



UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE CUENCA

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CUENCA

Comunidad Educativa al Servicio del Pueblo

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

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL.

**MODELACIÓN HIDROLÓGICA DE LA CUENCA DEL
RÍO SANTA BÁRBARA CONSIDERANDO
HERRAMIENTAS DE GEO INFORMACIÓN.**

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

AUTOR: STALIN MANUEL JIMÉNEZ SIGUENZA.

DIRECTOR: ING. SANTIAGO AURELIO OCHOA PhD.

CUENCA - ECUADOR

2021



UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CUENCA

Comunidad Educativa al Servicio del Pueblo

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

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL.

**MODELACIÓN HIDROLÓGICA DE LA CUENCA DEL
RÍO SANTA BÁRBARA CONSIDERANDO
HERRAMIENTAS DE GEO INFORMACIÓN.**

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

AUTOR: STALIN MANUEL JIMÉNEZ SIGUENZA.

DIRECTOR: ING. SANTIAGO AURELIO OCHOA PhD.

CUENCA - ECUADOR

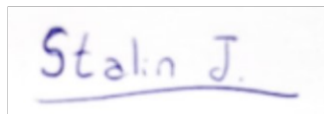
2021

DIOS, PATRIA, CULTURA Y DESARROLLO

Declaratoria de Autoría y Responsabilidad

Stalin Manuel Jiménez Sigüenza portador de la cédula de ciudadanía N° **0105266217**. Declaro ser el autor de la obra: “**Modelación hidrológica de la cuenca del río Santa Bárbara considerando herramientas de geo información**”, sobre la cual me hago responsable sobre las opiniones, versiones e ideas expresadas. Declaro que la misma ha sido elaborada respetando los derechos de propiedad intelectual de terceros y eximo a la Universidad Católica de Cuenca sobre cualquier reclamación que pudiera existir al respecto. Declaro finalmente que mi obra ha sido realizada cumpliendo con todos los requisitos legales, éticos y bioéticos de investigación, que la misma no incumple con la normativa nacional e internacional en el área específica de investigación, sobre la que también me responsabilizo y eximo a la Universidad Católica de Cuenca de toda reclamación al respecto.

Cuenca, **26 de noviembre de 2021**



F:

Stalin Manuel Jiménez Sigüenza.

0105266217

CERTIFICACIÓN DE TUTOR

De mi consideración

El presente trabajo de titulación **“MODELACIÓN HIDROLÓGICA DE LA CUENCA DEL RÍO SANTA BÁRBARA CONSIDERANDO HERRAMIENTAS DE GEO INFORMACIÓN”**, realizado por STALIN MANUEL JIMÉNEZ SIGUENZA, ha sido revisado y orientado durante su ejecución, por lo que certifico que el presente documento, fue desarrollado siguiendo los parámetros del método científico, se sujeta a las normas éticas de investigación, por lo que está expedito para su sustentación.

Cuenca, **25 de noviembre 2021**



Ing. Santiago Aurelio Ochoa PhD.

DEDICATORIA.

Dedico esta tesis especialmente a mi abuelito que se encuentra en el cielo, “Papito Samuel” quien fue un pilar muy importante para mi vida al igual que a mi mamá Mariana Sigüenza; mis hermanos Juan Pablo y Paola, gracias a ellos he podido llegar a ser la persona que soy y poder superar cada obstáculo que me puso la vida, a Moni, Javier y a los ñutos Martini y Joaquín.

Gracias a mis padres por haberme brindado la oportunidad de estudiar en esta institución tomando en cuenta todas las limitaciones económicas y pruebas que nos ha presentado la vida.

A una persona muy especial que llegó en una etapa muy difícil Eri ,además de docentes, amigos de la vida por ser un apoyo incondicional en todo momento,

Stalin J. Sigüenza.

AGRADECIMIENTOS

Mis más sinceros agradecimientos a mi tutor y quien me dio una oportunidad para desarrollar este trabajo de titulación Ing. Santiago Aurelio Ochoa PhD, por haberme tenido mucha paciencia, brindado su conocimiento y ser un guía en este trabajo.

Al Ing. Javier Fernández de Córdova y Carlos Matovelle por sus consejos y su experiencia, que también sirvieron de guía para poder desarrollar este trabajo de titulación.

Stalin J. Sigüenza.

Resumen.

El manejo de los Sistemas de Información Geográfica (SIG), en la actualidad han sufrido un desarrollo muy notable; permitiendo el geo proceso de información espacial que sirve para realizar modelamiento hidrológico e hidráulico, de igual forma el manejo de extensiones que hacen el proceso de esta información aún más sencilla y amigable con el usuario.

El trabajo de titulación comprendió la creación de un modelo hidrológico que representa la cuenca hidrográfica del río Santa Bárbara, esta se encuentra ubicada en las provincias del Azuay y Morona Santiago.

El desarrollo de la tesis consta de la recopilación de datos de la zona, un modelo digital de elevaciones para la delimitación de la cuenca, generación de la red hídrica y los parámetros geomorfológicos de la cuenca en estudio mediante el uso de sistemas de información geográfica y la extensión HEC-GeoHMS; para el modelo meteorológico la recopilación de datos de las estaciones presentes en la zona con su respectiva precipitación, corrección y la elaboración de hietogramas para periodos de retorno de: 2, 50 y 100 años para poder simular en el software HEC-HMS.

Finalmente, se realizó una modelación hidráulica en el casco urbano del cantón Gualaceo con el fin de tener un análisis con los resultados obtenidos de la modelación hidrológica.

Palabras clave: hidrología, hidráulica, precipitación, hietograma, hidrograma.

Abstract.

The use of Geographic Information Systems (GIS) has undergone remarkable development, allowing the geo-processing of spatial information used for hydrological and hydraulic modeling, as well as the use of extensions that make the processing of this information even simpler and more user-friendly. This thesis included the creation of a hydrological model that represents the hydrographic basin of the Santa Barbara River, located in the provinces of Azuay and Morona Santiago. The development of the thesis consists of data collection of the area, a digital elevation model for the delimitation of the basin, generation of the water network and the geomorphological parameters of the basin under study using geographic information systems and the HEC-GeoHMS extension; for the meteorological model, data collection of the stations present in the area with their respective precipitation, correction and the development of histograms for return periods of 2, 50 and 100 years to simulate in the HEC-HMS software. Lastly, hydraulic modeling was performed in the urban area of Gualaceo to have an analysis with the results obtained from the hydrological modeling.

Keywords: hydrology, hydraulics, precipitation, hydrological modeling, hydrograph, hydrograph.

INDICE.

1. GENERALIDADES.....	14
1.1. Introducción.....	14
1.2. Justificación y antecedentes.	15
1.3. Objetivos.	15
1.3.1. Objetivo General.	15
1.3.2. Objetivos Específicos.....	15
1.4. Metodología.	16
2. MARCO TEORICO.	17
2.1. Hidrología.	17
2.1.1. Precipitación.....	19
2.1.2. Hietograma mediante el método de bloques alternos.	22
2.1.3. Modelo Hidrológico.....	24
2.1.4. Modelo Hidrológico mediante el software HEC-HMS.	24
2.1.5. Métodos hidrológicos del software HEC-HMS	26
2.1.6. Ecuaciones aplicadas por el HEC-HMS.	28
2.2. Geomorfología de una cuenca hidrográfica.	30
2.3. Análisis estadístico.	32
2.3.1. Análisis estadístico de precipitación.....	32
2.3.2. Prueba de bondad para ajuste estadístico.	35
2.3.3. Análisis estadístico de resultados.....	35
2.4. Hidráulica.	37
2.4.1. Modelo Hidráulico.	37
2.4.2. Modelo Hidráulico mediante el software HEC-RAS.....	38
2.4.3. Metodología del software HEC-RAS	39
2.4.4. Ecuaciones aplicadas por el HEC-RAS.....	41
2.4.5. Calibración y validación de un modelo.....	43
3. CÁLCULO Y DESARROLLO.	44
3.1. Zona de Estudio.....	44
3.2. Características de la cuenca del río Santa Bárbara.	49
3.2.1. Resumen de caracterización de la cuenca.....	53
3.3. Modelación Hidrológica HEC-HMS.	54
3.3.1. Modelo de la cuenca hidrográfica (Basin Model).....	55
3.3.2. Modelo meteorológico (Meteorologic Model)	63
3.3.3. Precipitación e intensidad diaria para periodos de retorno.....	78
3.3.4. Curvas intensidad, duración y frecuencia (IDF).....	81
3.3.5. Hietogramas de diseño	85
3.4. Simulación del modelo hidrológico en el software HEC-HMS.	97
3.4.1. Análisis estadístico de resultados del HEC-HMS.....	98
3.4.2. Optimización y validación del modelo.....	100
3.5. Hidrograma para periodos de retorno.....	111
3.5.1. Periodo de retorno: 2 años.	111
3.5.2. Periodo de retorno: 50 años.	112

3.5.3.	Periodo de retorno: 100 años.	113
3.6.	Modelación Hidráulica HEC-RAS	113
3.6.1.	Datos geométricos.....	114
3.6.2.	Datos de flujo no permanente.	115
3.6.3.	Simulación de modelo hidráulico en el software HEC-RAS.	116
4.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.	123
4.1.	Conclusión principal.....	123
4.2.	Conclusiones destacadas.	123
4.3.	Síntesis de resultados.	124
4.4.	Recomendaciones.....	124
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.	126
	ANEXOS.....	130

INDICE DE FIGURAS.

Figura 1. Ciclo hidrológico.	17
Figura 2. Cuenca hidrográfica.	18
Figura 3. Polígonos de Thiessen.....	20
Figura 4. Método de Isoyetas.	21
Figura 5. Curvas IDF	22
Figura 6. Hietograma de diseño.....	23
Figura 7. Número de Orden.....	32
Figura 8. Línea de energía.....	42
Figura 9. Ubicación de la cuenca del río Santa Bárbara.	45
Figura 10. Modelo digital de elevaciones (MDE) de la cuenca del río Santa Bárbara.....	46
Figura 11. Metodología aplicada en el HEC-GeoHMS para la delimitación de la cuenca del río Santa Bárbara.....	47
Figura 12. Subcuencas de la cuenca del río Santa Bárbara.	48
Figura 13. Subcuencas de la cuenca del río Santa Bárbara desarrollado por ETAPA EP.....	49
Figura 14. Orden de la cuenca del río Santa Bárbara.	50
Figura 15. Curva hipsométrica de la cuenca del río Santa Bárbara.	52
Figura 16. Modelo de la cuenca del río Santa Bárbara en el Software HEC-HMS.....	54
Figura 17. Mapa de suelos, clasificación de acuerdo a la textura y litología.	56
Figura 18. Mapa de cobertura de suelos.	58
Figura 19. Ráster de curva número para la cuenca del río Santa Bárbara	60
Figura 20. Ubicación de las estaciones en la cuenca del río Santa Bárbara.....	63
Figura 21. Disponibilidad de datos de precipitación en el software R Studio.....	65
Figura 22. Diagrama de cajas en el software R Studio.	65
Figura 23. Reconstrucción de forma gráfica las lecturas de precipitación en el software R Studio.	66
Figura 24. Desarrollo en el software R Studio de las lecturas de precipitación.....	67
Figura 25. Representación de la distribución Gumbel en la estación Gualaceo DJ Pamar.	74
Figura 26. Representación de la distribución Gumbel en la estación Paute.....	75
Figura 27. Representación de la distribución Gumbel en la estación Sígsig.	76
Figura 28. Representación de la distribución Gumbel en la estación Jima.	77
Figura 29. Curvas IDF para la estación Gualaceo DJ Pamar.....	82
Figura 30. Curvas IDF para la estación Paute.	83
Figura 31. Curvas IDF para la estación Sígsig.....	84
Figura 32. Curvas IDF para la estación Jima.	85
Figura 33. Hietograma para la estación Gualaceo DJ Pamar en un periodo de retorno de 2 años.....	86
Figura 34. Hietograma para la estación Gualaceo DJ Pamar en un periodo de retorno de 50 años.....	87
Figura 35. Hietograma para la estación Gualaceo DJ Pamar en un periodo de retorno de 100 años.....	88
Figura 36. Hietograma para la estación Paute en un periodo de retorno de 2 años.....	89
Figura 37. Hietograma para la estación Paute en un periodo de retorno de 50 años.....	90

Figura 38. Hietograma para la estación Paute en un periodo de retorno de 100 años.....	91
Figura 39. Hietograma para la estación Sígsig en un periodo de retorno de 2 años.	92
Figura 40. Hietograma para la estación Sígsig en un periodo de retorno de 50 años.	93
Figura 41. Hietograma para la estación Sígsig en un periodo de retorno de 100 años	94
Figura 42. Hietograma para la estación Jima en un periodo de retorno de 2 años.....	95
Figura 43. Hietograma para la estación Jima en un periodo de retorno de 50 años.....	96
Figura 44. Hietograma para la estación Jima en un periodo de retorno de 100 años.....	97
Figura 45. Resultado de la primera simulación en HEC-HMS.....	98
Figura 46. Resultado de caudales por día en software HEC-HMS.....	99
Figura 47. Resultado con valores optimizados de la simulación en HEC-HMS.	101
Figura 48. Flujo observado vs flujo calculado en modelo calibrado para el año 2000.	102
Figura 49. Flujo observado vs flujo calculado en modelo calibrado para el año 2001.	102
Figura 50. Flujo observado vs flujo calculado en modelo calibrado para el año 2002.	103
Figura 51. Flujo observado vs flujo calculado en modelo calibrado para el año 2003.	104
Figura 52. Flujo observado vs flujo calculado en modelo calibrado para el año 2004.	104
Figura 53. Flujo observado vs flujo calculado en modelo calibrado para el año 2005.	105
Figura 54. Flujo observado vs flujo calculado en modelo calibrado para el año 2006.	106
Figura 55. Flujo observado vs flujo calculado en modelo calibrado para el año 2007.	106
Figura 56. Flujo observado vs flujo calculado en modelo calibrado para el año 2008.	107
Figura 57. Flujo observado vs flujo calculado en modelo calibrado para el año 2009.	108
Figura 58. Flujo observado vs flujo calculado en modelo calibrado para el año 2010.	108
Figura 59. Flujo observado vs flujo calculado en modelo calibrado para el año 2011.	109
Figura 60. Flujo observado vs flujo calculado en modelo calibrado para el año 2012.	110
Figura 61. Flujo observado vs flujo calculado en modelo calibrado para el año 2013.	110
Figura 62. Flujo observado vs flujo calculado en modelo calibrado para el año 2015.	111
Figura 63. Hidrograma para periodo de retorno de 2 años.	112
Figura 64. Hidrograma para periodo de retorno de 50 años.	112
Figura 65. Hidrograma para periodo de retorno de 100 años.	113
Figura 66. Tramo de río Santa Bárbara (2500 metros) en el cantón Gualaceo en HEC-RAS.	114
Figura 67. Secciones transversales del río Santa Bárbara a la altura del cantón Gualaceo referenciado a las secciones de la Fig.65.....	115
Figura 68. Datos de flujo no permanente en HEC-RAS.....	116
Figura 69. Hidrograma para periodo de retorno 2 años en HEC-RAS.	116
Figura 70. Zona de inundación para un periodo de retorno de 2 años.....	117
Figura 71. Velocidad para un periodo de retorno de 2 años.	117
Figura 72. Márgenes de río propensos a inundación en un periodo de retorno de 2 años.	118
Figura 73. Hidrograma para periodo de retorno 50 años en HEC-RAS.	119
Figura 74. Zona de inundación para un periodo de retorno de 50 años.....	119
Figura 75. Velocidad para un periodo de retorno de 50 años.	120
Figura 76. Inundación en el cantón Gualaceo.	120
Figura 77. Hidrograma para periodo de retorno 100 años en HEC-RAS.	121
Figura 78. Zona de inundación para un periodo de retorno de 100 años.	121
Figura 79. Velocidad para un periodo de retorno de 100 años.	122
Figura 80. Afecciones del río Santa Bárbara.....	122

INDICE DE TABLAS.

Tabla 1:	Métodos hidrológicos utilizados.....	26
Tabla 2:	Valores de coeficientes para método de Gumbel.	34
Tabla 3:	Valores para el coeficiente de correlación.	37
Tabla 4:	Tipo de Flujo según número de Reynolds.....	40
Tabla 5:	Tipo de Flujo según número de Froude.....	41
Tabla 6:	Coeficiente de Manning.....	41
Tabla 7:	Ubicación de las subcuencas de la cuenca del río Santa Bárbara.	49
Tabla 8:	Características de las subcuencas de la cuenca del río Santa Bárbara.....	50
Tabla 9:	Representación de cota promedio vs % acumulado del área de la cuenca del río Santa Bárbara.	51
Tabla 10:	Elevación media de la cuenca del río Santa Bárbara.	52
Tabla 11:	Características de la cuenca del río Santa Bárbara.....	53
Tabla 12:	Simbología en el modelo de la cuenca del río Santa Bárbara.	55
Tabla 13:	Descripción de los suelos con su grupo hidrológico.	56
Tabla 14:	Valores de grupos hidrológicos para los diferentes usos de suelo.	59
Tabla 15:	Curva número para las subcuencas del río Santa Bárbara.	60
Tabla 16:	Tiempo de concentración por el método de Kirpich.	61
Tabla 17:	Tiempo de concentración por el método SCS.	61
Tabla 18:	Tiempo de retardo por el método Kirpich.	62
Tabla 19:	Tiempo de retardo por el método SCS.	62
Tabla 20:	Estaciones que se encuentran en la cuenca del río Santa Bárbara.	64
Tabla 21:	Porcentaje de áreas con el método de polígonos de Thiessen.	64
Tabla 22:	Precipitación máxima 24 horas en la estación Gualaceo DJ Pamar (mm).....	67
Tabla 23:	Precipitación máxima 24 horas en la estación Paute (mm).	68
Tabla 24:	Precipitación máxima 24 horas en la estación Sígsig (mm).....	68
Tabla 25:	Precipitación máxima 24 horas en la estación Jima (mm).	69
Tabla 26:	Precipitación máxima corregida en la estación Gualaceo DJ Pamar.	69
Tabla 27:	Precipitación máxima corregida en la estación Paute.....	70
Tabla 28:	Precipitación máxima corregida en la estación Sígsig.	70
Tabla 29:	Precipitación máxima corregida en la estación Jima.	71
Tabla 30:	Distribución de probabilidad en la estación Gualaceo DJ Pamar.	72
Tabla 31:	Distribución de probabilidad en la estación Paute.....	72
Tabla 32:	Distribución de probabilidad en la estación Sígsig.	72
Tabla 33:	Distribución de probabilidad en la estación Jima.	73
Tabla 34:	Prueba de bondad de la estación Gualaceo DJ Pamar.	74
Tabla 35:	Prueba de bondad de la estación Paute.	75
Tabla 36:	Prueba de bondad de la estación Sígsig.	76
Tabla 37:	Prueba de bondad de la estación Jima.	77
Tabla 38:	Datos de entrada para la distribución de Gumbel en Gualaceo DJ Pamar.....	78
Tabla 39:	Cálculo de intensidad diaria para periodos de retorno en la estación Gualaceo DJ Pamar	78
Tabla 40:	Datos de entrada para la distribución de Gumbel en Paute.	79
Tabla 41:	Cálculo de intensidad diaria para periodos de retorno en la estación Paute. ..	79
Tabla 42:	Datos de entrada para la distribución de Gumbel en Sígsig.....	79
Tabla 43:	Cálculo de intensidad diaria para periodos de retorno en la estación Sígsig....	79
Tabla 44:	Datos de entrada para la distribución de Gumbel en Jima.	80

Tabla 45:	Cálculo de intensidad diaria para periodos de retorno en la estación Jima.	80
Tabla 46:	Intensidad para la estación Gualaceo DJ Pamar.	81
Tabla 47:	Intensidad para la estación Paute.	82
Tabla 48:	Intensidad para la estación Sígsig.	83
Tabla 49:	Intensidad para la estación Jima.	84
Tabla 50:	Hietograma para la estación Gualaceo DJ Pamar en un periodo de retorno de 2 años, duración de tormenta 9 horas.	85
Tabla 51:	Hietograma para la estación Gualaceo DJ Pamar en un periodo de retorno de 50 años, duración de tormenta 9 horas.	86
Tabla 52:	Hietograma para la estación Gualaceo DJ Pamar en un periodo de retorno de 100 años, duración de tormenta 9 horas.	87
Tabla 53:	Hietograma para la estación Paute en un periodo de retorno de 2 años, duración de tormenta 9 horas.	88
Tabla 54:	Hietograma para la estación Paute en un periodo de retorno de 50 años, duración de tormenta 9 horas.	89
Tabla 55:	Hietograma para la estación Paute en un periodo de retorno de 100 años, duración de tormenta 9 horas.	90
Tabla 56:	Hietograma para la estación Sígsig en un periodo de retorno de 2 años, duración de tormenta 9 horas.	91
Tabla 57:	Hietograma para la estación Sígsig en un periodo de retorno de 50 años, duración de tormenta 9 horas.	92
Tabla 58:	Hietograma para la estación Sígsig en un periodo de retorno de 100 años, duración de tormenta 9 horas.	93
Tabla 59:	Hietograma para la estación Jima en un periodo de retorno de 2 años, duración de tormenta 9 horas.	94
Tabla 60:	Hietograma para la estación Jima en un periodo de retorno de 50 años, duración de tormenta 9 horas.	95
Tabla 61:	Hietograma para la estación Jima en un periodo de retorno de 100 años, duración de tormenta 9 horas.	96
Tabla 62:	Metodología aplicada en el HEC-HMS.	97
Tabla 63:	Análisis estadístico de resultados obtenidos.	99
Tabla 64:	Valores optimizados para realizar la simulación.	101
Tabla 65:	Análisis estadístico para el año 2000.	102
Tabla 66:	Análisis estadístico para el año 2001.	103
Tabla 67:	Análisis estadístico para el año 2002.	103
Tabla 68:	Análisis estadístico para el año 2003.	104
Tabla 69:	Análisis estadístico para el año 2004.	105
Tabla 70:	Análisis estadístico para el año 2005.	105
Tabla 71:	Análisis estadístico para el año 2006.	106
Tabla 72:	Análisis estadístico para el año 2007.	107
Tabla 73:	Análisis estadístico para el año 2008.	107
Tabla 74:	Análisis estadístico para el año 2009.	108
Tabla 75:	Análisis estadístico para el año 2010.	108
Tabla 76:	Análisis estadístico para el año 2011.	109
Tabla 77:	Análisis estadístico para el año 2012.	110
Tabla 78:	Análisis estadístico para el año 2013.	111
Tabla 79:	Análisis estadístico para el año 2015.	111

1. GENERALIDADES

1.1.Introducción.

El presente documento analiza la modelación hidrológica en la cuenca del río Santa Bárbara, esta se encuentra ubicada entre las provincias de Azuay y Morona Santiago, se encarga de drenar la precipitación de cuencas de aporte que son parte de los cantones Sígsig, Chordeleg y Gualaceo, su superficie bordea los 951.91 km² AJ Río Paute y altitudinalmente está entre los 2000 y los 4000 m s.n.m. (Guapasaca & Mosquera, 2011).

Una modelación hidrológica es la representación del proceso precipitación – escorrentía, la cual se encarga de obtener hidrogramas de un río en cierto punto de estudio, con el fin de determinar caudales e información hidrológica, este estudio es fundamental para la toma de decisiones en una futura planificación de diseño y construcción de obras hidráulicas o para el desarrollo en asentamientos urbanos u ordenamiento territorial (Cabrera, 2012).

Mediante el software de acceso libre denominado HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center – Hydrologic Modeling System) por sus siglas en inglés, desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de Estados Unidos de Norteamérica, se puede realizar la simulación de una cuenca hidrológica de manera que se maneje los datos físicos de la misma con una interfaz muy amigable para el usuario; de igual forma se empleará sistemas de información geográfica que será de ayuda para administrar y procesar la información georreferenciada perteneciente a la zona.

La confiabilidad de los resultados en un modelo hidrológico depende de las variables de entrada, entre otras de precipitación información que es recopilada a través de las diferentes instituciones encargadas de su recolección y manejo en la zona con el fin de ser analizados, calibrados y validados en el transcurso del estudio.

En la cuenca hidrográfica en estudio se puede observar cambio en el uso de suelo, características propias del desordenado desarrollo social y económico del ser humano debido al incremento de grandes extensiones de cultivos y sobre todo de pasto creando una tendencia a la degradación de la misma y del recurso hídrico (Guapasaca & Mosquera, 2011), siendo necesario este estudio, ya que con esta información se podría tratar de mantener una correcta gestión en los recursos hídricos para no dañar los ecosistemas de la zona, que son muy ricos y sensibles.

1.2. Justificación y antecedentes.

El desarrollo de la humanidad en búsqueda de mejorar su estilo de vida, ha generado diferentes actividades como construcciones, alteración del uso de suelo, flora y fauna nativa; generando una variación en los diferentes espacios físicos los cuales al sufrir esta alteración en su forma original han interferido en el funcionamiento hidrológico de la cuenca hidrográfica respecto a su capacidad de escurrimiento (Lema & Plaza, 2009).

La aplicación de métodos numéricos brinda en la actualidad un pronóstico de cómo va a ser el comportamiento hidrológico de la cuenca hidrográfica en un futuro, conjuntamente con datos de precipitación y caudal registrados en la zona; se busca analizar el estudio de la cuenca hidrológica del río Santa Bárbara de la forma más real posible.

Existen estudios de la cuenca hidrográfica del río Paute de la cual es una subcuenca la del río Santa Bárbara, estos estudios se dan principalmente porque la cuenca del río Paute se encarga de alimentar a los embalses de las presas de Mazar y de Amaluza que generan el 25% de la energía eléctrica del país. (ARCONEL, 2014).

De igual forma existe un estudio sobre la inundación que produce el río Santa Bárbara (Orellana, Timbe & Pinos, 2017); por ser un riesgo natural que afecta a las ciudades andinas, en este estudio se realiza el modelo hidráulico con ayuda del software HEC-RAS.

1.3. Objetivos.

1.3.1. Objetivo General.

Representar el fenómeno precipitación – escurrimiento en la cuenca hidrográfica del río Santa Bárbara a través de un modelo hidrológico; modelo que será generado mediante herramientas de geo información y software HEC-HMS.

1.3.2. Objetivos Específicos.

- Recopilar y procesar la información hidrológica, meteorológica y geográfica disponible para la simulación de la cuenca del río Santa Bárbara mediante herramientas de geo información.

- Implementar un modelo hidrológico calibrado y validado en la cuenca del río Santa Bárbara para caracterizar el escurrimiento superficial de sus tributarios utilizando las herramientas computacionales HEC-HMS y HEC-GeoHMS.
- Obtener los hidrogramas de crecida para diferentes periodos de retorno de la cuenca de estudio para implementar un modelo hidráulico utilizando las herramientas computacionales HEC-RAS y HEC-GeoRAS.
- Evaluar resultados de calado y velocidad en la modelación hidráulica, información que permitirá elaborar mapas identificando zonas de inundación que se verán afectadas por crecientes.

1.4. Metodología.

El presente trabajo de titulación se encuentra desarrollado en cuatro capítulos; los cuales presentan la siguiente estructura:

El primer capítulo presenta *generalidades* del trabajo, es decir describe un poco de que se va a tratar y se trazan los objetivos que se buscan obtener cuando se finalice el estudio, de igual forma se describe brevemente estudios previos en la zona de la cuenca hidrográfica del río Santa Bárbara.

En el segundo capítulo se plantea el *marco teórico* y es donde se va explicando de forma detallada cada uno de los conceptos que son utilizados para la elaboración de la modelación hidrológica y sus componentes, además de una explicación breve del manejo del software HEC-HMS y HEC-RAS.

El tercer capítulo explica los *cálculos y desarrollo*, donde se encuentra cada uno de los componentes que son necesarios para el modelo hidrológico, simular y realizar el proceso de validación de los resultados; en este capítulo se obtienen las tormentas de diseño y como resultado los hidrogramas de creciente del río en estudio; finalmente, se realiza una modelación hidráulica para conseguir calados de inundación para los diferentes periodos de retorno.

Finalmente, en el cuarto capítulo se desarrollan las *conclusiones y recomendaciones* del modelo hidrológico e hidráulico de la zona de estudio elegida.

2. MARCO TEORICO.

Este capítulo comprende la explicación detallada de las variables de entrada que se van a calcular y que son indispensables para la elaboración de un modelo hidrológico e hidráulico, además se ilustra la metodología y las diferentes fórmulas que el software aplica para los cálculos; además conocer los conceptos teóricos y su procedencia para de esta manera poder relacionarlos los cálculos en la práctica.

2.1. Hidrología.

Según el Consejo Federal de Ciencia y Tecnología de Estados Unidos, se define la hidrología como la ciencia que estudia el agua en la Tierra, su ocurrencia, circulación y distribución en la superficie terrestre, sus respectivas propiedades y las diferentes relaciones que esta tiene con el medio ambiente incluyendo los seres vivos. (U.S. Federal Council for Science and Technology, 1962) (Maximo, 2002).

De ahí en relación al ámbito de la ingeniería, la hidrología sirve para analizar la circulación del agua a través del ciclo hidrológico, ayuda en estudios utilizados para analizar el diseño y la operación de diferentes proyectos en donde se necesita un control o el aprovechamiento del recurso hídrico. (Orozco, 2018).

El ciclo hidrológico es la base fundamental para el estudio de la hidrología, al igual que todo ciclo se caracteriza por no poseer un principio ni un fin, es decir que se puede describir desde cualquier punto del mismo.

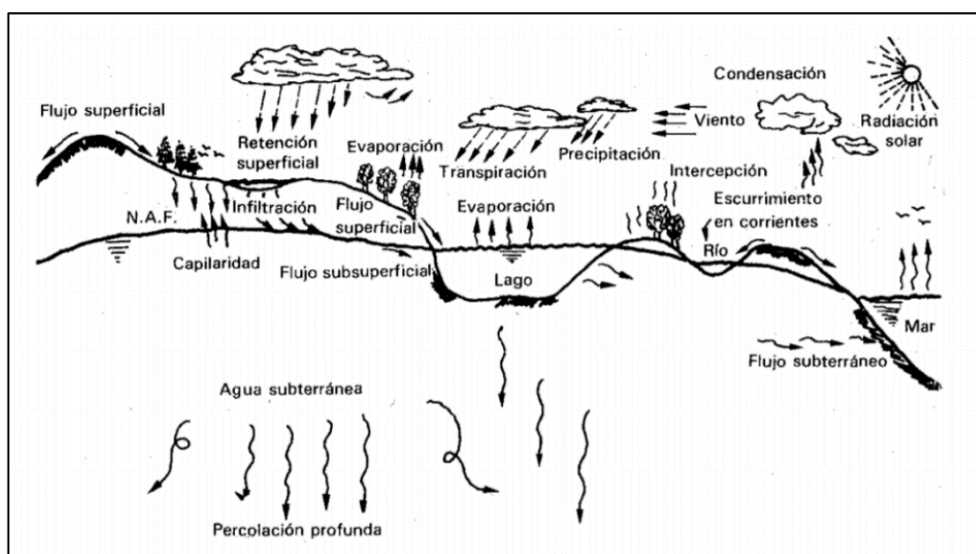


Figura 1. Ciclo hidrológico.
Fuente. (Mijares, pág. 17, 1999)

El elemento principal de este ciclo es el agua, este se encuentra sobre la superficie terrestre y procede a evaporarse mediante la radiación solar y el viento; el vapor de agua que se genera, se eleva y se transporta a la atmósfera en forma de nubes hasta que se condensa y regresa a la tierra cuando se produce la precipitación; mientras se produce este retorno el agua es interceptada por plantas o construcciones, luego recorre hasta las corrientes o se infiltra para percolar profundamente y recargar el agua subterránea que emerge en manantiales mientras que otro porcentaje llega hasta los océanos y cuerpos de agua como presas y lagos. El agua absorbida por las plantas es transpirada casi en su totalidad y de igual forma regresa hacia la atmósfera o fluye hacia la superficie de la tierra como se observa en la figura 1. (Mijares, 1999)

Una cuenca hidrográfica es el área de terreno delimitado geográficamente a través una línea divisoria topográfica, presenta entradas (lluvia) y salidas (caudal, evapotranspiración, flujo subsuperficial y percolación) (Fattorelli & Fernández, 2007); se caracteriza por drenar el agua de todos los afluentes presentes en el terreno en un punto en común o desembocadura identificable.

Además, considera todas las interacciones que pueden influir en la cantidad, calidad y curso del recurso hídrico.

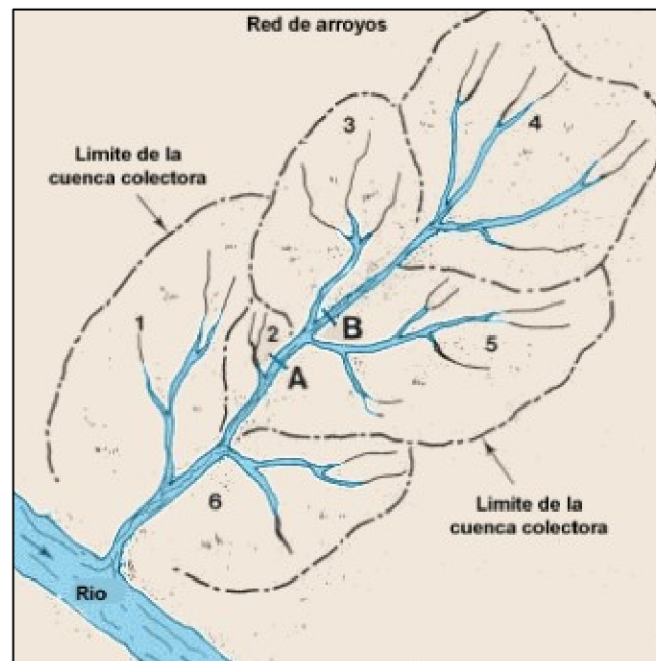


Figura 2. Cuenca hidrográfica.
Fuente. (FAO, 1999)

Como se observa en la figura 2, en una cuenca hidrográfica circula agua desde la parte alta hacia una corriente principal o desembocadura la cual se encuentra en la parte baja de la imagen.

2.1.1. Precipitación.

Según Máximo Villón, la precipitación es toda forma de humedad que, originándose en las nubes, llega a la superficie del suelo de diferentes formas: granizadas, lluvias, garuas y nevadas; relacionándolo a la hidrología esta es la fuente primaria del agua de la superficie terrestre y sus respectivos estudios y mediciones ayudan a la partida de los estudios para su uso y su conservación. (Máximo, 2002).

El registro de datos de lluvia puntual es tomado por pluviómetros o instrumentos implementados por la institución encargada, estos toman información en el punto exacto en donde se encuentran ubicados, aunque se conoce que la precipitación que cae en cierta zona específica difiere de la precipitación que se da alrededor o de sitios cercanos, razón por la cual se utiliza diferentes métodos para obtener una precipitación media en donde se proceda a realizar el estudio. (Máximo, 2002).

- **Polígonos de Thiessen**

Es un método que permite determinar la precipitación promedio sobre un área, esto es representado por pesos relativos de los pluviómetros los cuales son determinados por las correspondientes áreas de aplicación de la red de polígonos que se forma, estos polígonos son formados por bisectores perpendiculares a las líneas que unen pluviómetros adyacentes. (Chow, 1964)

La formulación que utiliza este método es.

$$P_{med} = \frac{1}{A_t} \sum_{i=1}^n A_i P_i \quad (2.1)$$

Donde:

P_{med} : precipitación media

A_t : área total de la cuenca hidrográfica.

A_i : área de influencia parcial del polígono de Thiessen correspondiente a la estación.

P_i : precipitación de la estación.

n : número de estaciones.

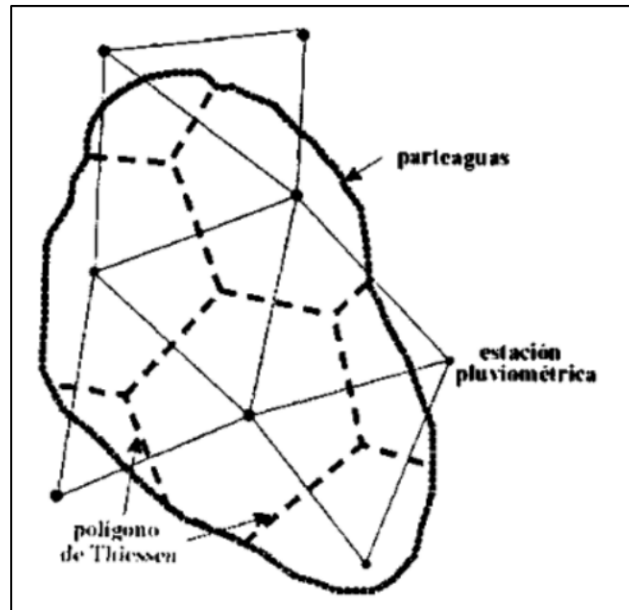


Figura 3. Polígonos de Thiessen.
Fuente. (Villon, pág. 79, 2002)

La elaboración de los polígonos de Thiessen como se muestra en la figura 3 se da posterior al trazo de las mediatrices, las cuales se estiran hasta la intersección con las mediatrices continuas formando así las diferentes áreas de influencia correspondientes a cada estación.

- **Isoyetas.**

Método conformado por curvas que unen puntos de precipitación similar registrada en los pluviómetros ubicados dentro y fuera de la cuenca, para el trazo de las isoyetas se interpola las alturas de precipitación y se obtiene gráficas similares a un trazado de curvas de nivel. (Chow, 1964)

La formulación que utiliza este método es.

$$P_{med} = \frac{1}{A_t} \sum_{i=1}^n \frac{P_{i-1} + P_i}{2} * A_i \quad (2.2)$$

Donde:

- P_{med}** : precipitación media
- A_t** : área total de la cuenca hidrográfica.
- A_i** : área comprendida entre las isoyetas P_{i-1} y P_i .
- P_i** : altura de precipitación de las isoyetas.
- n** : número de áreas parciales.

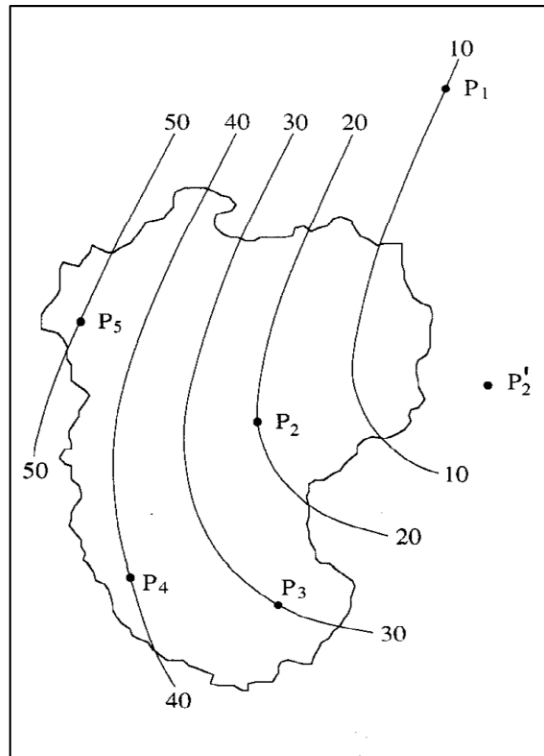


Figura 4. Método de Isoyetas.
Fuente. (Chow, pág. 82, 1964)

La ilustración anterior representa una cuenca hidrográfica con los valores de precipitación interpolados en base a los datos de precipitación que se tiene en cada estación.

- **Periodo de retorno.**

Es la frecuencia o el intervalo de recurrencia con la que se puede presentar un evento determinado de menor o mayor intensidad; este parámetro es muy importante para el diseño de obras hidráulicas o para estudios hidrológicos; para estudios los periodos de retorno varían desde los 2 hasta los 500 años, dependiendo de la información que se tenga de la precipitación y de la importancia en la obra a realizar (Guachamín, García, Arteaga, & Cadena, 2015).

Para describirlo en términos numéricos y de probabilidad se puede expresar de la siguiente manera para un ejemplo en 500 años:

$$p = \frac{1}{500} = 0.002 = 0.2\%$$

$$1 - p = 1 - 0.2 = 0.998 = 99.8\%$$

Es decir, la probabilidad de que suceda una precipitación superior en el año determinado es de 0.2%, mientras que esta precipitación no suceda es la de 99.8%, que es el resultado complementario.

- **Curvas intensidad, duración y frecuencia. (IDF).**

Son curvas que se generan de la unión de puntos representativos de la intensidad media para intervalos de diferente duración, correspondientes a un mismo periodo de retorno. (Témez, 1978); esta gráfica considera elementos como la intensidad de precipitación, frecuencia o la probabilidad de excedencia para un evento.

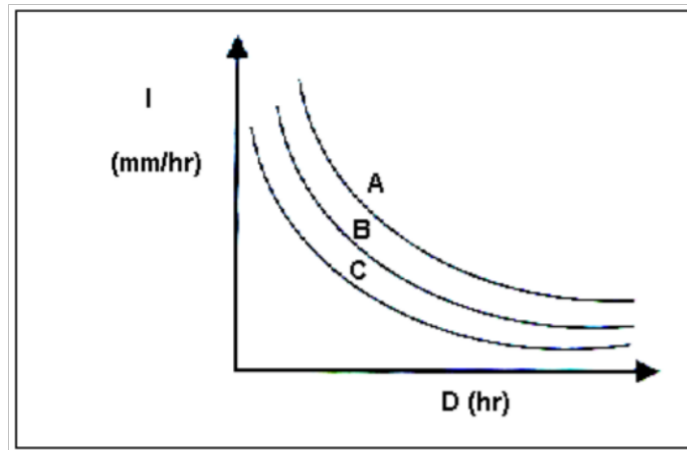


Figura 5. Curvas IDF
Fuente. (Pizarro, pág. 4, 2003)

La figura 5 muestra la asociación entre la intensidad y la duración de una precipitación tomando en cuenta la frecuencia de ocurrencia de ese evento.

2.1.2. Hietograma mediante el método de bloques alternos.

Los hietogramas son gráficos en los cuales se expresa la precipitación en intervalos de tiempo, estos son característicos y representan a una determinada tormenta; además representan la intensidad de lluvia durante todo su tiempo de duración; su uso radica en el manejo de software, los cuales requieren conocer como sucede o evoluciona la lluvia durante todo su tiempo de duración. Existen una gran variedad de metodologías para poder obtener los hietogramas de diseño, sin embargo, uno de los más usados es la metodología de los bloques alternos. (Chow,1964)

Esta metodología sirve para desarrollar el hietograma de diseño a través de curvas IDF, método muy utilizado por la simpleza de su desarrollo; el hietograma de diseño contiene un número de intervalos de tiempo en donde se tiene especificada la profundidad de la precipitación que ocurren en estos intervalos. (Chow,1964)

$$T_d = n * \Delta t \tag{2.3}$$

Donde:

n : intervalos de tiempo sucesivos.

Δt : duración total.

La profundidad de precipitación se encuentra con el producto de la intensidad y duración, se toma diferencias entre los valores sucesivos de profundidad de precipitación y se encuentra la cantidad que debe añadirse por cada unidad adicional de tiempo Δt , estos bloques se ordenan en secuencia temporal de modo que la la intensidad máxima ocurra en el centro de la duración requerida T_d . (Chow,1964)

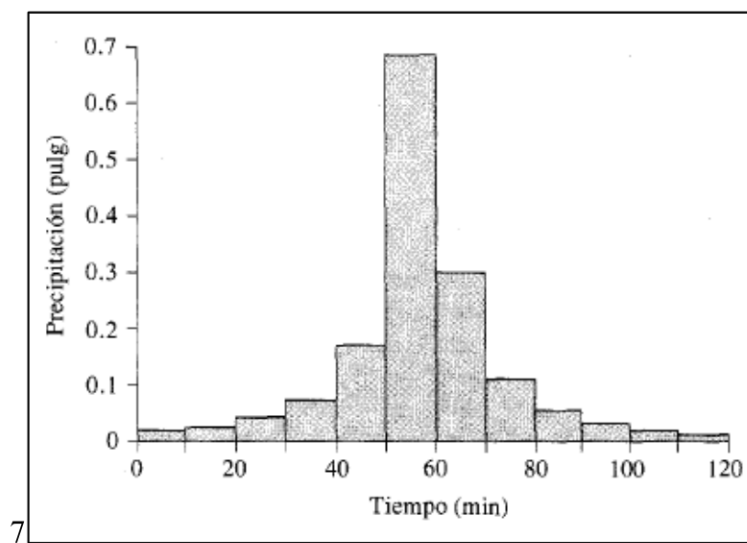


Figura 6. Hietograma de diseño.
Fuente. (Chow, pág. 479, 1964)

La metodología para el manejo de bloques alternos hace uso de las curvas IDF, teniendo en cuenta que para la representación del hietograma de diseño se necesita el tiempo de concentración de la zona en estudio; los pasos para esta medotología se pueden describir como:

- Dividir en intervalos semejantes el tiempo de concentración de la cuenca hidrográfica.
- Obtener la curva IDF según el tiempo de retorno en estudio; a partir de esta obtener la intensidad de precipitación respecto a cada intervalo de tiempo hasta obtener la duración total de precipitación.
- Obtener la precipitación ocurrida en cada intervalo de tiempo mediante el producto de intensidad y duración en cada intervalo; las unidades de este cálculo es de horas, ya que la intensidad debe ser expresada en mm/hr.

- Finalmente, se calcula la diferencia entre los valores consecutivos; se procede a ordenarlos de tal forma que el valor mayor se encontrará en la parte central del hietograma de diseño. (Chow,1964)

2.1.3. Modelo Hidrológico.

Un modelo hidrológico es el proceso utilizado para la representación y comprensión de la vida real del fenómeno precipitación-escorrentía en una cuenca hidrográfica con el fin de obtener resultados y conocer su comportamiento fruto de la precipitación. Se utiliza información propia de la zona para generar un modelo.

Se podría considerar a la modelación hidrológica también como la representación de la cuenca como sistema a modelar y la estimación de la escorrentía producida en ella en su flujo de salida (hidrograma), puede relacionarse como un proceso agrupado en tres fases: precipitación e información física (entradas), procesos intermedios producidos en el sistema hidrológico y producción de caudal (salidas) (Aguilar & Diaz, 2016).

En el trabajo realizado por (Eterovic, 2008) se plantea una clasificación de los modelos hidrológicos con ayuda de Ponce en 1989 y se tiene:

- **Modelo físico.**

Representación física simplificada del proceso lluvia – escurrimiento en un prototipo con cada uno de los elementos del ciclo hidrológico.

- **Modelo matemático.**

Elaboración de prototipo mediante el uso de matemática en donde se preserva propiedades de este; el uso de estos modelos es más económicos, flexible y en la actualidad existe un gran número de software desarrollados que pueden ser utilizados ajustando a los requerimientos del usuario para este tipo de representaciones.

2.1.4. Modelo Hidrológico mediante el software HEC-HMS.

El software HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center – Hydrologic Modeling System) por sus siglas en inglés, fue desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de Estados

Unidos de Norteamérica con el fin de simular procesos de precipitación-escorrentía; según su tipología es considerado un modelo de evento, lineal y semi distribuido; estas características son clasificaciones de los modelos matemáticos (Fernández de Córdova, 2019).

Si lo analizamos por una extensión temporal, es de evento porque obtiene datos de salida a través de un solo evento de precipitación lo cual puede tener un periodo de duración de varias horas o de días, por el manejo de ecuaciones es lineal ya que estos modelos utilizan ecuaciones para poder representar de una forma más fácil su aplicación, con la desventaja de que este proceso les hace perder exactitud y finalmente por su representación espacial es semi distribuido porque se da la división de la cuenca hidrográfica principal en pequeñas subcuencas en donde se pueden ingresar parámetros para cada una de ellas (Fernández de Córdova, 2019).

La finalidad de trabajar en un modelo hidrológico es poder cuantificar los caudales en una sección específica del río a través de un hidrograma tomando en cuenta los diferentes aspectos que pueden influir en la superficie.

El software HEC HMS se maneja mediante cuatro componentes básicos mediante los cuales se definen los datos de entrada y la estructura de la cuenca hidrográfica que se desea representar:

- **Datos de entrada.**

El software requiere información de entrada, los mismos que son obligatorios para cada uno de los componentes que el modelado requiere o necesita para poder realizar su ejecución; estos datos describen de una forma más clara las características de la cuenca hidrográfica en la que se va a trabajar.

- **Modelo de la cuenca.**

Representa las características físicas de la zona de estudio, el programador representa el modelo hidrográfico de la zona de estudio y lo relaciona con diferentes elementos hidrológicos tratando de simular condiciones reales; para los elementos hidrológicos se utiliza un modelo matemático con el fin de poder describir los procesos físicos que se realizan en la cuenca.

- **Modelo de precipitación.**

Componente que calcula la precipitación que pertenece a la zona de estudio, el software permite el manejo de información específica o de forma distribuida a través de la zona de estudio,

manejo que resulta muy beneficioso ya que al ser un modelo semi distribuido permite el manejo de información independiente para zonas diferentes y no una sola información generalizada.

Para el funcionamiento del componente se requiere de un hietograma de diseño, calculado con los diferentes métodos existentes.

- **Módulo de control.**

Encargado del control en los periodos de duración de las simulaciones; este apartado especifica la fecha de inicio, fecha de culminación e intervalo de tiempo para el estudio que se está realizando.

2.1.5. Métodos hidrológicos del software HEC-HMS

Los estudios hidrológicos manejan métodos que permiten realizar el proceso de cálculo simulados en la cuenca a estudiar (transformación lluvia - caudal, pérdida y flujo base), el software HEC-HMS maneja diferentes métodos para cada una de las fases de cálculo. (Arias, 2015).

TABLA 1: Métodos hidrológicos utilizados.
Fuente: (Arias, 2015)

Pérdidas	Transformación lluvia neta en escurrimiento	Flujo Base	Tránsito avenida por el cauce
Método Exponencial	Onda Cinemática	Recesión restringida	Modelo Lag
Número de curva CN SCS	HU SCS	Constante Mensual	Plus Modificado
Consideración de la humedad del suelo (SMA)	HU Snyder	Depósito Lineal	Muskingum
DC por celdas	HU especificado por el usuario		Muskingum-Cunge
CN SCS por celdas	Hidrograma en S del usuario		Onda Cinemática
SMA por celdas	Hidrograma Unitario HU de Clark		

- **Metodología: número de curva SCS.**

Método empírico generado por Soil Conservation Service (SCS) perteneciente al departamento de agricultura de Estados Unidos considerado como un método práctico, fácil de aplicar y validado para el uso de cualquier cuenca hidrográfica ha sido considerado como uno de los más comunes en estos estudios; se encarga de estimar la precipitación en exceso que se transforma posteriormente en escurrimiento superficial; esta metodología toma en cuenta las siguientes variables: (Arias, 2015)

- **Número de curva (NC).**

Es un parámetro hidrológico, se calcula a partir de características propias de la cuenca hidrográfica como son: cobertura vegetal, densidad, tipo de suelo y grupo hidrológico; este parámetro se encarga de caracterizar el potencial de escorrentía que tiene dicha zona de estudio.

Respecto a la escorrentía, se puede decir que es el agua presente en las fuentes superficiales de la cuenca hidrográfica; esta agua requiere una atención muy importante para poder conservarla y de esta manera evitar la degradación de los recursos naturales, sus valores oscilan entre 0 y 100. (Carvajal & Fernández, 2017).

- **Tiempo de concentración. (tc)**

El tiempo de concentración es el tiempo que tarda una gota de lluvia al caer en la parte más alejada de la cuenca hasta escurrir superficialmente en la salida o punto de cierre, es decir “*el tiempo a partir del cual toda la cuenca contribuye al caudal en el punto de salida de la cuenca*”. (Hotchkiss & McCallum, 1995).

Existe diferentes metodologías para calcular el tiempo de concentración de una cuenca hidrográfica, y de acuerdo al uso de las variables y los coeficientes sus resultados tienden a tener una alta variación; entre los autores de estas metodologías tenemos: Temez, Kirpich, Passini, Morgali y SCS, etc. Para realizar la modelación depende mucho del criterio del modelador para aplicar el tiempo de concentración adecuado.

La fórmula de aplicación de Kirpich (Aparicio, 1992) es:

$$tc = 0.000325 * \frac{L^{0.77}}{S^{0.385}} \quad (2.4)$$

Donde:

tc: tiempo de concentración en horas.

L: longitud de cauce en metros.

S: pendiente del cauce principal en mts/mts.

De igual forma existe la ecuación desarrollada por el SCS en 1973 para el método que lleva su mismo nombre, la ecuación es:

$$tc = \frac{0.0136 * (\frac{1000}{CN} - 9)^{0.7}}{S^{0.5}} \quad (2.5)$$

Donde:

CN: número de curva.

L: longitud de cauce en metros.

S: pendiente de la cuenca.

- **Tiempo de retardo (lag time)**

El tiempo de retardo (*lag time*) se asume como el 60% del tiempo de concentración (Fernández de Córdoba, 2019), según el manual de uso de HEC-HMS el tiempo de retardo es el que transcurre desde el centro de gravedad del hietograma de precipitaciones al centro de gravedad del hidrograma de caudales. (Sánchez, 2015)

$$\text{lag time} = 0.6 * tc \quad (2.6)$$

Donde:

lag time: tiempo de retardo en minutos.

tc: tiempo de concentración en minutos.

2.1.6. Ecuaciones aplicadas por el HEC-HMS.

De acuerdo al manejo de la metodología correspondiente a la cuenca hidrográfica, el software aplica ecuaciones las mismas que permiten representar las condiciones reales de la simulación correspondiente.

- **Precipitación neta.**

Para el cálculo de la precipitación neta se necesita de una abstracción inicial y el número de curva de la zona en estudio: (Nanía, 2007).

$$Po = 0.2 * \left(\frac{25400}{CN} - 254 \right) \quad (2.7)$$

Donde:

Po: Abstracción inicial.

CN: Curva número.

- **Precipitación efectiva.**

El cálculo de la precipitación efectiva para cada subcuenca se ayuda con la metodología de los polígonos de Thiessen, razón por la cual la precipitación se distribuye de acuerdo al peso que tiene cada uno de los pluviómetros en la zona de estudio. (López J, 2012).

$$Psb(i) = \frac{\sum Pem(i,j)w(j)}{\sum w(j)} \quad (2.8)$$

Donde:

Psb(i,j): Precipitación media uniforme sobre subcuena en el intervalo i, j.

Pem(i,j): Lectura de precipitación en el intervalo i y estación j.

w(j): Peso de la estación correspondiente a la zona de estudio.

- **Caudal pico.**

El cálculo del caudal punta se encuentra mediante la separación de la escorrentía de la lluvia neta, utilizando la metodología SCS correspondiente a la del hidrograma unitario. (López J, 2012).

$$Qp = \frac{2.08*A}{Tp} \quad (2.9)$$

$$Tp = \frac{Ty}{2} + T1 \quad (2.10)$$

$$T1 = \frac{L^{0.8}(2.540-22.86*CN)^{0.7}}{14.104*CN^{0.7}*i^{0.5}} \quad (2.11)$$

Donde:

Qp: Caudal punta (m³/s) por centímetro de lluvia efectiva.

A: Superficie de la cuenca (km²).

Tp: Tiempo al máximo en horas.

Ty: Duración del pulso de lluvia.

T1: Tiempo de desfase de la cuenca.

L: Longitud hidráulica en metros.

i: Pendiente media de la cuenca.

- **Método Muskingum.**

Técnica aplicada en la mayoría de estudios hidrológicos que permite manejar las relaciones entre variables de descarga-almacenamiento; para la representación se realiza la modelación del almacenamiento volumétrico de caudal-tiempo a lo largo de los cauces de los ríos de la zona mediante la combinación de un almacenamiento en forma de cuña y otra en forma de prisma. (Chow,1986)

La ecuación fundamental que maneja este método es la de:

$$Q_{j+1} = C_1 I_{j+1} + C_2 I_j + C_3 I_{j-1} \quad (2.12)$$

Donde:

I_j : Caudal entrante en un tramo en el instante j .

Q_j : Caudal saliente del mismo tramo en el instante j .

C_3, C_2, C_3 : Constantes dependientes de los parámetros k y x .

El parámetro k , simboliza el tránsito del cauce mientras que el parámetro x corresponde a un coeficiente de almacenamiento adimensional; como recomendación el valor de x oscila entre 0 y 0.5.

Para realizar modelos hidrológicos de cauces naturales se recomienda utilizar el valor de 0.2 aproximadamente.

2.2. Geomorfología de una cuenca hidrográfica.

Las características geomorfológicas de una cuenca son las propiedades particulares que posee cada cuenca, estableciendo parámetros importantes de forma preliminar para realizar estudios en la zona (Córdova, 2016) ; entre estos parámetros se encuentra:

- **Área de la cuenca.**

Es el área proyectada en un plano horizontal, tiene una forma irregular y es obtenida después de la delimitación de la cuenca hidrográfica; por su complejidad por su forma irregular no se puede realizar el uso de fórmulas geométricas y se utilizan métodos como: balanza analítica y el planímetro para trabajos manuales. (Máximo, 2002).

- **Perímetro de la cuenca.**

Es el borde de la forma de la cuenca proyectada en un plano horizontal, posee una forma irregular y su obtención se da después de realizar la delimitación de la zona de estudio; para su medición en la actualidad se utilizan sistemas de información geográficos (Máximo, 2002).

- **Longitud del cauce principal.**

Es la distancia del cuerpo de agua principal de la zona que está en estudio; para la medición de este parámetro se toma en cuenta la sinuosidad del cuerpo de agua.

- **Longitud axial de la cuenca.**

Se considera a la distancia entre la salida y el punto más apartado de la cuenca, es decir la longitud en línea recta que conecta los puntos extremos de la cuenca en forma paralela al curso principal (Morisawa, 1959)

- **Pendiente de la cuenca.**

La pendiente es en ángulo conformado entre la superficie del terreno y el plano horizontal, este parámetro mantiene una relación importante y compleja con la infiltración, escorrentía superficial, humedad del suelo y la contribución del agua subterránea para la escorrentía en el estudio de toda la cuenca (Máximo, 2002).

- **Índice de compacidad.**

Es el parámetro adimensional que relaciona el perímetro de la cuenca con el perímetro de un círculo teórico de área equivalente al de la cuenca (Gaspari, 2002).

$$K_c = \frac{P_{cuenca}}{2\pi \left(\frac{A_{cuenca}}{\pi}\right)^{\frac{1}{2}}}$$

Donde:

P: Perímetro de la cuenca (km)

A: Área de la cuenca (km²)

- **Factor de forma.**

Factor adimensional que explica el comportamiento del tiempo de concentración del escurrimiento superficial en la cuenca; es la relación del ancho de la cuenca y su longitud axial (Henaos, 1988)

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

Donde:

A: Área de la cuenca. (km²).

L: Longitud de la cuenca. (km).

- **Orden de la cuenca.**

El orden de la red hídrica de la cuenca hidrográfica proporciona el grado de bifurcación dentro de la zona de estudio; un método muy utilizado para su análisis es el de Horton.

Este método analiza a las corrientes de primer orden que se encuentran en los nacimientos y que no poseen afluentes, cuando se produce la unión de dos corrientes de un mismo orden generan una de orden mayor.

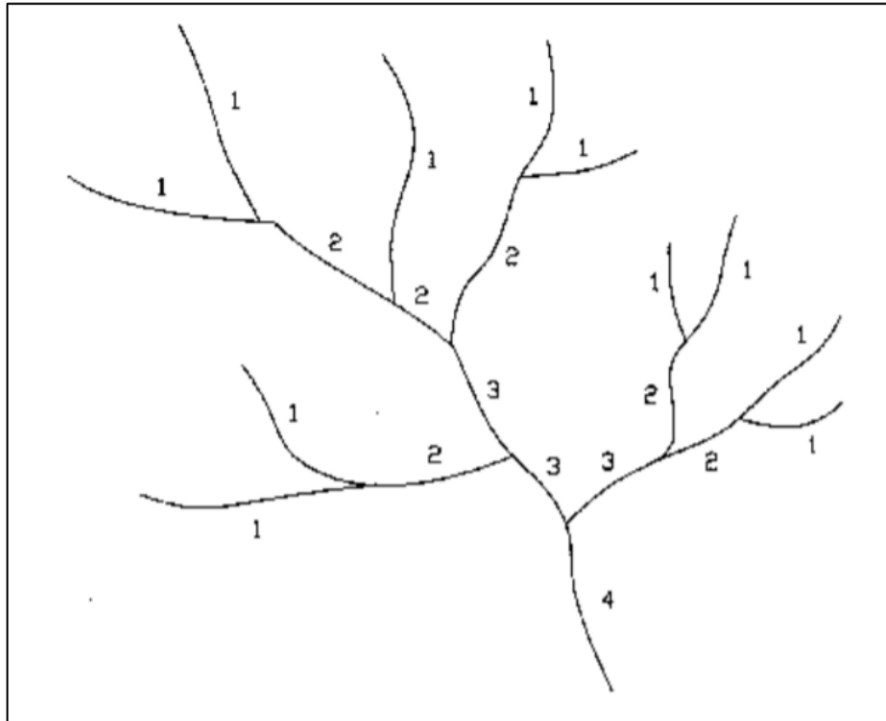


Figura 7. Número de Orden
Fuente. (Horton R. E., 1945)

Como se observa en la figura anterior, la unión de dos cauces de un mismo orden crea un orden mayor, según este criterio el orden de la cuenca hidrográfica sería el que se encuentra al final de la desembocadura de la cuenca hidrográfica.

- **Curva hipsométrica.**

Representa la relación entre la altura, y la superficie de la cuenca que se encuentra sobre esta altura (Máximo, 2002), este parámetro representa la topografía de la cuenca hidrográfica, debido a que su representación puede darse mediante gráficos característicos.

2.3.Análisis estadístico.

Estudio que se practica para interpretar el comportamiento de un conjunto de datos los cuales han sido recopilados o calculados con el fin de encontrar la tendencia o los patrones que existen entre sí.

2.3.1. Análisis estadístico de precipitación.

La estadística permite el uso de diferentes funciones las cuales calculan la probabilidad teórica en el análisis de una frecuencia o serie de datos, este estudio se realiza para extrapolar los datos de precipitación mediante el uso de estas funciones.

- **Distribución normal.**

La función de probabilidad normal es muy importante en el análisis para estudios estadísticos, en contraste con la hidrología esta distribución no se puede aplicar mucho ya que los datos raramente actúan como se representan en esta forma, esta distribución esta descrita por:

$$f(x) = \int_{-\infty}^x \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-0.5\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad (2.13)$$

Donde:

x: variable independiente

μ: media aritmética de datos

σ: desviación estándar de los datos.

- **Distribución log normal.**

En un estudio hidrológico los datos con los que se estudia por lo general son positivos; razón por la cual se puede presentar distribuciones asimétricas, para la distribución en estudio se aplica una transformación logarítmica en donde $Y = \ln(X)$, esta distribución esta descrita por:

$$f(x) = \int_0^{xi} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} * \frac{1}{x\beta} * e^{-0.5\left(\frac{\ln x - \alpha}{\beta}\right)^2} dx \quad (2.14)$$

Donde:

x: variable independiente.

α: media aritmética de datos.

β: desviación estándar de los datos.

- **Distribución de Gumbel**

En esta distribución se maneja n número de datos, donde se selecciona el elemento máximo de cada muestra de información, se puede indicar que a medida que n aumenta, la función correspondiente a este método estadístico tiende a:

$$f(x) = e^{-e^{-(x-u)/\alpha}} \quad (2.15)$$

Siendo:

$$\alpha = \frac{S_x}{\sigma_y} \quad (2.16)$$

$$u = \bar{x} - u_y \cdot \alpha \quad (2.17)$$

Donde:

\bar{x} : media aritmética de datos.

S_x : desviación estándar de datos.

σ_y, u_y : coeficientes de acuerdo al número de datos de la muestra.

TABLA 2: Valores de coeficientes para método de Gumbel.
Fuente. (Sánchez, 2019)

No. de datos	u_y	σ_y
10	0.4952	0.9496
15	0.5128	1.0206
20	0.5236	1.0628
25	0.5309	1.0914
30	0.5362	1.1124
35	0.5403	1.1285
40	0.5436	1.1413
45	0.5463	1.1518
50	0.5485	1.1607
55	0.5504	1.1682
60	0.5521	1.1747
65	0.5535	1.1803
70	0.5548	1.1854
75	0.5559	1.1898
80	0.5569	1.1938
85	0.5578	1.1974
90	0.5586	1.2007
95	0.5593	1.2037
100	0.5600	1.2065

Para realizar el cálculo de la precipitación en n años, se utiliza la siguiente expresión logarítmica obtenida de las expresiones anteriores.

$$x = -\ln(-\ln(F(x))) \cdot \alpha + u \quad (2.18)$$

2.3.2. Prueba de bondad para ajuste estadístico.

La prueba de bondad permite demostrar si la información que se está estudiando es una muestra independiente de la distribución escogida (Fattorelli & Fernández, 2007), es decir la que mejor se ajuste al conjunto de datos; se tiene diferentes pruebas de bondad, pero para este estudio se ha escogido:

- **Kolmogorov - Smirnov**

Consiste en realizar una comparación en el máximo valor absoluto de la diferencia entre la función de distribución de probabilidad observada y la estimada; este valor crítico depende del número de datos y del nivel de significancia que se adopta para el estudio (MTC, 2008); la ecuación utilizada es:

$$D = \text{máx}|F_o(xm) - F(xm)| \quad (2.19)$$

Donde:

$F_o(xm)$: distribución de probabilidad observada.

$F(xm)$: distribución de probabilidad estimada.

La función de probabilidad observada está dada por:

$$F_o(xm) = m/(n + 1) \quad (2.20)$$

m : número de orden de dato.

n : número total de datos.

2.3.3. Análisis estadístico de resultados.

Los resultados obtenidos en el proceso de modelación, deben ser sometidos a un análisis estadístico, este mide información distinta entre características de las diferencias o residuos de los resultados de observación y predicción por parte del modelo calculado. (Ochoa, 2014)

Los métodos estadísticos que se utilizan son los siguientes:

- **Error Medio Absoluto (MAE)**

Valor medio aritmético de los errores absolutos en cada medida, su ajuste será óptimo mientras su valor más se aproxime a 0.

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |o_i - p_i|}{n} \quad (2.21)$$

Donde:

o_i : datos observados

p_i : datos calculados

n : número de datos.

$$0 \leq MAE$$

- **Error Medio Relativo Cuadrado (RRMSE)**

Permite realizar la comparación en el ajuste entre los datos observados y los simulados del modelo, el valor óptimo sería de 0, este indicaría que no existe ningún tipo de errores y la relación entre los datos es perfecta.

$$RRMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (o_i - p_i)^2}{n}} * \frac{1}{\bar{o}} \quad (2.22)$$

Donde:

o_i : datos observados

p_i : datos calculados

n : número de datos.

\bar{o} : media aritmetica de los datos observados.

$$0 \leq RRMSE$$

- **Coefficiente de correlacion (R^2)**

Medida que indica el grado en el ajuste a una línea recta entre los datos que fueron simulados y los que son observados, se puede obtener un valor optimo de 1, el mismo que indicaria que existe una tendencia lineal perfecta entre los datos.

$$R^2 = \frac{Cov(o_i - p_i)^2}{\sigma^2 o * \sigma^2 p} \quad (2.23)$$

Donde:

$Cov(o_i - p_i)^2$: covarianza entre los datos observados y calculados.

$\sigma^2 o$: varianza de los datos observados.

$\sigma^2 p$: varianza de los datos calculados.

$$0 \leq R^2 \leq +\infty$$

TABLA 3: Valores para el coeficiente de correlación.
Fuente. (Amat Rodrigo, 2016)

Coeficiente de correlación.	Ajuste.
< 0.0	Insuficiente
0.0 – 0.5	Débil
0.5 – 0.9	Moderada
0.9 – 1	Fuerte
1	“Perfecta

- **Coeficiente de Nash-Sutcliffe.**

Es uno de los criterios más utilizado en estudios de hidrología; permite medir cuánto de la variabilidad entre las observaciones es demostrada por la simulación realizada; si la simulación es perfecta el coeficiente sería igual a 1, algunos de los valores sugeridos para su análisis son los siguientes:

TABLA 4: Valores para el coeficiente de Nash-Sutcliffe.
Fuente. (Amat Rodrigo, 2016)

Coeficiente de correlación.	Ajuste.
< 0.2	Insuficiente
0.2 – 0.4	Satisfactorio
0.4 – 0.6	Bueno
0.6 – 0.8	Muy Bueno
>0.8	Excelente

2.4.Hidráulica.

La hidráulica es la ciencia que se encarga del análisis y estudio de un fluido; además de todo el comportamiento que tiene a lo largo de un canal, en términos hidráulicos un río es un canal con una conducta diferente por esta razón su flujo debe ser esquematizado de la forma más apegada a la realidad. (Rocha, 1998).

2.4.1. Modelo Hidráulico.

Herramienta que permite la representación de forma simplificada un complejo funcionamiento que sucede en la naturaleza, estas representaciones se producen con el fin de facilitar el estudio

debido a que antiguamente se recurría a la experiencia del ingeniero encargado de los diseños y conocimientos teóricos en hidráulica (Fernández de Córdoba, 2019).

Existe una cantidad de software en donde se puede representar un modelo hidráulico pertenecientes a diferentes autores, se debe optar por el más eficaz de acuerdo a las variables y a la base de datos que se tenga para el estudio en la zona que se va a realizar (Fernández de Córdoba, 2019).

Los modelos hidráulicos pueden ser representados de diferentes formas, entre las cuales tenemos:

- **Modelación hidráulica en 1D**

Esta modelación es la forma más sencilla de poder representar un flujo, se caracterizan por determinar el nivel y el caudal en las secciones transversales que comprenden un río; esta modelación se basa en los principios de las ecuaciones de conservación de masa y momento desarrollada por Saint Venant en 1871, mismas que representan el flujo no permanente unidimensional en canales abiertos. (Chow,1964).

- **Modelación hidráulica en 2D**

Los modelos de dos dimensiones se manejan cuando la información obtenida por un modelo unidimensional no es el adecuado, este tipo de modelos manejan las ecuaciones de Saint Venant en el sentido perpendicular al flujo (Fread, 1982), además del sentido natural del mismo y son denominadas como ecuaciones para flujo poco profundo.(Gilles y Moore, 2010).

- **Modelación hidráulica en 3D**

El modelo tridimensional representa de la forma más compleja el flujo, permitiendo simular los tres componentes espaciales de la velocidad de este, además se puede conseguir resultados más detallados de la zona; al ser un modelo completo necesita más variables de entrada para poder conseguir un resultado correcto. (Gilles y Moore, 2010).

2.4.2. Modelo Hidráulico mediante el software HEC-RAS.

El software HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center – River Analysis System) por sus siglas en inglés, fue desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de Estados Unidos de Norteamérica con el fin de poder representar modelos hidráulicos para cauces, permite pronosticar la dinámica en los niveles de agua según los diferentes eventos extremos en la zona de estudio (López, 2017).

Para el análisis en este software se debe considerar datos geométricos de la zona, estos datos involucran las secciones transversales a lo largo del cauce que se encuentra considerado; además del valor del caudal el cual puede ser constante o puede variar a lo largo del tiempo (López, 2017).

Mediante el uso del modelo HEC-RAS se puede realizar la modelación hidráulica en cualquier tramo de un cauce, y este software tiene el beneficio de interactuar con modelo digital de elevaciones los cuales son generados en sistemas de información geográficos con el fin de obtener resultados de excelente calidad y poder generar mapas de inundaciones que pueden ser georreferenciados. (López, 2017).

2.4.3. Metodología del software HEC-RAS

El análisis que aplica el software HEC-RAS es la representación de un sistema fluvial, en este caso de un río; hidráulicamente a un río se lo puede caracterizar mediante un canal abierto, pero se tiene en cuenta que la esquematización de este tiene un comportamiento particular comparado con el de un canal, ejemplo, el movimiento de un río no es permanente mientras que el de un canal reúne las condiciones propias creadas por el hombre para que tenga cierto comportamiento. (Rocha Felices, 1998).

- **Condiciones de contorno para un modelo hidráulico.**

Para poder representar un modelo hidráulico a través de software se debe tener todas las variables de entrada para el mismo, estas variables definen al modelo aguas arriba y aguas abajo; estos datos de entrada son: tipo de flujo en sus diferentes caracterizaciones, nivel de caudal en el río y sus secciones geométricas transversales. (Aguilar, 2017)

- **Flujo.**

Es el estudio del movimiento de un fluido sobre un canal sometido a una presión atmosférica o a una superficie libre, para el estudio de este movimiento se realiza un análisis mediante las leyes del movimiento de la física, características del conducto por donde fluyen y las propiedades del mismo; para tener una mejor descripción del estudio de flujo, se tiene una clasificación que se expone a continuación. (Mohames, 2008)

- **Flujo según el tiempo.**

Permanente: Este mantiene los parámetros hidráulicos de forma constante en el tiempo; es decir que las características de la partícula son las mismas en todos los puntos para todos los instantes.

No permanente: Los parámetros de estudio van variando de acuerdo a como viaja el flujo en el tiempo.

- **Flujo según el movimiento.**

Libre: El fluido se mueve por conductos abiertos en donde existe una superficie libre la cual se encuentra en contacto con la atmósfera.

Presión: El movimiento del fluido se ve afectada por la acción de una presión hidráulica la cual es totalmente diferente a la presión atmosférica.

- **Flujo según el efecto viscoso.**

Laminar: El movimiento del fluido se da de una forma regular, se transporta en láminas paralelas que no se mezcla en su trayectoria.

Turbulento: La trayectoria del fluido es irregular, se transporta en láminas que se mezclan entre sí y su trayectoria es irregular.

Transicional: Se da cuando el flujo pasa de laminar a turbulento de una forma gradual.

- **Número de Reynolds.**

Permite clasificar el flujo según su efecto viscoso, su valor adimensional representa las fuerzas viscosas en relación a las fuerzas de inercia del fluido. (Mohamed, 2008)

TABLA 5: Tipo de Flujo según número de Reynolds.
Fuente: Mohamed, 2008.

Flujo	Rango
Flujo laminar	$Re < 500$
Flujo turbulento	$Re > 1000$
Flujo transicional	$500 < Re < 1000$

- **Número de Froude.**

Coefficiente adimensional que indica la relación existente entre las fuerzas de inercia y gravitatorias de un flujo en un canal abierto. (Aguirre-Pe, Olivero & Moncada, 2000).

TABLA 6: Tipo de Flujo según número de Froude.
Fuente: Aguirre-Pe, Olivero & Moncada, 2000

Flujo	Rango
Flujo subcrítico	$F < 1$
Flujo supercrítico	$F > 1$
Flujo crítico	$F = 1$

- **Geometría esquemática del río.**

El análisis de un flujo en software requiere la geometría que lo representa y sirve para el análisis de su cauce natural, en esto se tiene las secciones transversales que son los perfiles de superficie del terreno y la longitud de los tramos según la distancia que el modelador requiera; la geometría es de suma importancia porque brinda información cada cierto intervalo de la capacidad de acarreo del río y de la zona de inundación que ahí se produce. (Vivas & Matamoros, 2009).

- **Coefficiente de Manning.**

El coeficiente de rugosidad o conocido como el número de Manning es el coeficiente que determina la resistencia de un flujo en un canal o río; este coeficiente es importante porque causa un impacto directo en el tiempo de traslado del flujo. (Araya, González, & Jiménez, 2018), el valor adoptado para este coeficiente se extrae de una tabla el mismo que se lo relaciona con condiciones similares a las del flujo en estudio.

TABLA 7: Coeficiente de Manning.
Fuente: Chow, 1964.

Cursos naturales en planicie.			
Limpio, recto, nivel lleno, sin fallas o pozos profundos	0.025	0.030	0.033
Igual que arriba, pero más piedras y pastos	0.030	0.035	0.040
Limpio, curvado, algunos pozos y bancos	0.033	0.040	0.045
Igual que arriba, pero algunos pastos y piedras	0.035	0.045	0.050
Igual que arriba, niveles inferiores, más pendiente	0.040	0.048	0.055
Igual que 4, pero más piedras	0.045	0.05	0.060
Tramos sucios, con pastos y pozos profundos	0.050	0.070	0.080

2.4.4. Ecuaciones aplicadas por el HEC-RAS

- **Ecuación de la energía.**

Para realizar el cálculo de la altura en la superficie de agua en una sección transversal (Vivar & Matamoros, 2009), se aplica:

$$Y_2 + Z_2 + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} + h_e = Y_1 + Z_1 + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} \quad (2.24)$$

Donde:

Y_1, Y_2 = profundidad del agua en sección transversal.

Z_1, Z_2 = elevación del lecho del tramo

V_1, V_2 = velocidades promedio, (Q total/ A total)

α_1, α_2 = coeficiente de velocidad.

g = gravedad

h_e = pérdida principal de energía.

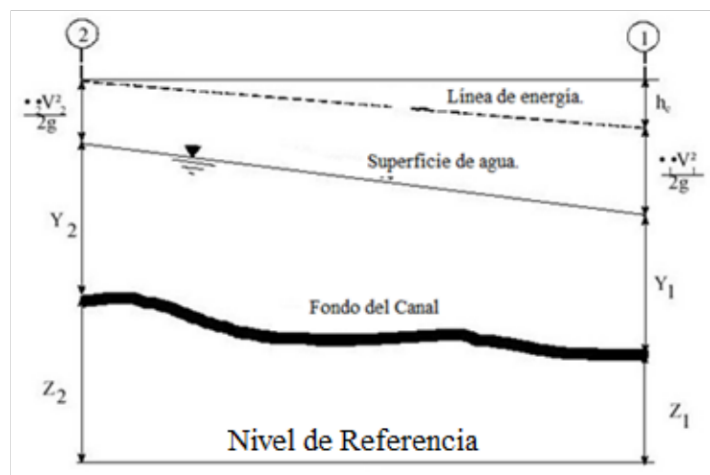


Figura 8. Línea de energía.
Fuente. (Chow, 1964)

La figura 8 muestra la línea de energía de un flujo en canal abierto, en donde las condiciones del flujo varían por el hecho de encontrarse a superficie libre y porque sus condiciones varían con el tiempo; de igual forma se puede notar la caída de la línea de energía en relación con el descenso de la superficie de agua.

- **Ecuación de pérdida de energía entre dos secciones.**

La pérdida de energía que se produce entre dos secciones transversales es generada por la fricción y las pérdidas por contracción y expansión (Vivar & Matamoros, 2009), su ecuación es:

$$h_e = L * \bar{S}_f + C * \left[\frac{a_2 v_2^2}{2g} + \frac{a_1 v_1^2}{2g} \right] \quad (2.25)$$

Donde:

L = longitud de tramo.

\bar{S}_f = pendiente de fricción entre secciones.

C = coeficiente de pérdida por expansión o contracción.

- **Ecuación de energía total para una sección.**

La altura critica en una sección es determinada por la altura en donde la energía total principal es la mínima (Vivar & Matamoros, 2009), mediante la siguiente expresión:

$$H = WS + \frac{\alpha V^2}{2g} \quad (2.26)$$

H = Energía total.

WS = Elevación de la superficie de flujo.

$\frac{\alpha V^2}{2g}$ = Velocidad principal.

- **Número de Reynolds.**

El cálculo del número de Reynolds maneja la siguiente ecuación:

$$Re = \frac{VL}{\nu} \quad (2.27)$$

Donde:

V = velocidad de flujo.

L = longitud característica.

ν = viscosidad dinámica del agua.

- **Número de Froude.**

El número de Froude se determina de la siguiente forma:

$$F = \frac{v}{\sqrt{gL}} \quad (2.28)$$

Donde:

v = velocidad media del flujo.

g = gravedad

L = Longitud [pies]

2.4.5. Calibración y validación de un modelo.

La implementación de un modelo hidrológico a través de las variables de entrada ingresadas según la metodología a utilizar, poseen un margen de error que puede ser significativo; por esta razón se tiene que realizar un proceso de verificación de información para afinar los resultados con la información ingresada (Sánchez, 2015).

- **Calibración de modelo.**

En el proceso de calibración se realiza un ajuste a las variables de entrada como: número de curva, tiempo de retardo entre otras; de esta manera se reduce el margen de error caudal observado – caudal calculado; el proceso de calibración maneja una metodología de prueba y error, con un criterio de exactitud para ajustar parámetros como un medio de calibración para el modelo hidrológico. (Tapia, 2015).

- **Validación de modelo.**

Posterior a la calibración se comprueba el funcionamiento del modelo hidrológico de una forma correcta mediante los resultados observados y calculados, este funcionamiento podrá definir al modelo como correcto; la calibración de los parámetros de entrada modifica de forma directa la simulación del programa, por esta razón la validación evalúa el margen de error ajustado en el proceso de calibración de parámetros (Tapia, 2015).

3. CÁLCULO Y DESARROLLO.

En este capítulo se desarrollan y calculan todas las variables necesarias para realizar la simulación hidrológica e hidráulica mencionadas en el capítulo anterior, en el ámbito hidrológico sobresale el estudio de precipitación para obtener la tormenta de diseño; además, los hidrogramas de creciente del río en el punto de estudio de la cuenca hidrográfica; por otra parte, en la modelación hidráulica se obtiene las zonas de inundación con su nivel de calado.

3.1. Zona de Estudio.

La cuenca hidrográfica del río Santa Bárbara se encuentra ubicada en los cantones Sígsig, Gualaceo, Chordeleg y Paute pertenecientes a la provincia del Azuay; además de Limón Indanza perteneciente a la provincia de Morona Santiago, posee una superficie de 951.92 km²,

se encuentra entre los 2°50' y 3°10' de latitud sur y entre los 78°30' y 79°10' de longitud oeste, con altitudes que van desde los 2200 hasta los 4000 m s. n. m. (Guapasaca & Mosquera, 2011), Según el Instituto Ecuatoriano de Estadísticas y Censos a través del Censo de Población y Vivienda realizado en el 2010 en esta zona la población es de 117 882 habitantes donde la temperatura media anual es de 17°C. (Cg Paute, UDA,2007)

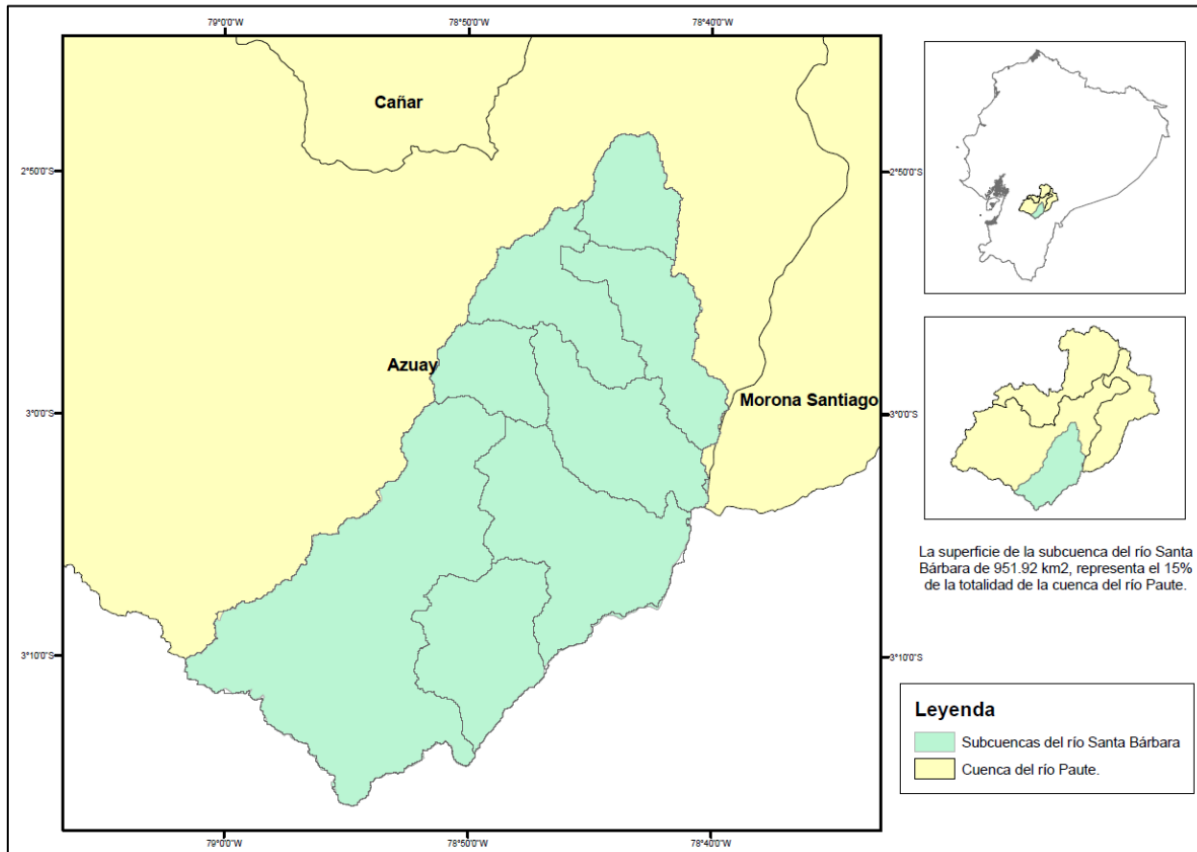


Figura 9. Ubicación de la cuenca del río Santa Bárbara.
Fuente. Elaboración propia. (Anexo 1)

La figura 9 muestra la ubicación de la subcuenca del río Santa Bárbara respecto a la cuenca del río Paute; esta subcuenca de estudio representa el 15% de la cuenca del río Paute como se observa en la segunda imagen de la derecha.

Se delimita la cuenca hidrográfica del río Santa Bárbara mediante herramientas de sistemas de información geográficos con ayuda de la extensión HEC-GeoHMS, extensión encargada para el desarrollo de herramientas propias de hidrología geoespacial siendo de gran ayuda por su facilidad y simplicidad en el proceso de creación de cuencas hidrográficas y la obtención de sus propiedades.

La base fundamental para poder delimitar la cuenca hidrográfica es un modelo digital de elevaciones el mismo que se explica detalladamente a continuación.

- **Modelo digital de elevaciones (MDE)**

El modelo digital de elevaciones (MDE) es el encargado de representar las características de la superficie de suelo, es un dato de tipo de dato ráster, tiene un tamaño en pixeles de 10 m x 10 m; la información obtenida está relacionada con los datos SRTM del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS) en coordenadas WGS_1984_UTM_Zone_17S, se utilizó este software debido a la carente información cartográfica de la zona y a la falta de detalles en las cartas del Instituto Geográfico Militar; el MDE obtenido se almacena en formato Geo TIFF y se exporta al SIG.

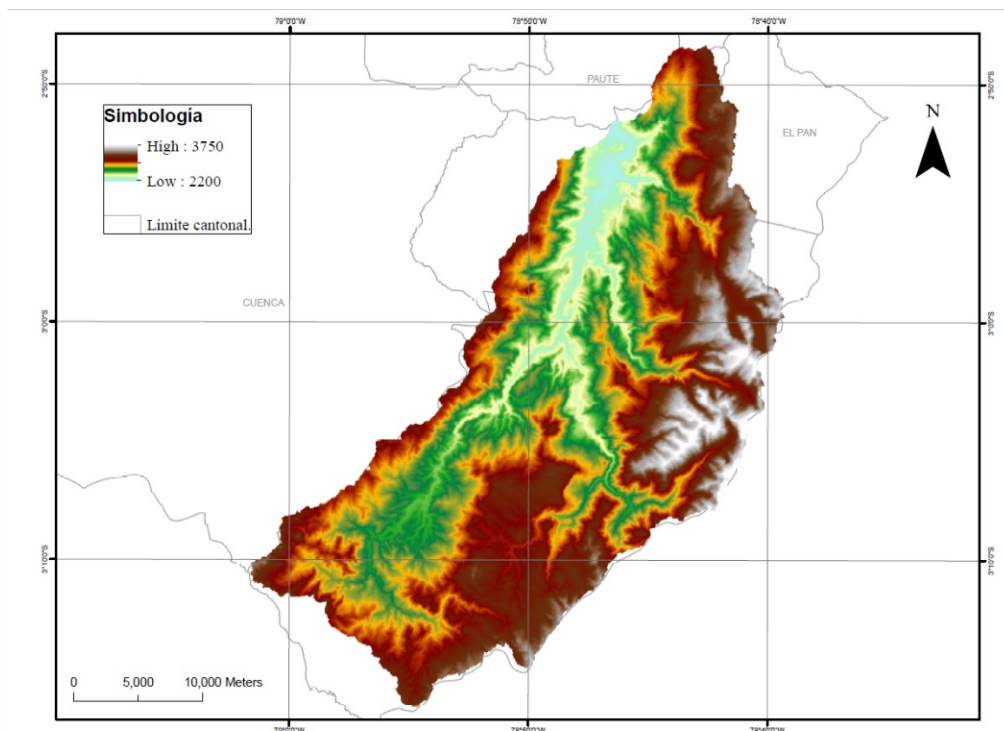


Figura 10. Modelo digital de elevaciones (MDE) de la cuenca del río Santa Bárbara.
Fuente. Elaboración propia. (Anexo 2)

El MDE correspondiente a la figura 10, explica la zona de estudio con sus diferentes altitudes, siendo la mínima de 2200 m s. n. m y la máxima de 3750 m s. n. m en una superficie de una superficie de 951.92 km², la zona alta según la gama de colores se lo puede representar con un color blanco y café, mientras las zonas más bajas se las diferencian por los tonos celestes.

- **Metodología para la delimitación de la cuenca hidrográfica del río Santa Bárbara.**

Para representar el proceso de lluvia – escorrentía, se necesita tener la delimitación de la zona en la que se va a realizar esta simulación y su red de drenaje completa; el uso de los sistemas

de información geográfica y algoritmos que analizan el geo proceso en el terreno facilita este trabajo.

La metodología que emplea el HEC-GeoHMS es la siguiente; se puede encontrar en la pestaña de *preprocessing* y siguen la siguiente secuencia.

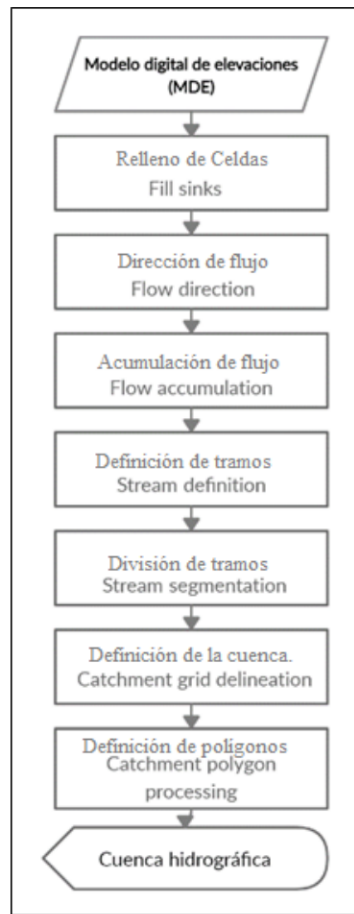


Figura 11. Metodología aplicada en el HEC-GeoHMS para la delimitación de la cuenca del río Santa Bárbara.
Fuente. Elaboración propia.

Una vez generado el proyecto en SIG, se procede a analizar el MDE mediante ArcHydro Tools herramienta que sigue la secuencia de la figura 11; este proceso comienza con la corrección de imperfecciones en la superficie del MDE, la generación de flujo de una celda a otra, la acumulación del flujo en cada una de las celdas tomando en cuenta las que se encuentran aguas arriba, define los cauces y finalmente se encarga de generar las subcuencas en forma de polígono.

- **Delimitación de subcuencas.**

La división en subcuencas ayuda obtener características geomorfológicas de la misma, datos que servirán como información de ingreso para el HEC-HMS (Fernández de Córdoba, 2019); esta delimitación para su verificación fue cotejada con una que maneja ETAPA EP en el “Monitoreo eco-hidrológico de Cuenca” y puede ser cotejado a través de su geo visor; se obtuvo el siguiente resultado.

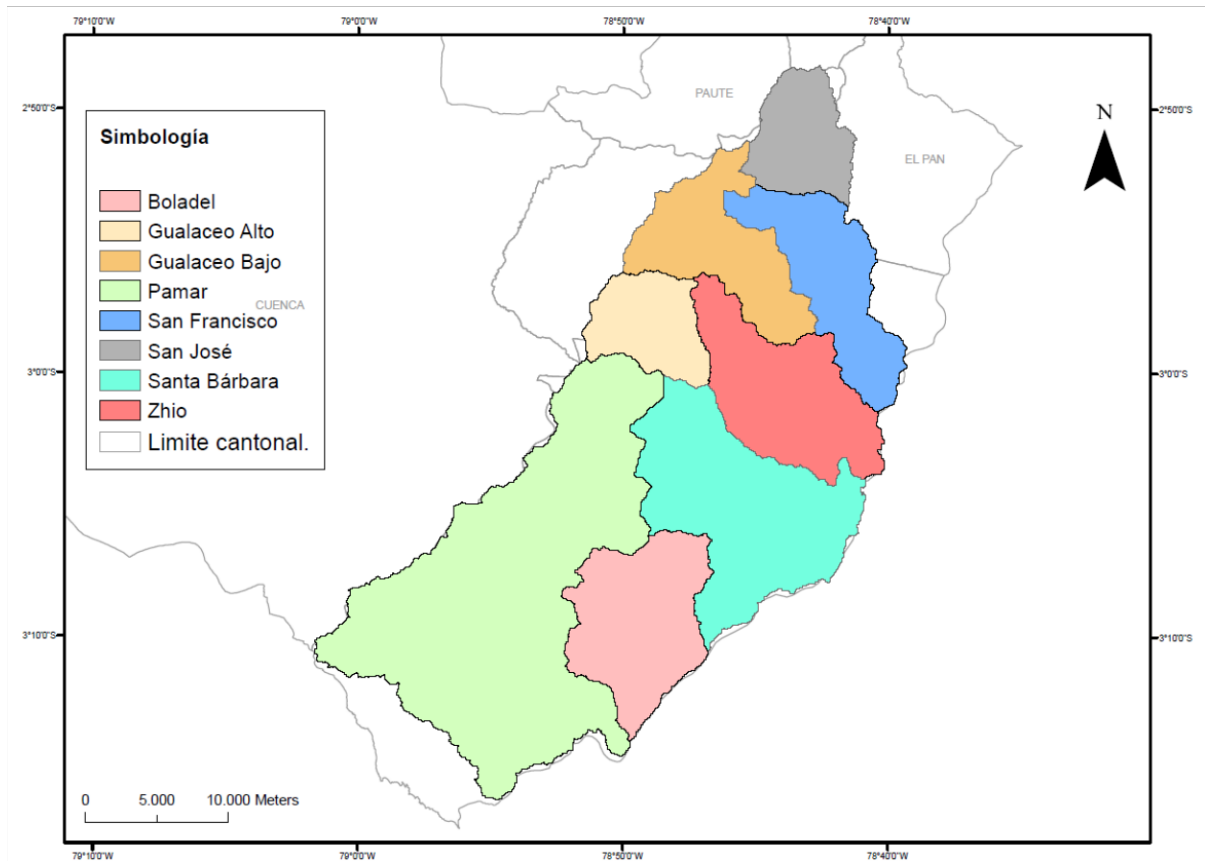


Figura 12. Subcuencas de la cuenca del río Santa Bárbara.
Fuente. Elaboración propia. (Anexo 3)

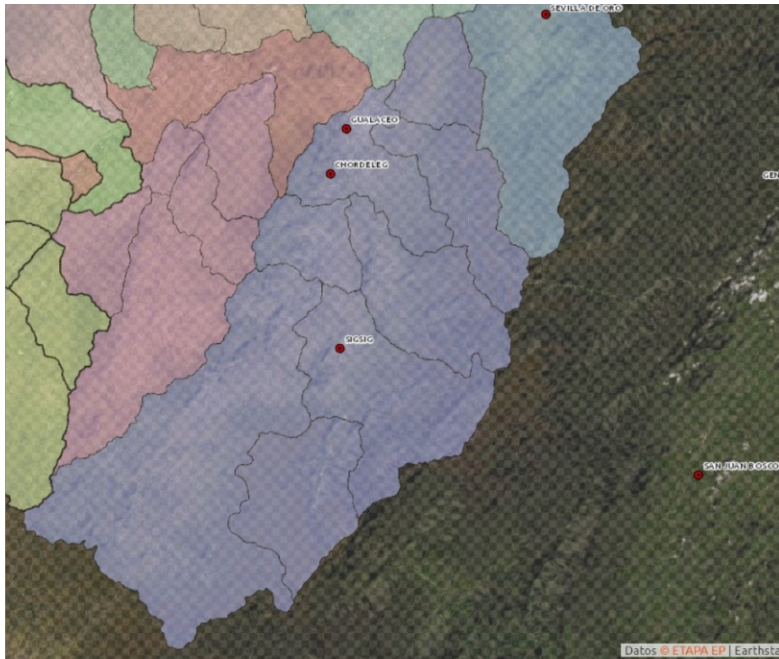


Figura 13. Subcuencas de la cuenca del río Santa Bárbara desarrollado por ETAPA EP.
Fuente. <https://geo.etapa.net.ec/monitoreoecohidrologico/>

Con la delimitación propuesta en la figura 12 se trabaja a lo largo de todo el proyecto, a continuación, se detalla un poco más de las subcuencas que comprenden el área.

TABLA 8: Ubicación de las subcuencas de la cuenca del río Santa Bárbara.
Fuente. Elaboración propia.

N.	Provincia	Cantón	Subcuenca
1	Azuay - Morona Santiago	Sígsig - Gualaquiza	Río Boladel
2	Azuay	Gualaceo - Sígsig	Río Gualaceo Alto
3	Azuay	Gualaceo - Chordeleg	Río Gualaceo Bajo
4	Azuay - Morona Santiago	Cuenca - Sígsig - Gualaquiza	Río Pamar
5	Azuay - Morona Santiago	Gualaceo - Chordeleg - El Pan - Limón Indanza	Río San Francisco
6	Azuay	Gualaceo - Paute - El Pan - Guachapala	Río San José
7	Azuay - Morona Santiago	Sígsig - Gualaquiza	Río Santa Bárbara
8	Azuay - Morona Santiago	Gualaceo - Sígsig - Chordeleg - Limón Indanza - Gualaquiza	Río Zhio

3.2. Características de la cuenca del río Santa Bárbara.

- **Área de la cuenca.**

La cuenca del río Santa Bárbara tiene un área de 951.92 km² y un perímetro de 218.10 km; en la siguiente tabla se describe La información de las subcuencas de acuerdo a la discretización realizada:

TABLA 9: Características de las subcuencas de la cuenca del río Santa Bárbara.

Fuente. Elaboración propia.

Subcuenca	Área (km²)	Longitud de cauce principal (km)	Pendiente media de cauce principal (m/m)
<i>Río Boladel</i>	84.9	7.73	0.0450
<i>Río Gualaceo Alto</i>	47.55	8.8	0.0062
<i>Río Gualaceo Bajo</i>	83.52	12.59	0.0299
<i>Río Pamar</i>	335.96	38.79	0.0133
<i>Río San Francisco</i>	80.78	15.27	0.0595
<i>Río San José</i>	51.17	3.66	0.0803
<i>Río Santa Bárbara</i>	165.66	18.12	0.0257
<i>Río Zhio</i>	102.4	16.28	0.0337

Como se observa en la tabla 8, la subcuenca del río Pamar corresponde a la más grande con un área de 335.96 km² misma que contiene la longitud del cauce más grande con una distancia de 38.79 km; por otra parte, la subcuenca más pequeña corresponde a la de Gualaceo Alto con un área de 47.55 km² y el tramo del cauce más corto se encuentra en la subcuenca del río San José con 3.66 km.

- **Orden de la cuenca.**

El orden de la red hídrica que se encuentra en la cuenca es **5** según el método de Horton, proceso que fue realizado mediante SIG.

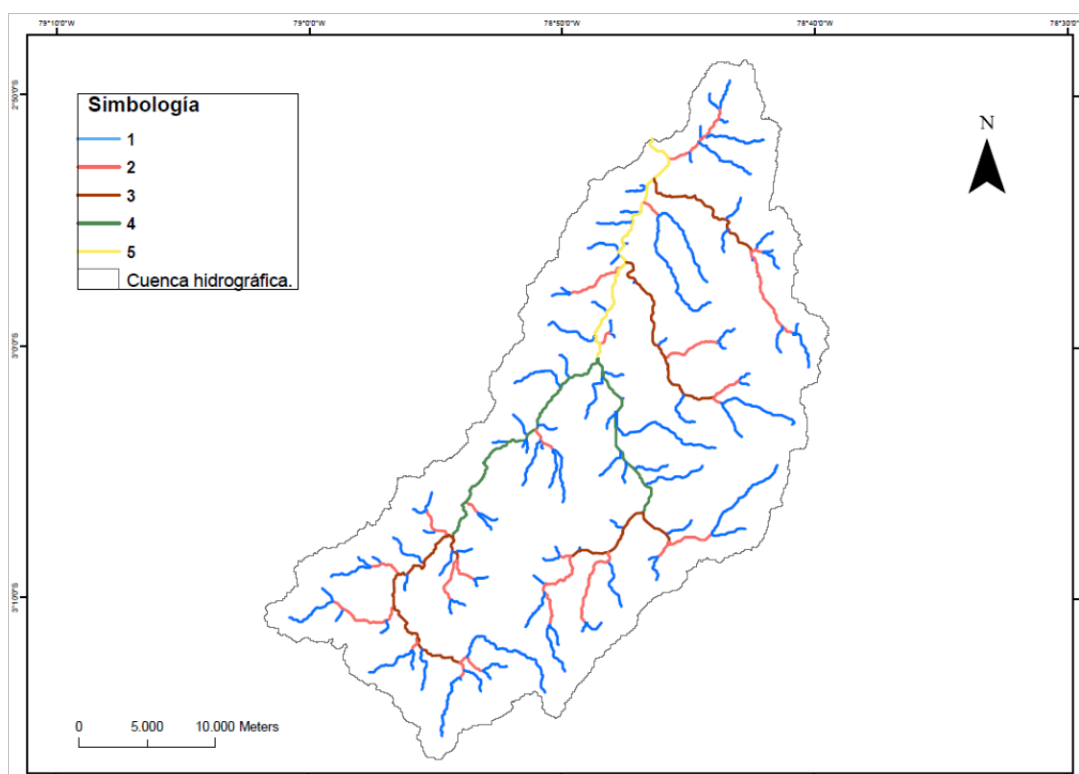


Figura 14. Orden de la cuenca del río Santa Bárbara.

Fuente. Elaboración propia. (Anexo 4)

En la figura 14, el orden 1 de la red hídrica corresponde a un tono negro, el mismo que al unirse con una red del mismo tono conforma el orden 2, este tiene un color verde, el orden de la cuenca en estudio es 5 aplicando la metodología explicada anteriormente, mismo que se puede encontrar en la parte baja de esta a la altura de la salida; el orden 5 se encuentra diferenciado por un tono tomate.

- **Curva hipsométrica.**

TABLA 10: Representación de cota promedio vs % acumulado del área de la cuenca del río Santa Bárbara.

Fuente. Elaboración propia.

No	Cotas			Área entre curvas	Acumulado	% Acumulado
	Min	Max	Promedio			
1	2208.26	2301.83	2255.05	16.07	951.92	100
2	2301.85	2395.42	2348.63	24.7	935.85	98.31
3	2395.44	2489.01	2442.22	34.07	911.15	95.72
4	2489.02	2582.6	2535.81	47.57	877.08	92.14
5	2582.61	2676.19	2629.4	73.38	829.51	87.14
6	2676.19	2769.78	2722.99	83.07	756.13	79.43
7	2769.78	2863.36	2816.57	84.91	673.06	70.71
8	2863.37	2956.95	2910.16	90.22	588.15	61.79
9	2956.95	3050.54	3003.75	95.5	497.93	52.31
10	3050.54	3144.13	3097.33	105.95	402.43	42.28
11	3144.13	3237.69	3190.91	99.41	296.48	31.15
12	3237.74	3331.17	3284.45	70.99	197.08	20.7
13	3331.31	3424.43	3377.87	45.06	126.09	13.25
14	3425.04	3518.41	3471.73	32.55	81.03	8.51
15	3518.48	3612	3565.24	23.85	48.48	5.09
16	3613.45	3704	3658.73	14.46	24.63	2.59
17	3706	3798	3752	7.51	10.17	1.07
18	3800	3892	3846	2.29	2.66	0.28
19	3894	3978	3936	0.31	0.37	0.04
20	3990	4080	4035	0.06	0.06	0.01

Con ayuda de los datos presentes en la tabla 9 se elaboró la curva hipsométrica, esta información se obtuvo en la tabla de atributos de SIG; la curva hipsométrica de la figura 15 es la representación de cota promedio vs % acumulado del área entre cotas.

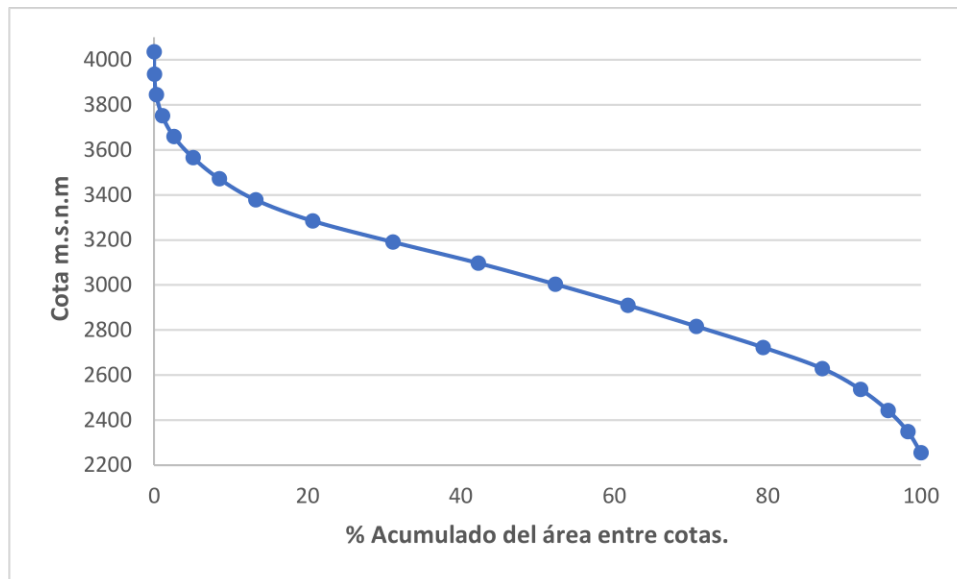


Figura 15. Curva hipsométrica de la cuenca del río Santa Bárbara.
Fuente. Elaboración propia.

Con la elaboración del gráfico correspondiente a la curva hipsométrica se interpreta que la cuenca en estudio está en equilibrio es decir en etapa de madurez.

- **Elevación media.**

La ecuación 3.1 se empleó para el cálculo de la elevación media basado en los datos de la tabla siguiente.

$$H_{media} = \frac{\sum(H_i \times A_i)}{\text{Área Total}} \quad (3.1)$$

Donde:

H_{media}: altura media expresada en m.s.n.m.

H_i x A_i: producto de cota y área.

Área Total: área total de la cuenca en estudio.

TABLA 11: Elevación media de la cuenca del río Santa Bárbara.
Fuente. Elaboración propia.

Cota promedio	Área entre curvas(km²)	Cota * Área
2255.05	16.07	36232.95
2348.63	24.7	58011.28
2442.22	34.07	83206.58
2535.81	47.57	120634.85
2629.4	73.38	192952.06

Cota promedio	Área entre curvas(km²)	Cota * Área
2722.99	83.07	226198.46
2816.57	84.91	239141.05
2910.16	90.22	262554.77
3003.75	95.5	286857.8
3097.33	105.95	328162.5
3190.91	99.41	317192.27
3284.45	70.99	233155.06
3377.87	45.06	152198.48
3471.73	32.55	113013.37
3565.24	23.85	85039.94
3658.73	14.46	52905.17
3752	7.51	28177.52
3846	2.29	8807.34
3936	0.31	1200.48
4035	0.06	242.1
Total	951.92	2825884.03

$$H_{media} = 2968.61 \text{ m. s. n. m.}$$

Tras la elaboración de los cálculos con los datos obtenidos en tabla 10, la elevación media de la cuenca hidrográfica del río Santa Bárbara es de 2968.61 m. s. n. m como punto de referencia.

3.2.1. Resumen de caracterización de la cuenca.

A continuación, se resume las propiedades propias de la cuenca en estudio:

TABLA 12: Características de la cuenca del río Santa Bárbara.
Fuente. Elaboración propia.

Caracterización de la Cuenca.	Valor
Área (km ²)	951.92
Perímetro (km)	218.10
Longitud de cuenca (km)	56.22
Longitud de cauce principal (km)	60.18
Longitud total de cauces (km)	121.24
Elevación media (m.s.n.m.)	2968.61
Pendiente media del cauce principal (m/m)	0.0367
Pendiente media de la cuenca	32.67%
Índice de Compacidad	1.99
<i>Cuenca de forma rectangular – oblonga.</i>	
Factor de Forma	0.26
<i>Tendencia a ser alargada</i>	
Orden de la Cuenca	5

En la tabla 11, se observa la caracterización general de la cuenca en estudio; donde sobresale su área de estudio de 951.92 km², perímetro de 218.10 km, la longitud de la superficie de la cuenca es de 56.22 km, el río principal tiene una longitud de 60.18 km, la elevación media es de 2968.61 m. s. n. m., el índice de compacidad de esta es de 1.99 que nos indica una forma rectangular – oblonga con una tendencia a ser alargada según su factor de forma, el número de orden según el método de Horton es 5.

3.3. Modelación Hidrológica HEC-HMS.

Tras la generación del modelo hidrológico a través de la extensión HEC-GeoHMS se procede a migrar el mismo al software HEC-HMS; quedando de la siguiente manera.

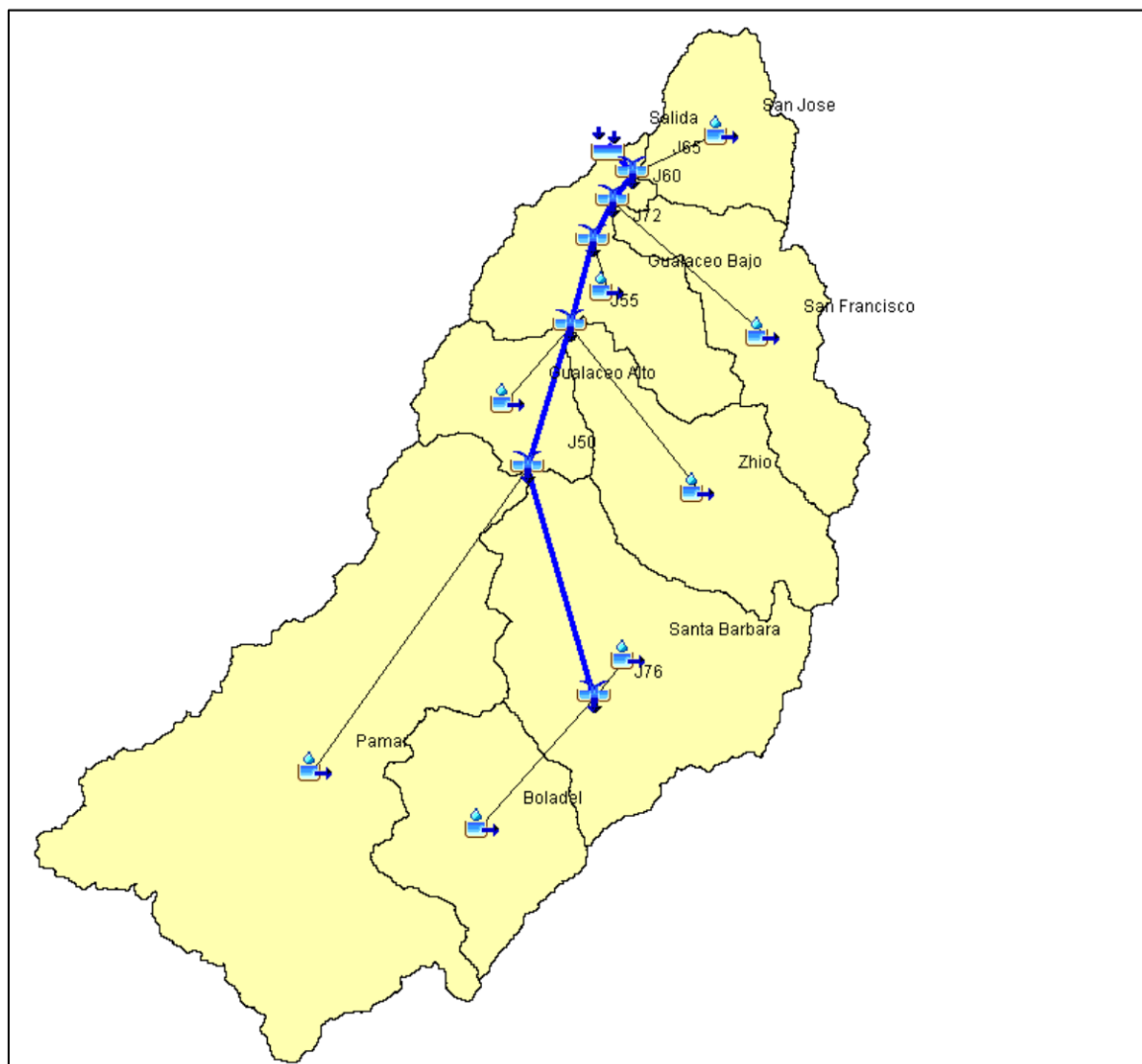




Figura 16. Modelo de la cuenca del río Santa Bárbara en el Software HEC-HMS.
Fuente. Elaboración propia.

El modelo se encuentra conformado por:

TABLA 13: Simbología en el modelo de la cuenca del río Santa Bárbara.
Fuente. Elaboración propia.

Elemento	Simbología
<i>Subcuencas</i>	
<i>Río Boladel</i>	
<i>Río Gualaceo Alto</i>	
<i>Río Gualaceo Bajo</i>	
<i>Río Pamar</i>	
<i>Río San Francisco</i>	
<i>Río San José</i>	
<i>Río Santa Bárbara</i>	
<i>Río Zhio</i>	
<i>Unión</i>	

El resultado del modelo hidrológico es el que se encuentra en la figura 16, está conformado por sus 8 subcuencas y se encuentran conectados según su simbología descrita anteriormente, el uso de SIG y la herramienta del HEC-GeoHMS ayuda mucho en la creación de esta, permitiendo obtener la caracterización de la zona de estudio que posteriormente servirá como datos de entrada.

3.3.1. Modelo de la cuenca hidrográfica (Basin Model)

En esta sección se define el modelo de la cuenca hidrográfica, la metodología y los métodos que se pueden seleccionar para trabajar en cada una de las secciones que contiene el software HEC-HMS corresponde a la cantidad de información que se tiene de la misma.

- **Metodología para el cálculo de la curva número.**

El cálculo fue realizado mediante la metodología del Servicio de Conservación de Suelos de EEUU (SCS), describe al número de curva como un factor de escorrentía mediante el cual se obtiene la lluvia efectiva que se convierte en el caudal que finalmente descarga en un río.

La generación del número de curva depende de:

- Mapa de cobertura de suelo.
 - Mapa de suelos
 - Modelo digital de elevaciones.
- **Mapa de textura y litología de suelos.**

Se analizó información digital procesada por la FAO y UNESCO (FAO-UNESCO, 1989), definiendo la zona de estudio y los atributos del grupo hidrológico de suelo, este grupo mantiene ya una clasificación de acuerdo a la textura y litología representando las condiciones reales de cada uno.

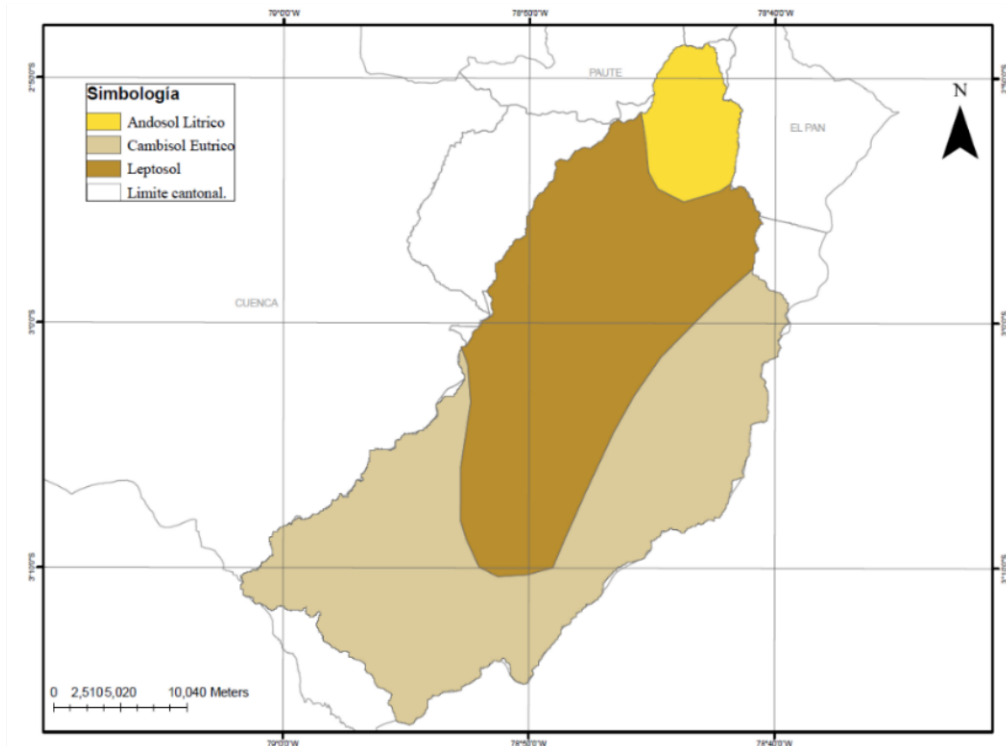


Figura 17. Mapa de suelos, clasificación de acuerdo a la textura y litología.
Fuente. Elaboración propia con información de la FAO y UNESCO (Anexo 5)

Como se observa en la figura 17, en la cuenca hidrográfica sobresalen los suelos andosol lítico, cambisol eutríco y leptosol en una menor proporción comparándolo con los dos anteriores, esta información relacionada con su grupo hidrológico correspondiente servirá para poder generar la curva número posteriormente.

TABLA 14: Descripción de los suelos con su grupo hidrológico.
Fuente. Elaboración propia con información de la FAO y UNESCO.

DESCRIPCIÓN DE SUELOS	SIMBOLOGIA	GRUPO HIDROLOGICO
Acrisol háplico - Alisol háplico - Lixisol háplico	ACh-ALh-LXh	C
Acrisol háplico - Alisol háplico - Luvisol crómico	ACh-ALh-LVx	C
Arenosol háplico - Solonchak háplico	ARh-SCh	A
Cambisol dístrico - Acrisol háplico	CMd-ACh	C
Cambisol dístrico - Acrisol háplico - Lixisol háplico	CMd-ACh-LXh	C
Cambisol dístrico - Alisol háplico	CMd-ALh	C
Cambisol dístrico - Nitisol háplico	CMd-NTh	C
Cambisol éutríco - Phaeozem háplico	CMe-PHh	B
Cambisol éutríco - Vertisol éutríco	CMe-VRe	C

<i>DESCRIPCIÓN DE SUELOS</i>	<i>SIMBOLOGIA</i>	<i>GRUPO HIDROLOGICO</i>
Fluvisol éútrico - Gleysol éútrico	FLe-GLe	B
Fluvisol éútrico - Regosol éútrico	FLe-RGe	B
Gleysol dístrico - Cambisol dístrico	GLd-CMd	B
Gleysol dístrico - Histosol fíbrico	GLd-HSf	D
Gleysol dístrico - Lixisol háplico - Fluvisol dístrico	GLd-LXh-FLd	A
Leptosol dístrico - Afloramiento lítico	LPd-R	B
Leptosol dístrico - Andosol Umbrico - Afloramiento lítico	LPd-ANu-R	B
Leptosol dístrico - Andosol vítrico	LPd-ANz	B
Leptosol dístrico - Cambisol dístrico - Regosol dístrico	LPd-CMd-RGd	B
Leptosol dístrico - Regosol dístrico - Afloramiento lítico	LPd-RGd-R	B
Leptosol éútrico - Afloramiento lítico	LPe-R	B
Leptosol éútrico - Cambisol éútrico	LPe-CMe	C
Leptosol éútrico - Cambisol éútrico - Regosol éútrico	LPe-CMe-RGe	B
Leptosol éútrico - Kastanozem háplico - Afloramiento lítico	LPe-KSh-R	B
Leptosol éútrico - Regosol éútrico - Afloramiento lítico	LPe-RGe-R	B
Leptosol lítico - Afloramiento lítico	LPq-R	B
Lixisol háplico - Gleysol dístrico	LXh-GLd	B
Luvisol crómico - Cambisol éútrico	LVx-CMe	C
Regosol dístrico - Afloramiento lítico	RGd-R	B
Regosol dístrico - Cambisol dístrico	RGd-CMd	C
Regosol éútrico - Andosol móllico	RGe-ANm	C
Regosol éútrico - Calcisol háplico	RGe-CLh	C
Regosol éútrico - Cambisol éútrico	RGe-CMe	C
Solonchak háplico - Leptosol éútrico	SCh-LPe	A

- **Mapa de cobertura de suelo.**

Se procesó información del Gobierno Provincial del Azuay del estudio “Mapa de Cobertura Vegetal y Uso de Suelo de la provincia del Azuay” (Pacheco, Pomavilla, Orellana, López & Inga, 2017); para analizarlo y dividirlo de acuerdo a las características que se encuentran en la zona, en donde resalta la presencia de: cuerpo de agua, residencial, bosque y zona de agricultura.

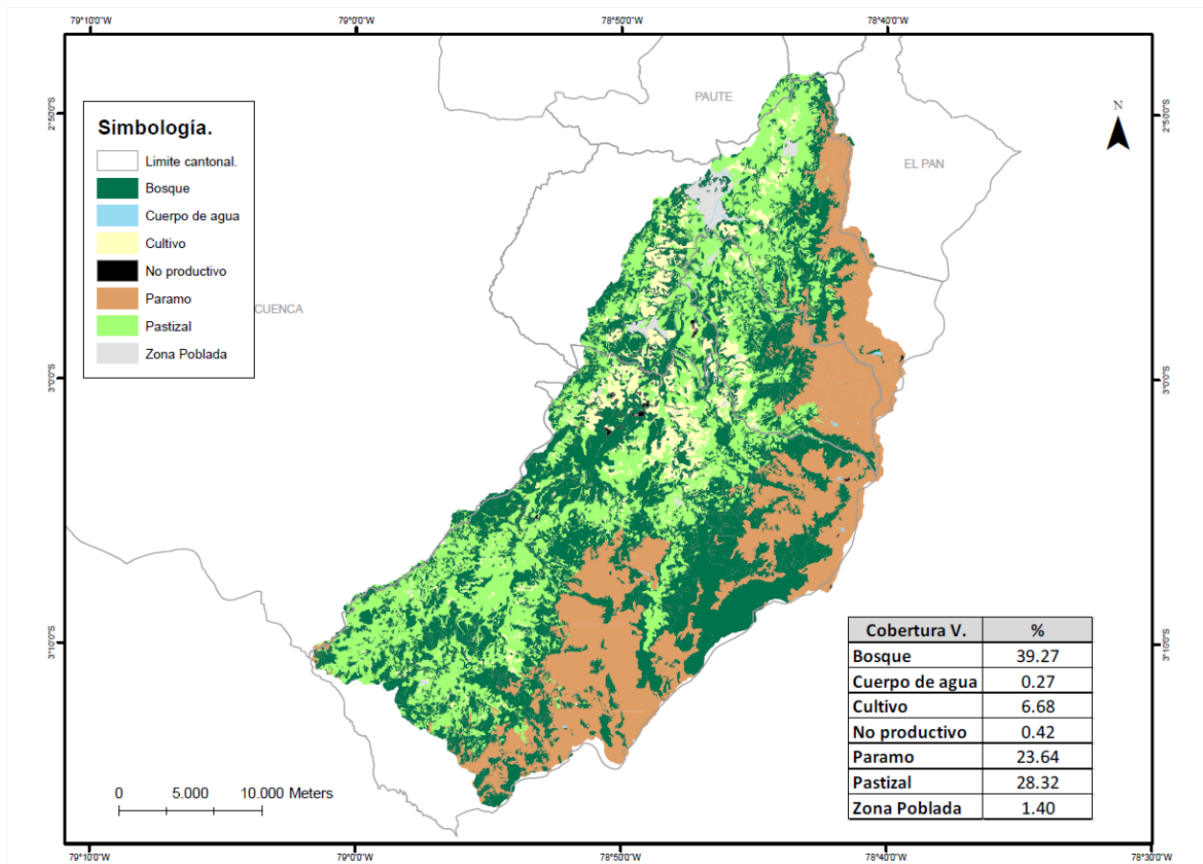


Figura 18. Mapa de cobertura de suelos.

Fuente. Elaboración propia con información del Gobierno Provincial del Azuay 2017. (Anexo 6).

Como se observa en la figura 18, en las zonas correspondientes a los cantones Gualaceo, Chordeleg y Sígsig predomina la actividad de agricultura, esto se encuentra reflejado en cultivos principalmente de maíz y pastizales los cuales son destinados para el ganado vacuno, una cobertura de igual forma representativa corresponde a los bosques de la zona con el 39.27%; finalmente la cobertura residencial representa las zonas pobladas en donde la más visible es la del cantón Gualaceo por su extensión.

- **Curva número para las subcuencas de la cuenca hidrográfica del río Santa Bárbara.**

El uso de la extensión HEC-GeoHMS y su herramienta CN grid es muy importante para encontrar el número de curva, la información ingresada de mapa de suelos, cobertura vegetal y MDE, con sus diferentes clasificaciones dan lugar a un archivo tipo ráster, el mismo es generado mediante interpolaciones.

TABLA 15: Valores de grupos hidrológicos para los diferentes usos de suelo.
Fuente. Hidrología Aplicada, Ven Te Chow.

Descripción del uso de la tierra		Grupo hidrológico del suelo			
		A	B	C	D
Tierra Cultivada	sin tratamiento de conservación.	72	81	88	91
	con tratamiento de conservación.	62	71	78	81
Pastizales	condiciones pobres	68	79	86	89
	condiciones óptimas	39	61	74	80
Vegas de ríos	condiciones óptimas	30	58	71	78
Bosques	troncos delgados, cubierta pobre, sin hierbas	45	66	77	83
	cubierta buena	25	55	70	77
Áreas abiertas (césped, parques, cementerios)	óptimas condiciones: cubierta de pasto en el 75% o más	39	61	74	80
	óptimas aceptables: cubierta de pasto en el 50% al 75%	49	69	79	84
Áreas comerciales de negocios (85% impermeables)		89	92	94	95
Distritos industriales (72% impermeables)		81	88	91	93
Residencial	Porcentaje promedio impermeable				
1/8 acre o menos	65	77	85	90	92
1/4 acre	38	61	75	83	87
1/3 acre	30	57	72	81	86
1/2 acre	25	54	70	80	85
1 acre	20	51	68	79	84
Parqueaderos pavimentados, techos, accesos, etc.		98	98	98	98
Calles y carreteras:					
Pavimentados con cunetas y alcantarillados		98	98	98	98
grava		76	85	89	91
tierra		72	82	87	89

Con la información obtenida se realiza el cálculo de la curva número ponderado para cada una de las subcuencas que conforma la cuenca hidrográfica del río Santa Bárbara mediante la siguiente operación:

$$CN(II) = \frac{CN(II) * Area_{CN(II)}}{Area_{CNTotal}} \quad (3.2)$$

Donde:

CN = curva número.

Area_{CN} = área correspondiente a cada número de curva (km²).

Area_{CNTotal} = sumatoria del área de estudio (km²).

Se obtuvo el siguiente mapa, este representa la curva número para la cuenca hidrográfica en estudio:

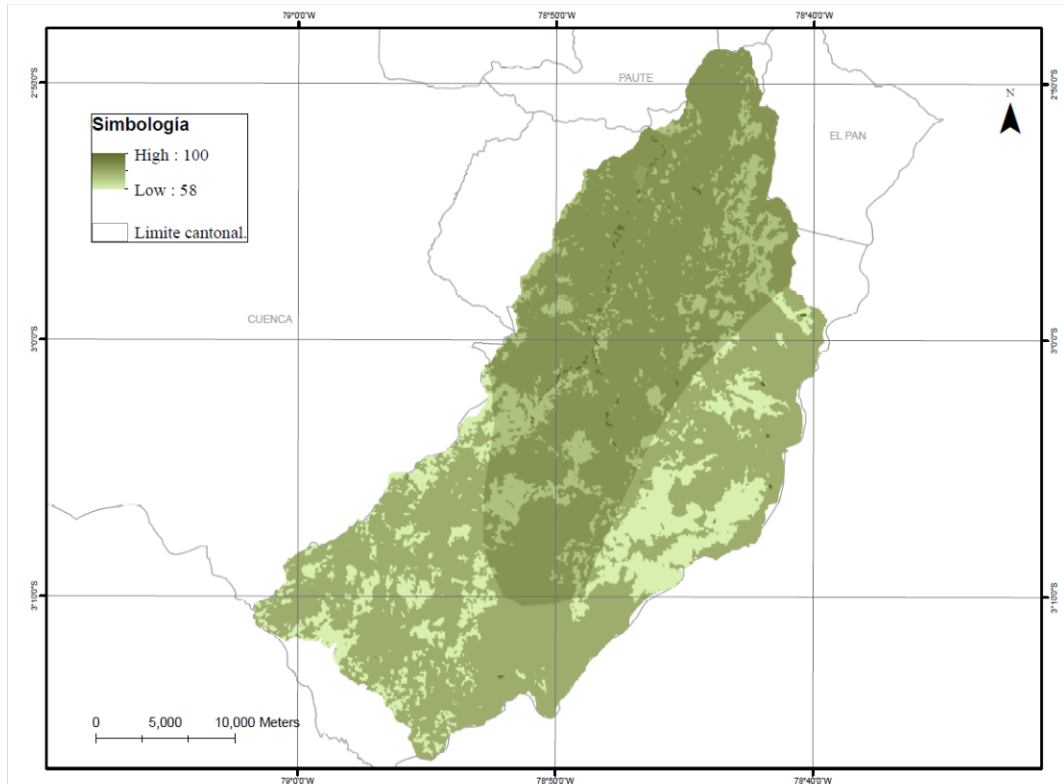


Figura 19. Ráster de curva número para la cuenca del río Santa Bárbara
Fuente. Elaboración propia. (Anexo 7)

Para condiciones de humedad en una modelación hidrológica se utiliza la curva número III (*CN III*), este representa condiciones de humedad (Chow,1964) y se lo encuentra mediante la siguiente fórmula:

$$CN(III) = \frac{23 * CN(II)}{10 + 0.13 * CN(II)} \quad (3.3)$$

TABLA 16: Curva número para las subcuencas del río Santa Bárbara.
Fuente. Elaboración propia

Subcuenca	CN (II)
Río Boladel	78
Río Gualaceo Alto	82
Río Gualaceo Bajo	83
Río Pamar	74
Río San Francisco	79
Río San José	83
Río Santa Bárbara	73
Río Zhio	77

Tomando en cuenta las recomendaciones por parte del autor Chow para la representación de las condiciones de humedad se obtiene que la curva número que representa zonas de permeabilidad alta es la de Santa Bárbara con un CN (II) de 73 y un CN (III) de 86; mientras que las zonas con características más cercanas a la impermeabilidad sería la subcuenca del río Gualaceo bajo con un CN (II) de 83 y un CN (III) de 92.

- **Tiempo de Concentración.**

El tiempo de concentración se calculó mediante la ecuación 2.4 que corresponde al método de Kirpich, obteniendo los siguientes resultados y teniendo como subcuenca con mayor concentración la correspondiente al río Pamar:

TABLA 17: Tiempo de concentración por el método de Kirpich.
Fuente. Elaboración propia.

Subcuenca	Longitud Cauce (km)	Longitud Cauce (m)	Pendiente Del Cauce (m/m)	Tiempo Concentración (horas)	Tiempo Concentración (minutos)
Río Boladel	7.73	7730	0.0450	1.058	63.452
Río Gualaceo Alto	8.80	8800	0.0062	2.506	150.389
Río Gualaceo Bajo	12.59	12590	0.0299	1.802	108.124
Río Pamar	38.79	38790	0.0133	5.855	351.29
Río San Francisco	15.27	15270	0.0595	1.604	96.25
Río San José	3.66	3660	0.0803	0.476	28.55
Río Santa Bárbara	18.12	18120	0.0257	2.528	151.702
Río Zhio	16.28	16280	0.0337	2.098	125.855

De igual forma, a través de la ecuación 2.5 se obtiene el tiempo de concentración a través del método SCS; información que será utilizada para el desarrollo del modelo debido a que la metodología seleccionada en el HEC-HMS está basada en el SCS.

El método SCS basa el estudio de una cuenca hidrográfica a través de la curva número de la misma y de las propiedades que generan escorrentía en la misma: uso del suelo, tratamiento de suelo y tipo hidrológico de suelo, obteniendo de igual forma la subcuenca con mayor tiempo de concentración a la correspondiente al río Pamar.

TABLA 18: Tiempo de concentración por el método SCS.
Fuente. Elaboración propia.

Subcuenca	Pendiente de la Subcuenca	Longitud del cauce principal (km)	Tiempo Concentración (min)
Río Boladel	24.924	7.73	87.724
Río Gualaceo Alto	31.356	8.80	76.759
Río Gualaceo Bajo	27.262	12.59	105.956
Río Pamar	29.144	38.79	331.233
Río San Francisco	37.321	15.27	122.046

Subcuenca	Pendiente de la Subcuenca	Longitud del cauce principal (km)	Tiempo Concentración (min)
Río San José	27.239	3.66	39.787
Río Santa Bárbara	42.246	18.12	154.618
Río Zhio	41.907	16.28	126.572

La metodología aplicada a lo largo del estudio se basa en el método SCS; para el tiempo de concentración se ha realizado la comparación entre esta metodología y la de Kirpich; en donde según el manejo de las variables el método SCS obtuvo para la cuenca río Pamar 331.23 min comparado con los 351.29 min de Kirpich; por otro lado para la subcuenca del río San José se obtuvo con el SCS 39.78 min y Kirpich 28.55 min; valores correspondientes tanto para el tiempo de concentración mayor y menor en la zona de estudio; si bien estos valores no son similares mantienen una relación y concuerdan entre sí.

- **Tiempo de retardo (Lag time).**

A partir de las tablas 16 y 17 se calcula el tiempo de retardo para cada subcuenca, este corresponde al 60% del tiempo de concentración de cada uno de los métodos; dato requerido en el software HEC-HMS.

TABLA 19: Tiempo de retardo por el método Kirpich.
Fuente. Elaboración propia.

Subcuenca	Tiempo Concentración (min)	Tiempo de Retardo (min)
Río Boladel	63.452	38.071
Río Gualaceo Alto	150.389	90.233
Río Gualaceo Bajo	108.124	64.874
Río Pamar	351.29	210.774
Río San Francisco	96.25	57.75
Río San José	28.55	17.13
Río Santa Bárbara	151.702	91.021
Río Zhio	125.855	75.513

TABLA 20: Tiempo de retardo por el método SCS.
Fuente. Elaboración propia.

Subcuenca	Tiempo Concentración (min)	Tiempo de Retardo (min)
Río Boladel	87.724	52.635
Río Gualaceo Alto	76.759	46.055
Río Gualaceo Bajo	105.956	63.574
Río Pamar	331.233	198.740
Río San Francisco	122.046	73.227
Río San José	39.787	23.872
Río Santa Bárbara	154.618	92.771
Río Zhio	126.572	75.943

Observando las tablas 18 y 19, además de asociar esta información con el tiempo de concentración, el tiempo de retardo según el método SCS para la cuenca río Pamar es 198.74 min comparado con los 210.77 min de Kirpich; por otro lado, para la subcuenca del río San José se obtuvo con el SCS 23.87 min y Kirpich 17.13 min valores mayores y menores en la zona de estudio y que mantienen concordancia entre sí.

3.3.2. Modelo meteorológico (Meteorologic Model)

En esta sección se define la precipitación que se registra en la zona de estudio, de igual forma la metodología y los métodos que se seleccionan para la simulación en el software HEC-HMS corresponde a la cantidad de información que se tiene sobre las mismas.

- **Polígonos de Thiessen.**

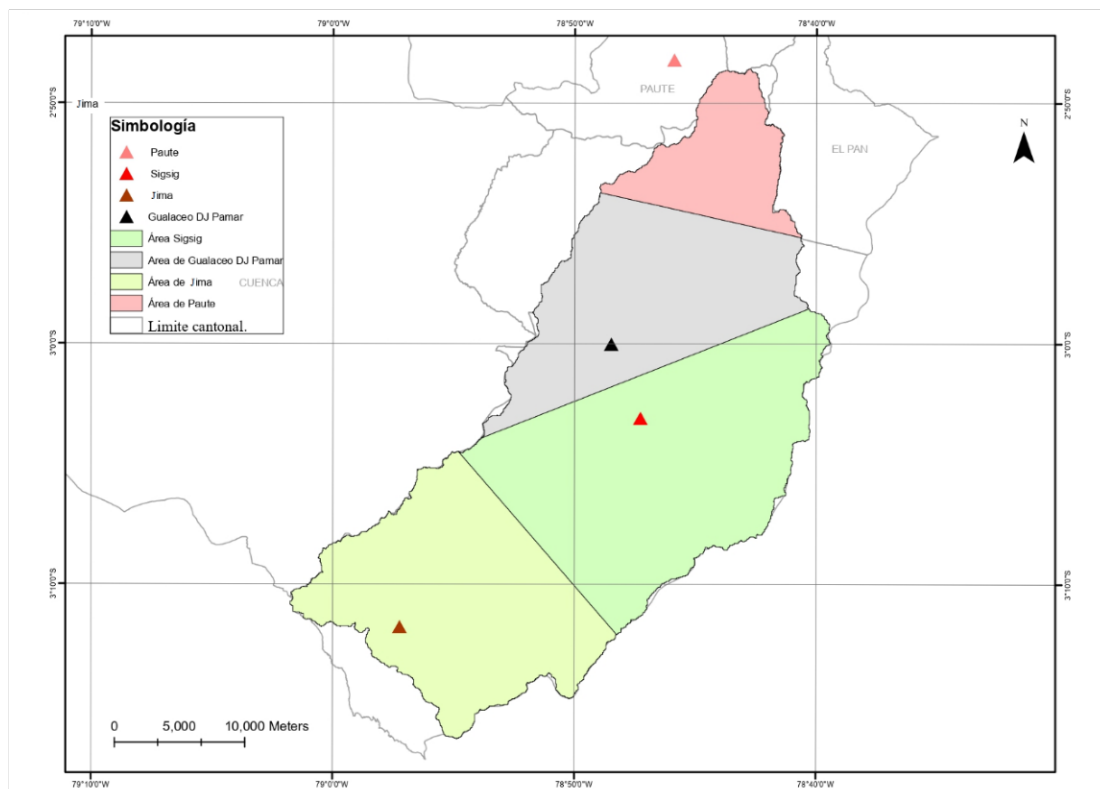


Figura 20. Ubicación de las estaciones en la cuenca del río Santa Bárbara.
Fuente. Elaboración propia. (Anexo 8)

Para realizar el estudio de la precipitación se aplicó el método de Thiessen como se explica en la ecuación 2.1, la misma permite encontrar el promedio de las áreas de influencia para cada una de las estaciones que se encuentran dentro de la cuenca.

Para el modelo en estudio fueron tomadas en cuenta y se manejó la recopilación de datos de las siguientes estaciones:

TABLA 21: Estaciones que se encuentran en la cuenca del río Santa Bárbara.
Fuente. Elaboración propia.

Nombre	Tipo
Gualaceo DJ Pamar - ETAPA EP	Limnimétrica + Pluviométrica
Jima - ETAPA EP	Pluviométrica
Paute- INHAMI	Pluviométrica
Sígsig - INHAMI	Pluviométrica

La falta de información por parte del INAMHI y ETAPA EP, además de la limitación al acceso de datos y mantenimiento de las estaciones ha permitido representar el modelo con estas 4 estaciones.

TABLA 22: Porcentaje de áreas con el método de polígonos de Thiessen.
Fuente. Elaboración propia.

Subcuenca	Área (km²)	Gualaceo %	Paute %	Sígsig %	Jima %
<i>Río Boladel</i>	84.90	55.47	0.00	0.00	44.53
<i>Río Gualaceo Alto</i>	47.55	100.00	0.00	0.00	0.00
<i>Río Gualaceo Bajo</i>	83.52	79.60	20.39	0.00	0.00
<i>Río Pamar</i>	335.96	11.69	0.00	18.28	70.03
<i>Río San Francisco</i>	80.78	45.58	30.89	23.54	0.00
<i>Río San José</i>	51.17	0.00	100.00	0.00	0.00
<i>Río Santa Bárbara</i>	165.66	4.53	0.00	95.47	0.00
<i>Río Zhio</i>	102.40	34.35	0.00	65.65	0.00

Como se observa en la tabla 21, el porcentaje corresponde a las cuatro estaciones presentes en la zona de estudio; la suma de estas comprende el 100%, es decir la totalidad de la cobertura en cada una de las subcuencas en las que tiene alcance estas estaciones.

- **Recopilación de datos de precipitación con lectura cada 24 horas.**

La información recopilada para el estudio corresponde al periodo de tiempo desde el 2000 hasta el 2015 de las estaciones mencionadas en la tabla 20, los datos faltantes en esta recopilación se completaron a través del software R Studio y su paquete CLIMATOL, paquete que ayuda en la homogenización, control de calidad y relleno de datos ausentes de las series climatológicas, librería muy amigable que permite el manejo de este tipo de información en volúmenes grandes.

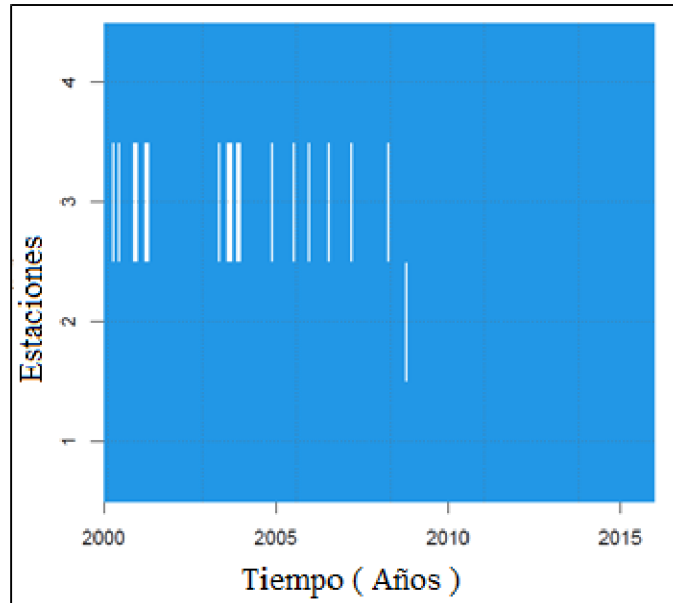


Figura 21. Disponibilidad de datos de precipitación en el software R Studio.
Fuente. Elaboración propia.

La figura 21 refleja la disponibilidad de datos, siendo los espacios en blanco los datos faltantes para el proceso; se debe tomar en cuenta que, en el caso de existir un porcentaje alto en la ausencia de datos, se debería descartar la información de esa estación; en este proceso el software se encarga de realizar este control para tener en cuenta el grado de confiabilidad de la información en el proceso a realizar.

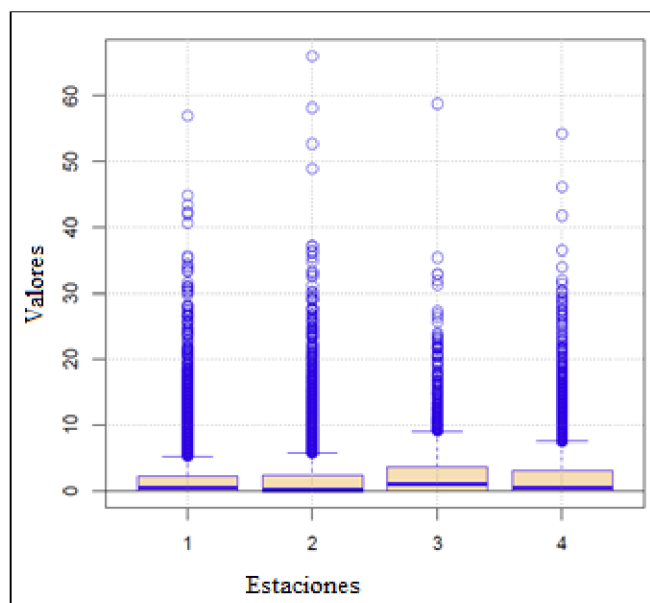


Figura 22. Diagrama de cajas en el software R Studio.
Fuente. Elaboración propia.

En la figura 22 se representa la distribución de las lecturas en cada estación, esta distribución da una idea sobre la dispersión de datos; en el estudio se puede observar que los datos tienen una relación muy grande y son coherentes entre sí en las cuatro estaciones.

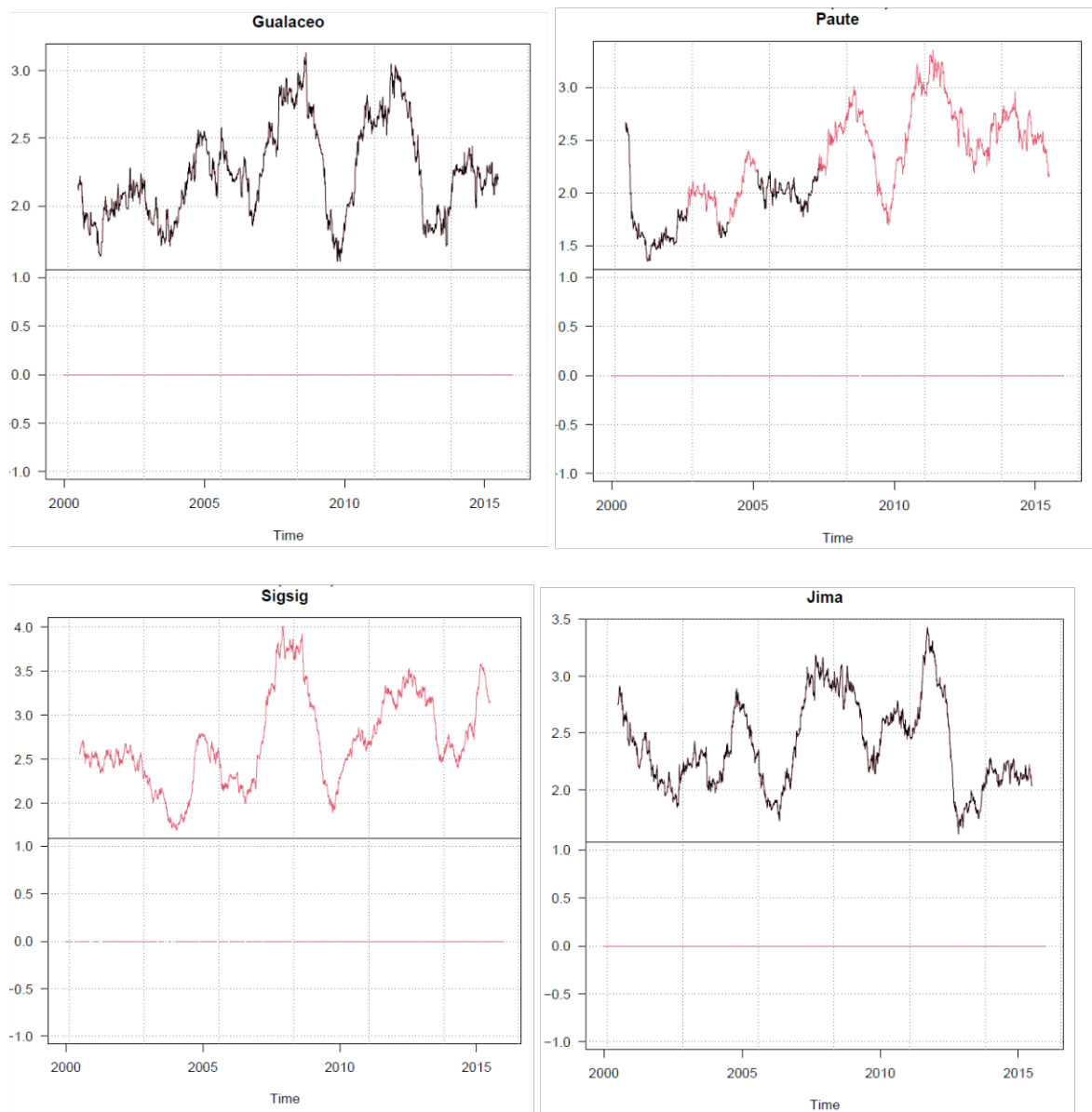
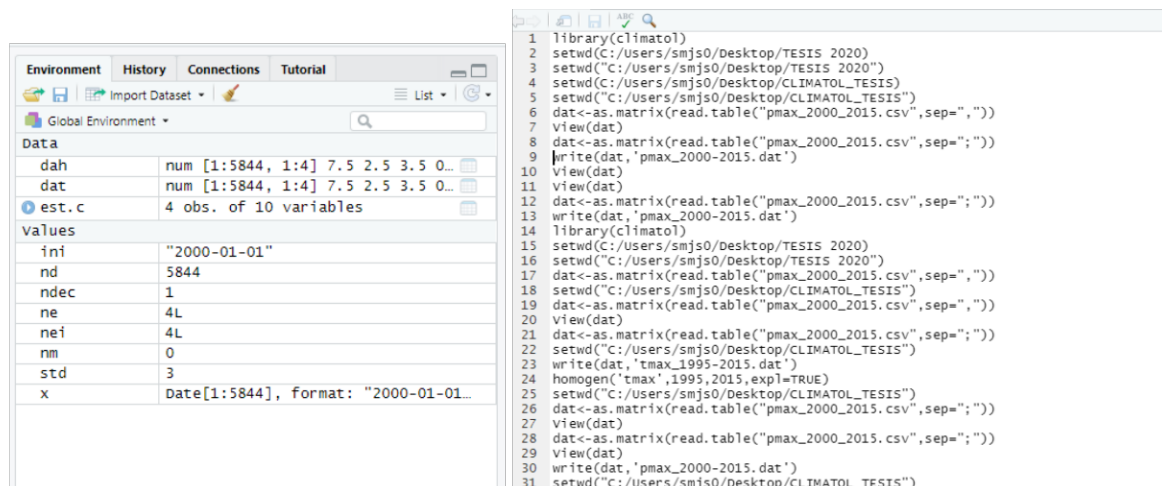


Figura 23. Reconstrucción de forma gráfica las lecturas de precipitación en el software R Studio.
Fuente. Elaboración propia.

Finalmente, se obtiene de forma gráfica y en un documento de formato Excel la reconstrucción de la serie completa, el documento contiene la información numérica, indispensable para continuar con el proceso de la modelación hidrológica; en este proceso el software R Studio maneja el método de Paulhus y Kohler estudiado en 1952 para rellenar precipitaciones diarias mediante promedios que se encuentran a su alrededor (Guijarro, 2018).



St_2000-2015.dat	27/01/2021 16:54	Archivo DAT	81 KB
St_2000-2015.est	27/01/2021 16:22	Archivo EST	1 KB
St_2000-2015.pdf	27/01/2021 16:54	Adobe Acrobat D...	615 KB
St_2000-2015.rda	27/01/2021 16:54	Archivo RDA	69 KB
St_2000-2015.txt	27/01/2021 16:54	Documento de tex...	3 KB
St_2000-2015_brk.csv	27/01/2021 16:54	Archivo de valores...	1 KB
St_2000-2015_flags.csv	27/01/2021 19:11	Archivo de valores...	115 KB
St_2000-2015_out.csv	27/01/2021 16:54	Archivo de valores...	1 KB
St_2000-2015_series.csv	27/01/2021 19:11	Archivo de valores...	141 KB

Figura 24. Desarrollo en el software R Studio de las lecturas de precipitación.
Fuente. Elaboración propia. (Codificación en Anexo 9)

- **Registro histórico de precipitación máxima 24 horas.**

La precipitación máxima observada cada mes a lo largo de los 15 años de estudio en cada una de las estaciones son los siguientes:

TABLA 23: Precipitación máxima 24 horas en la estación Gualaceo DJ Pamar (mm)
Fuente. Elaboración propia.

	Ene	Feb	Mar	Abril	May	Jun	Jul	Ago	Sept	Oct	Nov	Dic
2000	9.00	23.70	16.50	10.00	17.70	16.00	4.50	11.00	26.60	3.50	4.00	34.00
2001	11.60	15.40	26.60	12.30	10.60	24.00	6.70	6.70	24.80	28.20	33.50	20.10
2002	3.70	14.40	23.80	26.40	27.40	13.60	14.90	6.50	2.09	14.39	18.00	35.59
2003	7.60	13.50	21.00	18.60	10.20	21.29	13.80	3.09	12.19	27.60	13.19	13.69
2004	20.70	44.90	10.10	30.40	6.10	17.90	17.80	4.80	17.20	33.30	16.90	21.80
2005	17.50	15.00	19.20	18.30	9.00	17.00	4.50	7.30	5.00	18.50	4.50	16.40
2006	13.00	25.70	28.00	16.70	10.50	18.40	5.20	5.50	11.50	14.00	34.50	26.50
2007	20.50	11.50	11.60	23.00	21.10	16.70	6.40	18.20	11.00	21.80	22.50	8.00
2008	10.00	35.30	17.50	18.30	22.00	17.00	4.70	6.50	14.00	40.70	28.00	8.00
2009	29.80	19.40	31.00	18.50	17.50	6.50	9.50	3.70	3.00	15.00	10.10	21.00
2010	5.50	15.10	12.50	30.20	17.00	16.20	17.50	8.00	6.80	10.50	28.10	16.80
2011	31.60	9.00	30.80	30.40	14.40	13.50	20.70	6.50	13.40	12.50	20.00	15.80
2012	17.00	31.00	25.90	27.00	14.00	10.50	10.00	8.00	3.00	16.50	14.00	20.50

	Ene	Feb	Mar	Abril	May	Jun	Jul	Ago	Sept	Oct	Nov	Dic
2013	21.50	21.00	12.50	6.00	15.00	17.00	10.50	8.50	12.00	24.50	7.00	27.00
2014	57.00	9.50	42.30	14.60	12.60	14.60	18.20	6.40	14.00	24.50	14.00	8.50
2015	20.50	9.00	43.40	9.50	10.50	13.40	18.60	7.00	7.40	24.00	42.00	25.50

TABLA 24: Precipitación máxima 24 horas en la estación Paute (mm).

Fuente. Elaboración propia.

	Ene	Feb	Mar	Abril	May	Jun	Jul	Ago	Sept	Oct	Nov	Dic
2000	21.80	33.20	10.00	18.50	18.10	21.00	2.30	10.4	15.00	4.20	15.20	8,00
2001	12.00	8.00	15.50	15.00	5.80	16.50	6.60	7.30	16,00	8.10	17.20	11,00
2002	10.60	9.20	17.0	24.70	19.20	11.00	12.80	7.40	7.40	14.50	27.60	13.80
2003	11.40	37.20	34.80	12.60	11.80	10.00	9.50	3.60	9,00	15.20	15.50	9,00
2004	11.60	17.10	12.00	26.00	10.30	14.90	20.50	3.20	25.80	15.20	27.30	26.40
2005	8.50	21.00	21.00	22.50	4.50	11,00	6.70	7.80	5,00	15.40	16.20	23.30
2006	12.00	12.40	23.90	24.00	13.50	19,00	3.40	12,00	14.30	9.50	21.20	16.60
2007	13.50	3.70	25.90	22.30	14.90	13.4	7,00	11.60	10.70	17.30	29.60	21.60
2008	11.40	29.1	17.20	17.60	24.50	21.5	6,00	6.70	15.20	29.70	35.50	36.20
2009	21.00	13.10	27.70	22.00	17.50	7.50	4.30	7,00	4,00	20,00	8.60	24.80
2010	16.20	10.50	9.30	23.60	16.40	29.30	24.50	14.30	8.10	16.50	20.40	33.30
2011	15.80	32.80	24.90	19.60	18.40	11.40	29.10	12.70	18.90	26.70	16.40	37.10
2012	20.50	23.40	17.10	18.00	8.70	10.50	6.50	7.80	6,00	72.70	24.10	15.20
2013	6.70	30.00	12.60	10.50	26.80	12.50	12.20	9.40	7.10	48.90	78.20	12.10
2014	16.70	8.50	22.00	11.90	19.60	18.50	13,00	9,00	14.70	25.60	17.60	18.10
2015	13.40	7.10	31.10	10.40	6.50	11.80	8.90	4.80	7.40	19.70	10.70	12.80

TABLA 25: Precipitación máxima 24 horas en la estación Sigsig (mm)

Fuente. Elaboración propia.

	Ene	Feb	Mar	Abril	May	Jun	Jul	Ago	Sept	Oct	Nov	Dic
2000	6.90	20.70	28.70	9.90	25.60	10.60	6.50	23.60	14.80	10.80	5.00	15.50
2001	10.30	10.40	12.70	12.60	10.60	17.10	10.00	6.20	12.50	12.00	9.70	14.80
2002	9.10	31.20	7.50	14.70	18.00	22.00	10.30	9.30	9.20	6.50	17.20	15.70
2003	5.00	8.40	21.10	6.70	10.20	13.90	8.60	3.80	12.00	6.20	7.30	9.30
2004	2.40	5.90	8.30	22.90	8.50	4.90	16.00	6.50	14.30	9.10	16.00	14.10
2005	12.00	13.40	15.50	13.20	14.70	6.30	4.90	5.10	3.10	22.80	7.90	11.30
2006	12.00	15.00	12.70	14.40	10.30	13.70	5.00	4.70	6.20	10.30	13.70	9.30
2007	9.50	14.20	14.10	21.80	14.90	17.70	12.10	16.60	11.90	26.30	19.60	9.90
2008	6.00	22.40	58.80	13.00	21.80	14.80	8.10	10.00	13.80	23.10	20.90	10.10
2009	17.20	10.50	12.60	10.60	7.30	9.00	5.40	4.60	2.50	10.30	7.40	9.90
2010	7.20	10.60	11.90	22.20	21.80	26.80	10.40	11.30	6.00	8.60	7.80	21.50
2011	5.50	6.40	9.20	11.90	12.80	10.20	15.20	6.10	16.40	10.60	13.00	12.50
2012	16.40	21.20	8.90	19.40	9.50	17.40	10.00	20.80	10.90	14.50	9.70	16.00
2013	35.40	11.20	7.20	10.60	15.00	13.00	10.00	6.80	14.10	15.30	21.70	4.80
2014	15.10	6.00	16.60	8.50	10.20	14.70	8.80	5.50	7.50	12.00	10.90	9.40
2015	9.70	13.80	31.90	4.10	9.40	32.90	16.20	14.70	10.70	8.60	12.50	4.50

TABLA 26: Precipitación máxima 24 horas en la estación Jima (mm).

Fuente. Elaboración propia.

	Ene	Feb	Mar	Abril	May	Jun	Jul	Ago	Sept	Oct	Nov	Dic
2000	17.00	21.50	30.40	20.10	46.20	17.80	4.40	27.30	18.20	2.20	5.50	13.20
2001	18.70	28.90	19.60	23.60	8.90	22.70	8.90	8.10	16.30	9.80	13.00	21.20
2002	3.80	12.20	17.70	13.70	15.90	17.70	10.90	10.30	5.00	8.60	17.30	9.80
2003	6.20	10.70	54.20	21.60	15.60	15.70	11.80	6.90	19.90	16.20	9.70	17.90
2004	13.20	6.30	10.90	41.80	15.10	21.50	17.10	8.70	11.90	15.80	24.60	21.90
2005	7.50	19.00	19.50	22.80	14.00	10.50	10.00	5.40	9.50	16.50	9.50	5.50
2006	12.00	8.80	15.50	11.50	10.50	14.70	8.30	5.50	7.00	8.70	21.00	17.90
2007	29.40	32.00	13.00	26.50	26.60	26.70	11.50	27.50	19.00	16.40	28.10	18.00
2008	7.50	28.50	9.00	19.00	16.00	14.00	8.50	8.30	10.50	14.50	31.40	9.50
2009	17.70	6.50	22.30	21.70	25.50	11.60	13.50	6.00	8.80	18.50	14.00	19.00
2010	13.00	13.50	15.00	34.00	27.00	30.30	19.50	6.00	9.40	7.20	11.50	17.00
2011	5.00	9.50	23.40	25.10	21.70	18.70	17.20	6.00	15.00	12.00	20.50	36.50
2012	30.00	29.30	19.00	21.00	14.50	12.80	5.30	9.10	5.00	10.50	9.50	12.50
2013	28.50	0.00	10.50	6.20	15.00	14.50	14.00	7.50	23.00	16.60	8.00	7.50
2014	7.50	6.20	21.50	11.50	19.20	15.30	11.20	6.50	6.60	27.50	9.00	9.00
2015	11.50	4.50	25.00	15.50	9.50	11.40	7.50	4.00	25.50	14.00	16.30	10.00

Las cuatro tablas descritas anteriormente muestran el valor máximo de precipitación registrado en el mes y el año correspondiente, información que servirá para realizar el análisis de precipitación y calcular la tormenta de diseño.

- **Corrección de datos de precipitación máxima.**

Para el manejo de datos por parte de estaciones que registran información una vez al día, la Organización Meteorológica Mundial (OMM) recomienda utilizar un factor de corrección de 1.13.

Aplicando este coeficiente de corrección se obtuvo:

TABLA 27: Precipitación máxima corregida en la estación Gualaceo DJ Pamar.

Fuente. Elaboración propia.

Año	Registro (mm)	Registro Corregido (mm)
2000	34.00	38.42
2001	33.50	37.86
2002	35.59	40.22
2003	27.60	31.19
2004	44.90	50.74
2005	19.20	21.70
2006	34.50	38.99
2007	23.00	25.99
2008	40.70	45.99
2009	31.00	35.03

Año	Registro (mm)	Registro Corregido (mm)
2010	30.20	34.13
2011	31.60	35.71
2012	31.00	35.03
2013	27.00	30.51
2014	57.00	64.41
2015	43.40	49.04

Para la estación anterior el valor más alto de precipitación corresponde al año 2014 con un registro de 64.41 mm

TABLA 28: Precipitación máxima corregida en la estación Paute.
Fuente. Elaboración propia.

Año	Registro (mm)	Registro Corregido (mm)
2000	33.20	37.52
2001	17.20	19.44
2002	27.60	31.19
2003	37.20	42.04
2004	27.30	30.85
2005	23.30	26.33
2006	24.00	27.12
2007	29.60	33.45
2008	36.20	40.91
2009	27.70	31.30
2010	33.30	37.63
2011	37.10	41.92
2012	72.70	82.15
2013	78.20	88.37
2014	25.60	28.93
2015	31.10	35.14

Para la estación anterior el valor más alto de precipitación corresponde al año 2013 con un registro de 88.37 mm

TABLA 29: Precipitación máxima corregida en la estación Sigsig.
Fuente. Elaboración propia.

Año	Registro (mm)	Registro Corregido (mm)
2000	28.70	32.43
2001	17.10	19.32
2002	31.20	35.26
2003	21.10	23.84
2004	22.90	25.88
2005	22.80	25.76
2006	15.00	16.95
2007	26.30	29.72
2008	58.80	66.44
2009	17.20	19.44

Año	Registro (mm)	Registro Corregido (mm)
2010	26.80	30.28
2011	16.40	18.53
2012	21.20	23.96
2013	35.40	40.00
2014	16.60	18.76
2015	32.90	37.18

Para la estación anterior el valor más alto de precipitación corresponde al año 2008 con un registro de 66.44 mm.

TABLA 30: Precipitación máxima corregida en la estación Jima.

Fuente. Elaboración propia.

Año	Registro (mm)	Registro Corregido (mm)
2000	46.20	52.21
2001	28.90	32.66
2002	17.70	20.00
2003	54.20	61.25
2004	41.80	47.23
2005	22.80	25.76
2006	21.00	23.73
2007	32.00	36.16
2008	31.40	35.48
2009	25.50	28.82
2010	34.00	38.42
2011	36.50	41.25
2012	30.00	33.90
2013	28.50	32.21
2014	27.50	31.08
2015	25.50	28.82

Para la estación anterior el valor más alto de precipitación corresponde al año 2003 con un registro de 61.25 mm.

- **Distribución estadística de datos de precipitación.**

En el tratamiento de la serie de datos recopilados se realizó la distribución de probabilidad: Normal, Log Normal y Gumbel; tanto la distribución de probabilidad como la prueba de bondad se desarrolló con ayuda del software de acceso libre Hidroesta 2 (Bejar, 2012), programa especializado en cálculos hidrológicos.

TABLA 31: Distribución de probabilidad en la estación Gualaceo DJ Pamar.

Fuente. Elaboración propia.

m	PP MAX 24 HRS (mm)	Función Teórica (m / (N+1))	NORMAL	LOG NORMAL	GUMBEL
1	64.41	0.9412	0.9941	0.9817	0.978
2	50.74	0.8824	0.8833	0.8812	0.8854
3	49.04	0.8235	0.8478	0.8535	0.8604
4	45.99	0.7647	0.7678	0.7901	0.8028
5	40.22	0.7059	0.5686	0.6165	0.6378
6	38.99	0.6471	0.5214	0.5707	0.5921
7	38.42	0.5882	0.4994	0.5486	0.5698
8	37.86	0.5294	0.4778	0.5264	0.5472
9	35.71	0.4706	0.3959	0.4378	0.4549
10	35.03	0.3529	0.3708	0.4092	0.4244
11	35.03	0.4118	0.3708	0.4092	0.4244
12	34.13	0.2941	0.3383	0.3712	0.3835
13	31.19	0.2353	0.2414	0.2509	0.2513
14	30.51	0.1765	0.2214	0.2249	0.2225
15	25.99	0.1176	0.114	0.0859	0.0717
16	21.70	0.0588	0.0525	0.02	0.0112

TABLA 32: Distribución de probabilidad en la estación Paute.

Fuente. Elaboración propia.

m	PP MAX 24 HRS (mm)	Función Teórica (m / (N+1))	NORMAL	LOG NORMAL	GUMBEL
1	88.37	0.9412	0.9951	0.9892	0.9802
2	82.15	0.8824	0.9879	0.9817	0.9687
3	42.04	0.8235	0.5506	0.6389	0.6196
4	41.92	0.7647	0.548	0.6362	0.6172
5	40.91	0.7059	0.5268	0.6122	0.5965
6	37.63	0.6471	0.4552	0.5274	0.5247
7	37.52	0.5882	0.4552	0.5243	0.5222
8	35.14	0.5294	0.4057	0.4567	0.4661
9	33.45	0.4706	0.3713	0.4066	0.425
10	31.3	0.4118	0.3291	0.3415	0.3717
11	31.19	0.3529	0.327	0.3382	0.369
12	30.85	0.2941	0.3205	0.3279	0.3605
13	28.93	0.2353	0.285	0.2702	0.313
14	27.12	0.1765	0.2534	0.2178	0.269
15	26.33	0.1176	0.2401	0.196	0.2503
16	19.44	0.0588	0.1421	0.0503	0.11

TABLA 33: Distribución de probabilidad en la estación Sigsig.

Fuente. Elaboración propia.

m	PP MAX 24 HRS (mm)	Función Teórica (m / (N+1))	NORMAL	LOG NORMAL	GUMBEL
1	66.44	0.9989	0.9953	0.9936	0.9889
2	40	0.8153	0.9874	0.8601	0.8373
3	37.18	0.7478	0.5495	0.8098	0.7878
4	35.26	0.6954	0.5470	0.7673	0.7472
5	32.43	0.6105	0.5258	0.6905	0.6759

m	PP MAX 24 HRS (mm)	Función Teórica (m / (N+1))	NORMAL	LOG NORMAL	GUMBEL
6	30.28	0.5420	0.5258	0.6204	0.6124
7	29.72	0.5290	0.4546	0.6004	0.5946
8	25.88	0.4002	0.4054	0.4482	0.4600
9	25.76	0.4706	0.3964	0.4431	0.4555
10	23.96	0.4118	0.3411	0.3652	0.3871
11	23.84	0.3529	0.3376	0.3599	0.3825
12	19.44	0.2941	0.2184	0.1772	0.2183
13	19.32	0.2353	0.2155	0.1728	0.2141
14	18.76	0.1765	0.2024	0.1527	0.1951
15	18.53	0.1176	0.1972	0.1447	0.1875
16	16.95	0.0588	0.1634	0.0956	0.1388

TABLA 34: Distribución de probabilidad en la estación Jima.
Fuente. Elaboración propia.

m	PP MAX 24 HRS (mm)	Función Teórica (m / (N+1))	NORMAL	LOG NORMAL	GUMBEL
1	61.25	0.9989	0.9917	0.9783	0.9743
2	52.21	0.8153	0.9397	0.9289	0.9262
3	47.23	0.7478	0.8617	0.8688	0.8701
4	41.25	0.6954	0.7021	0.7418	0.7525
5	38.42	0.6105	0.6051	0.6575	0.6711
6	36.16	0.5420	0.5223	0.5776	0.5929
7	35.48	0.5290	0.4970	0.5518	0.5673
8	33.9	0.4002	0.4385	0.4890	0.5042
9	32.66	0.4706	0.3934	0.4378	0.4519
10	32.21	0.4118	0.3774	0.4189	0.4325
11	31.08	0.3529	0.3381	0.3713	0.3831
12	28.82	0.2941	0.2648	0.2777	0.2845
13	28.82	0.2353	0.2648	0.2777	0.2845
14	25.76	0.1765	0.1804	0.1639	0.1632
15	23.73	0.1176	0.1350	0.1034	0.0992
16	20.00	0.0588	0.0734	0.0318	0.0271

Como se muestra en las cuatro tablas anteriores de distribución de probabilidades, la metodología Normal, Log Normal y Gumbel permite la evaluación de eventos extremos debido a que su estimación depende de los caudales máximos anuales que han ocurrido en la cuenca.

- **Prueba de Bondad de Kolmogorov – Smirnov.**

Para la prueba de bondad en el proceso de distribución de probabilidad, se aplicó el método de Kolmogórov-Smirnov; se obtiene un valor **d** como se explica en la ecuación 9 para cada una de las distribuciones realizadas.

TABLA 35: Prueba de bondad de la estación Gualaceo DJ Pamar.
Fuente. Elaboración propia.

m	PP MAX 24 HRS (mm)	NORMAL	LOG NORMAL	GUMBEL
1	64.41	0.0529	0.0405	0.0368
2	50.74	0.001	0.0011	0.003
3	49.04	0.0243	0.0299	0.0369
4	45.99	0.0031	0.0254	0.0381
5	40.22	0.1373	0.0893	0.0681
6	38.99	0.1256	0.0764	0.0549
7	38.42	0.0888	0.0397	0.0185
8	37.86	0.0516	0.003	0.0177
9	35.71	0.0747	0.0328	0.0157
10	35.03	0.0178	0.0562	0.0715
11	35.03	0.041	0.0026	0.0126
12	34.13	0.0442	0.077	0.0894
13	31.19	0.0061	0.0156	0.016
14	30.51	0.0449	0.0484	0.0461
15	25.99	0.0036	0.0317	0.0456
16	21.7	0.0063	0.0388	0.0476
d		0.1373	0.0893	0.0894

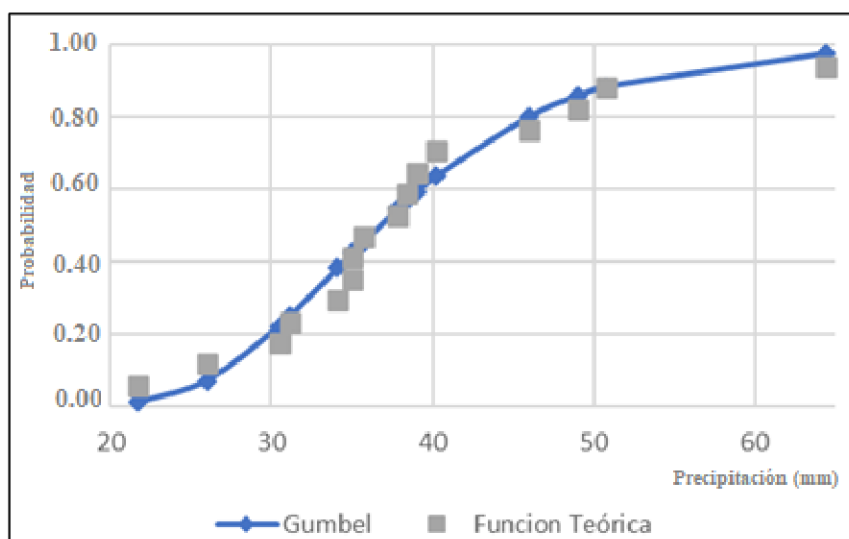


Figura 25. Representación de la distribución Gumbel en la estación Gualaceo DJ Pamar.

Fuente. Elaboración propia.

Como análisis estadístico para la estación Gualaceo DJ Pamar se dice que el delta teórico 0.0894, es menor que el delta tabular 0.340; es decir que los datos se ajustan a la distribución Gumbel, con un nivel de significancia del 5%.

TABLA 36: Prueba de bondad de la estación Paute.
Fuente. Elaboración propia.

m	PP MAX 24 HRS (mm)	NORMAL	LOG NORMAL	GUMBEL
1	88.37	0.0539	0.048	0.039
2	82.15	0.1055	0.0994	0.0864
3	42.04	0.273	0.1846	0.2039
4	41.92	0.2167	0.1286	0.1475
5	40.91	0.1791	0.0937	0.1094
6	37.63	0.1896	0.1197	0.1224
7	37.52	0.133	0.0639	0.0661
8	35.14	0.1238	0.0727	0.0633
9	33.45	0.0993	0.064	0.0456
10	31.30	0.0826	0.0702	0.04
11	31.19	0.0259	0.0148	0.016
12	30.85	0.0264	0.0338	0.0664
13	28.93	0.0497	0.0349	0.0777
14	27.12	0.0769	0.0414	0.0926
15	26.33	0.1225	0.0783	0.1327
16	19.44	0.0832	0.0085	0.0512
d		0.273	0.1846	0.2039

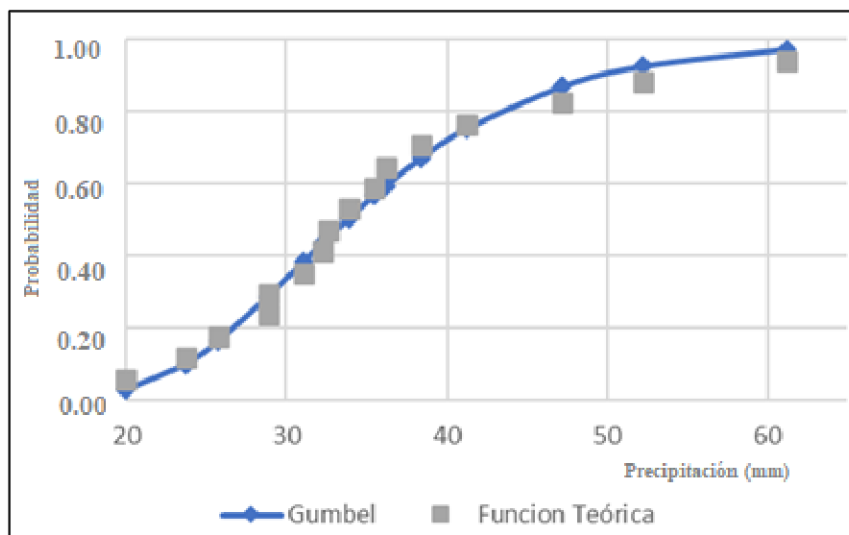


Figura 26. Representación de la distribución Gumbel en la estación Paute.

Fuente. Elaboración propia.

Como análisis estadístico para la estación Paute se dice que el delta teórico 0.2039, es menor que el delta tabular 0.340; es decir los datos se ajustan a la distribución Gumbel, con un nivel de significancia del 5%.

TABLA 37: Prueba de bondad de la estación Sígsig.
Fuente. Elaboración propia.

m	PP MAX 24 HRS (mm)	NORMAL	LOG NORMAL	GUMBEL
1	66.44	0.0577	0.0525	0.0144
2	40.00	0.0671	0.0223	0.0451
3	37.18	0.0757	0.0137	0.0357
4	35.26	0.0693	0.0026	0.0175
5	32.43	0.0953	0.0154	0.03
6	30.28	0.105	0.0267	0.0347
7	29.72	0.0643	0.0122	0.0063
8	25.88	0.1292	0.0812	0.0694
9	25.76	0.0742	0.0275	0.0151
10	23.96	0.0706	0.0466	0.0247
11	23.84	0.0154	0.007	0.0295
12	19.44	0.0757	0.1169	0.0759
13	19.32	0.0198	0.0625	0.0212
14	18.76	0.026	0.0238	0.0186
15	18.53	0.0795	0.0271	0.0699
16	16.95	0.1046	0.0367	0.0800
d		0.1292	0.1169	0.0800

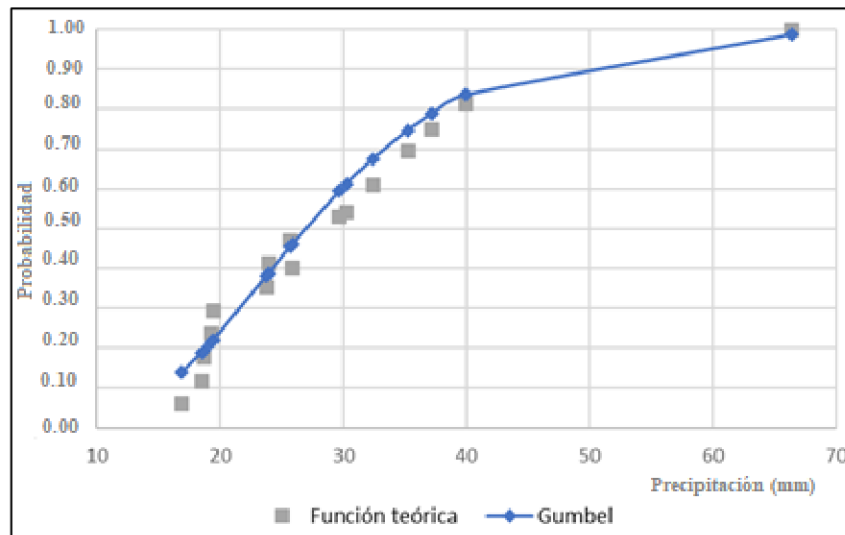


Figura 27. Representación de la distribución Gumbel en la estación Sígsig.
Fuente. Elaboración propia.

Como análisis estadístico para la estación Sígsig se dice que el delta teórico 0.0800, es menor que el delta tabular 0.340; es decir los datos se ajustan a la distribución Gumbel, con un nivel de significancia del 5%.

TABLA 38: Prueba de bondad de la estación Jima.

Fuente. Elaboración propia.

m	PP MAX 24 HRS (mm)	NORMAL	LOG NORMAL	GUMBEL
1	61.25	0.0505	0.0372	0.0331
2	52.21	0.0573	0.0466	0.0438
3	47.23	0.0381	0.0452	0.0466
4	41.25	0.0626	0.0220	0.0122
5	38.42	0.1008	0.0483	0.0348
6	36.16	0.1248	0.0694	0.0541
7	35.48	0.0913	0.0365	0.0210
8	33.90	0.0910	0.0404	0.0252
9	32.66	0.0772	0.0328	0.0187
10	32.21	0.0344	0.0071	0.0207
11	31.08	0.0149	0.0184	0.0302
12	28.82	0.0293	0.0164	0.0097
13	28.82	0.0295	0.0424	0.0492
14	25.76	0.0039	0.0125	0.0132
15	23.73	0.0174	0.0143	0.0184
16	20.00	0.0146	0.0270	0.0318
d		0.1248	0.0694	0.0541

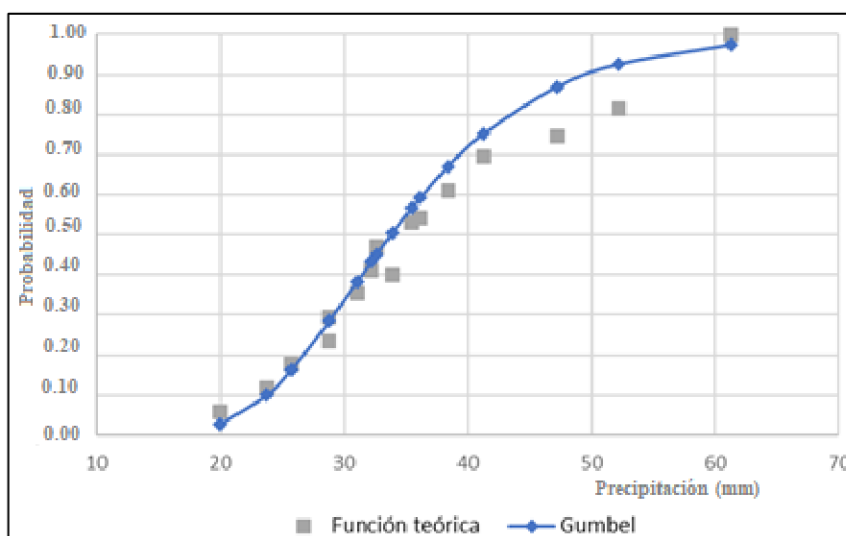


Figura 28. Representación de la distribución Gumbel en la estación Jima.

Fuente. Elaboración propia.

Como análisis estadístico para la estación Jima se dice que el delta teórico 0.0541, es menor que el delta tabular 0.3400, es decir los datos se ajustan a la distribución Gumbel, con un nivel de significancia del 5%

3.3.3. Precipitación e intensidad diaria para periodos de retorno.

Se desarrolla la precipitación e intensidad diaria correspondiente a cada uno de los periodos de retorno necesarios para el estudio.

- **Estación Gualaceo DJ Pamar.**

Para las estaciones en estudio se realiza el cálculo de los parámetros correspondientes a la distribución por el método de Gumbel, don encontramos la media aritmética, la desviación estándar y los coeficientes de acuerdo al número de datos que se tiene.

TABLA 39: Datos de entrada para la distribución de Gumbel en Gualaceo DJ Pamar.
Fuente. Elaboración propia.

Media aritmética (X)	34.012
Desviación Estándar (σ)	9.137
No. de datos	16
σ_y	1.029
u_y	0.515
α	8.879
u	29.439

TABLA 40: Cálculo de intensidad diaria para periodos de retorno en la estación Gualaceo DJ Pamar.
Fuente. Elaboración propia.

Periodo (t)	Cálculo Estadístico.		Precipitación	Precipitación Corregida (mm).	
Años	F(X)	P	X (mm)	PC= 1,13* X	IdTR (mm/h)
2	0,50	0,50	32,69	36,94	1,539
5	0,80	0,20	42,76	48,32	2,013
10	0,90	0,10	49,42	55,85	2,327
25	0,96	0,04	57,84	65,36	2,723
50	0,98	0,02	64,09	72,42	3,017
100	0,99	0,01	70,29	79,42	3,309

Para la estación Gualaceo DJ Pamar, la intensidad diaria correspondiente a un periodo de retorno de 2 años es de 1.539 mm/h, para un periodo de retorno de 50 años de 3.017 mm/h y para 100 años 3.309 mm/h; como datos más representativos.

- **Estación Paute.**

Para la estación Paute, los datos y los coeficientes a utilizar son los siguientes:

TABLA 41: Datos de entrada para la distribución de Gumbel en Paute.
Fuente. Elaboración propia

Media aritmética (X)	35,081
Desviación Estándar (σ)	16,691
No. de datos	16,000
σ_y	1,029
u_y	0,515
α	16,220
u	26,728

TABLA 42: Cálculo de intensidad diaria para periodos de retorno en la estación Paute.
Fuente. Elaboración propia.

Periodo(t)	Cálculo Estadístico		Precipitación	Precipitación Corregida (mm).	
Años	F(X)	P	X (mm)	PC= 1,13* X	IdTR(mm/h)
2	0,50	0,50	32,67	36,92	1,538
5	0,80	0,20	51,06	57,70	2,404
10	0,90	0,10	63,23	71,45	2,977
25	0,96	0,04	78,61	88,83	3,701
50	0,98	0,02	90,02	101,72	4,238
100	0,99	0,01	101,34	114,52	4,772

Para la estación Paute, la intensidad diaria correspondiente a un periodo de retorno de 2 años es de 1.538 mm/h, para un periodo de retorno de 50 años de 4.238 mm/h y para 100 años 4.772 mm/h; como datos más representativos.

- **Estación Sígsig.**

La distribución Gumbel maneja los siguientes parámetros para la estación Sígsig.

TABLA 43: Datos de entrada para la distribución de Gumbel en Sígsig.
Fuente. Elaboración propia

Media aritmética (X)	25,650
Desviación Estándar (σ)	10,863
No. de datos	16,000
σ_y	1,029
u_y	0,515
α	10,556
u	20,214

TABLA 44: Cálculo de intensidad diaria para periodos de retorno en la estación Sígsig.
Fuente. Elaboración propia.

Periodo(t)	Cálculo Estadístico.		Precipitación	Precipitación Corregida (mm)	
Años.	F(X)	P	X (mm)	PC= 1,13* X	IdTR(mm/h)
2	0,50	0,50	24,08	27,21	1,134
5	0,80	0,20	36,05	40,73	1,697
10	0,90	0,10	43,97	49,69	2,070
25	0,96	0,04	53,98	61,00	2,541

Periodo(t)	Cálculo Estadístico.		Precipitación	Precipitación Corregida (mm)	
Años.	F(X)	P	X (mm)	PC= 1,13* X	IdTR(mm/h)
50	0,98	0,02	61,40	69,39	2,891
100	0,99	0,01	68,77	77,71	3,238

Para la estación Sígsg, la intensidad diaria correspondiente a un periodo de retorno de 2 años es de 1.134 mm/h, para un periodo de retorno de 50 años de 2.891 mm/h y para 100 años 3.238 mm/h; como datos más representativos.

- **Estación Jima.**

Finalmente, para la estación Jima, los parámetros de entrada calculados correspondiente a la metodología Gumbel son:

TABLA 45: Datos de entrada para la distribución de Gumbel en Jima.

Fuente. Elaboración propia.

Media aritmética (X)	32,000
Desviación Estándar (σ)	9,372
No. de datos	16,000
σ_y	1,029
u_y	0,515
α	9,108
u	27,310

TABLA 46: Cálculo de intensidad diaria para periodos de retorno en la estación Jima.

Fuente. Elaboración propia.

Periodo (t)	Cálculo Estadístico.		Precipitación	Precipitación Corregida (mm)	
Años	F(X)	P	X (mm)	PC= 1,13* X	IdTR(mm/h)
2	0,5	0,5	30,65	34,63	1,443
5	0,8	0,2	40,97	46,30	1,929
10	0,9	0,1	47,81	54,02	2,251
25	0,96	0,04	56,44	63,78	2,657
50	0,98	0,02	62,85	71,02	2,959
100	0,99	0,01	69,21	78,20	3,259

Para la estación Sígsg, la intensidad diaria correspondiente a un periodo de retorno de 2 años es de 1.443 mm/h, para un periodo de retorno de 50 años de 2.959 mm/h y para 100 años 3.259 mm/h; como datos más representativos.

3.3.4. Curvas intensidad, duración y frecuencia (IDF)

Para elaborar las curvas IDF se utilizan las ecuaciones para el cálculo de intensidades máximas de precipitación perteneciente a un estudio del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INHAMI, 2015) para cada una de las estaciones que conforma la cuenca hidrográfica.

- **Estación Gualaceo DJ Pamar.**

Duración: 5min < 51.88 min

$$I_{TR} = 125.44 * Id_{TR} * t^{-0.434} \quad (3.5)$$

Duración: 51.88min < 1440 min

$$I_{TR} = 892.87 * Id_{TR} * t^{-0.931} \quad (3.6)$$

Donde:

t: duración de lluvia (minutos)

Id_{TR}: intensidad diaria para un periodo de retorno dado (mm/h)

TABLA 47: Intensidad para la estación Gualaceo DJ Pamar.

Fuente. Elaboración propia.

TR (Años)	Duración t (Minutos)										
	30	60	90	120	155	180	240	360	440	530	540
2	44.13	30.39	20.83	15.94	12.56	10.93	8.36	5.73	4.75	4.00	3.93
5	57.71	39.74	27.24	20.84	16.42	14.29	10.93	7.49	6.22	5.23	5.14
10	66.70	45.93	31.49	24.09	18.98	16.52	12.64	8.66	7.19	6.04	5.94
25	78.07	53.76	36.85	28.19	22.22	19.33	14.79	10.14	8.41	7.07	6.95
50	86.50	59.56	40.83	31.24	24.62	21.42	16.38	11.23	9.32	7.84	7.70
100	94.86	65.32	44.78	34.26	27.00	23.49	17.97	12.32	10.22	8.59	8.45

Mediante los cálculos realizados para la obtención de las curvas intensidad, duración y frecuencia en la estación Gualaceo DJ Pamar se obtuvo que en un periodo de retorno de 2 años y duración de 540 minutos se tiene una intensidad de 3.93 mm/h, para un periodo de retorno de 50 años en 540 minutos 7.70 mm/h y para un periodo de retorno de 100 años en 540 minutos se obtuvo 8.45 mm/h.

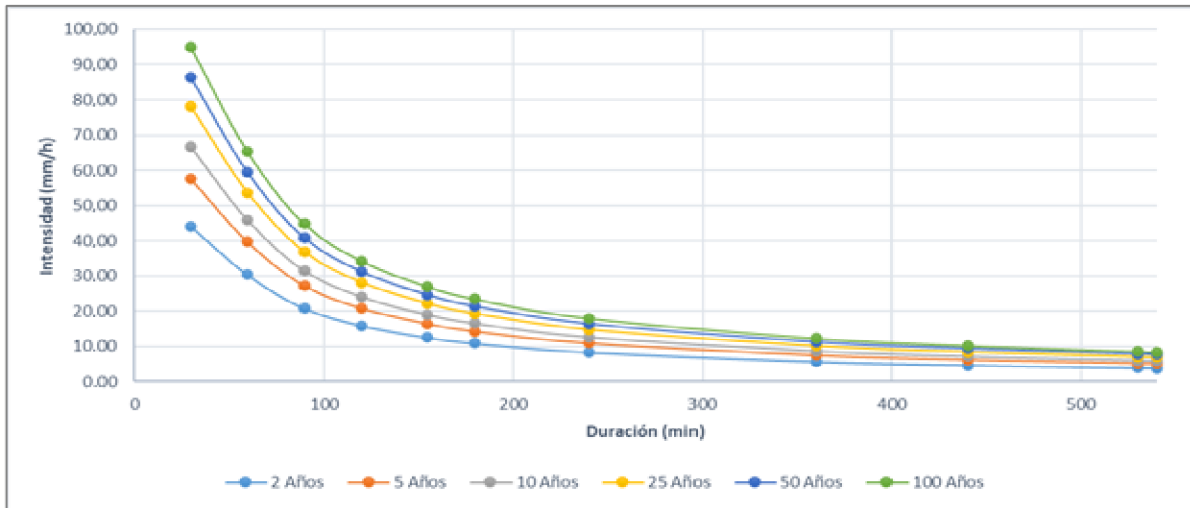


Figura 29. Curvas IDF para la estación Gualaceo DJ Pamar.
Fuente. Elaboración propia.

- **Estación Paute.**

Duración: 5min < 44.9 min

$$I_{TR} = 90.127 * Id_{TR} * t^{-0.398} \quad (3.7)$$

Duración: 44.9min < 1440 min

$$I_{TR} = 510.800 * Id_{TR} * t^{-0.854} \quad (3.8)$$

Donde:

t: duración de lluvia (minutos)

Id_{TR}: intensidad diaria para un periodo de retorno dado (mm/h)

TABLA 48: Intensidad para la estación Paute.
Fuente. Elaboración propia.

TR (Años)	Duración t (Minutos)										
	30	60	90	120	155	180	240	360	440	530	540
2	35.81	23.81	16.84	13.17	10.59	9.32	7.29	5.16	4.34	3.70	3.65
5	55.96	37.21	26.32	20.59	16.54	14.56	11.39	8.06	6.79	5.79	5.70
10	69.30	46.08	32.59	25.49	20.49	18.03	14.10	9.98	8.40	7.17	7.06
25	86.16	57.29	40.52	31.69	25.47	22.42	17.53	12.40	10.45	8.91	8.77
50	98.67	65.60	46.40	36.29	29.17	25.67	20.08	14.20	11.97	10.21	10.05
100	111.08	73.85	52.24	40.86	32.84	28.90	22.61	15.99	13.47	11.49	11.31

La curva intensidad, duración y frecuencia en la estación Paute tiene para un periodo de retorno de 2 años y duración de 540 minutos se tiene una intensidad de 3.65 mm/h, para un periodo de retorno de 50 años en 540 minutos 10.05 mm/h y para un periodo de retorno de 100 años en 540 minutos se obtuvo 11.31 mm/h.

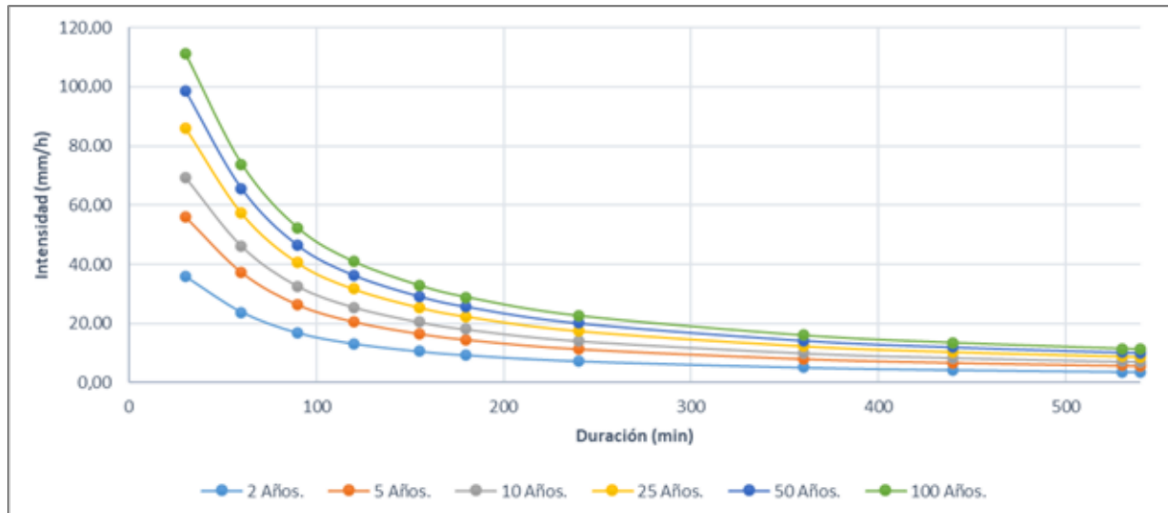


Figura 30. Curvas IDF para la estación Paute.
Fuente. Elaboración propia.

- **Estación Sígsig.**

Duración: 5min < 51.88 min

$$I_{TR} = 125.44 * Id_{TR} * t^{-0.434} \quad (3.9)$$

Duración: 51.88min < 1440 min

$$I_{TR} = 892.87 * Id_{TR} * t^{-0.931} \quad (3.10)$$

Donde:

t: duración de lluvia (minutos)

Id_{TR}: intensidad diaria para un periodo de retorno dado (mm/h)

TABLA 49: Intensidad para la estación Sígsig.
Fuente. Elaboración propia.

TR (Años)	Duración t (Minutos)										
	30	60	90	120	155	180	240	360	440	530	540
2	32.50	22.38	15.34	11.74	9.25	8.05	6.16	4.22	3.50	2.94	2.89
5	48.65	33.50	22.97	17.57	13.85	12.05	9.22	6.32	5.24	4.41	4.33
10	59.34	40.86	28.02	21.43	16.89	14.69	11.24	7.71	6.39	5.38	5.28
25	72.85	50.17	34.39	26.31	20.73	18.04	13.80	9.46	7.85	6.60	6.49
50	82.88	57.07	39.12	29.93	23.59	20.52	15.70	10.76	8.93	7.51	7.38
100	92.82	63.92	43.82	33.52	26.42	22.98	17.58	12.05	10.00	8.41	8.26

La curva intensidad, duración y frecuencia en la estación Sígsig tiene para un periodo de retorno de 2 años y duración de 540 minutos se tiene una intensidad de 2.89 mm/h, para un periodo de retorno de 50 años en 540 minutos 7.38 mm/h y para un periodo de retorno de 100 años en 540 minutos se obtuvo 8.26 mm/h.

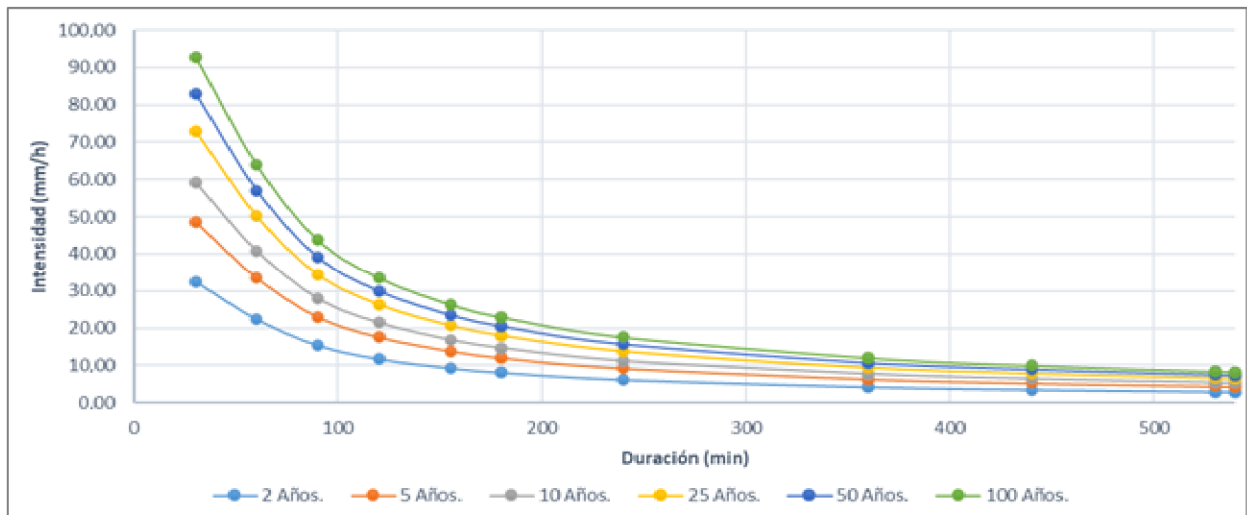


Figura 31. Curvas IDF para la estación Sigsig.

Fuente. Elaboración propia.

- **Estación Jima.**

Duración: 5min < 51.88 min

$$I_{TR} = 125.44 * Id_{TR} * t^{-0.434} \quad (3.11)$$

Duración: 51.88min < 1440 min

$$I_{TR} = 892.87 * Id_{TR} * t^{-0.931} \quad (3.12)$$

Donde:

t: duración de lluvia (minutos)

Id_{TR} : intensidad diaria para un periodo de retorno dado (mm/h)

TABLA 50: Intensidad para la estación Jima.

Fuente. Elaboración propia.

TR (Años)	Duración t (Minutos)										
	30	60	90	120	155	180	240	360	440	530	540
2	41.37	28.48	19.53	14.94	11.77	10.24	7.84	5.37	4.46	3.75	3.68
5	55.30	38.08	26.11	19.97	15.74	13.69	10.48	7.18	5.96	5.01	4.92
10	64.52	44.43	30.46	23.30	18.36	15.98	12.22	8.38	6.95	5.85	5.74
25	76.18	52.46	35.96	27.51	21.68	18.86	14.43	9.89	8.21	6.90	6.78
50	84.83	58.41	40.05	30.64	24.14	21.00	16.07	11.02	9.14	7.69	7.55
100	93.41	64.32	44.10	33.74	26.58	23.13	17.69	12.13	10.06	8.46	8.32

Finalmente, la curva intensidad, duración y frecuencia en la estación Jima tiene para un periodo de retorno de 2 años y duración de 540 minutos se tiene una intensidad de 3.68 mm/h, para un periodo de retorno de 50 años en 540 minutos 7.55 mm/h y para un periodo de retorno de 100 años en 540 minutos se obtuvo 8.32 mm/h.

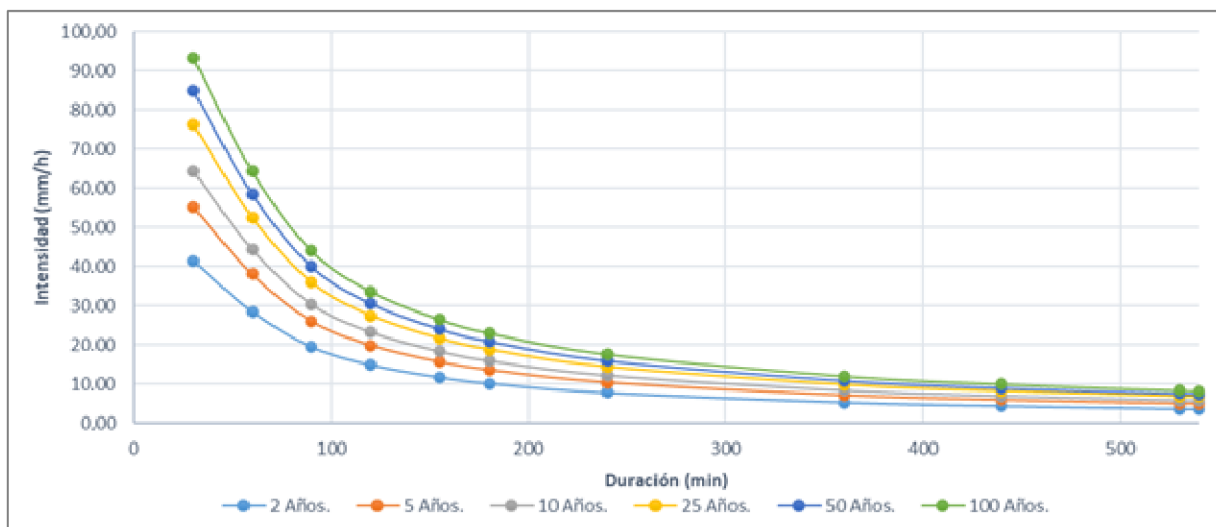


Figura 32. Curvas IDF para la estación Jima.

Fuente. Elaboración propia.

3.3.5. Hietogramas de diseño

Para realizar la simulación del modelo hidrológico se calcula los hietogramas de diseño, estos representan la precipitación en instantes de tiempo para los periodos de retorno de 2,5 y 100 años. (Chow,1964)

La duración de los hietogramas de diseño es de 540 minutos (9 horas) porque, a este tiempo se encuentra el punto de interés de nuestro estudio que es la estación **Gualceo DJ Pamar**, estación que cuenta con datos de caudal observado; es decir a partir de la estación **Gualceo DJ Pamar** aguas arriba se realizará la simulación hidrológica en el HEC-HMS.

El cálculo de los hietogramas para la zona de estudio son los siguientes:

TABLA 51: Hietograma para la estación Gualceo DJ Pamar en un periodo de retorno de 2 años, duración de tormenta 9 horas.

Fuente: Elaboración propia.

Duración (min)	Intensidad (mm/h)	Profundidad calculada (mm)	Profundidad Incremental (mm)	Intervalo (min)	Precipitación (mm)
30	44.13	22.06	22.06	0-30	0.147
60	30.39	30.39	8.32	30-60	0.166
90	20.83	31.25	0.86	60-90	0.190
120	15.94	31.87	0.63	90-120	0.224
150	12.95	32.37	0.49	120-150	0.273
180	10.93	32.78	0.41	150-180	0.351
210	9.47	33.13	0.35	180-210	0.495
240	8.36	33.44	0.31	210-240	0.862
270	7.49	33.71	0.27	240-270	22.063
300	6.79	33.95	0.25	270-300	8.322

330	6.21	34.18	0.22	300-330	0.626
360	5.73	34.38	0.21	330-360	0.410
390	5.32	34.57	0.19	360-390	0.307
420	4.96	34.75	0.18	390-420	0.246
450	4.66	34.92	0.17	420-450	0.206
480	4.38	35.07	0.16	450-480	0.177
510	4.14	35.22	0.15	480-510	0.156
540	3.93	35.36	0.14	510-540	0.139

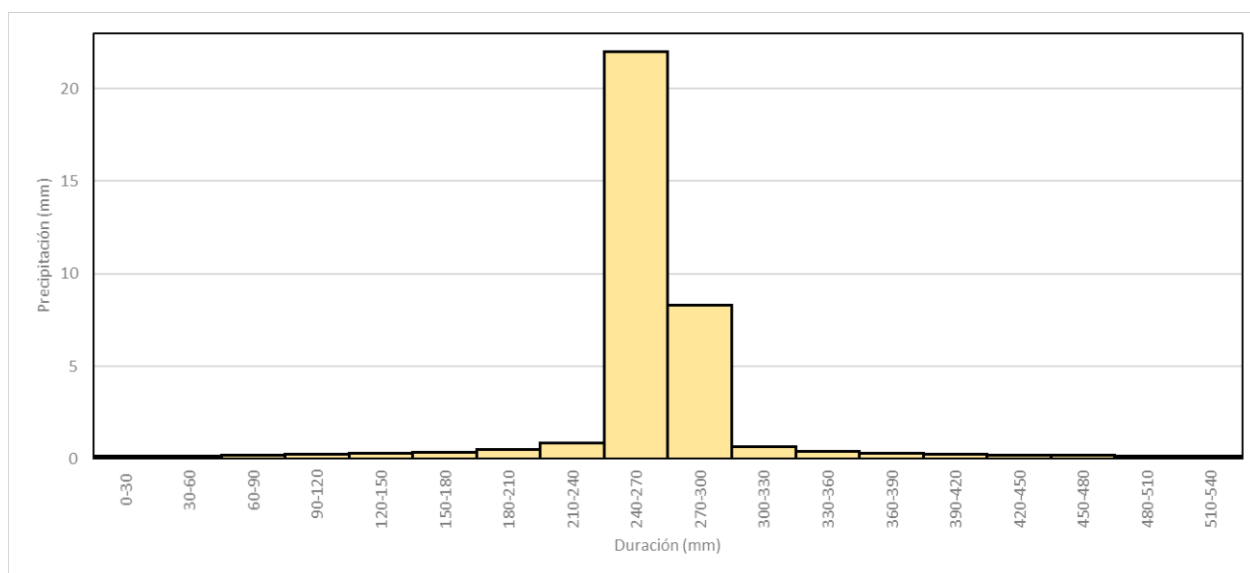


Figura 33. Hietograma para la estación Gualaceo DJ Pamar en un periodo de retorno de 2 años.

Fuente. Elaboración propia.

La estación Gualaceo DJ Pamar mediante el método de bloques alternos obtiene una precipitación pico de 22.06 mm en el lapso de los minutos 240 – 270 para un periodo de retorno de 2 años.

TABLA 52: Hietograma para la estación Gualaceo DJ Pamar en un periodo de retorno de 50 años, duración de tormenta 9 horas.

Fuente: Elaboración propia.

Duración (min)	Intensidad (mm/h)	Profundidad calculada (mm)	Profundidad Incremental (mm)	Intervalo(min)	Precipitación(mm)
30	86.50	43.25	43.25	0-30	0.288
60	59.56	59.56	16.31	30-60	0.325
90	40.83	61.25	1.69	60-90	0.373
120	31.24	62.48	1.23	90-120	0.439
150	25.38	63.45	0.97	120-150	0.535
180	21.42	64.25	0.80	150-180	0.687
210	18.55	64.94	0.69	180-210	0.969
240	16.38	65.54	0.60	210-240	1.690
270	14.68	66.07	0.53	240-270	43.248
300	13.31	66.56	0.48	270-300	16.313
330	12.18	66.99	0.44	300-330	1.228
360	11.23	67.40	0.40	330-360	0.803

390	10.43	67.77	0.37	360-390	0.601
420	9.73	68.12	0.35	390-420	0.482
450	9.13	68.44	0.33	420-450	0.403
480	8.59	68.75	0.31	450-480	0.347
510	8.12	69.04	0.29	480-510	0.305
540	7.70	69.31	0.27	510-540	0.273

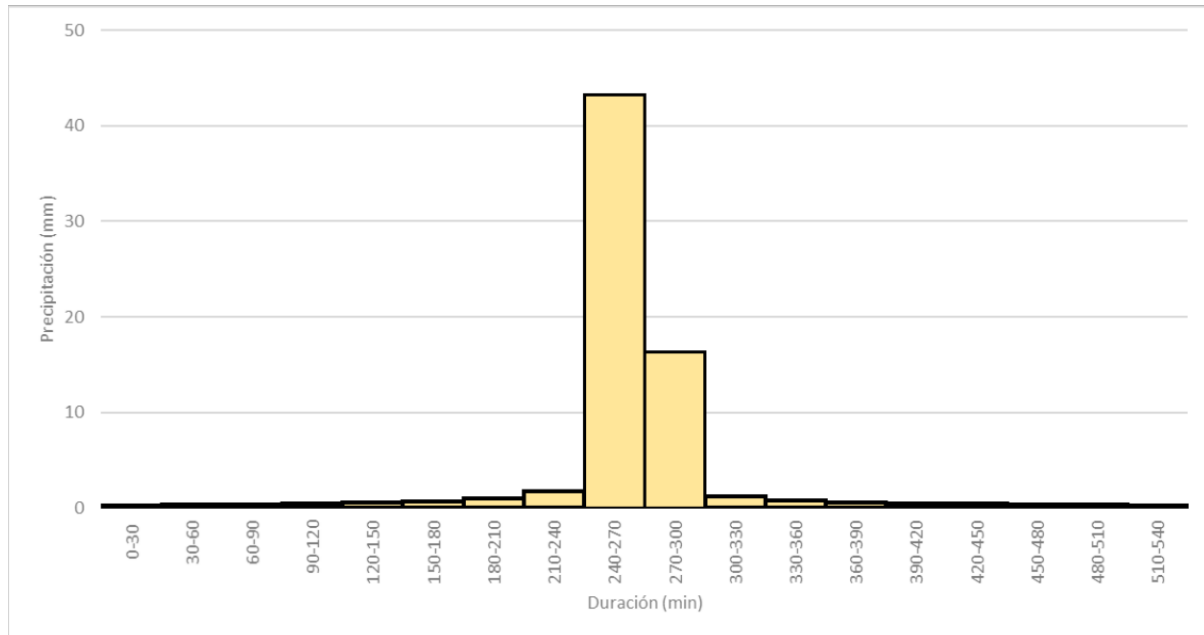


Figura 34. Hietograma para la estación Gualaceo DJ Pamar en un periodo de retorno de 50 años.
Fuente. Elaboración propia.

El hietograma de bloques alternos da una precipitación pico de 43.24 mm en el lapso de los minutos 240 – 270 para un periodo de retorno de 50 años, correspondiente a la estación Gualaceo DJ Pamar.

TABLA 53: Hietograma para la estación Gualaceo DJ Pamar en un periodo de retorno de 100 años, duración de tormenta 9 horas.
Fuente: Elaboración propia.

Duración(min)	Intensidad(mm/h)	Profundidad calculada (mm)	Profundidad Incremental (mm)	Intervalo (min)	Precipitación(mm)
30	94.86	47.43	47.43	0-30	0.32
60	65.32	65.32	17.89	30-60	0.36
90	44.78	67.18	1.85	60-90	0.41
120	34.26	68.52	1.35	90-120	0.48
150	27.83	69.59	1.06	120-150	0.59
180	23.49	70.47	0.88	150-180	0.75
210	20.35	71.22	0.75	180-210	1.06
240	17.97	71.88	0.66	210-240	1.85
270	16.10	72.47	0.59	240-270	47.43
300	14.60	72.99	0.53	270-300	17.89
330	13.36	73.48	0.48	300-330	1.35
360	12.32	73.92	0.44	330-360	0.88
390	11.44	74.33	0.41	360-390	0.66

420	10.67	74.71	0.38	390-420	0.53
450	10.01	75.07	0.36	420-450	0.44
480	9.43	75.40	0.34	450-480	0.38
510	8.91	75.72	0.32	480-510	0.34
540	8.45	76.02	0.30	510-540	0.30

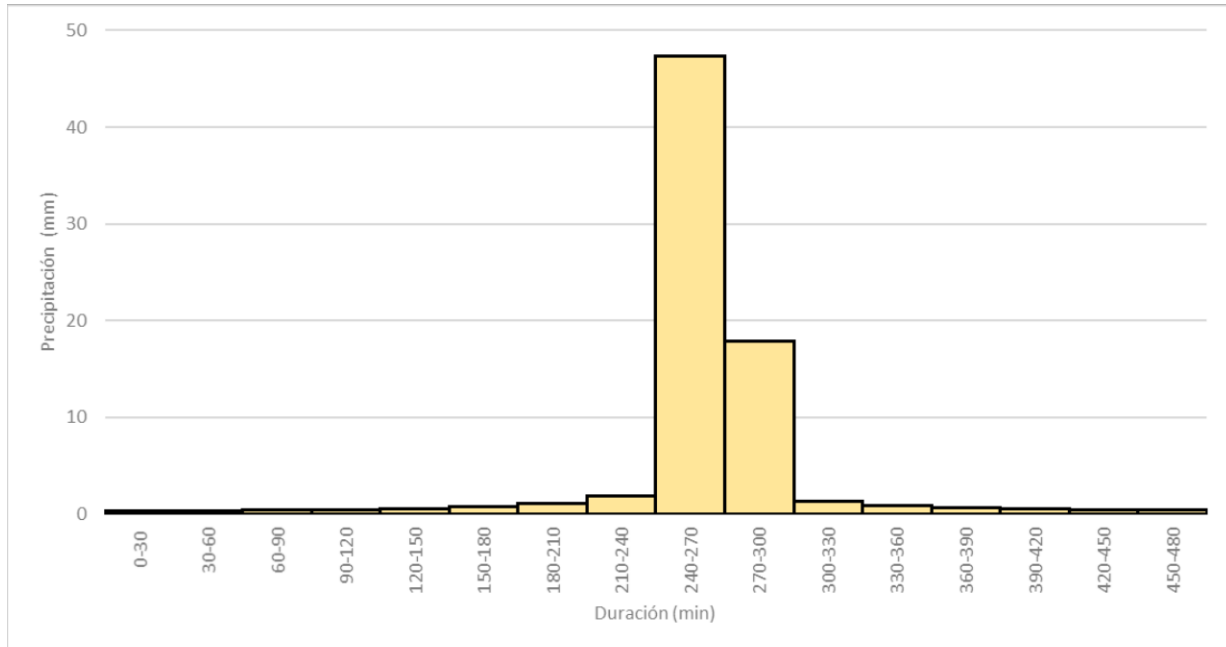


Figura 35. Hietograma para la estación Gualaceo DJ Pamar en un periodo de retorno de 100 años.
Fuente. Elaboración propia.

Finalmente, para un periodo de retorno de 100 años en la estación Gualaceo DJ Pamar la precipitación pico de 47.43 mm en el lapso de los minutos 240 – 270.

TABLA 54: Hietograma para la estación Paute en un periodo de retorno de 2 años, duración de tormenta 9 horas.
Fuente: Elaboración propia.

Duración(min)	Intensidad(mm/h)	Profundidad calculada (mm)	Profundidad Incremental (mm)	Intervalo (min)	Precipitación(mm)
30	35.81	17.91	17.91	0-30	0.287
60	23.81	23.81	5.90	30-60	0.320
90	16.84	25.26	1.45	60-90	0.364
120	13.17	26.35	1.08	90-120	0.422
150	10.89	27.22	0.87	120-150	0.506
180	9.32	27.95	0.73	150-180	0.636
210	8.17	28.59	0.64	180-210	0.872
240	7.29	29.15	0.56	210-240	1.452
270	6.59	29.66	0.51	240-270	17.906
300	6.02	30.12	0.46	270-300	5.905
330	5.55	30.54	0.42	300-330	1.084
360	5.16	30.93	0.39	330-360	0.734
390	4.81	31.29	0.36	360-390	0.563
420	4.52	31.63	0.34	390-420	0.460
450	4.26	31.95	0.32	420-450	0.390

480	4.03	32.26	0.30	450-480	0.340
510	3.83	32.54	0.29	480-510	0.303
540	3.65	32.82	0.27	510-540	0.273

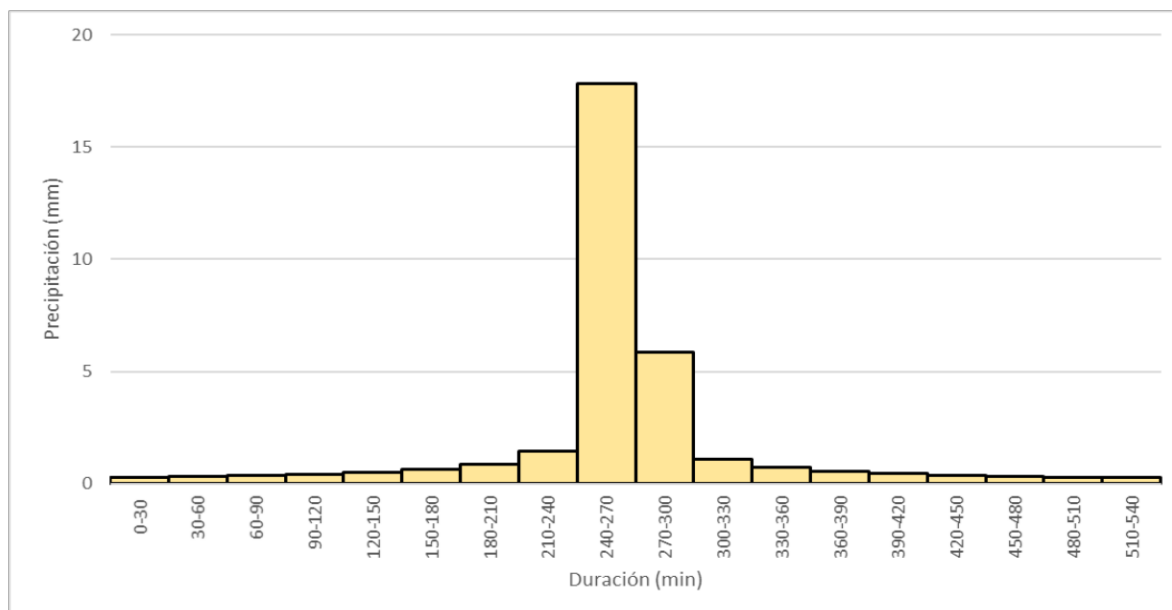


Figura 36. Hietograma para la estación Paute en un periodo de retorno de 2 años.
Fuente: Elaboración propia.

La estación Paute mediante el método de bloques alternos obtiene una precipitación pico de 17.90 mm en el lapso de los minutos 240 – 270 para un periodo de retorno de 2 años.

TABLA 55: Hietograma para la estación Paute en un periodo de retorno de 50 años, duración de tormenta 9 horas.
Fuente: Elaboración propia.

Duración(min)	Intensidad(mm/h)	Profundidad calculada (mm)	Profundidad Incremental (mm)	Intervalo(min)	Precipitación(mm)
30	98.67	49.33	49.33	0-30	0.790
60	65.60	65.60	16.27	30-60	0.882
90	46.40	69.60	4.00	60-90	1.002
120	36.29	72.59	2.99	90-120	1.163
150	30.00	74.99	2.40	120-150	1.393
180	25.67	77.01	2.02	150-180	1.753
210	22.50	78.77	1.75	180-210	2.404
240	20.08	80.32	1.55	210-240	4.001
270	18.16	81.71	1.39	240-270	49.333
300	16.60	82.98	1.27	270-300	16.269
330	15.30	84.14	1.16	300-330	2.986
360	14.20	85.22	1.08	330-360	2.023
390	13.26	86.22	1.00	360-390	1.551
420	12.45	87.16	0.94	390-420	1.267
450	11.74	88.04	0.88	420-450	1.076

480	11.11	88.87	0.83	450-480	0.938
510	10.55	89.66	0.79	480-510	0.833
540	10.05	90.41	0.75	510-540	0.751

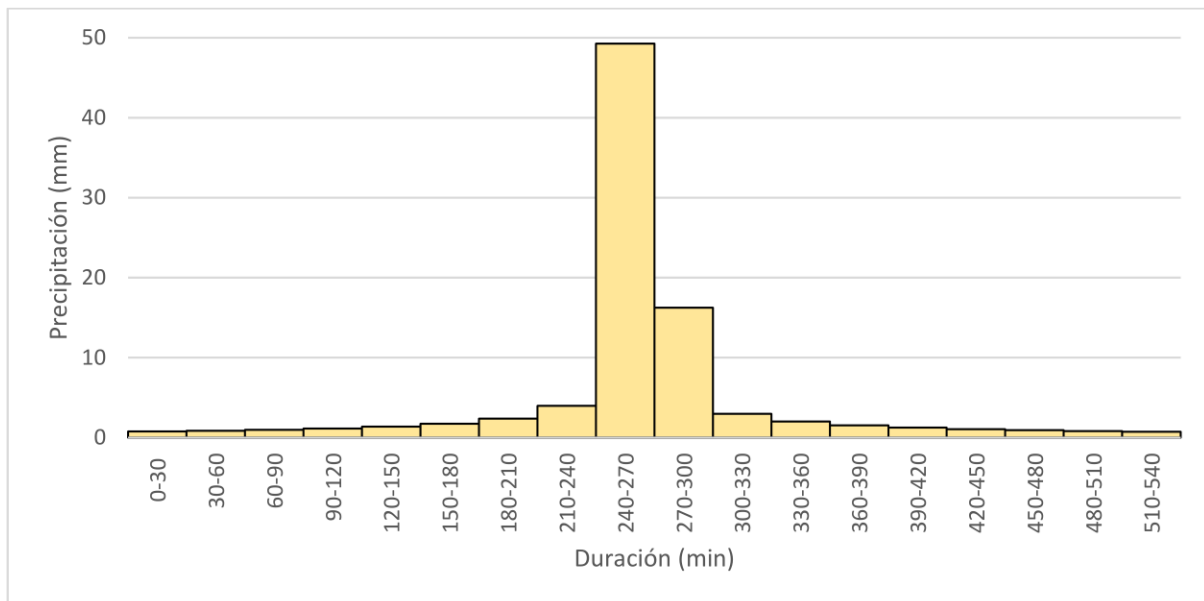


Figura 37. Hietograma para la estación Paute en un periodo de retorno de 50 años.
Fuente. Elaboración propia.

El hietograma de bloques alternos da una precipitación pico de 49.33 mm en el lapso de los minutos 240 – 270 para un periodo de retorno de 50 años, correspondiente a la estación Paute.

TABLA 56: Hietograma para la estación Paute en un periodo de retorno de 100 años, duración de tormenta 9 horas.
Fuente: Elaboración propia.

Duración(min)	Intensidad(mm/h)	Profundidad calculada (mm)	Profundidad Incremental (mm)	Intervalo (min)	Precipitación(mm)
30	111.08	55.54	55.54	0-30	0.89
60	73.85	73.85	18.32	30-60	0.99
90	52.24	78.36	4.50	60-90	1.13
120	40.86	81.72	3.36	90-120	1.31
150	33.77	84.43	2.71	120-150	1.57
180	28.90	86.70	2.28	150-180	1.97
210	25.34	88.68	1.97	180-210	2.71
240	22.61	90.42	1.75	210-240	4.50
270	20.44	91.99	1.57	240-270	55.54
300	18.68	93.42	1.43	270-300	18.32
330	17.22	94.73	1.31	300-330	3.36
360	15.99	95.94	1.21	330-360	2.28
390	14.93	97.06	1.13	360-390	1.75
420	14.02	98.12	1.06	390-420	1.43
450	13.22	99.11	0.99	420-450	1.21
480	12.51	100.05	0.94	450-480	1.06

510	11.88	100.94	0.89	480-510	0.94
540	11.31	101.79	0.85	510-540	0.85

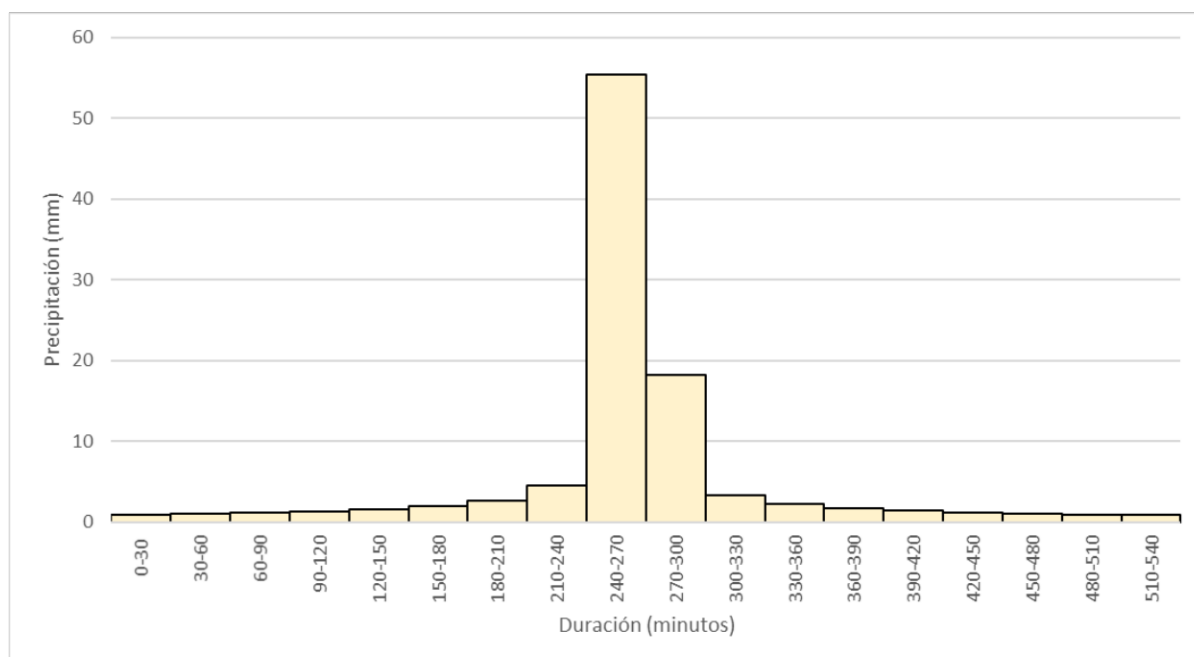


Figura 38. Hietograma para la estación Paute en un periodo de retorno de 100 años.
Fuente. Elaboración propia.

Finalmente, para un periodo de retorno de 100 años en la estación Paute la precipitación pico es de 55.54 mm en el lapso de los minutos 240 – 270.

TABLA 57: Hietograma para la estación Sígsig en un periodo de retorno de 2 años, duración de tormenta 9 horas.
Fuente: Elaboración propia.

Duración(min)	Intensidad(mm/h)	Profundidad calculada (mm)	Profundidad Incremental (mm)	Intervalo (min)	Precipitación(mm)
30	32.50	16.25	16.25	0-30	0.108
60	22.38	22.38	6.13	30-60	0.122
90	15.34	23.02	0.64	60-90	0.140
120	11.74	23.48	0.46	90-120	0.165
150	9.54	23.84	0.36	120-150	0.201
180	8.05	24.15	0.30	150-180	0.258
210	6.97	24.40	0.26	180-210	0.364
240	6.16	24.63	0.23	210-240	0.635
270	5.52	24.83	0.20	240-270	16.252
300	5.00	25.01	0.18	270-300	6.130
330	4.58	25.18	0.17	300-330	0.461
360	4.22	25.33	0.15	330-360	0.302
390	3.92	25.47	0.14	360-390	0.226
420	3.66	25.60	0.13	390-420	0.181
450	3.43	25.72	0.12	420-450	0.152
480	3.23	25.84	0.11	450-480	0.131
510	3.05	25.94	0.11	480-510	0.115
540	2.89	26.05	0.10	510-540	0.103

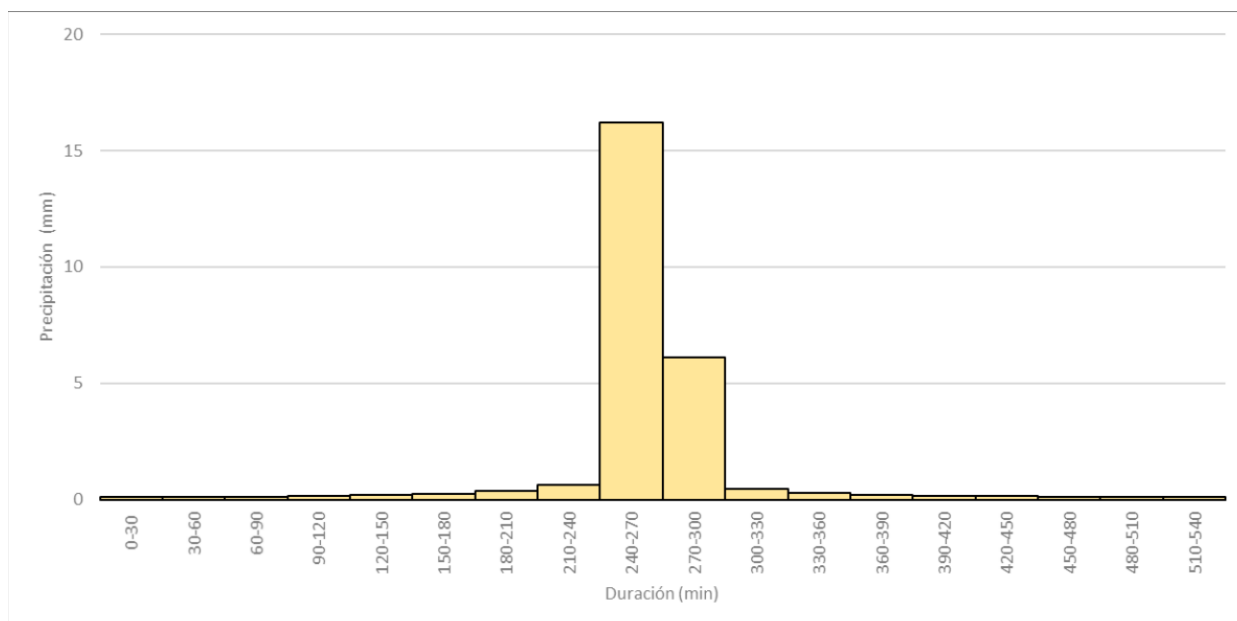


Figura 39. Hietograma para la estación Sigsig en un periodo de retorno de 2 años.

Fuente: Elaboración propia.

La estación Sigsig mediante el método de bloques alternos obtiene una precipitación pico de 16.25 mm en el lapso de los minutos 240 – 270 para un periodo de retorno de 2 años.

TABLA 58: Hietograma para la estación Sigsig en un periodo de retorno de 50 años, duración de tormenta 9 horas.

Fuente: Elaboración propia.

Duración(min)	Intensidad(mm/h)	Profundidad calculada (mm)	Profundidad Incremental (mm)	Intervalo (min)	Precipitación(mm)
30	82.88	41.44	41.44	0-30	0.276
60	57.07	57.07	15.63	30-60	0.311
90	39.12	58.69	1.62	60-90	0.358
120	29.93	59.86	1.18	90-120	0.421
150	24.32	60.79	0.93	120-150	0.512
180	20.52	61.56	0.77	150-180	0.658
210	17.78	62.22	0.66	180-210	0.929
240	15.70	62.80	0.58	210-240	1.619
270	14.07	63.31	0.51	240-270	41.438
300	12.75	63.77	0.46	270-300	15.630
330	11.67	64.19	0.42	300-330	1.177
360	10.76	64.58	0.39	330-360	0.770
390	9.99	64.94	0.36	360-390	0.576
420	9.32	65.27	0.33	390-420	0.462
450	8.74	65.58	0.31	420-450	0.387
480	8.23	65.87	0.29	450-480	0.333
510	7.78	66.15	0.28	480-510	0.293
540	7.38	66.41	0.26	510-540	0.261

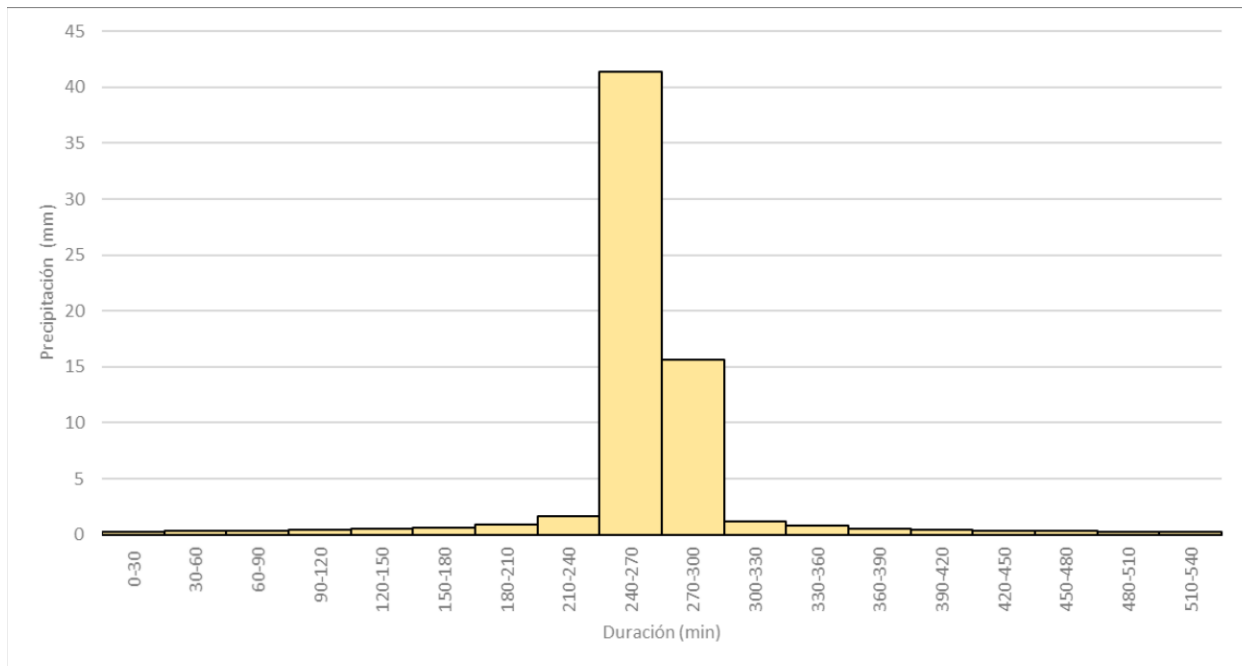


Figura 40. Hietograma para la estación Sigsig en un periodo de retorno de 50 años.
Fuente. Elaboración propia.

El hietograma de bloques alternos da una precipitación pico de 41.43 mm en el lapso de los minutos 240 – 270 para un periodo de retorno de 50 años, correspondiente a la estación Sigsig.

TABLA 59: Hietograma para la estación Sigsig en un periodo de retorno de 100 años, duración de tormenta 9 horas.
Fuente: Elaboración propia.

Duración(min)	Intensidad(mm/h)	Profundidad calculada (mm)	Profundidad Incremental (mm)	Intervalo (min)	Precipitación(mm)
30	92.82	46.41	46.41	0-30	0.310
60	63.92	63.92	17.51	30-60	0.350
90	43.82	65.73	1.81	60-90	0.400
120	33.52	67.05	1.32	90-120	0.470
150	27.24	68.09	1.04	120-150	0.570
180	22.98	68.95	0.86	150-180	0.740
210	19.91	69.69	0.74	180-210	1.040
240	17.58	70.33	0.65	210-240	1.810
270	15.76	70.91	0.57	240-270	46.410
300	14.28	71.42	0.52	270-300	17.510
330	13.07	71.90	0.47	300-330	1.320
360	12.05	72.33	0.43	330-360	0.860
390	11.19	72.73	0.40	360-390	0.650
420	10.44	73.10	0.37	390-420	0.520
450	9.79	73.45	0.35	420-450	0.430
480	9.22	73.78	0.33	450-480	0.370
510	8.72	74.09	0.31	480-510	0.330
540	8.26	74.38	0.29	510-540	0.290

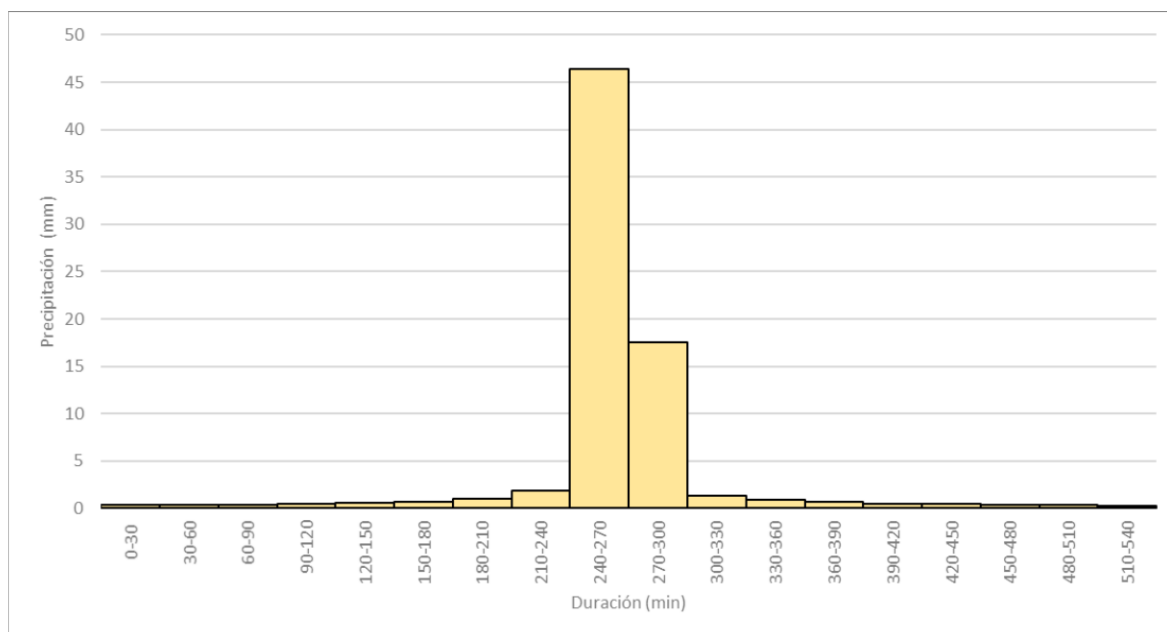


Figura 41. Hietograma para la estación Sigsig en un periodo de retorno de 100 años
Fuente. Elaboración propia.

Finalmente, para un periodo de retorno de 100 años en la estación Sigsig la precipitación pico es de 46.41 mm en el lapso de los minutos 240 – 270.

TABLA 60: Hietograma para la estación Jima en un periodo de retorno de 2 años, duración de tormenta 9 horas.
Fuente: Elaboración propia.

Duración(min)	Intensidad(mm/h)	Profundidad calculada (mm)	Profundidad Incremental (mm)	Intervalo (min)	Precipitación(mm)
30	41.37	20.68	20.68	0-30	0.138
60	28.48	28.48	7.80	30-60	0.155
90	19.53	29.29	0.81	60-90	0.179
120	14.94	29.88	0.59	90-120	0.210
150	12.14	30.34	0.46	120-150	0.256
180	10.24	30.73	0.38	150-180	0.329
210	8.87	31.06	0.33	180-210	0.464
240	7.84	31.34	0.29	210-240	0.808
270	7.02	31.60	0.26	240-270	20.683
300	6.37	31.83	0.23	270-300	7.801
330	5.83	32.04	0.21	300-330	0.587
360	5.37	32.23	0.19	330-360	0.384
390	4.99	32.41	0.18	360-390	0.287
420	4.65	32.58	0.17	390-420	0.231
450	4.36	32.73	0.16	420-450	0.193
480	4.11	32.88	0.15	450-480	0.166
510	3.88	33.02	0.14	480-510	0.146
540	3.68	33.15	0.13	510-540	0.130

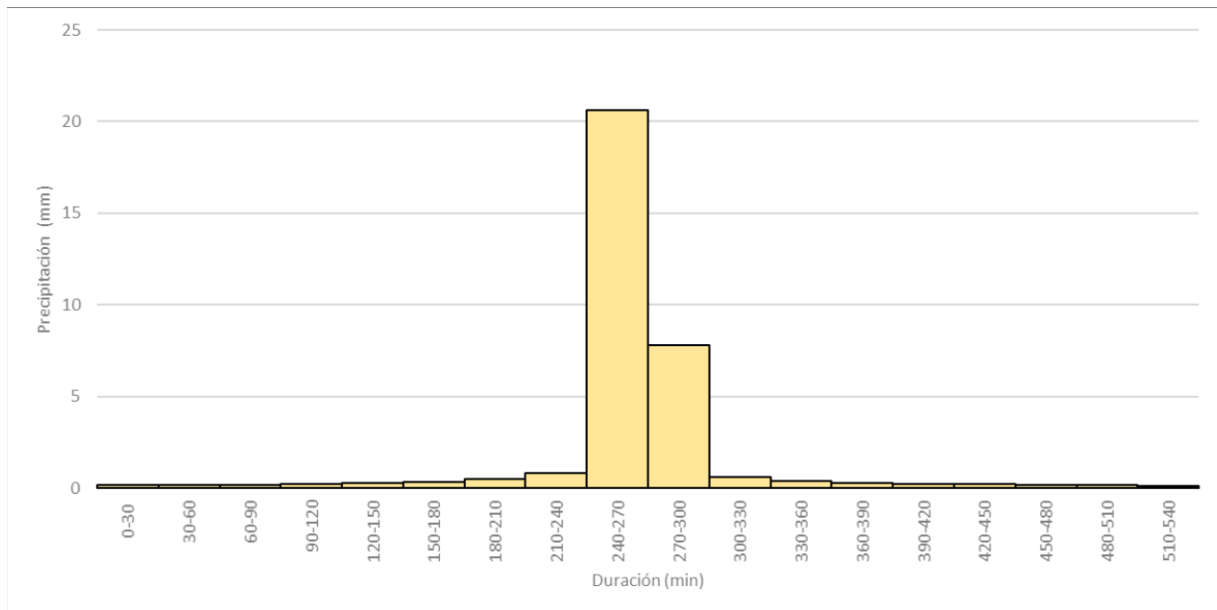


Figura 42. Hietograma para la estación Jima en un periodo de retorno de 2 años.

Fuente. Elaboración propia.

La estación Jima mediante el método de bloques alternos obtiene una precipitación pico de 20.68 mm en el lapso de los minutos 240 – 270 para un periodo de retorno de 2 años.

TABLA 61: Hietograma para la estación Jima en un periodo de retorno de 50 años, duración de tormenta 9 horas.

Fuente: Elaboración propia.

Duración(min)	Intensidad(mm/h)	Profundidad calculada (mm)	Profundidad Incremental (mm)	Intervalo (min)	Precipitación(mm)
30	84.83	42.41	42.41	0-30	0.283
60	58.41	58.41	16.00	30-60	0.319
90	40.05	60.07	1.66	60-90	0.366
120	30.64	61.27	1.20	90-120	0.431
150	24.89	62.22	0.95	120-150	0.524
180	21.00	63.01	0.79	150-180	0.674
210	18.20	63.68	0.67	180-210	0.951
240	16.07	64.27	0.59	210-240	1.657
270	14.40	64.80	0.52	240-270	42.413
300	13.05	65.27	0.47	270-300	15.998
330	11.95	65.70	0.43	300-330	1.204
360	11.02	66.10	0.40	330-360	0.788
390	10.23	66.46	0.37	360-390	0.589
420	9.54	66.80	0.34	390-420	0.473
450	8.95	67.12	0.32	420-450	0.396
480	8.43	67.42	0.30	450-480	0.341
510	7.97	67.70	0.28	480-510	0.300
540	7.55	67.97	0.27	510-540	0.268

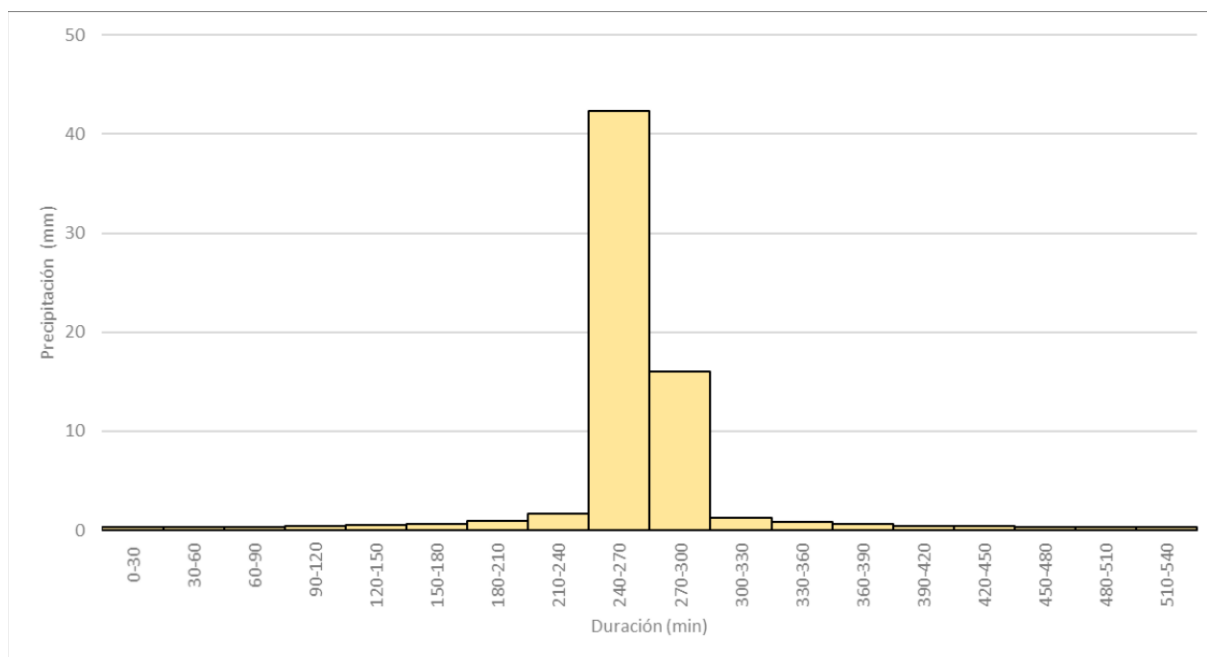


Figura 43. Hietograma para la estación Jima en un periodo de retorno de 50 años.
Fuente. Elaboración propia.

El hietograma de bloques alternos da una precipitación pico de 42.41 mm en el lapso de los minutos 240 – 270 para un periodo de retorno de 50 años, correspondiente a la estación Jima.

TABLA 62: Hietograma para la estación Jima en un periodo de retorno de 100 años, duración de tormenta 9 horas.
Fuente: Elaboración propia.

Duración(min)	Intensidad(mm/h)	Profundidad calculada (mm)	Profundidad Incremental (mm)	Intervalo (min)	Precipitación(mm)
30	93.41	46.70	46.70	0-30	0.310
60	64.32	64.32	17.62	30-60	0.350
90	44.10	66.15	1.82	60-90	0.400
120	33.74	67.47	1.33	90-120	0.470
150	27.41	68.52	1.05	120-150	0.580
180	23.13	69.39	0.87	150-180	0.740
210	20.04	70.13	0.74	180-210	1.050
240	17.69	70.78	0.65	210-240	1.820
270	15.86	71.35	0.58	240-270	46.700
300	14.38	71.88	0.52	270-300	17.620
330	13.15	72.35	0.47	300-330	1.330
360	12.13	72.78	0.44	330-360	0.870
390	11.26	73.19	0.40	360-390	0.650
420	10.51	73.56	0.38	390-420	0.520
450	9.86	73.91	0.35	420-450	0.440
480	9.28	74.24	0.33	450-480	0.380
510	8.77	74.56	0.31	480-510	0.330
540	8.32	74.85	0.29	510-540	0.290

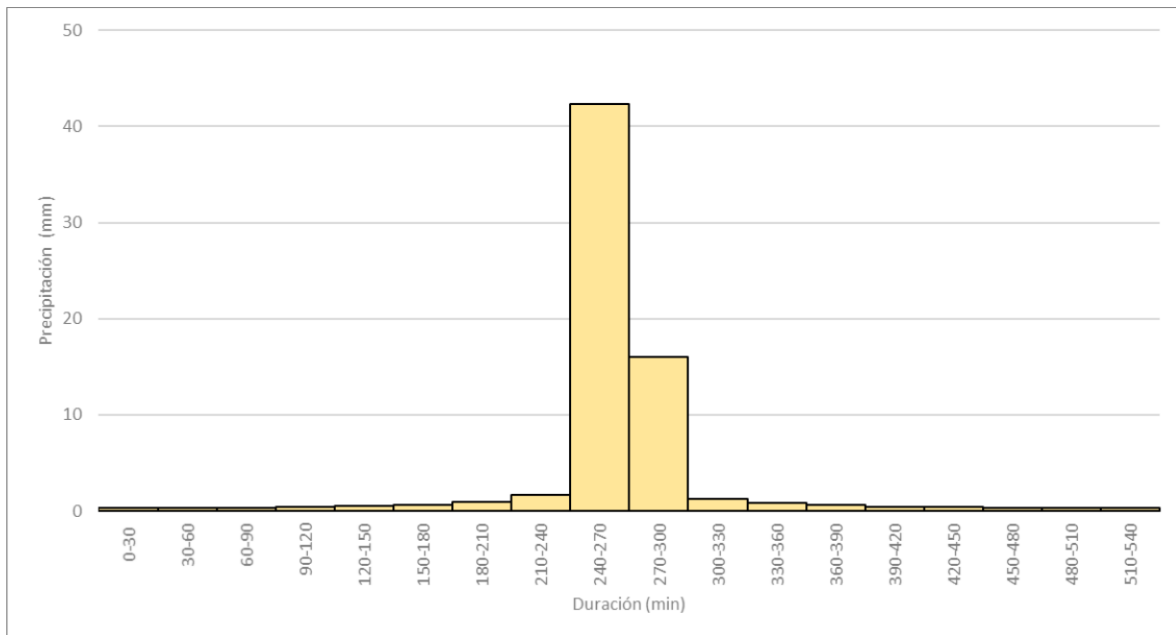


Figura 44. Hietograma para la estación Jima en un periodo de retorno de 100 años.
Fuente. Elaboración propia.

Finalmente, para un periodo de retorno de 100 años en la estación Jima la precipitación pico es de 46.70 mm en el lapso de los minutos 240 – 270.

3.4.Simulación del modelo hidrológico en el software HEC-HMS.

Para poder realizar la simulación, se necesita programar cada uno de los componentes de entrada del software HEC-HMS; tanto de modelo de la cuenca (Basin Models), modelo meteorológico (Meteorologic Models) y la definición de un control en el periodo de simulación (Control Specification y Time – Series Data), para el estudio es entre 01/01/2000 y 31/12/2015 teniendo un intervalo de 24 horas para cada una de las lecturas.

Los métodos que se propone en el software HEC-HMS para una simulación hidrológica es variada, por la disponibilidad de información se ha utilizado para cada una de las fases los siguientes métodos, datos de entrada encontrados anteriormente:

TABLA 63: Metodología aplicada en el HEC-HMS.
Fuente: Elaboración propia.

Cálculo de Pérdidas	Transformación Lluvia – Escorrentia	Tránsito de avenida por cauce
Número de curva – CN SCS	Hidrograma Unitario SCS	Muskingum

Esta simulación se centrará en torno a la estación limnimétrica de Gualaceo DJ Pamar, debido a la disponibilidad de datos de lectura de caudal e información de precipitación aguas arriba del punto de interés.

Tras correr el modelo hidrológico por primera vez se obtiene los siguientes resultados:

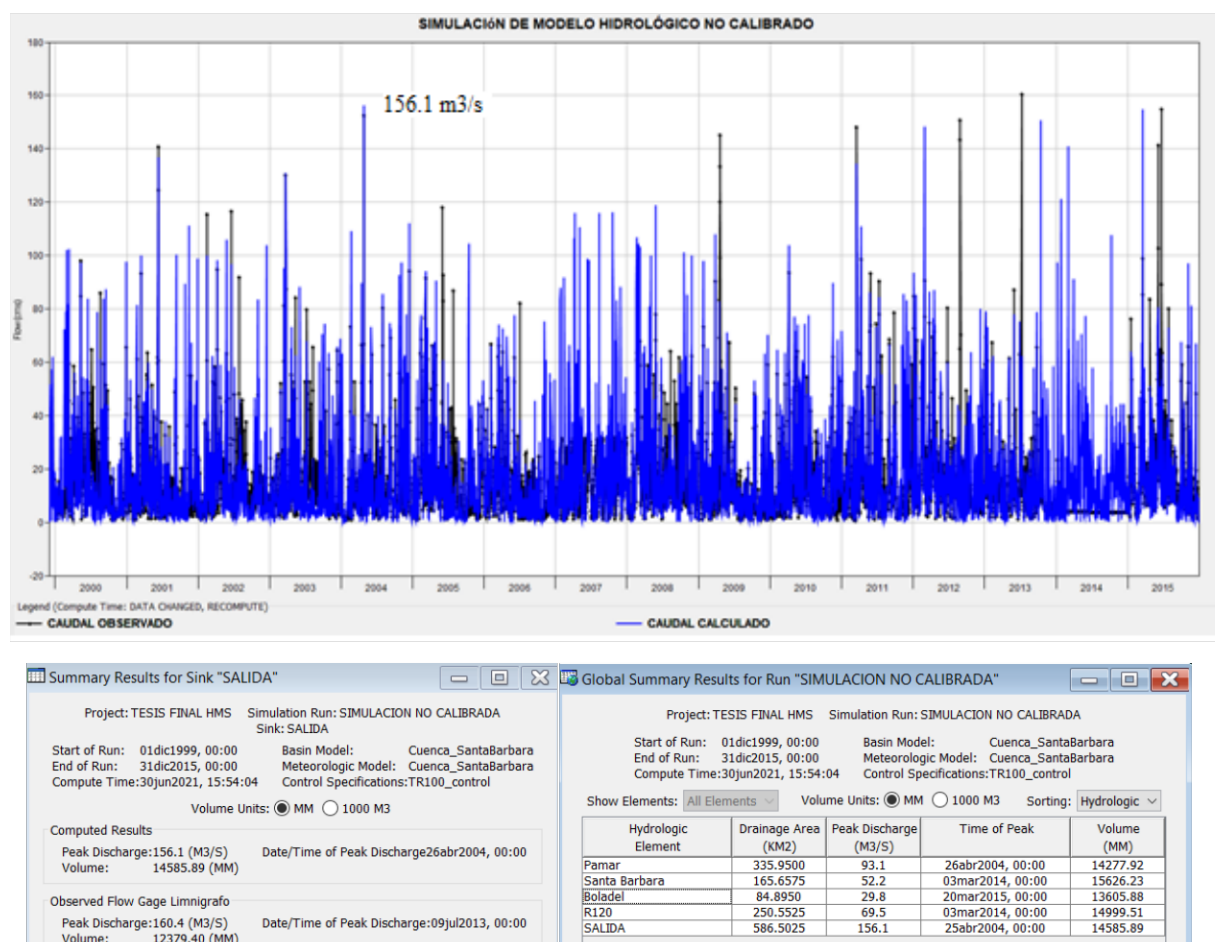


Figura 45. Resultado de la primera simulación en HEC-HMS.
Fuente. Elaboración propia. (Anexo 10)

Después de tener los primeros resultados por parte del software HEC-HMS, se realiza un análisis de los datos observados en campo con los de la simulación, comparar estos resultados nos permite tener una idea completa del funcionamiento del modelo hidrológico y de su nivel de confiabilidad respecto a los resultados obtenidos en campo.

3.4.1. Análisis estadístico de resultados del HEC-HMS.

Para poder tener en consideración los resultados de cualquier trabajo de investigación y el mismo tenga validéz, sus resultados deben tener cierto grado de confiabilidad; este análisis se lo hace mediante un análisis estadístico de resultados (Ochoa, 2014), respecto al estudio se analiza los resultados obtenidos en la opción día a día tanto en la simulación como en las lecturas reales.

Fecha	Flujo de Subcuenca Pamar	Flujo de R120	Flujo Calculado	Flujo Observado
27/3/2000	6.00	4.90	10.80	10.10

Fecha	Flujo de Subcuenca Pamar	Flujo de R120	Flujo Calculado	Flujo Observado
28/3/2000	22.20	18.50	40.70	25.20
29/3/2000	7.70	7.60	15.30	12.10
30/3/2000	1.90	0.50	2.40	2.20
31/3/2000	0.60	1.20	1.80	1.10
1/4/2000	2.60	1.30	3.90	3.30
2/4/2000	11.00	7.30	18.30	19.10
3/4/2000	15.30	8.90	24.20	28.20
4/4/2000	13.50	9.50	23.00	21.20
5/4/2000	27.50	19.30	46.90	44.40
6/4/2000	19.20	17.30	36.50	39.30
7/4/2000	23.00	17.70	40.60	58.50
8/4/2000	7.20	8.40	15.60	11.10
9/4/2000	18.70	12.80	31.60	26.20
10/4/2000	7.80	9.80	17.60	19.10
11/4/2000	35.20	21.00	56.20	52.50
12/4/2000	14.30	15.30	29.60	31.30
13/4/2000	9.30	3.00	12.30	11.10
14/4/2000	5.90	8.30	14.20	14.10
15/4/2000	5.60	0.5	6.10	9.90
16/4/2000	13.30	12.90	26.20	21.20
17/4/2000	5.50	2.60	8.10	6.60
18/4/2000	2.50	3.20	5.70	6.60
19/4/2000	12.70	4.70	17.40	10.10
20/4/2000	8.90	7.70	16.60	19.10
21/4/2000	10.80	6.90	17.70	16.10
22/4/2000	4.90	5.20	10.10	9.90
23/4/2000	19.00	14.00	33.00	19.10
24/4/2000	21.40	19.40	40.70	39.30
25/4/2000	31.80	15.70	47.50	28.20
26/4/2000	10.20	8.30	18.50	12.10

Figura 46. Resultado de caudales por día en software HEC-HMS.
Fuente. Elaboración propia.

Como se observa en la transcripción de la tabla anterior, el software HEC-HMS genera los resultados para la simulación hidrológica día a día, este resultado nos permite en lo posterior realizar el análisis estadístico.

De igual manera en el software HEC-HMS se observa los valores para poder realizar la comparación entre el flujo observado y el flujo calculado.

TABLA 64: Análisis estadístico de resultados obtenidos.
Fuente: Elaboración propia.

Año	MAE	RRMSE	Coefficiente R	Coefficiente R ²
2000	8.022	0.950	0.704	0.496
2001	7.106	1.000	0.739	0.546
2002	7.314	0.890	0.705	0.500
2003	7.905	0.900	0.696	0.485
2004	7.148	1.100	0.702	0.493
2005	7.854	0.910	0.690	0.477
2006	6.034	1.010	0.697	0.486
2007	9.448	1.210	0.705	0.499
2008	9.218	0.910	0.743	0.552
2009	6.340	0.890	0.707	0.499
2010	7.770	0.910	0.761	0.579
2011	8.248	0.940	0.729	0.532
2012	8.006	0.800	0.711	0.505
2013	5.804	0.950	0.711	0.505
2015	7.356	0.710	0.741	0.549

Donde:

MAE: Error medio absoluto.

RRMSE: Error medio relativo cuadrado.

Coefficiente R²: Coeficiente de correlación (R²)

El análisis estadístico brindado por los resultados obtenidos por la primera simulación nos brindan coeficientes R² los cuales van desde 0.477 a 0.579; estos coeficientes en la mayoría de años son menores a 0.500 por esta razón se realizará la calibración de las variables de entrada y de esta manera aumentar el coeficiente R²; de esta manera se tendrá un modelo hidrológico confiable.

3.4.2. Optimización y validación del modelo.

Con el fin de tener el modelo hidrológico lo más parecido a la realidad, se procede a realizar una iteración en las variables que componen el modelo de la cuenca (Basin Model), donde se calibra el número de curva para poder aumentar el coeficiente de correlación (R²) encontrado en el análisis estadístico de resultados, se pretende llegar a un valor cercano a 0.5 o superior para poder definir que el modelo hidrológico tiene una correlación moderada.

La optimización se da para una parte de la data, mientras que la validación para la data completa; es decir, después de realizar la iteración de las variables y se encuentre el valor óptimo, se repite la simulación en el software HEC-HMS para encontrar los nuevos resultados.

Los datos que son utilizados para realizar la *simulación del modelo hidrológico optimizado* son los siguientes:

TABLA 65: Valores optimizados para realizar la simulación.
Fuente: Elaboración propia.

Subcuenca	CN Optimizado.	Lag time (min)
Río Pamar	79	199
Río Santa Bárbara	78	93
Río Boladel	81	53

Al realizar la calibración del CN se modifica la escorrentía superficial del modelo hidrológico y al realizar la simulación en el software HEC-HMS de nuevo y se obtienen los resultados:

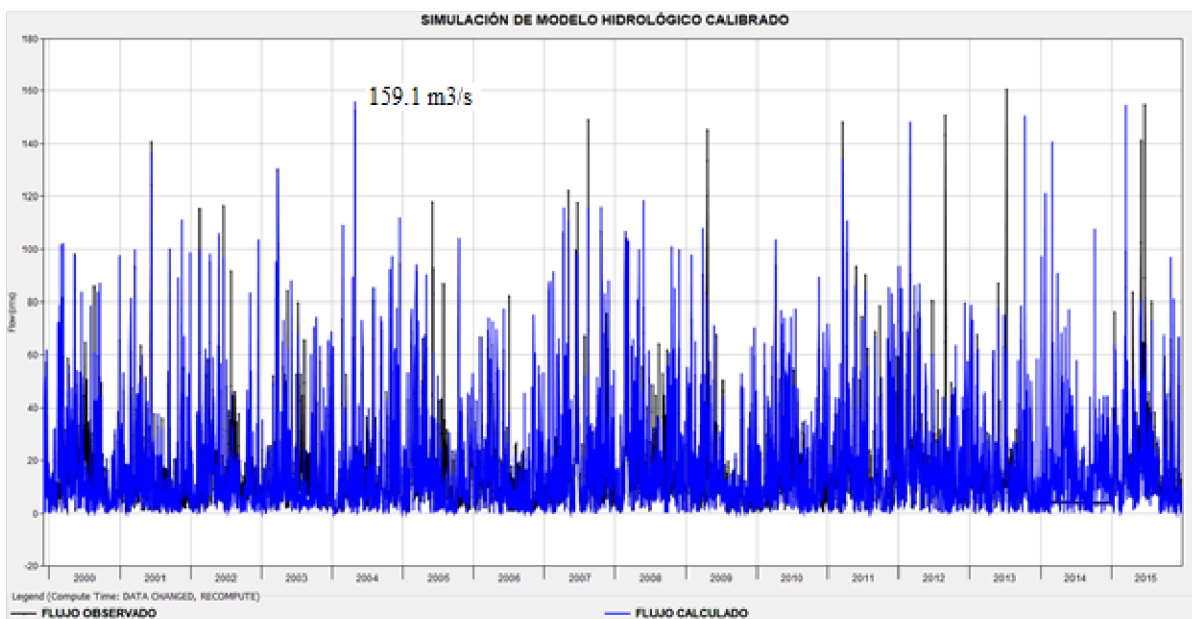


Figura 47. Resultado con valores optimizados de la simulación en HEC-HMS.
Fuente. Elaboración propia. (Anexo 11)

Para la validación de la data se realiza nuevamente el análisis estadístico obteniendo para cada uno de los años en estudio:

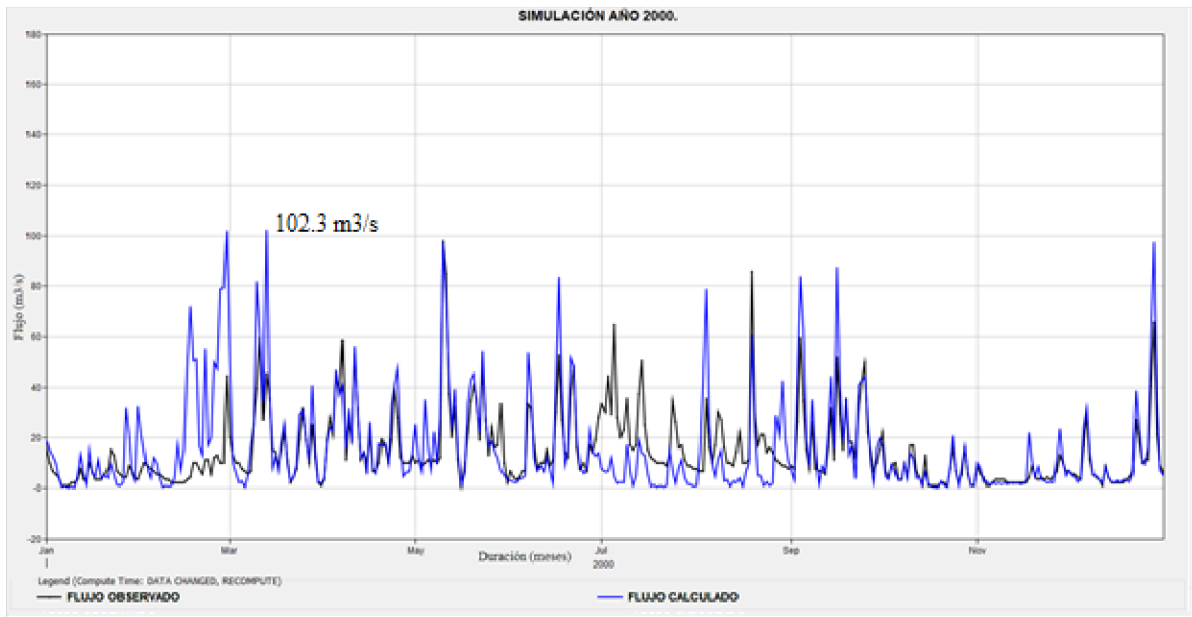


Figura 48. Flujo observado vs flujo calculado en modelo calibrado para el año 2000.
Fuente. Elaboración propia.

TABLA 66:. Análisis estadístico para el año 2000.
Fuente: Elaboración propia.

Año	Coficiente R	Coficiente R ²	Coficiente Nash-Sutcliffe
2000	0.704	0.496	0.278
2000 optimizado.	0.716	0.513	0.300

El resultado para la simulación en el año 2000 tras su calibración y el respectivo análisis estadístico aumenta un coeficiente R² de 0.513 y se tiene un caudal punta calculado de 102.3 m³/s; el coeficiente analizado permite expresar que el modelo hidrológico es confiable.

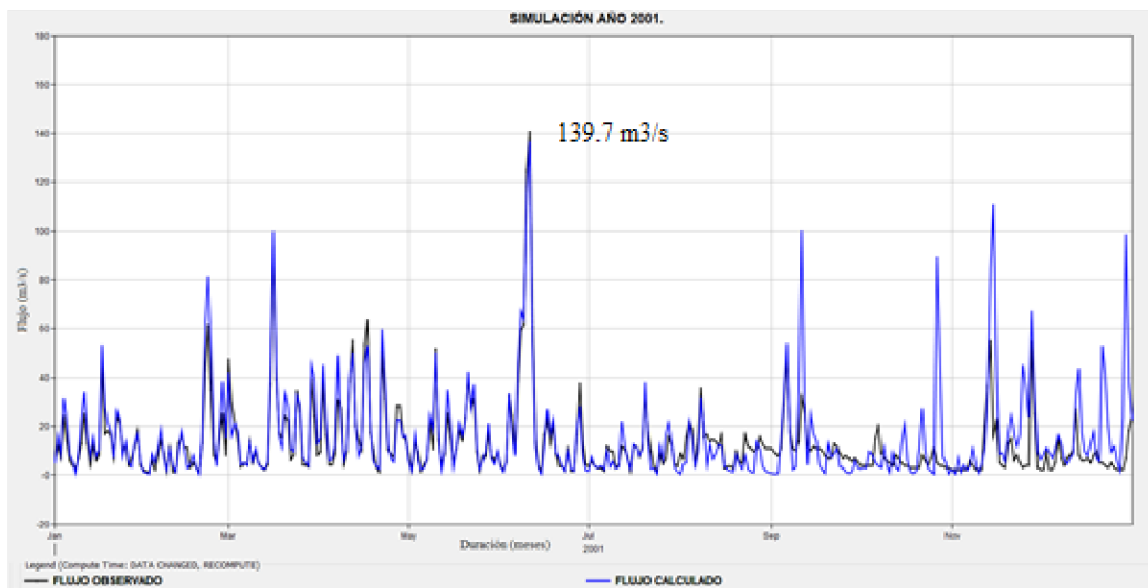


Figura 49. Flujo observado vs flujo calculado en modelo calibrado para el año 2001.
Fuente. Elaboración propia.

TABLA 67: Análisis estadístico para el año 2001.

Fuente: Elaboración propia.

Año	Coefficiente R	Coefficiente R ²	Coefficiente Nash-Sutcliffe
2001	0.739	0.546	0.294
2001 optimizado.	0.749	0.561	0.335

Para el año 2001 tras su calibración y validación el coeficiente R² es de 0.561 y se tiene un caudal punta calculado de 139.7 m³/s; el coeficiente es muy favorable y permite tener una confiabilidad alta en el modelo.

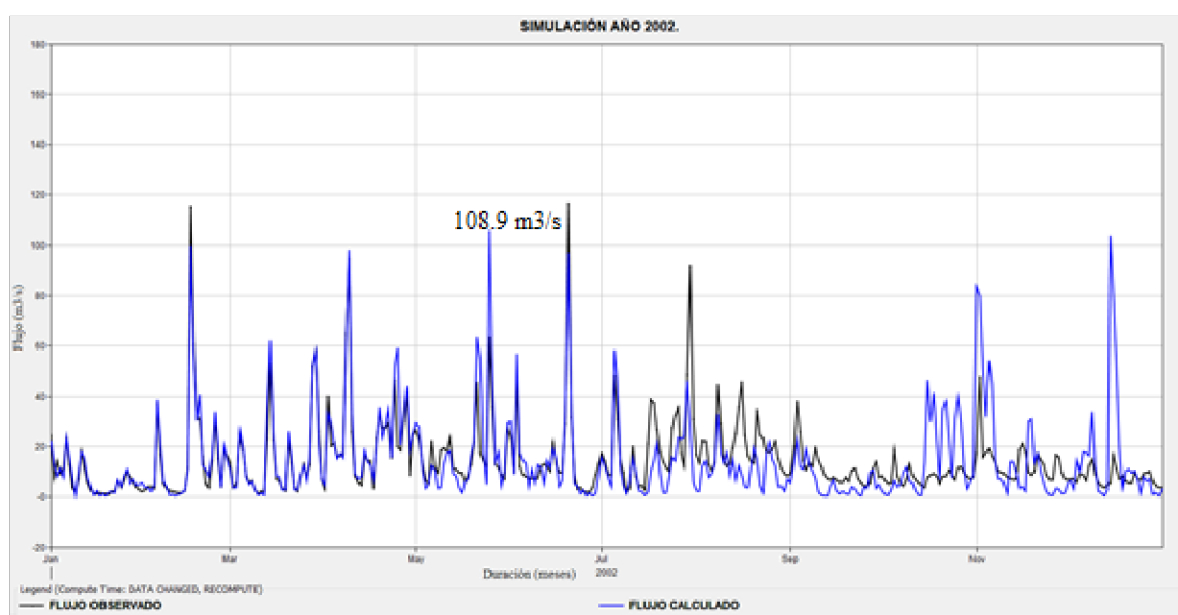


Figura 50. Flujo observado vs flujo calculado en modelo calibrado para el año 2002.

Fuente: Elaboración propia.

TABLA 68: Análisis estadístico para el año 2002.

Fuente: Elaboración propia.

Año	Coefficiente R	Coefficiente R ²	Coefficiente Nash-Sutcliffe
2002	0.705	0.500	0.268
2002 optimizado.	0.714	0.511	0.290

Para el año 2002 tras su calibración y validación el coeficiente R² es de 0.511 y se tiene un caudal punta calculado de 108.9 m³/s; el coeficiente da una confiabilidad en el modelo.

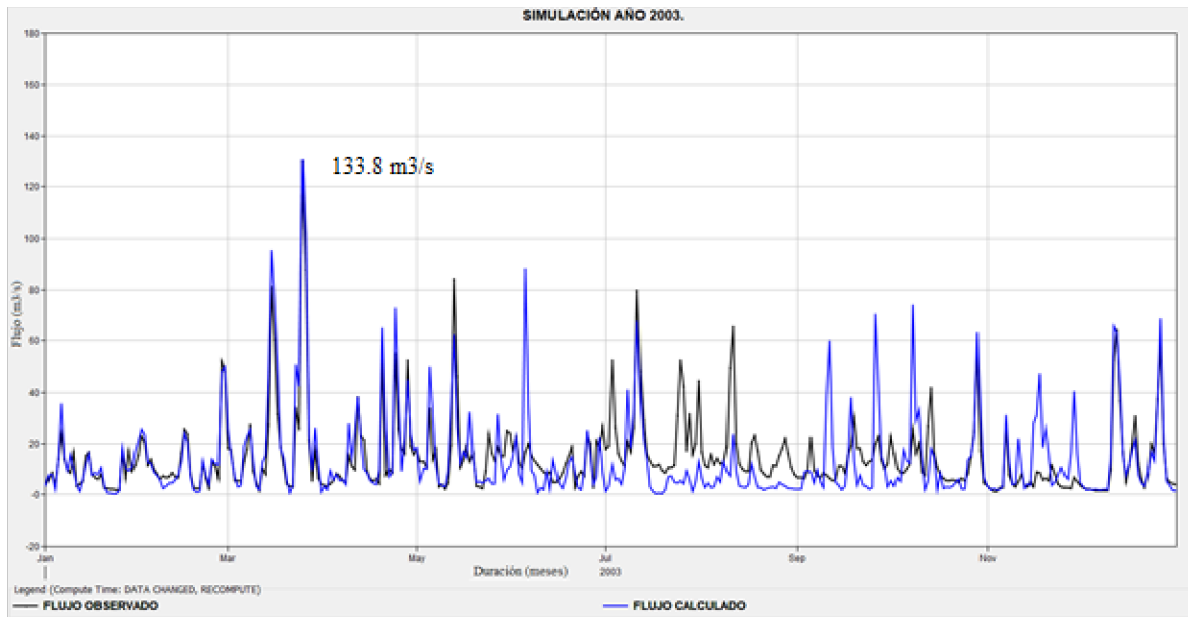


Figura 51. Flujo observado vs flujo calculado en modelo calibrado para el año 2003.
Fuente. Elaboración propia.

TABLA 69: Análisis estadístico para el año 2003.
Fuente: Elaboración propia.

Año	Coefficiente R	Coefficiente R ²	Coefficiente Nash-Sutcliffe
2003	0.696	0.485	0.292
2003 optimizado.	0.710	0.504	0.310

Para el año 2003 tras su calibración y validación el coeficiente R² es de 0.504 y se tiene un caudal punta calculado de 133.8 m³/s; el coeficiente da una confiabilidad en el modelo.

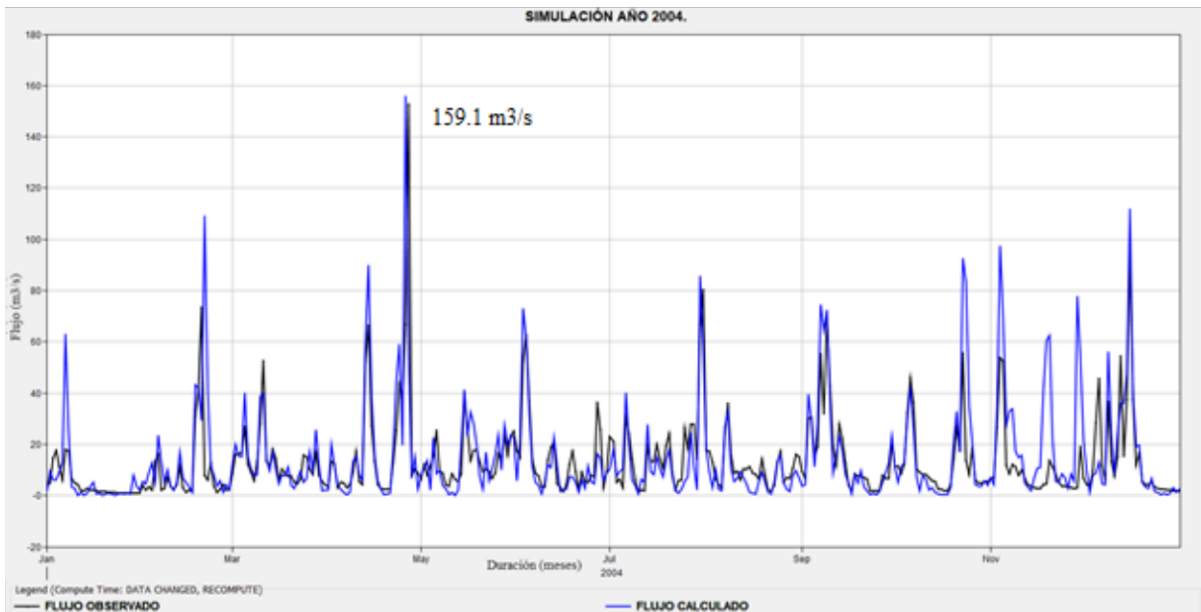


Figura 52. Flujo observado vs flujo calculado en modelo calibrado para el año 2004.
Fuente. Elaboración propia.

TABLA 70: Análisis estadístico para el año 2004.

Fuente: Elaboración propia.

Año	Coefficiente R	Coefficiente R ²	Coefficiente Nash-Sutcliffe
2004	0.702	0.493	0.287
2004 optimizado.	0.714	0.512	0.300

Para el año 2004 tras su calibración y validación el coeficiente R² es de 0.512 y se tiene un caudal punta calculado de 159.1 m³/s; el coeficiente da una confiabilidad en el modelo.

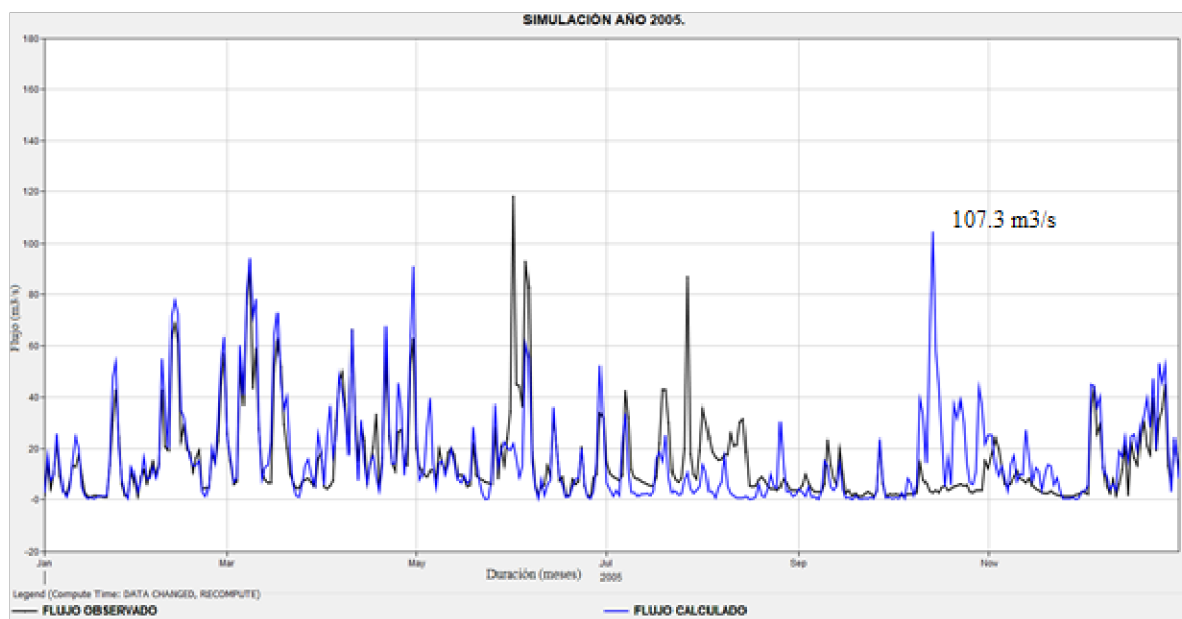


Figura 53. Flujo observado vs flujo calculado en modelo calibrado para el año 2005.

Fuente: Elaboración propia.

TABLA 71: Análisis estadístico para el año 2005.

Fuente: Elaboración propia.

Año	Coefficiente R	Coefficiente R ²	Coefficiente Nash-Sutcliffe
2005	0.690	0.477	0.284
2005 optimizado.	0.700	0.491	0.310

Para la simulación de año 2005 con los datos de entrada optimizados se obtuvo el coeficiente R² más bajo 0.491; este coeficiente se acerca mucho a 0.500 el cual permite describir como moderadamente confiable, por esta razón y por el resultado en los años anteriores y posteriores se acepta la confiabilidad del mismo.

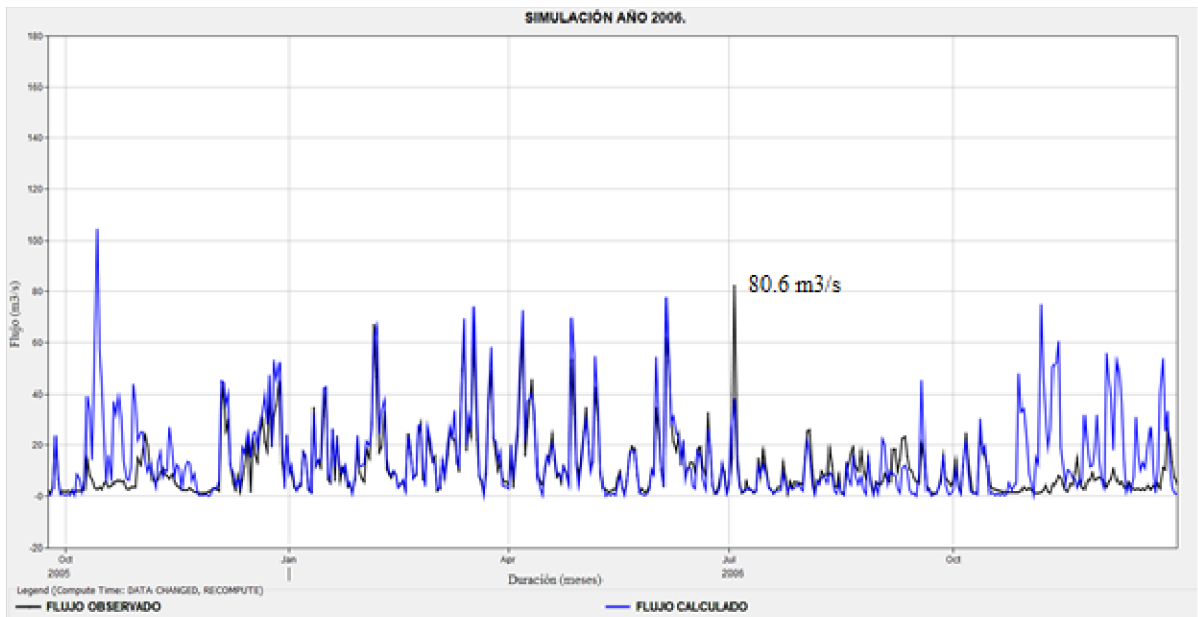


Figura 54. Flujo observado vs flujo calculado en modelo calibrado para el año 2006.

Fuente. Elaboración propia.

TABLA 72: Análisis estadístico para el año 2006.

Fuente: Elaboración propia.

Año	Coefficiente R	Coefficiente R ²	Coefficiente Nash-Sutcliffe
2006	0.697	0.486	0.277
2006 optimizado.	0.703	0.495	0.290

Para el año 2006 tras su calibración y validación el coeficiente R² es de 0.495 y se tiene un caudal punta calculado de 80.6 m³/s; el coeficiente da una confiabilidad media en el modelo.

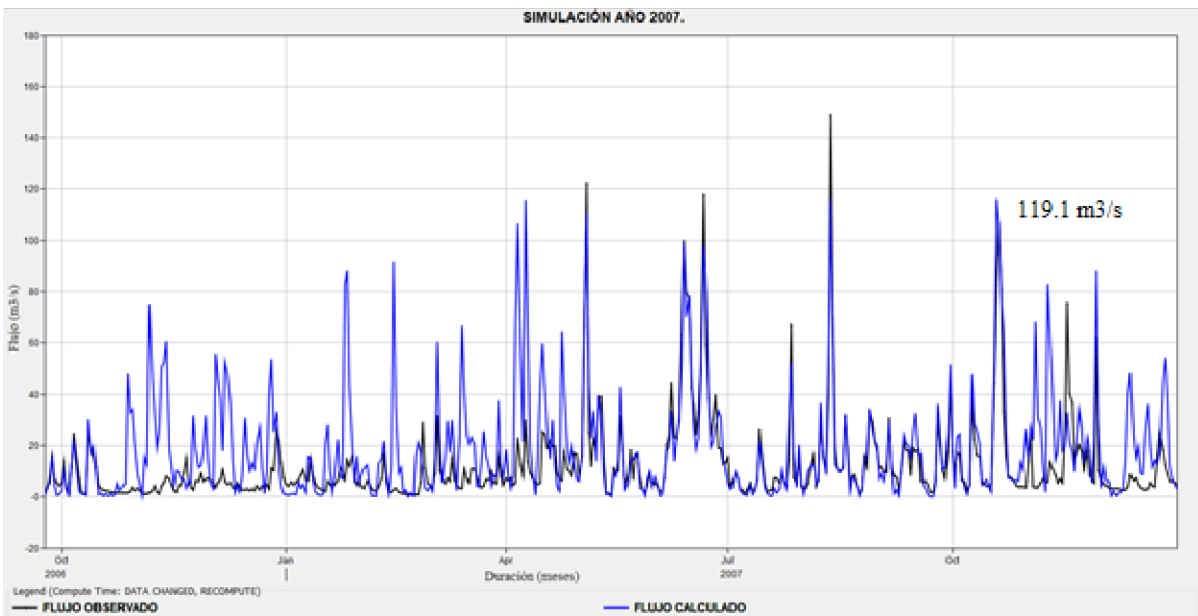


Figura 55. Flujo observado vs flujo calculado en modelo calibrado para el año 2007.

Fuente. Elaboración propia.

TABLA 73: Análisis estadístico para el año 2007.

Fuente: Elaboración propia.

Año	Coefficiente R	Coefficiente R ²	Coefficiente Nash-Sutcliffe
2007	0.705	0.499	0.294
2007 optimizado.	0.716	0.512	0.323

Para el año 2007 tras su calibración y validación el coeficiente R² es de 0.512 y se tiene un caudal punta calculado de 119.1 m³/s; el coeficiente da una confiabilidad en el modelo.

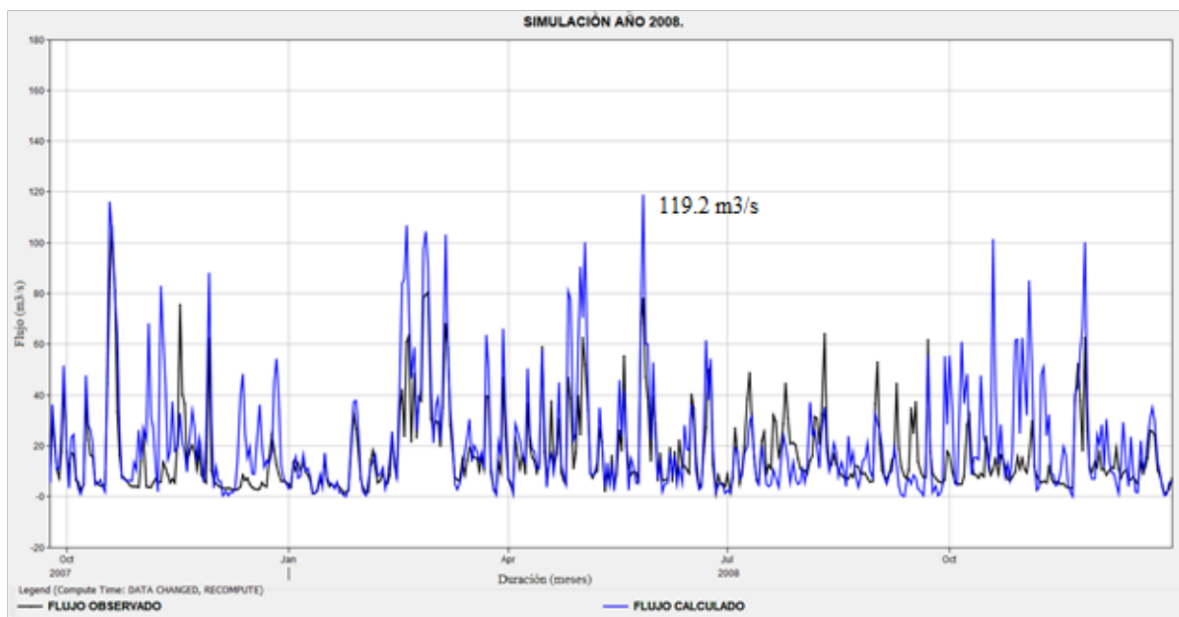


Figura 56. Flujo observado vs flujo calculado en modelo calibrado para el año 2008.

Fuente. Elaboración propia.

TABLA 74: Análisis estadístico para el año 2008.

Fuente: Elaboración propia.

Año	Coefficiente R	Coefficiente R ²	Coefficiente Nash-Sutcliffe
2008	0.743	0.552	0.287
2008 optimizado.	0.750	0.562	0.313

Para el año 2008 tras su calibración y validación el coeficiente R² es de 0.562 y se tiene un caudal punta calculado de 119.2 m³/s; el coeficiente da una confiabilidad en el modelo.

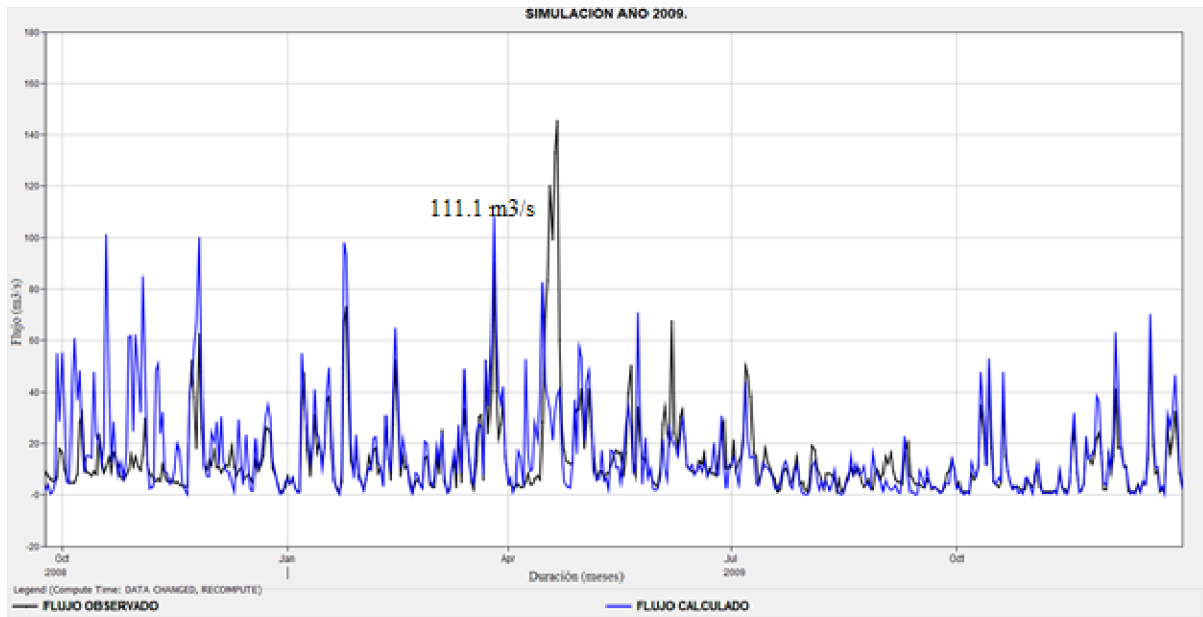


Figura 57. Flujo observado vs flujo calculado en modelo calibrado para el año 2009.
Fuente. Elaboración propia.

TABLA 75: Análisis estadístico para el año 2009.
Fuente: Elaboración propia.

Año	Coficiente R	Coficiente R ²	Coficiente Nash-Sutcliffe
2009	0.707	0.499	0.428
2009 optimizado.	0.715	0.511	0.455

Para el año 2009 tras su calibración y validación el coeficiente R² es de 0.511 y se tiene un caudal punta calculado de 111.1 m³/s; el coeficiente da una confiabilidad en el modelo.

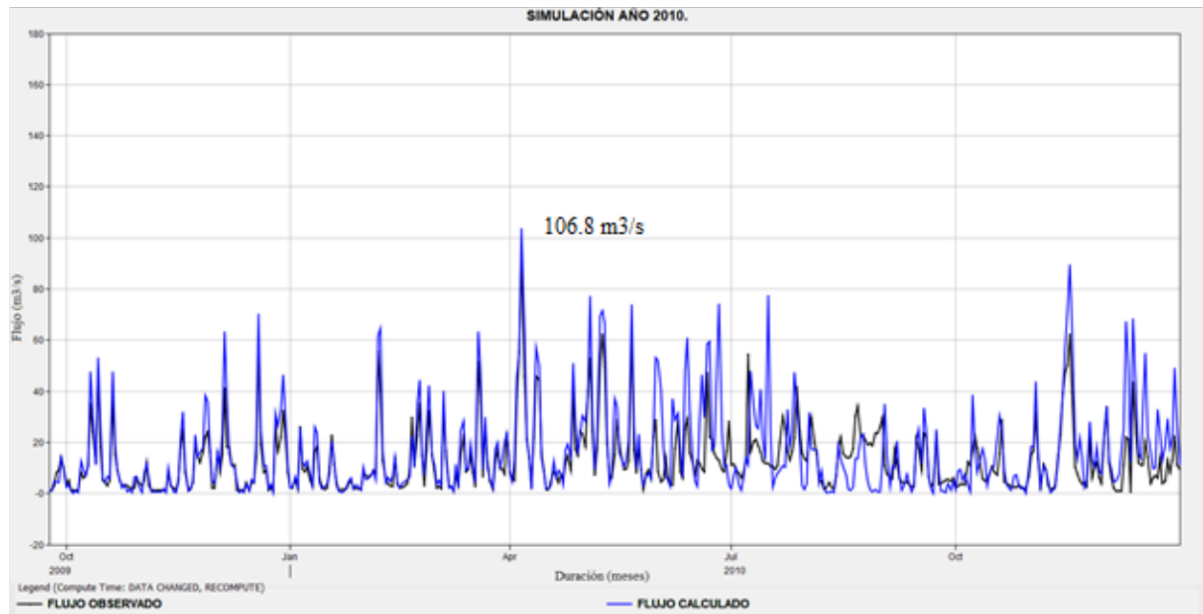


Figura 58. Flujo observado vs flujo calculado en modelo calibrado para el año 2010.
Fuente. Elaboración propia.

TABLA 76: Análisis estadístico para el año 2010.
Fuente: Elaboración propia.

Año	Coefficiente R	Coefficiente R ²	Coefficiente Nash-Sutcliffe
2010	0.761	0.579	0.285
2010 optimizado.	0.765	0.585	0.300

Para la simulación del año 2010 con los datos de entrada optimizados se obtuvo el coeficiente R² más alto 0.585 y se tiene un caudal punta calculado de 106.8 m³/s; describiendo el modelo como moderadamente confiable.

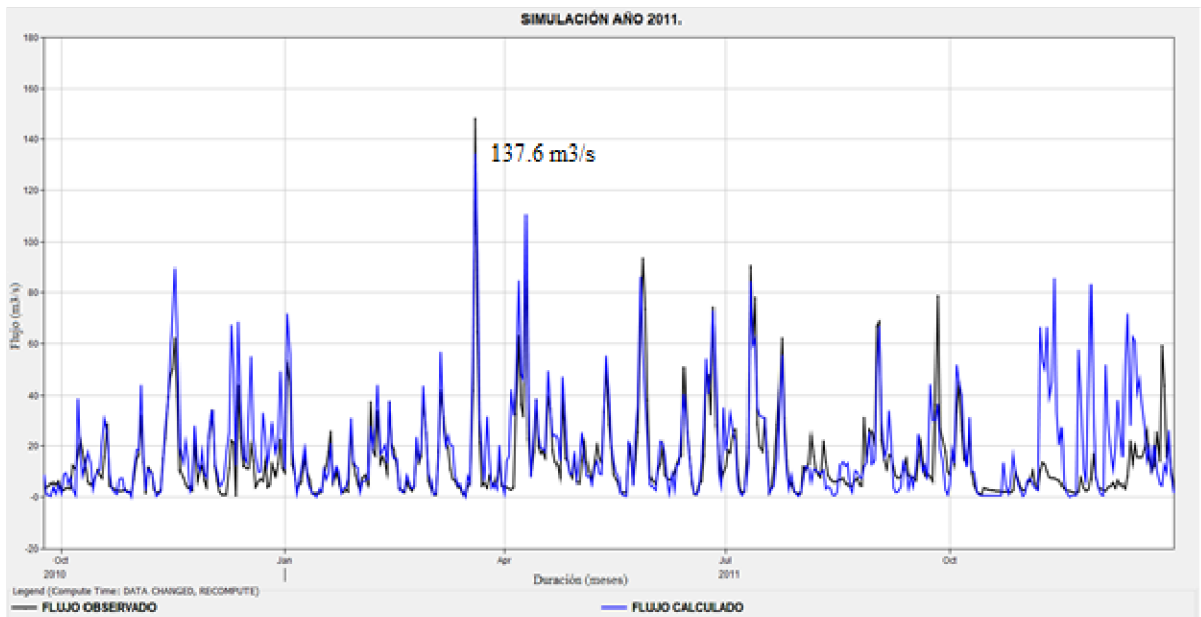


Figura 59. Flujo observado vs flujo calculado en modelo calibrado para el año 2011.
Fuente. Elaboración propia.

TABLA 77: Análisis estadístico para el año 2011.
Fuente: Elaboración propia.

Año	Coefficiente R	Coefficiente R ²	
2011	0.729	0.532	0.296
2011 optimizado.	0.731	0.536	0.320

Para el año 2011 tras su calibración y validación el coeficiente R² es de 0.536 y se tiene un caudal punta calculado de 137.6 m³/s; el coeficiente da una confiabilidad en el modelo.

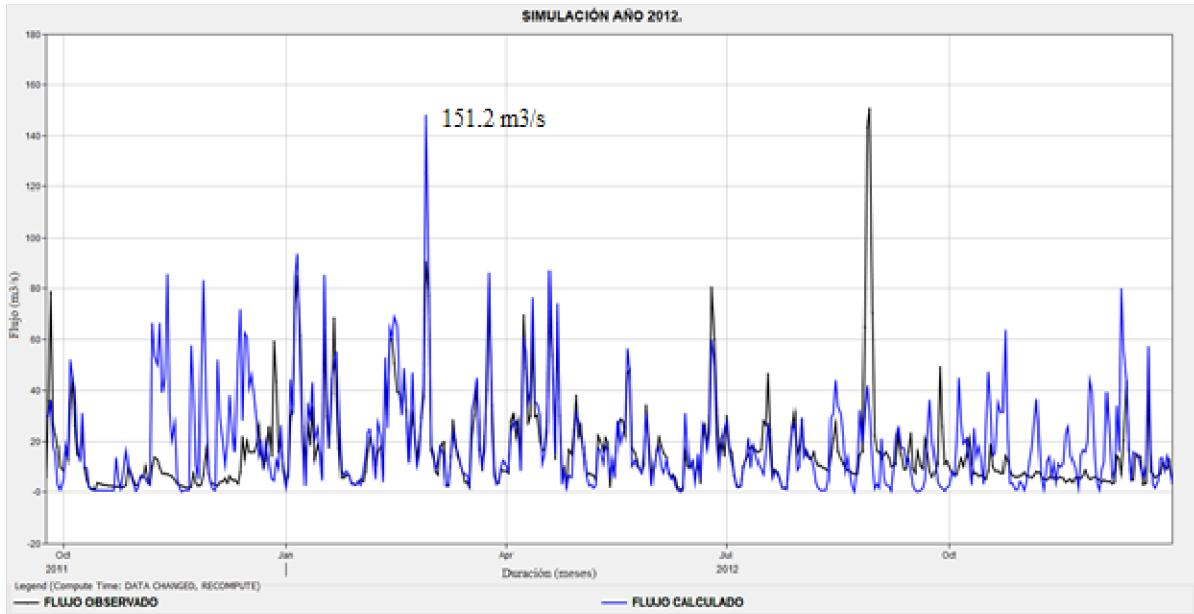


Figura 60. Flujo observado vs flujo calculado en modelo calibrado para el año 2012.
Fuente. Elaboración propia.

TABLA 78: Análisis estadístico para el año 2012.
Fuente: Elaboración propia.

Año	Coefficiente R	Coefficiente R ²	Coefficiente Nash-Sutcliffe
2012	0.711	0.505	0.360
2012 optimizado.	0.714	0.510	0.402

Para el año 2012 tras su calibración y validación el coeficiente R² es de 0.510 y se tiene un caudal punta calculado de 151.2 m³/s; el coeficiente da una confiabilidad en el modelo.

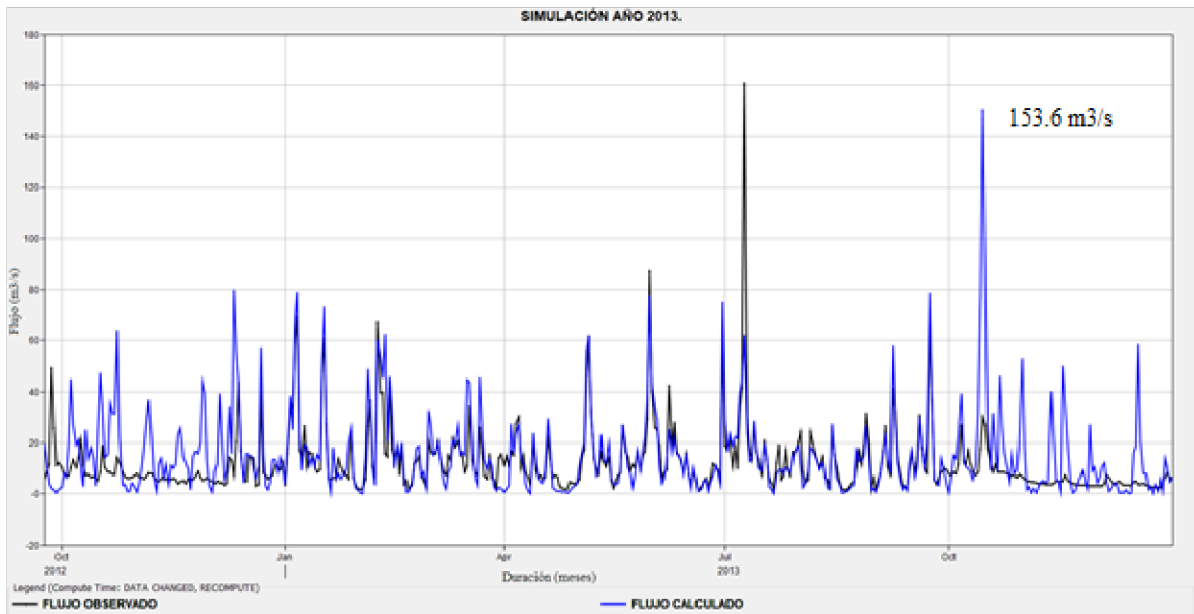


Figura 61. Flujo observado vs flujo calculado en modelo calibrado para el año 2013.
Fuente. Elaboración propia.

TABLA 79: Análisis estadístico para el año 2013.

Fuente: Elaboración propia.

Año	Coefficiente R	Coefficiente R ²	Coefficiente Nash-Sutcliffe
2013	0.711	0.505	0.294
2013 optimizado.	0.714	0.510	0.323

Para el año 2013 tras su calibración y validación el coeficiente R² es de 0.510 y se tiene un caudal punta calculado de 153.6 m³/s; coeficiente que da una confiabilidad en el modelo.

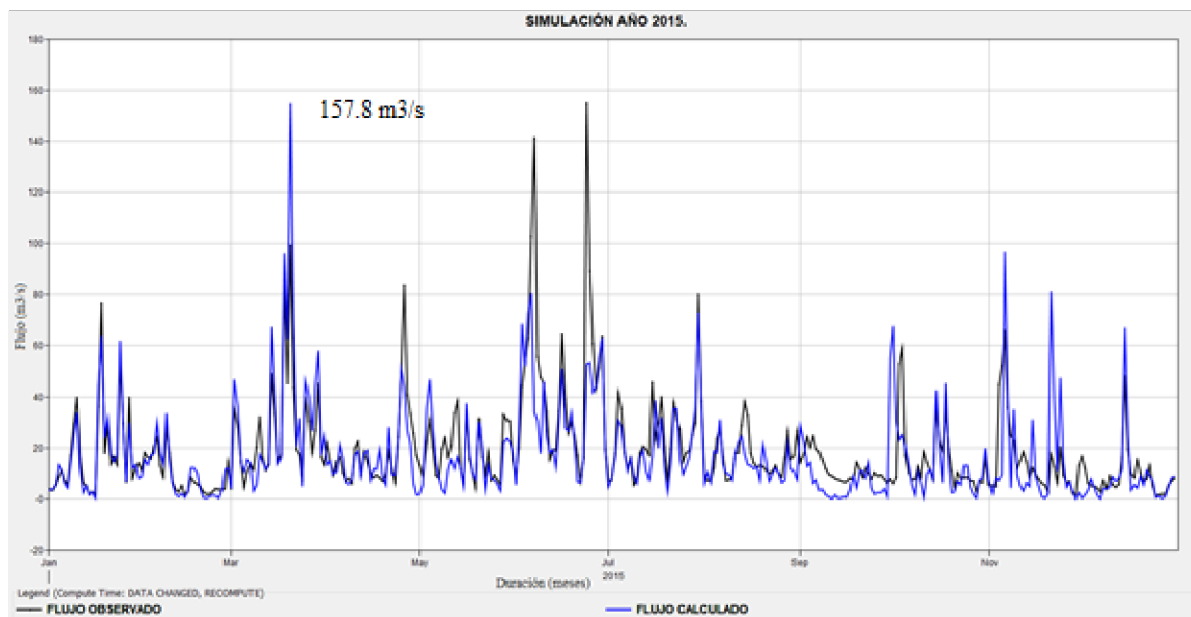


Figura 62. Flujo observado vs flujo calculado en modelo calibrado para el año 2015.

Fuente: Elaboración propia.

TABLA 80: Análisis estadístico para el año 2015.

Fuente: Elaboración propia.

Año	Coefficiente R	Coefficiente R ²	Coefficiente Nash-Sutcliffe
2015	0.741	0.549	0.483
2015 optimizado.	0.743	0.554	0.500

Para el año 2015 tras su calibración y validación el coeficiente R² es de 0.554 y el coeficiente Nash-Sutcliffe es de 0.500 siendo este el más alto en la simulación y teniendo un ajuste de **Bueno**.

3.5. Hidrograma para periodos de retorno.

Posterior a la validación y calibración del modelo hidrológico se procede a realizar la simulación con los hidrogramas calculados en los periodos de retorno de 2, 50 y 100 años respectivamente.

3.5.1. Periodo de retorno: 2 años.

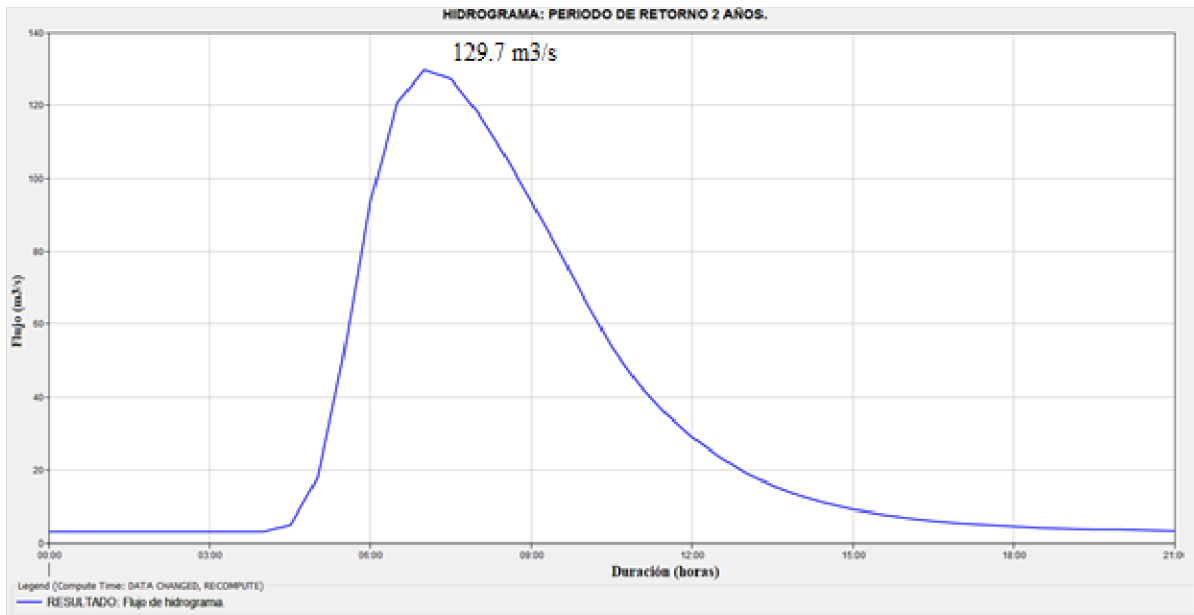


Figura 63. Hidrograma para periodo de retorno de 2 años.
Fuente. Elaboración propia.

Como se observa en la ilustración anterior, para el estudio en un periodo de retorno correspondiente a 2 años se obtiene un caudal pico de 129.7 m³/s.

3.5.2. Periodo de retorno: 50 años.

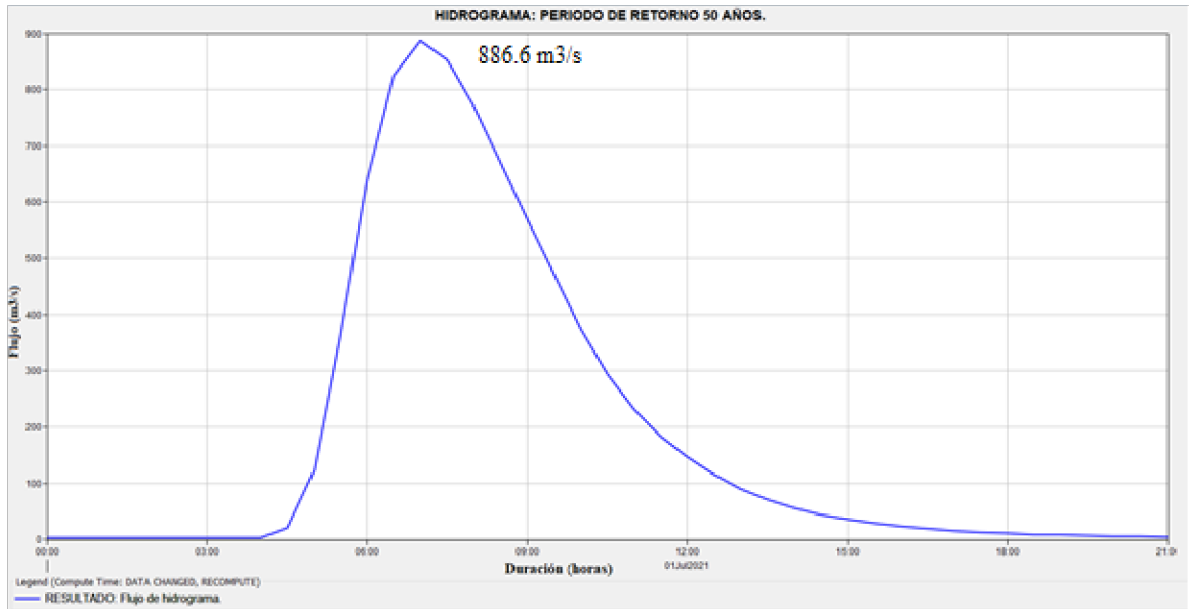


Figura 64. Hidrograma para periodo de retorno de 50 años.
Fuente. Elaboración propia.

Para un periodo de 50 años se obtiene un caudal pico de 886.6 m³/s, para cotejar esta información se verifica el estudio *“Calibración de un Modelo Basado en Agentes para el*

estudio del peligro de inundación en el río Santa Bárbara Orellana”, (Orellana, Timbe & Pinos, 2017); mismo que para una simulación en este periodo de retorno maneja un caudal muy similar a este resultado.

3.5.3. Periodo de retorno: 100 años.

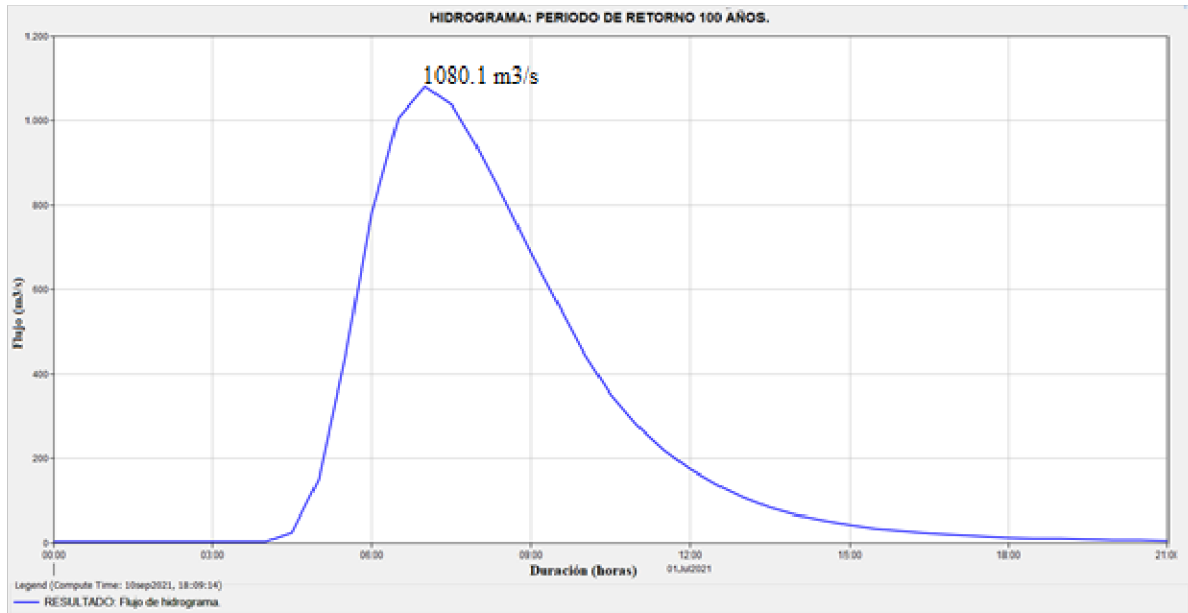


Figura 65. Hidrograma para periodo de retorno de 100 años.
Fuente. Elaboración propia.

Para un periodo de retorno de 100 años, se obtiene un caudal pico de $1080.1 \text{ m}^3/\text{s}$; caudal que es muy considerable y debe ser tomado en cuenta el momento de la planificación de obras civiles en la zona de estudio.

3.6. Modelación Hidráulica HEC-RAS

Para tener una relación adecuada entre acontecimiento reales y el modelo hidrológico calculado anteriormente, se realizó una modelación hidraulica la misma que es: *unidimensional de flujo no permanente* en el casco urbano del cantón Gualaceo, donde se va a obtener una zona de predicción de inundabilidad en una longitud de 2500 metros aproximadamente.

Al igual que para la modelación hidrológica los sistemas de información geograficos son de mucha ayuda, para esta sección de la modelación hidráulica se utilizará la herramienta de HEC-GeoRAS; esta brindará facilidades para determinar los elementos de entrada en el modelo.

3.6.1. Datos geométricos.

Los elementos de entrada para el *Geometric Data*, se determinan con ayuda del complemento HEC-GeoRAS; donde se obtiene las secciones transversales del flujo, trayectoria de flujo y características propias del río Santa Bárbara que es el que se encuentra en la zona.

Para un mayor detalle en la zona, se utilizó un MDE con un tamaño de pixel de 3 x 3; mismo que fue suministrado por el docente Ingeniero Carlos Matovelle, información disponible de sus recursos digitales.

Tras la digitalización y proceso del MDE en el SIG, se procede a migrar la información a HEC-RAS obteniendo el tramo de los 2500 mts con sus secciones transversales.

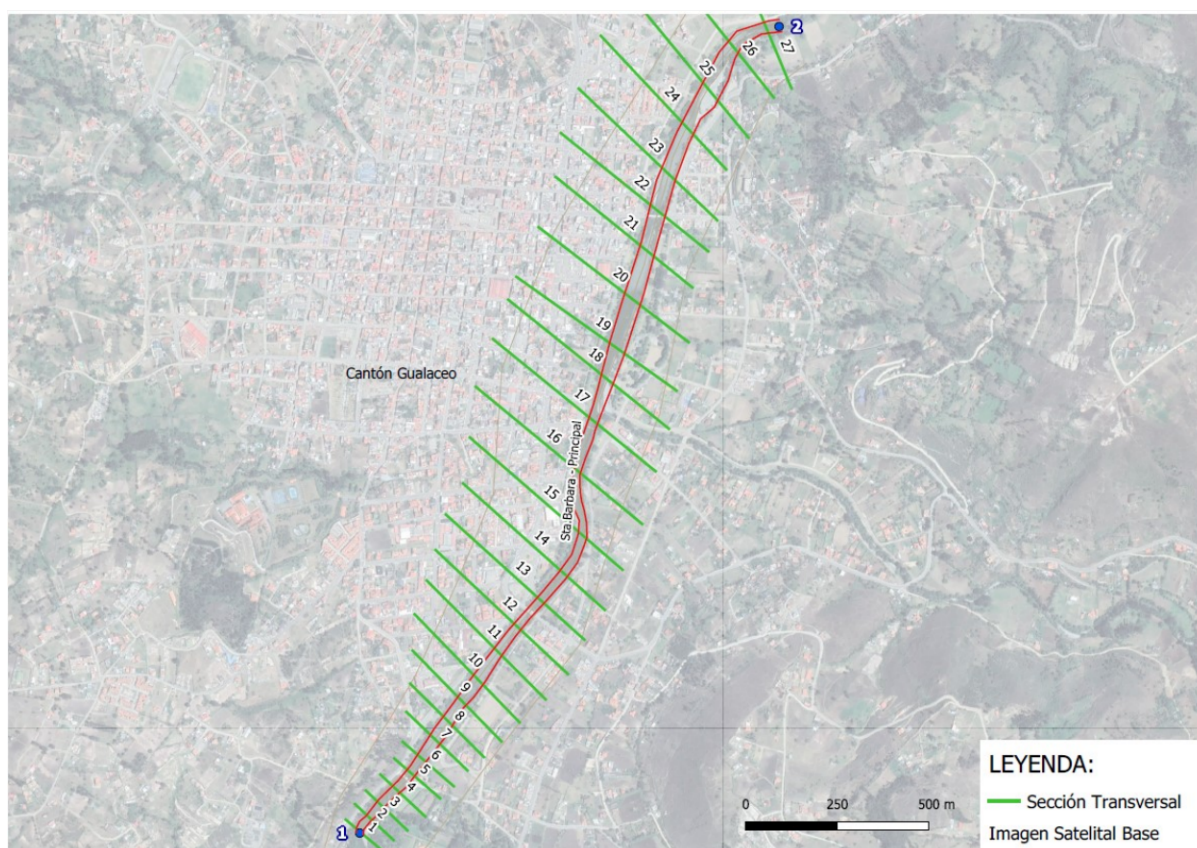
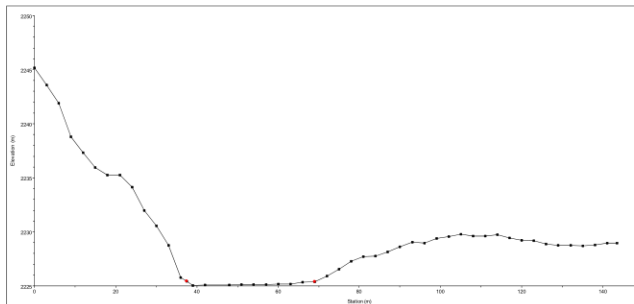


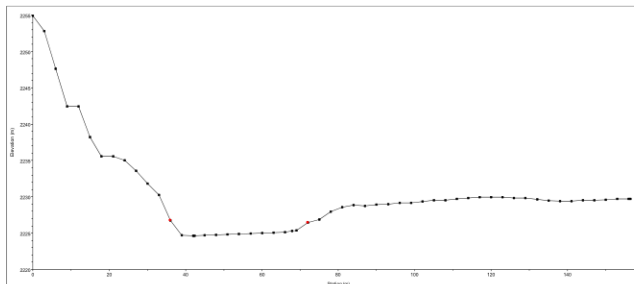
Figura 66. Tramo de río Santa Bárbara (2500 metros) en el cantón Gualaceo en HEC-RAS.
Fuente. Elaboración propia.

De igual forma, las secciones que se encontraron en software fueron cotejadas con imágenes reales realizadas mediante el sobrevuelo de dron a la zona, si bien a estas no se las puede representar completamente mantienen una similitud con las existentes en la realidad.

Sección #2



Sección #10



Sección #14

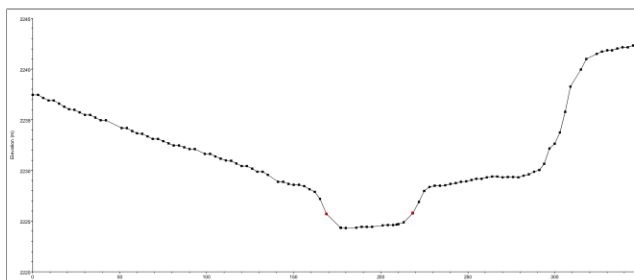


Figura 67. Secciones transversales del río Santa Bárbara a la altura del cantón Gualaceo referenciado a las secciones de la Fig.65.
Fuente. Elaboración propia.

Para el tramo en estudio, se maneja el coeficiente de rugosidad de Manning de 0.043 para los tramos laterales y de 0.035 para la franja central del río, la selección del coeficiente de rugosidad se basa en las características propias geológicas y de vegetación presente en las secciones transversales y en bibliografía recopilada de estudios efectuados en la cuenca del río Santa Bárbara.

3.6.2. Datos de flujo no permanente.

Para la configuración del flujo se ha elegido para el tramo principal los hidrogramas de flujo, mismos que fueron calculados en este estudio en el apartado 3.7; con la simulación de estos se procederá a tener las áreas de inundabilidad de acuerdo a los resultados obtenidos en este estudio.

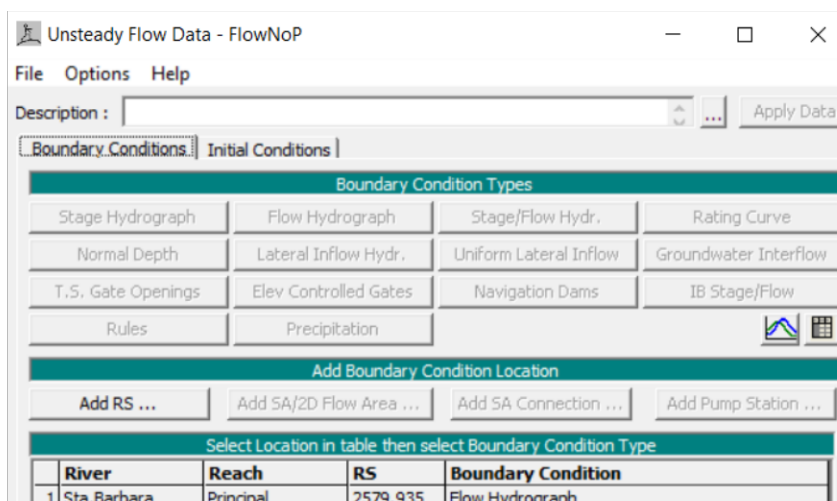


Figura 68. Datos de flujo no permanente en HEC-RAS.
Fuente. Elaboración propia.

3.6.3. Simulación de modelo hidráulico en el software HEC-RAS.

Para la simulación hidráulica en el cantón Gualaceo, se ha tomado la información obtenida hasta nuestro punto de interés más el análisis de la subcuenca Gualaceo Alto cuyo CN es 82 y su tiempo de retardo (lag time) es 46 minutos.

- **Periodo de retorno 2 años.**

Para esta simulación se ingresó el hidrograma cuyo flujo punta es de 148.7 m³/s.

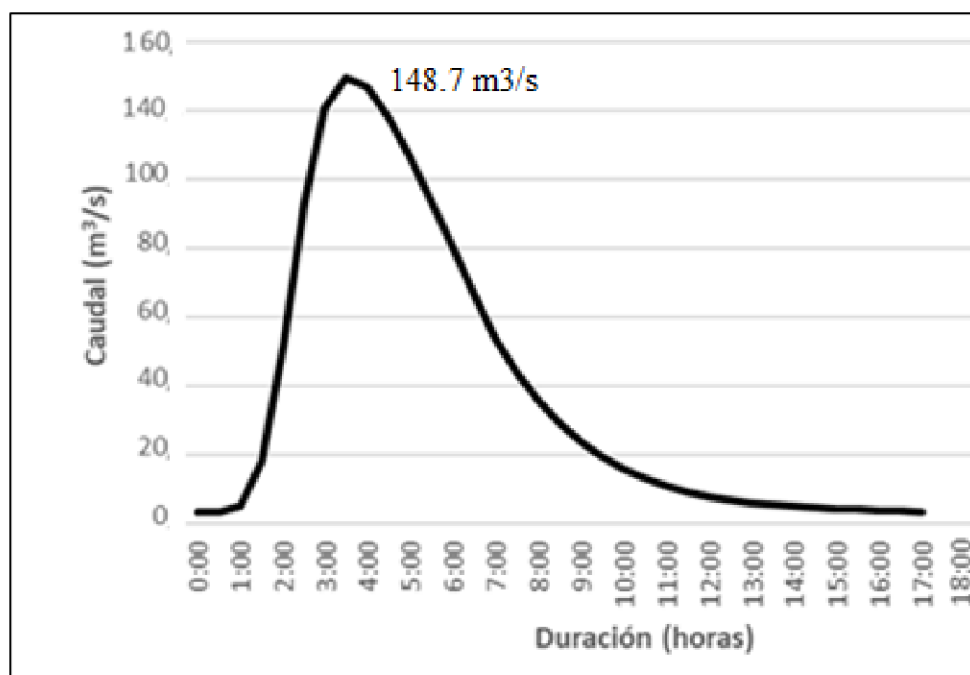


Figura 69. Hidrograma para periodo de retorno 2 años en HEC-RAS.
Fuente. Elaboración propia.

Realizando la simulación en el software HEC-RAS se obtiene la siguiente zona propensa a inundaciones en este periodo de retorno.

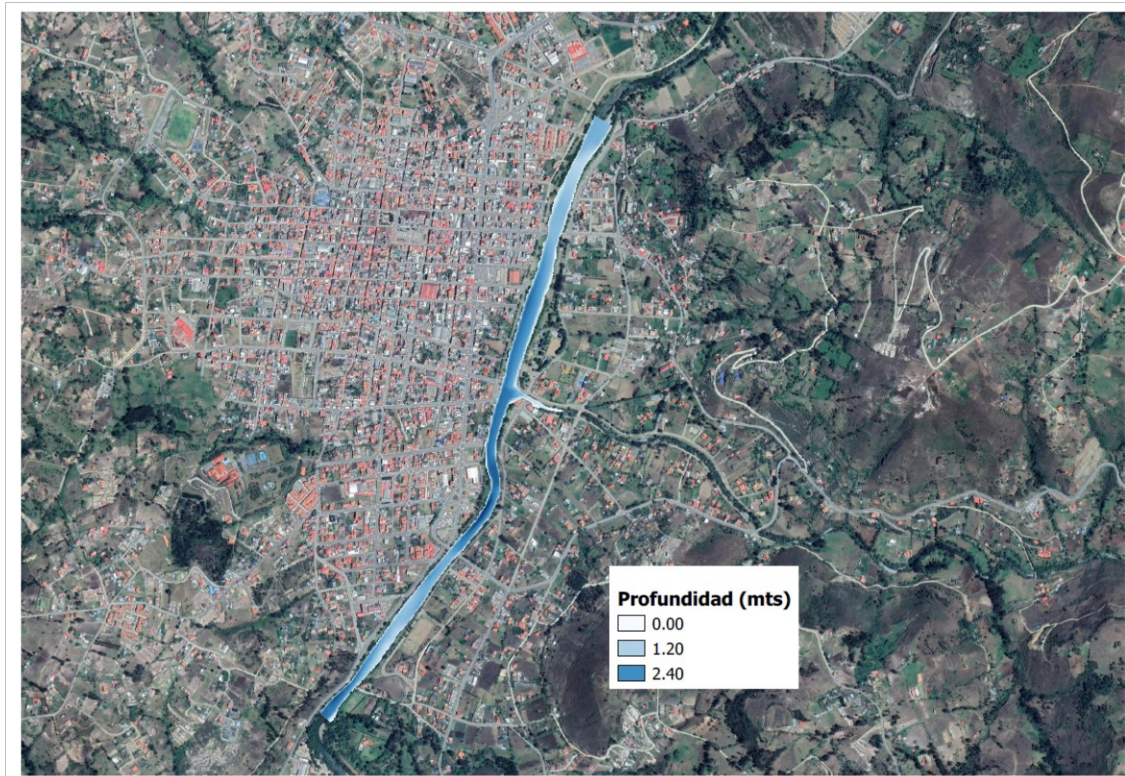


Figura 70. Zona de inundación para un periodo de retorno de 2 años.
Fuente. Elaboración propia.

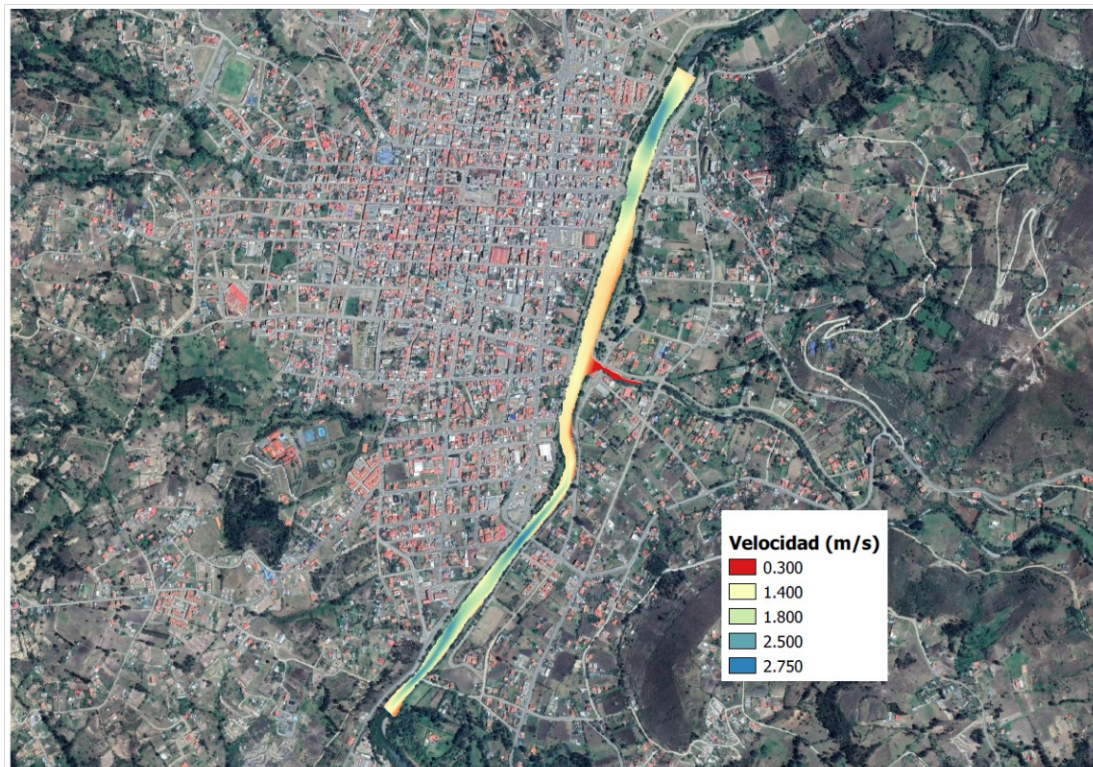


Figura 71. Velocidad para un periodo de retorno de 2 años.
Fuente. Elaboración propia.

Como se puede observar en la figura anterior, las zonas más afectadas en este son las próximas a los márgenes de los ríos; esto se produce debido a que estos terrenos tienen una altura muy pequeña como se observa a continuación; se puede encontrar calados de 2.40 mts y velocidades máximas de 2.75 m/s en el centro del cauce.



Figura 72. Márgenes de río propensos a inundación en un periodo de retorno de 2 años.
Fuente. Elaboración propia.

Las zonas populares que se ven afectadas en este periodo de retorno son las conocidas como:

- Playas del río Santa Bárbara.
- Parque “Belén” y sus canchas deportivas.
- Márgenes de la vía a Guazhalán.

- **Periodo de retorno 50 años.**

Para esta simulación se ingresó el hidrograma cuyo flujo punta es de 905.6 m³/s.

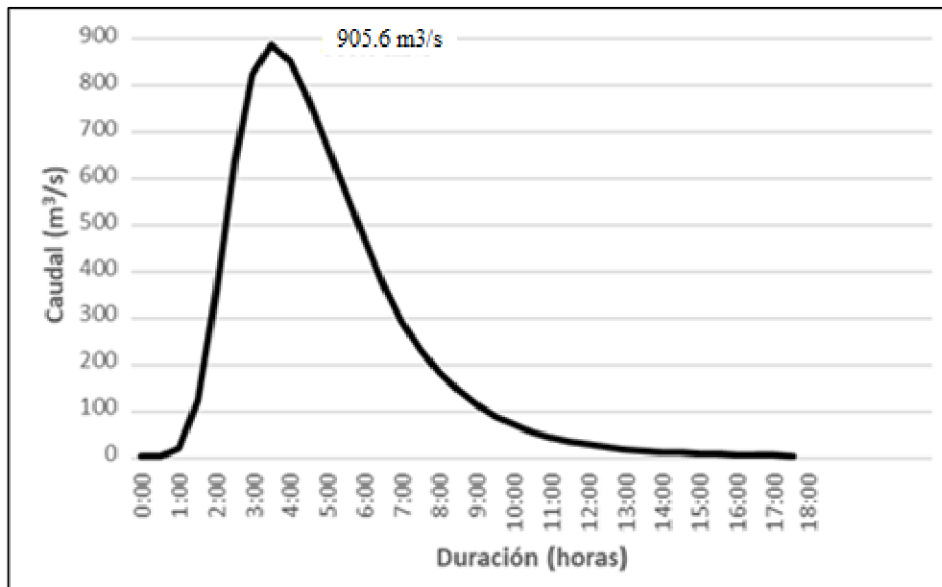


Figura 73. Hidrograma para periodo de retorno 50 años en HEC-RAS.
Fuente. Elaboración propia.

Realizando la simulación en el software HEC-RAS se obtiene la siguiente zona propensa a inundaciones en este periodo de retorno.

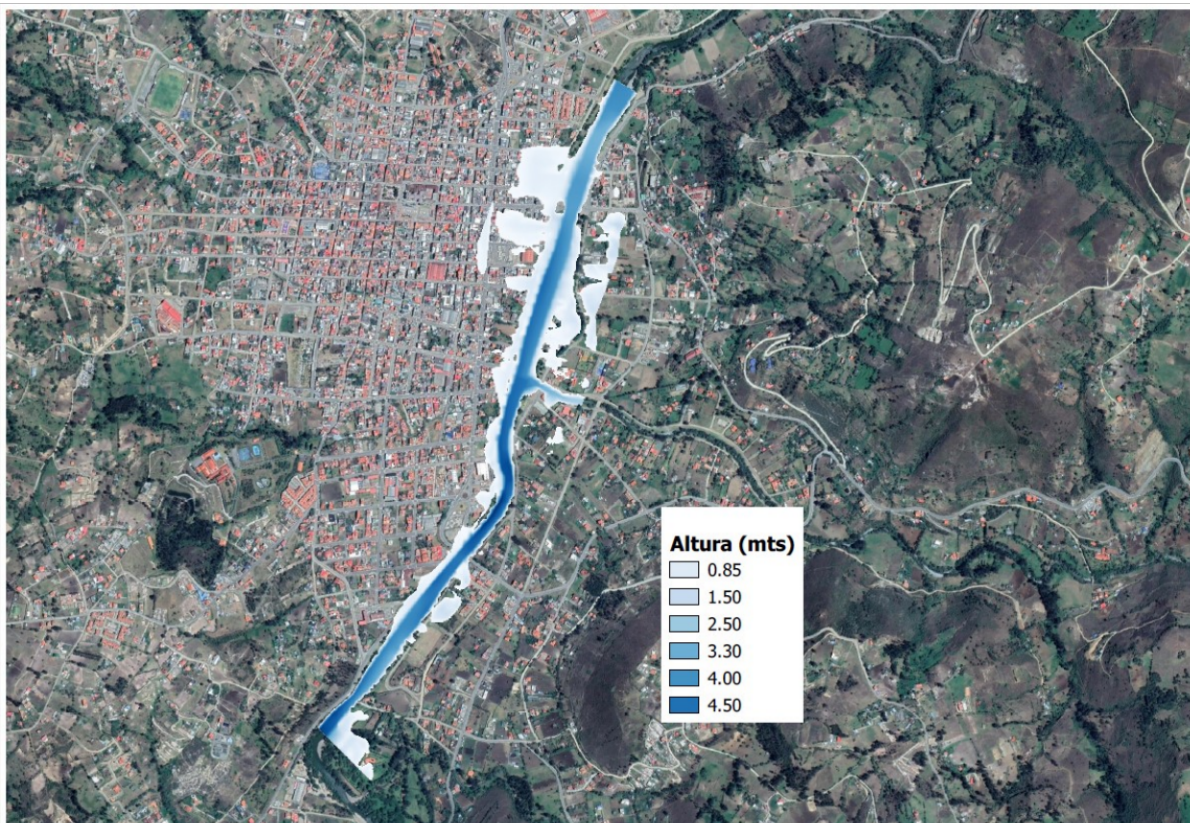


Figura 74. Zona de inundación para un periodo de retorno de 50 años.
Fuente. Elaboración propia.

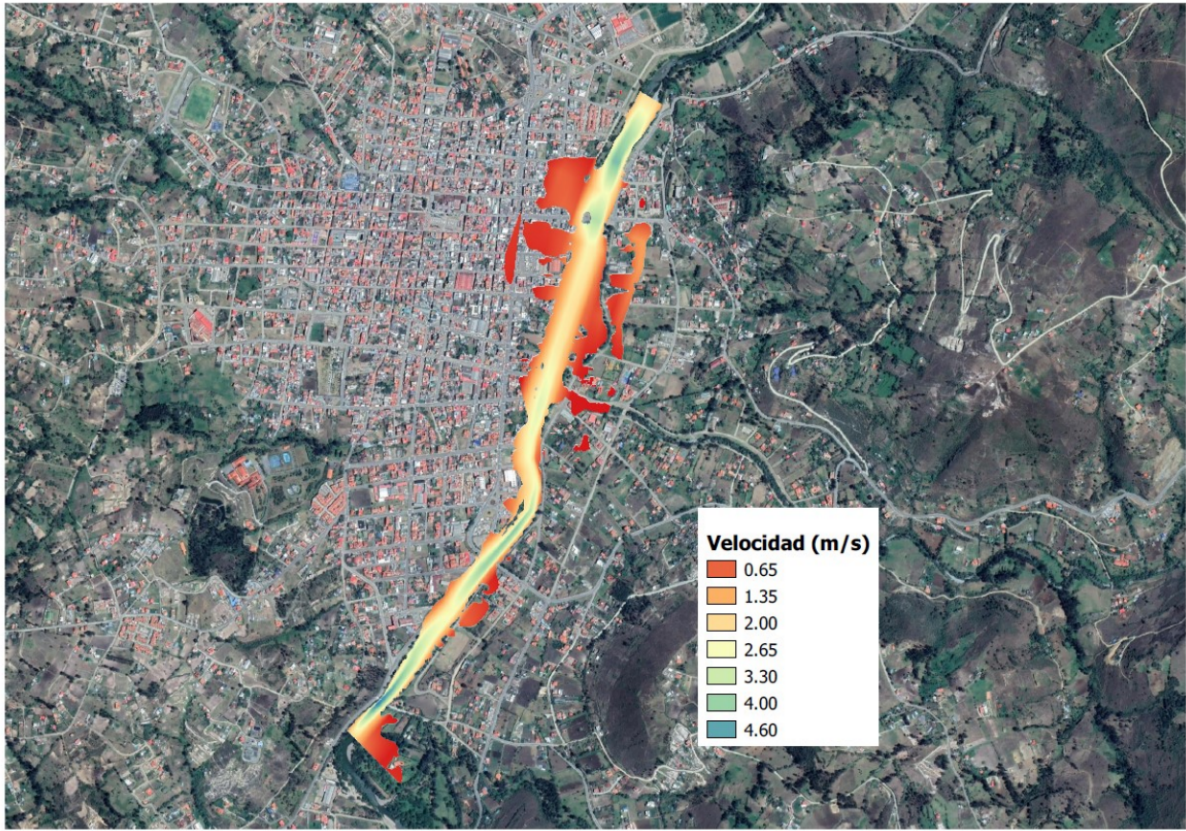


Figura 75. Velocidad para un periodo de retorno de 50 años.
Fuente. Elaboración propia.

Como se puede observar en la ilustración anterior, las zonas más afectadas en este periodo de retorno ya no son solo las próximas a los márgenes de los ríos; sino se ve afectado el casco urbano próximo al río Santa Bárbara, esta zona se extiende hasta aproximadamente la calle Cuenca es decir unas dos calles posteriores a la vía principal Gualaceo-Sígsig teniendo registros de inundaciones; se puede encontrar calados de 4.50 m y velocidades máximas de 4.60 m/s en el centro del cauce.



Figura 76. Inundación en el cantón Gualaceo.
Fuente. Noticiero Gualaceo y elaboración propia.

- **Periodo de retorno 100 años.**

Para esta simulación se ingresó el hidrograma cuyo flujo punta es de 1099.1 m³/s.

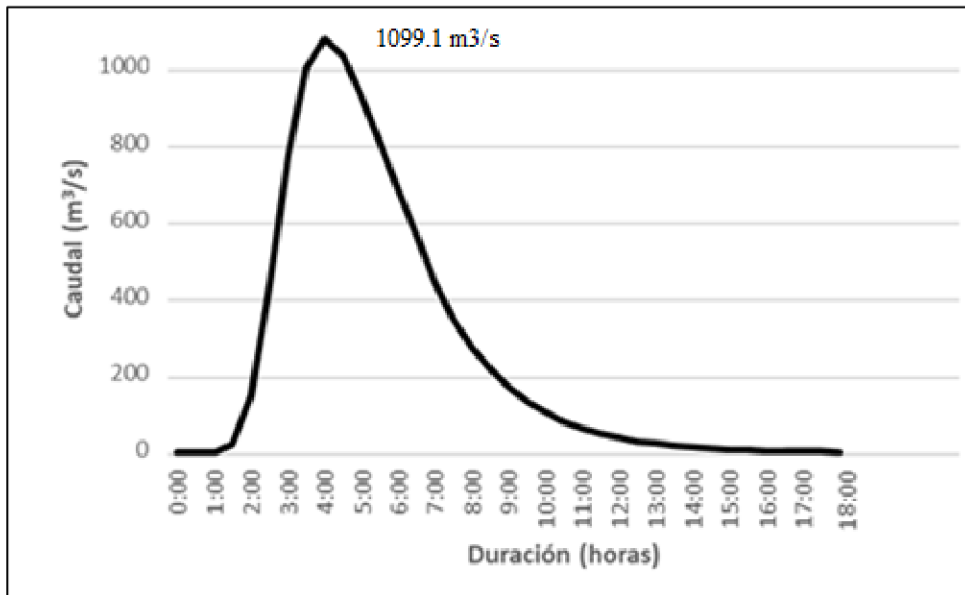


Figura 77. Hidrograma para periodo de retorno 100 años en HEC-RAS.

Fuente. Elaboración propia.

Realizando la simulación en el software HEC-RAS se obtiene la siguiente zona propensa a inundaciones en este periodo de retorno.

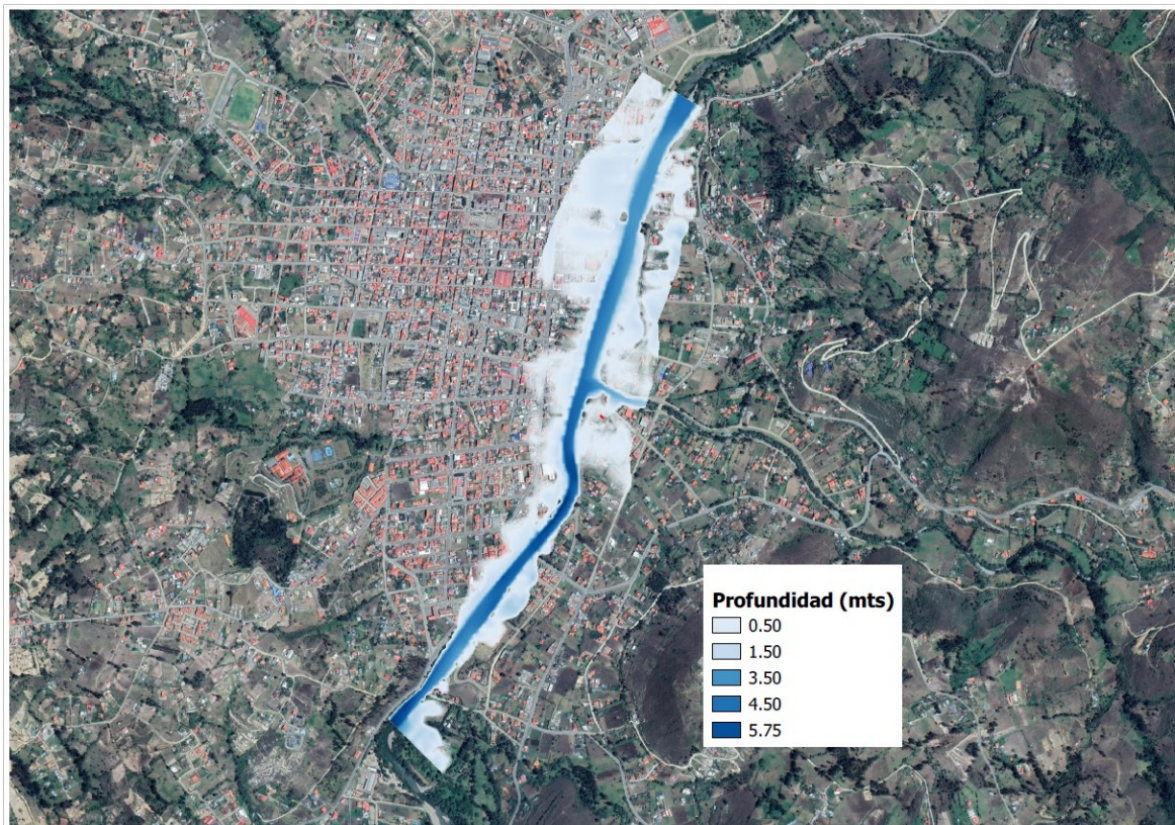


Figura 78. Zona de inundación para un periodo de retorno de 100 años.

Fuente. Elaboración propia.

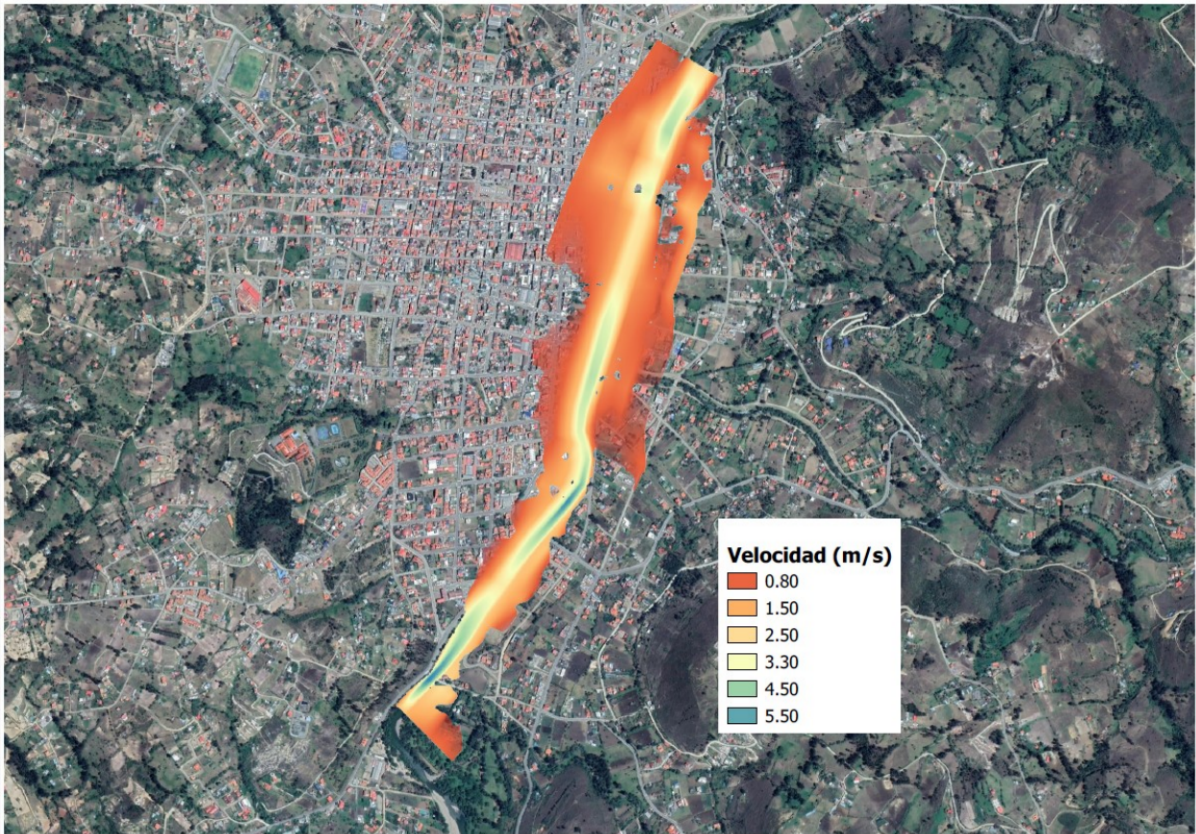


Figura 79. Velocidad para un periodo de retorno de 100 años.
Fuente. Elaboración propia.

Al igual que el periodo de retorno correspondiente a los 50 años; para las ilustraciones anteriores las zonas de inundación ingresan al casco urbano y son más destructivas; producen erosión en los márgenes del río además de que estas zonas sufren de una inundación completa, se puede encontrar calados de 5.75 mts y velocidades máximas de 5.50 m/s en el centro del cauce.



Figura 80. Afecciones del río Santa Bárbara.
Fuente. Elaboración propia.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

4.1. Conclusión principal.

El fenómeno precipitación – escurrimiento de la cuenca hidrográfica del río Santa Bárbara pudo ser representada mediante el uso de sistemas de geo información con la obtención de sus características físicas (curva número, área, perímetro, tiempo de concentración, etc), información que es considerada como variables de entrada para la modelación hidrológica e hidráulica.

En el estudio realizado se trabajó con una distribución de las subcuencas: Boladel, Gualaceo Alto, Gualaceo Bajo, Pamar, San Francisco, San José, Santa Bárbara y Zhio y la estación meteorológica considerado punto de interés fue la de Gualaceo DJ Pamar debido a la calidad de la información obtenida.

La modelación de la zona de estudio fue calibrada y validada para tener un grado de confiabilidad en los resultados obtenidos, estos resultados fueron analizados mediante métodos estadísticos brindándole un grado moderado de confiabilidad al estudio.

Los resultados obtenidos para la modelación hidrológica con la metodología SCS fueron los hidrogramas correspondientes a periodos de retorno de 2, 50 y 100 años obteniendo caudales de 129.7 m³/s, 886.6 m³/s y 1080, 1 m³/s; respectivamente, los resultados obtenidos para la modelación hidráulica unidimensional de flujo no permanente fue de calados 2.40 metros, 4.50 metros y 5.75 metros respectivamente según su periodo de retorno pero, denotando que las zonas más afectadas son las próximas a los márgenes del cauce, debido a la altura no muy representativa que existe en la zona entre el río y el suelo.

4.2. Conclusiones destacadas.

- Para un correcto uso de los sistemas de información geográficos y softwares modeladores hidrológicos e hidráulicos se necesita de buena información de entrada; es decir que el MDE forma parte fundamental de cualquier modelación debido a que sus propiedades como: área, perímetro, tiempo de concentración , tiempo de retardo, entre otros difiere mucho de la calidad de este; por esta razón la obtención de un MDE con la mayor cantidad de detalles en el proceso de recopilar información es de gran ayuda.

- Los modelos hidrológicos manejan un grado de sensibilidad muy respecto a las variables de: curva número, tiempo de concentración y tiempo de retardo ya la metodología que se utiliza para su cálculo; por esta razón esta debe ser la más precisa y la que tenga una mayor cantidad de datos para poder ser representada; por otro lado, la modelación hidráulica depende de la variable correspondiente al número de Manning, coeficiente que simula la resistencia del movimiento del agua.
- El manejo de sistemas de geo información permitió obtener las zonas potencialmente inundables con la representación mediante mapas, estos conjuntamente con imágenes satelitales identifican las zonas o barrios que pueden llegar a sufrir inconvenientes con estas crecientes.

4.3.Síntesis de resultados.

- El modelo hidrológico fue desarrollado a través del software HEC-HMS, en donde para el periodo de retorno de 2 años el caudal fue de 129.7 m³/s, 50 años el caudal fue de 886.6 m³/s y para 100 años 1080.1 m³/s.
- La altura a la cual puede llegar el cauce del río varía según el periodo de retorno, para 2 años se tiene 2.40 metros, para 50 años 4.50 metros y para 100 años se obtuvo 5.75 metros.
- La velocidad del cauce del río de igual forma varía según el periodo de retorno, obteniendo para 2 años 2.75 m/s, para 50 años 4.60 m/s y para 100 años 5.50 m/s.
- Las zonas propensas a ser afectadas por las crecientes del río Santa Bárbara son:
Playas del río Santa Bárbara.
Parque “Belén” y sus canchas deportivas.
Márgenes de la vía a Guazhalán.
Casco urbano hasta la vía Gualaceo – Sígsig

4.4.Recomendaciones.

- Se puede manejar convenios con las instituciones encargadas del manejo de los registros de precipitación en la zona del Azuay (ETAPA EP e INHAMI), ya que con el acceso a esta información se podrían desarrollar más modelos.

- Para obtener un modelo hidráulico más detallado se podría realizar un levantamiento topográfico con estudiantes en las zonas que se vaya analizar, para tener un MDE con un tamaño de pixel más pequeño es decir existiría mayor cantidad de detalle en el mismo.
- Se debería analizar la acumulación de sedimentos en los diferentes tramos del río Santa Bárbara, debido a que estos ocasionan la disminución de la sección transversal del cauce y variaciones en su velocidad, generando un mayor número de zonas potenciales de inundación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

- Amat Rodrigo, J. (2016). Correlación lineal y Regresión lineal simple. Ciencia de Datos.
- Aparicio Mijares, F. J. (1999). Fundamentos de hidrología de superficie (No. 551.49 A6).
- Aparicio, F.J., 1992. Fundamentos de Hidrología de Superficie. Editorial Limusa S. A., México D. F., México.
- Araya, A., González, V., & Jiménez, M. (2018). Análisis de la variación del coeficiente de rugosidad de Manning con respecto a la pendiente del canal en tubería de PVC de 315 mm de diámetro. Revista INGENIERÍA UC, 25(1), 43-49.
- ARCONEL., (2014). *Estadísticas del Sector eléctrico ecuatoriano 2014*. Quito: Agencia de regulación y control de Electricidad
- Arias, P.P., 2015. Guía de aplicaciones del HEC-HMS en cuencas cubanas. Ejemplos
- Béjar, M. V. (2012). HidroEsta, software para cálculos hidrológicos y estadísticos aplicados a la Hidrología. Revista Digital: Matemática, Educación e Internet, 12(2).
- Burbano Abril, B. J. (2016). Análisis de caudales y precipitaciones de los ríos Tomebamba y Yanuncay (Bachelor's thesis, Universidad del Azuay).
- Cabrera, J. (2012). Modelos hidrológicos. Instituto para la Mitigación de los Efectos del Fenómeno El Ni-o, Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Ingeniería Civil, Perú, 8. Centro de Investigaciones Hidráulicas, La Habana, Cuba.
- CG-PAUTE, UDA. 2007. Cobertura Vegetal de la Cuenca del Rio Paute, ano 2001. Escala 1:50 000. Cuenca- Ecuador
- Chow, V. T. (1964). Handbook of applied hydrology.
- Diaz Carvajal, Á., & Mercado Fernández, T. (2017). Determinación del número de curva en la subcuenca de Betancí (Córdoba, Colombia) mediante teledetección y SIG. Ingeniería y Desarrollo, 35(2), 452-470.
- en Cuenca-Ecuador

Eterovic, J. (2008). Aplicación de modelos hidrológicos con fines de prevención de desastres en cuencas de Venezuela (Doctoral dissertation, Tesis MSc., Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela).

FAO-U, N. E. S. C. O. (1989). Mapa mundial de suelos. Leyenda revisada. Roma.

Fattorelli, S., & Fernández, P. C. (2007). Diseño hidrológico. Zeta Editores.

Federal Council for Science and Technology, "Scientific Hydrology", Washington, June 1962.

Fernández de Córdova Webster. (2019). Propuesta de un sistema de alerta

Fread, D. L. (1982). Flood Routing: A Synopsis of Past, Present, and Future Capability. Office of Hydrology.

Gilles, D., y Moore, M. (07 de 2010). International Perspectives in Water Resource Management, University of Iowa, College of Engineering. Recuperado el 08 de 05 de 2014, de Review of Hydraulic Flood Modeling Software used in Belgium, The Netherlands, and The United Kingdom: http://www.iahr.uiowa.edu/education1/international/UK/projects_files/ipwrsm_paper_gilles_moore_Dan_editted.pdf

Gaspari FJ. 2002. Plan de ordenamiento territorial en cuencas serranas degradadas. Aplicación de sistemas de información geográfica. Huelva. España. Ediciones Cooperativas, Buenos Aires: 179 p

Guachamín, W., García, F., Arteaga, M., & Cadena, J. (2015). Determinación de ecuaciones para el cálculo de intensidades máximas de precipitación.

Guijarro, J. A. (2018). Homogenization of climatic series with Climatol. Version 3.1. 1 <https://CRAN.R-project.org/package=climatol>.

Henaos JE. 1988. Introducción al manejo de cuencas hidrográficas. Universidad Santo Tomás, Centro de enseñanza desescolarizada, Bogotá, Colombia: 396 p

Hoorelbeke, R., Calvez, R., Pombosa, R., Roura, J., García, F., & Tejada, M. (2000). Modelización hidrológica en la cuenca del río Paute.

Hotchkiss, R. H., & McCallum, B. E. (1995). Peak discharge for small agricultural watersheds. *Journal of Hydraulic Engineering*, 121(1), 36-48.

INAMHI, I. (2015). Determinación de ecuaciones para el cálculo de intensidades máximas de precipitación. Instituto Nacional De Meteorología E Hidrología, Determinación De Ecuaciones Para El Cálculo De Intensidades Máximas De Precipitación, 283.

Instituto Superior Politécnico José Antonio Echevarría, Facultad de Ingeniería Civil,

Lojano Guapacasa, L. E., & Lucero Mosquera, G. A. (2011). Estado de la calidad físico-químico, bacteriológico y biológico del agua, de la subcuenca del río Santa Bárbara, en una estación climática, cantones Sigsig, Chordeleg y Gualaceo provincia del Azuay-Ecuador (Bachelor's thesis, Universidad del Azuay).

López Rodríguez, L. (2017). Procedimiento para la simulación hidráulica a partir del software ArcGIS y HEC-RAS para eventos extremos máximos (Doctoral dissertation, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas. Facultad de Construcciones. Departamento de Ingeniería Hidráulica.).

MANUAL, D. (2008). CARRETERAS-Hidrología. Hidráulica y Drenaje.

Máximo, V. B. (2002). hidrología. Editorial Villón, Lima-Perú.

Morisawa, M. (1985). Rivers: form and process. Geomorphology texts, (7).

Ochoa, S. A. (2014). Evaluación de modelos hidrodinámicos para representar flujos en cauces naturales: aplicación en un tramo del Río Suquía que incluye la confluencia con el arroyo La Cañada, Provincia de Córdoba (Master's thesis, Universidad Nacional de Córdoba. Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.).

Orellana, D., Timbe, L., & Pinos, J. (2017). EJE 07-08 Calibración de un Modelo Basado en Agentes para el estudio del peligro de inundación en el río Santa Bárbara. Memorias y Boletines de la Universidad del Azuay, (XVI), 391-397.

Orozco, A. I. R. (2018). Hidrología esencial. Editorial Digital del Tecnológico de Monterrey.

Pacheco, C. T., Pomavilla, T. Q., Orellana, G. D., López, E. T., & Inga, O. D. (2017). 2 generación del mapa de cobertura y uso del suelo de la provincia del Azuay. Universidad Verdad, (73), 23-37.

Pascual Aguilar, J. A., & Díaz, M. (2016). Guia practica sobre la modelización hidrológica y el modelo HEC-HMS. Centro para el conocimiento del Paisaje, Instituto IMDEA Agua, Alcalá de Henares.

Pizarro, R., Sangüesa, C., & Martínez, E. (2003). Módulo 2 Curvas Intensidad Duración Frecuencia. Sociedad Estándares de Ingeniería para Aguas y Suelos LTDA.

Ponce, V. M. 1986. Diffusion Wave Modeling of Catchment Dynamics. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 112, No. 8, August, 716-727.

Portuguez Maurtua, D. M. (2017). Aplicación de la geoestadística a modelos hidrológicos en la cuenca del río Cañete.

prácticos (Trabajo de diploma presentado en opción al título de Ingeniero Hidráulico).

Sánchez San Román, F. J. (2019). Hidrología, 2018-19.

Sánchez, F. (2015). HEC-HMS Manual Elemental. Universidad de Salamanca, Departamento de Geología, España. Recuperado de: <http://hidrologia.usal.es>. 0 0, 2(0), 4.

Scharffenberg, W., 2016. Hydrologic Modeling System HEC-HMS User's Manual.

Tapia, R. P., Benavides, M. S., & Daza, C. F. Calibración y validación de Modelos de Simulación Integral Hidrológica, en cuencas húmedas y semiáridas de Chile Central.

Lopez, J. (2012). Caracterización del modelo Hec-Hms en la cuenca de río Arga en Pamplona y su aplicación a cinco avenidas significativas. Scielo.

Nanía, L. (2007). Manual Básico de Hec-Hms y Hec-GeoHMS. Granada.

Rocha Felices, A. (1998). Introducción a la hidráulica Fluvial. Universidad Nacional de Ingeniería Lima.

Khaled Mohames, A. H. (2008). Aplicaciones del modelo HEC-RAS para el análisis del flujo no permanente con superficie libre (Bachelor's thesis, QUITO/EPN/2008).

Aguirre-Pe, J., Olivero, M. L., & Moncada, A. T. (2000). Transporte de sedimentos en cauces de alta pendiente. Ingeniería del agua, 7(4), 353-365.

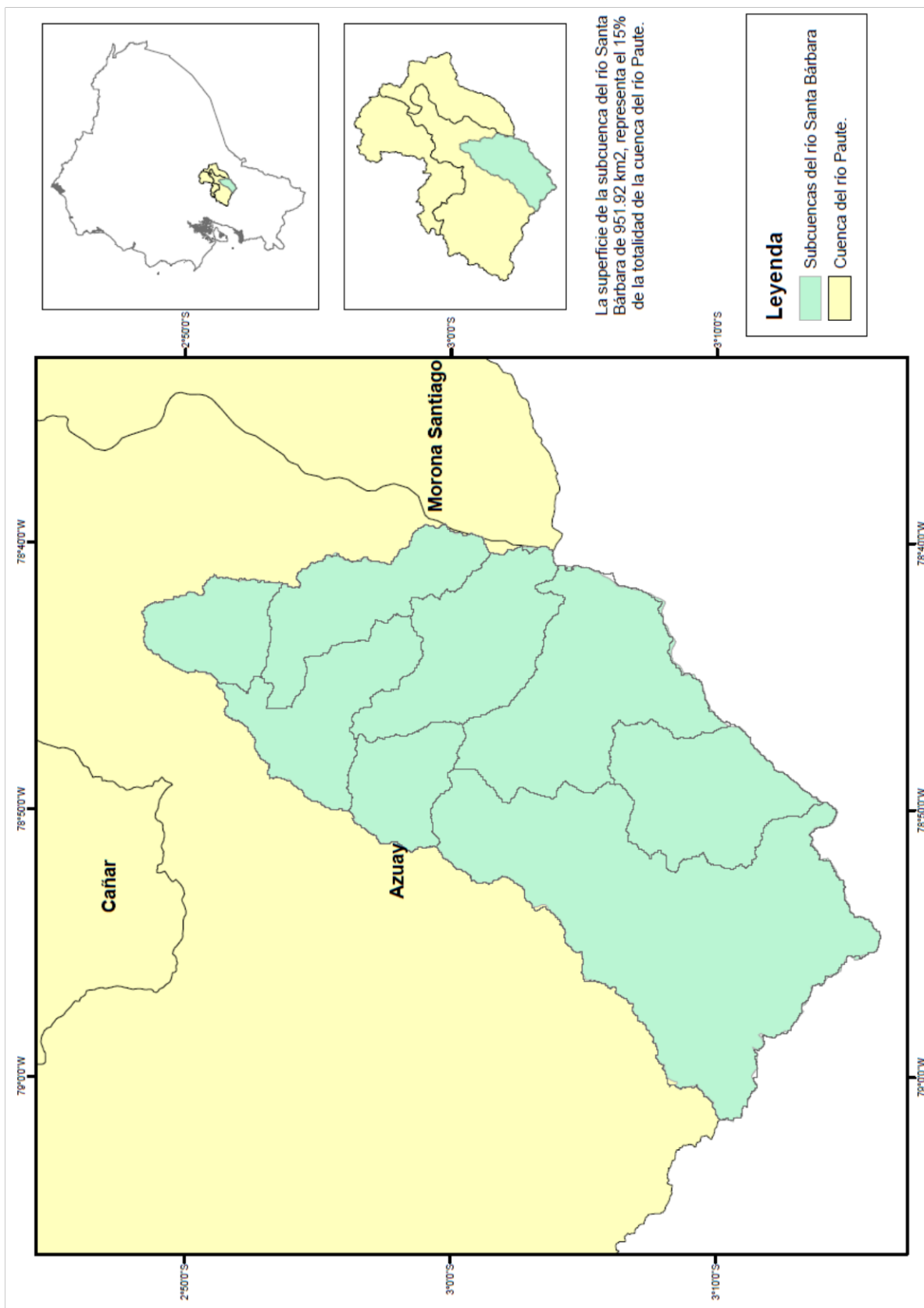
Vivas Gonzalez, C. J., & Matamoros Camposano, D. E. (2009). Aplicación del modelo hec-ras para el cálculo de los perfiles hidráulicos del sistema hídrico del río chaguana.

Aguilar, J. (2017). EVALUACIÓN DE LAS CONDICIONES HIDRÁULICAS EN ESTEROS Y CANALES MEDIANTE MODELAMIENTO HIDRODINAMICO 1D Y 2D. Cuenca.

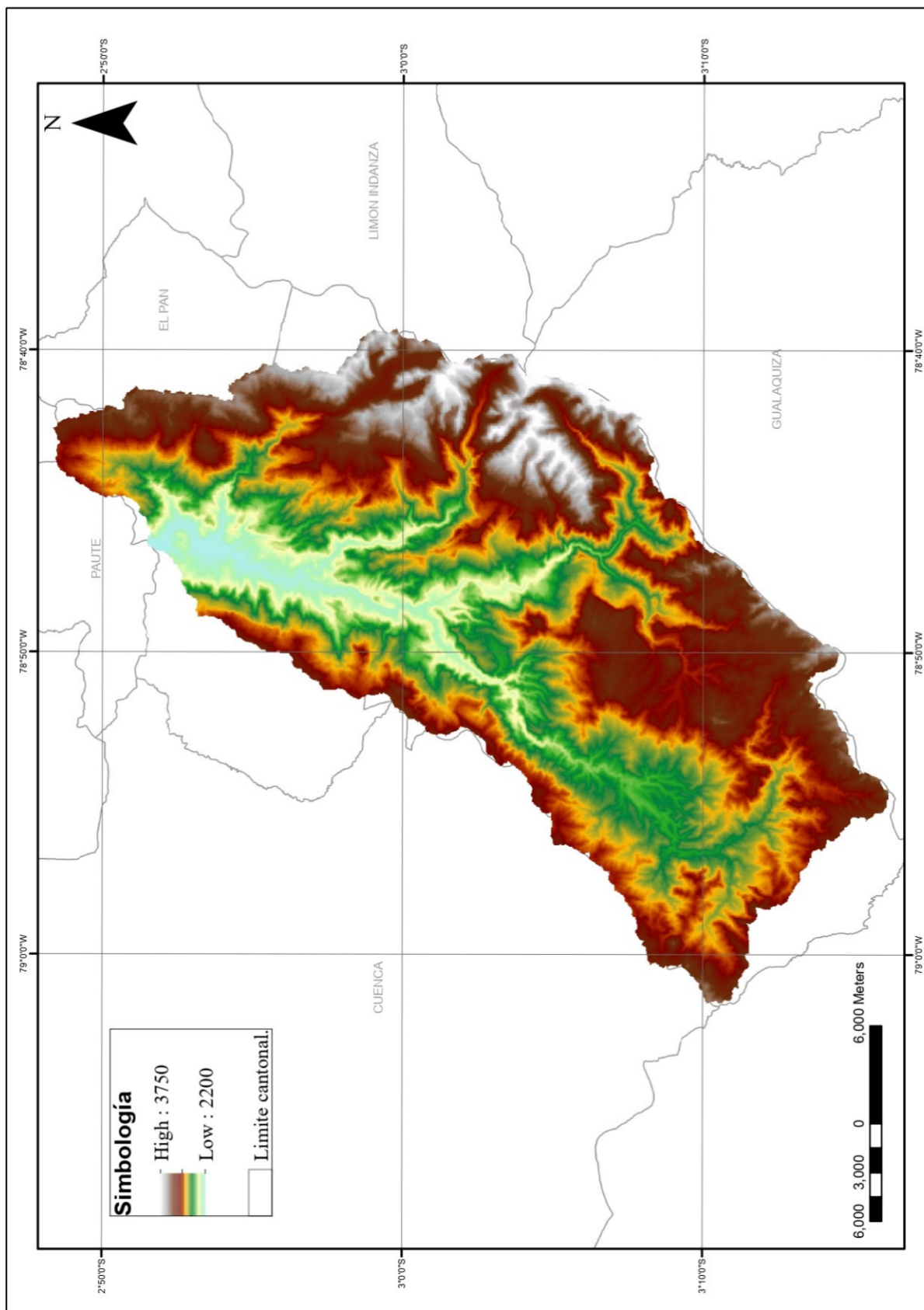
Córdova Rojas, M. A. Estimación de caudales medios naturalizados en la cuenca del Río Mantaro mediante el método de regionalización estadística.

ANEXOS.

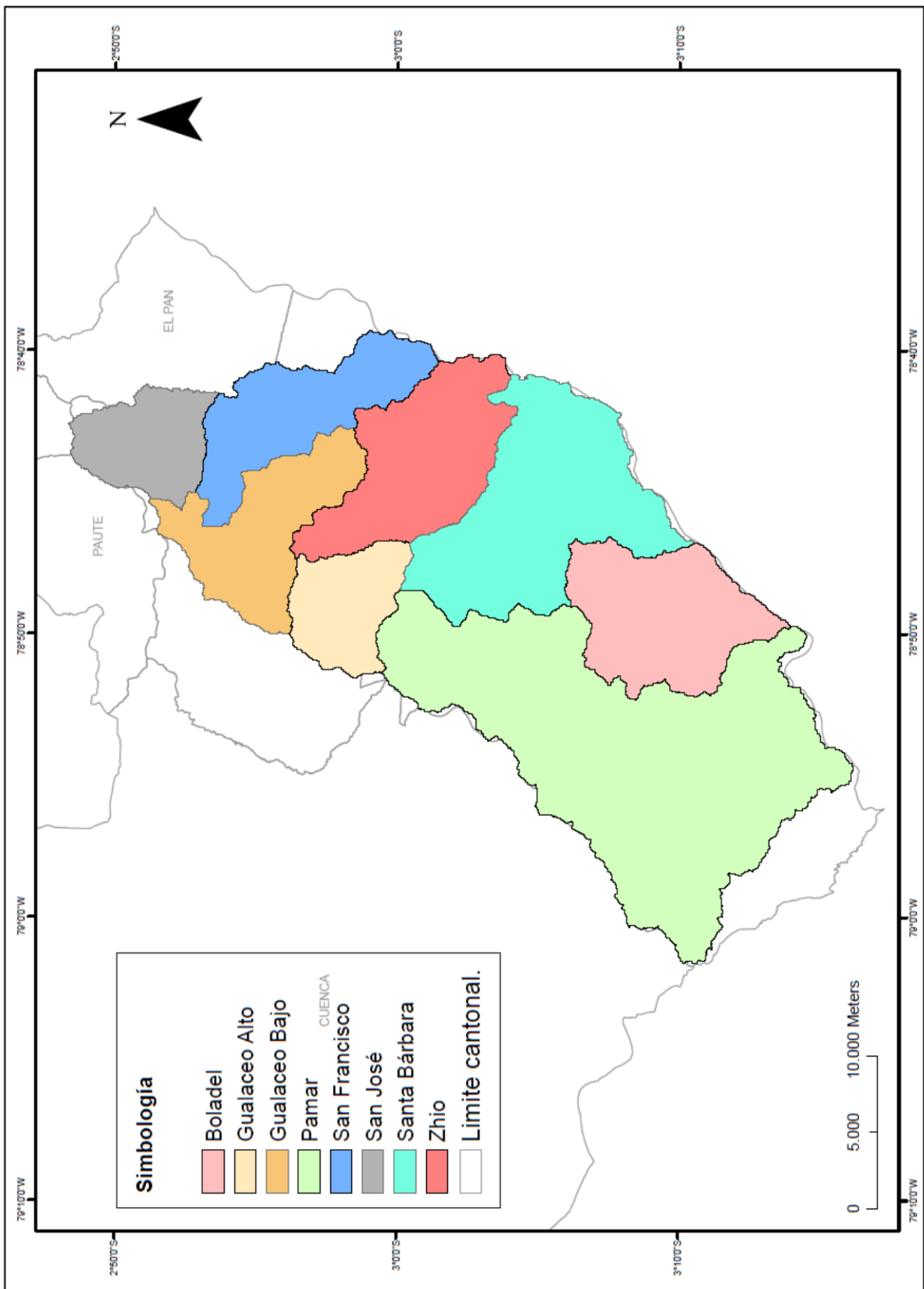
Anexo 1.



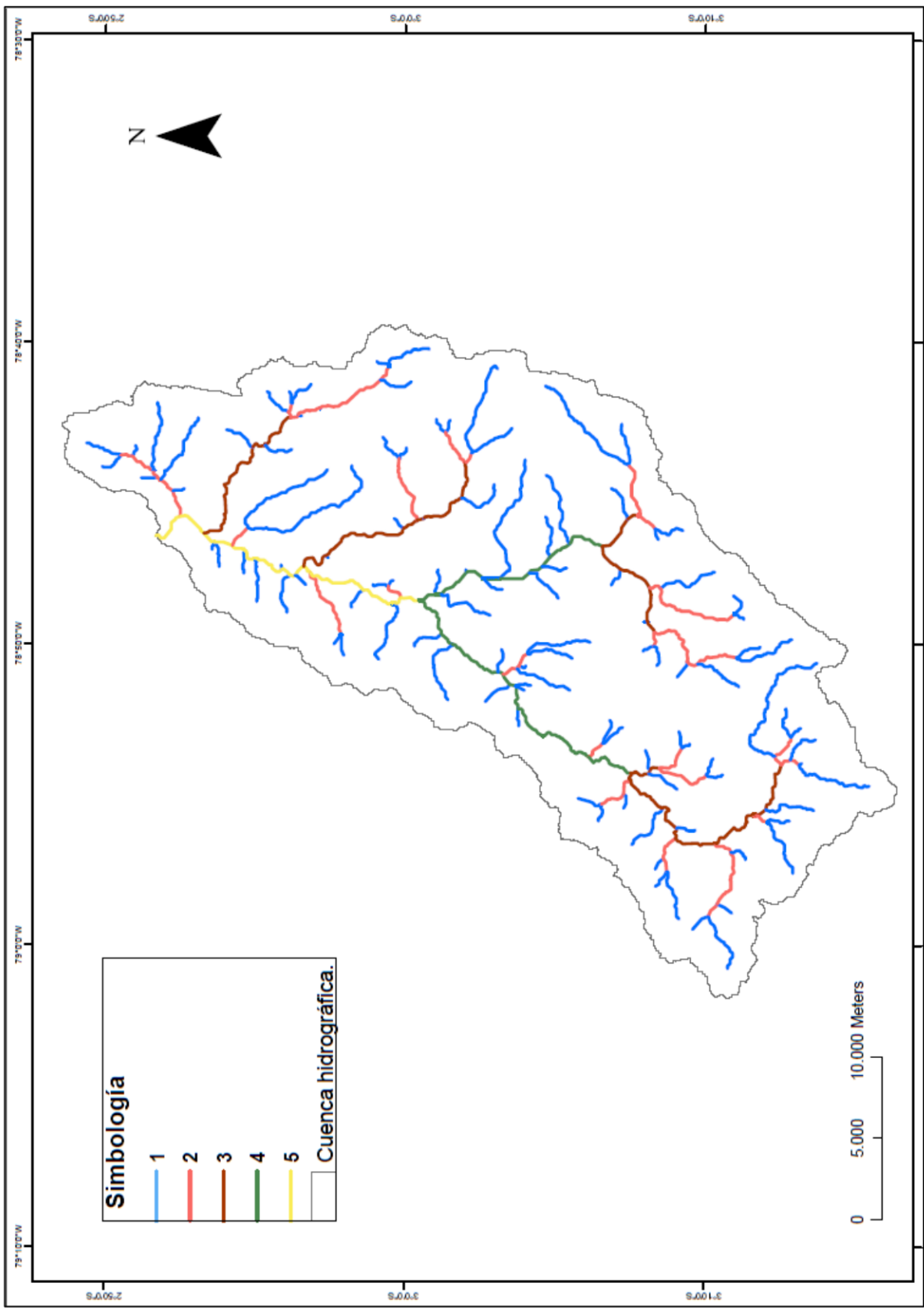
Anexo 2.



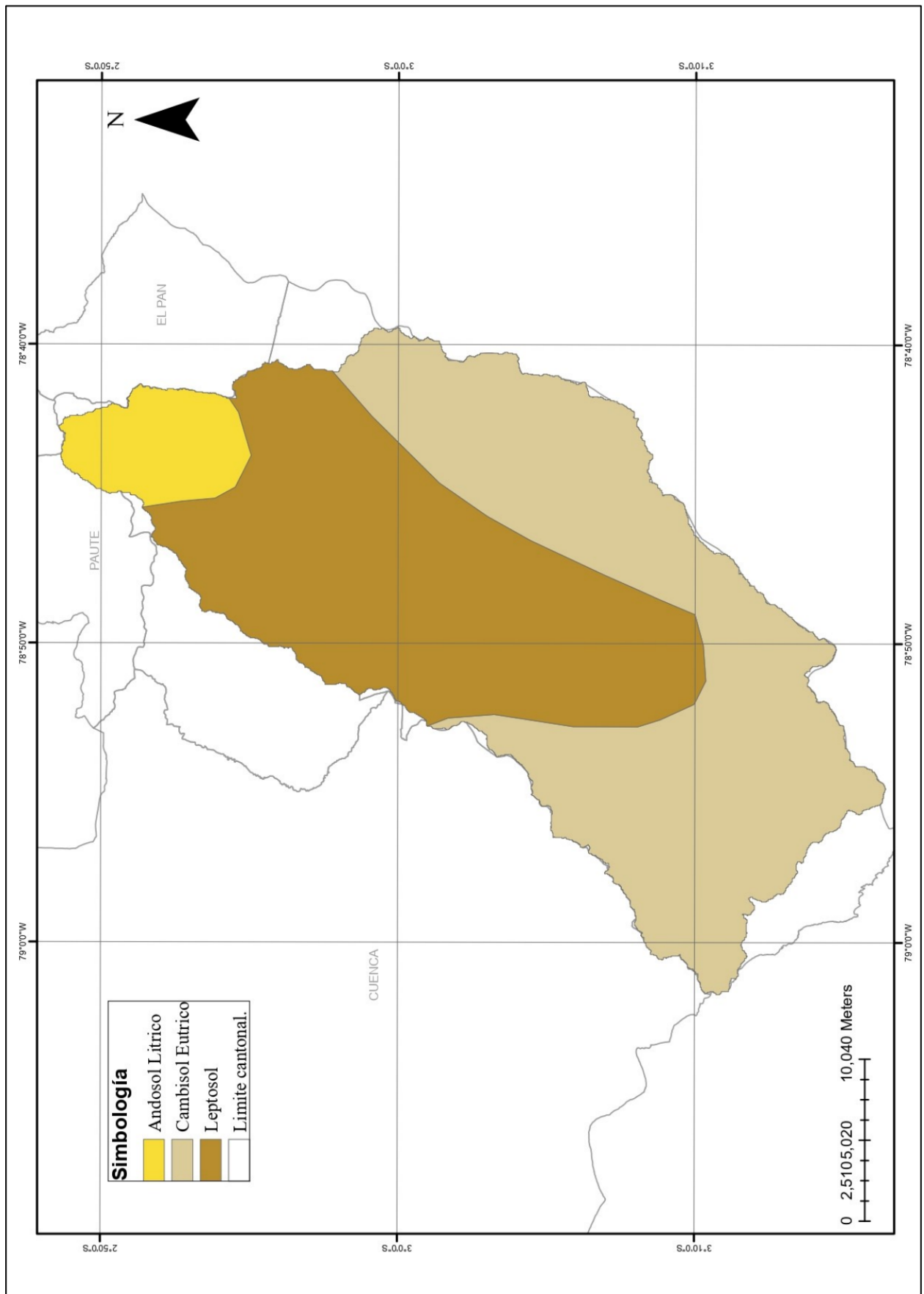
Anexo 3.



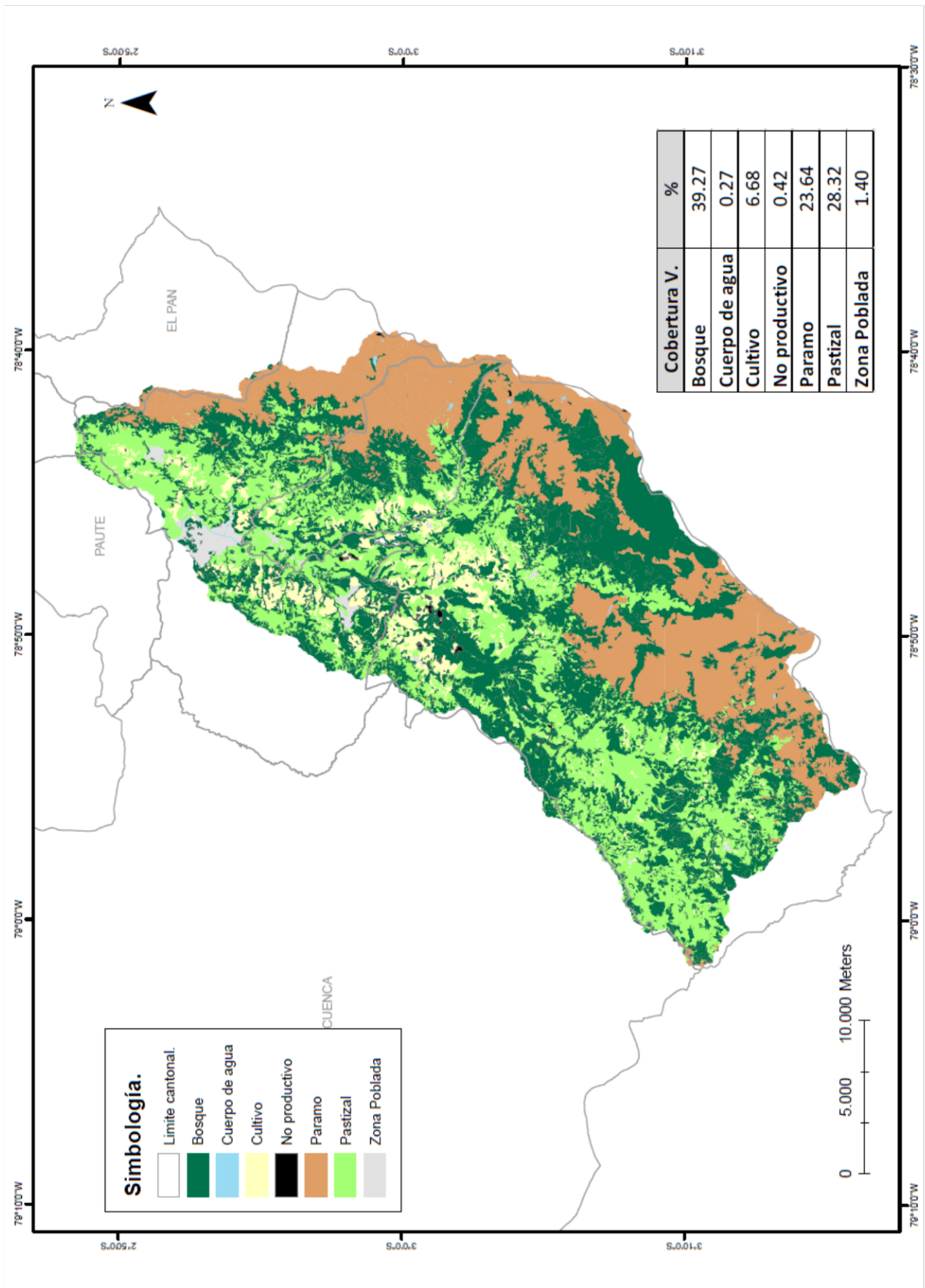
Anexo 4.



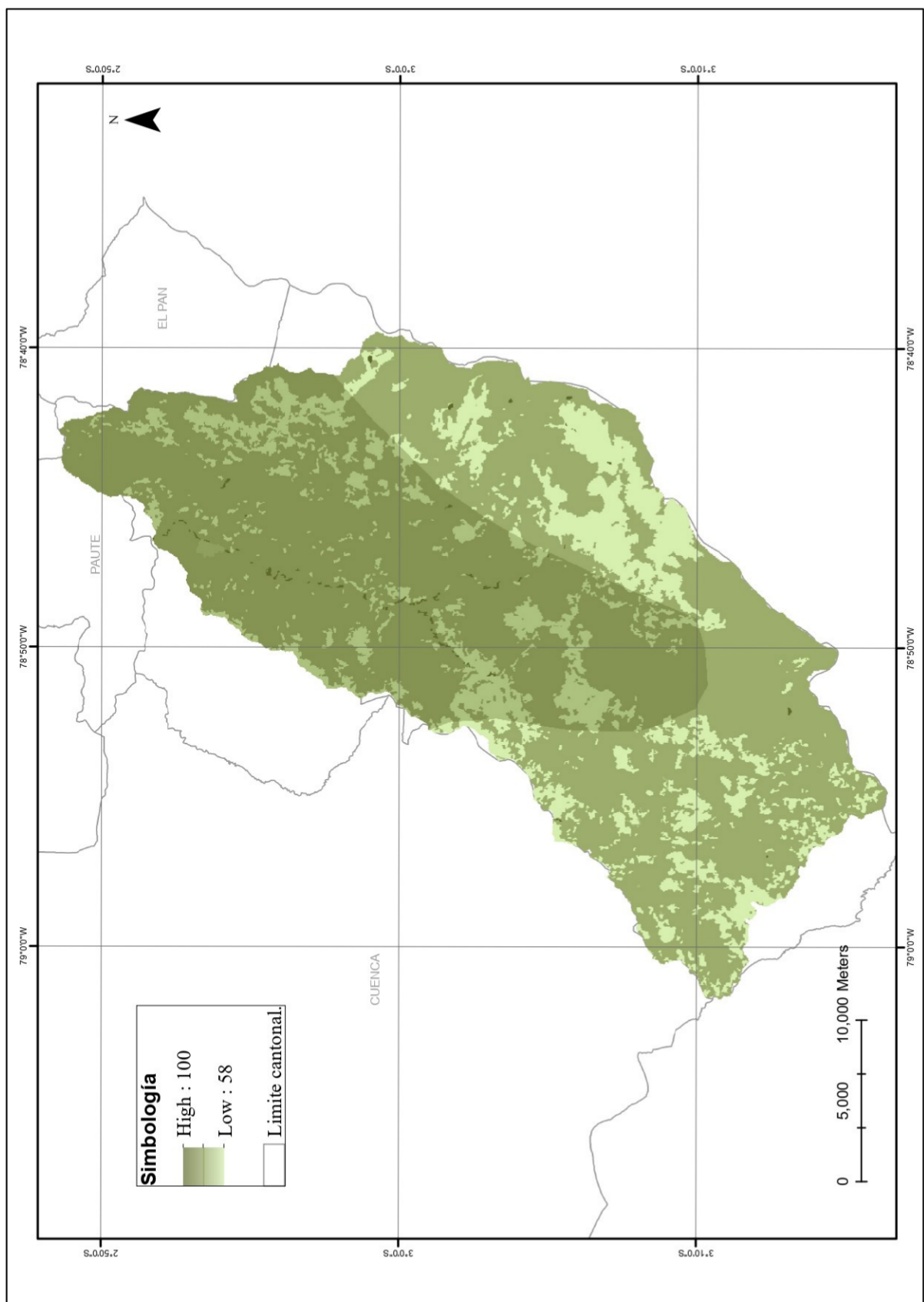
Anexo 5.



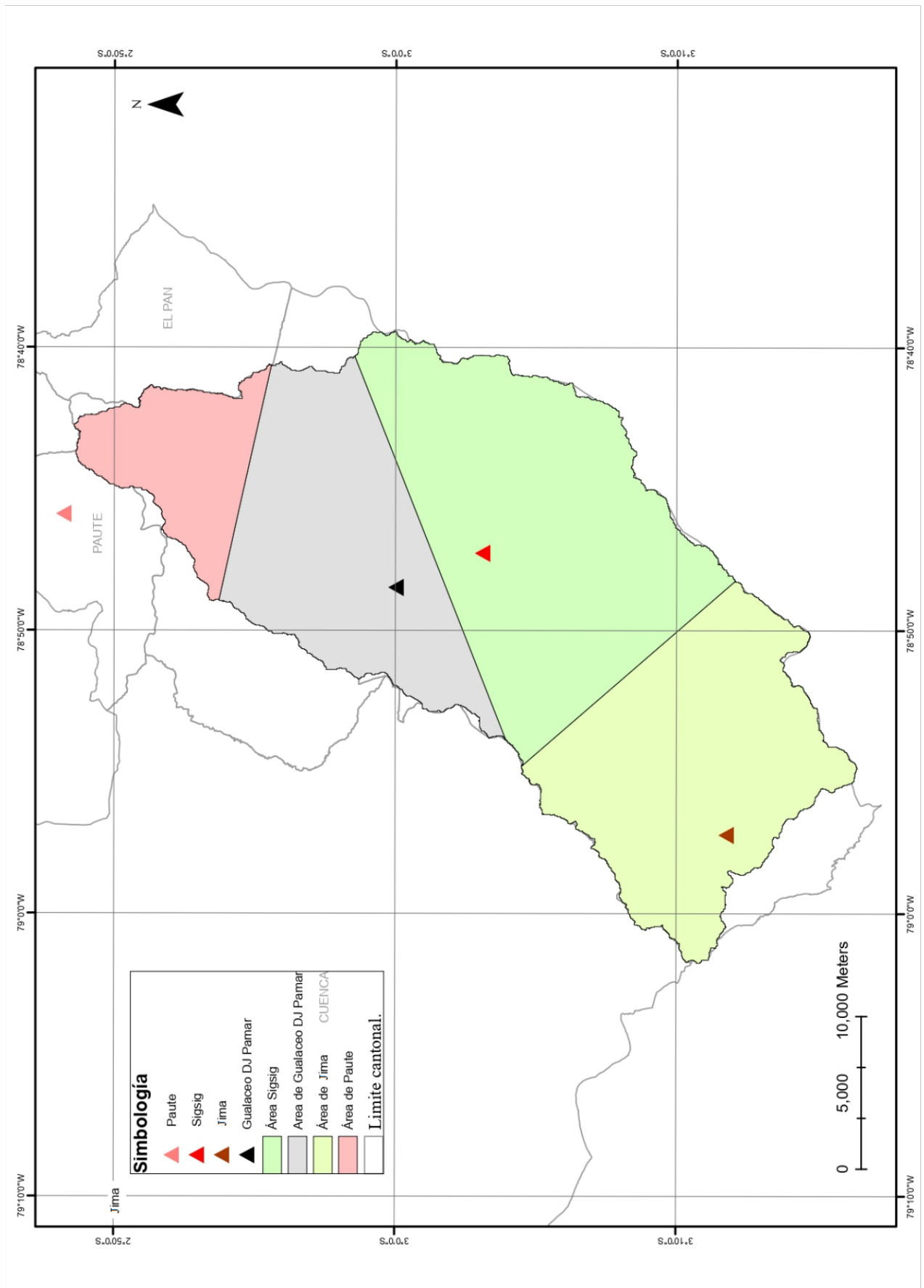
Anexo 6.



Anexo 7.



Anexo 8.

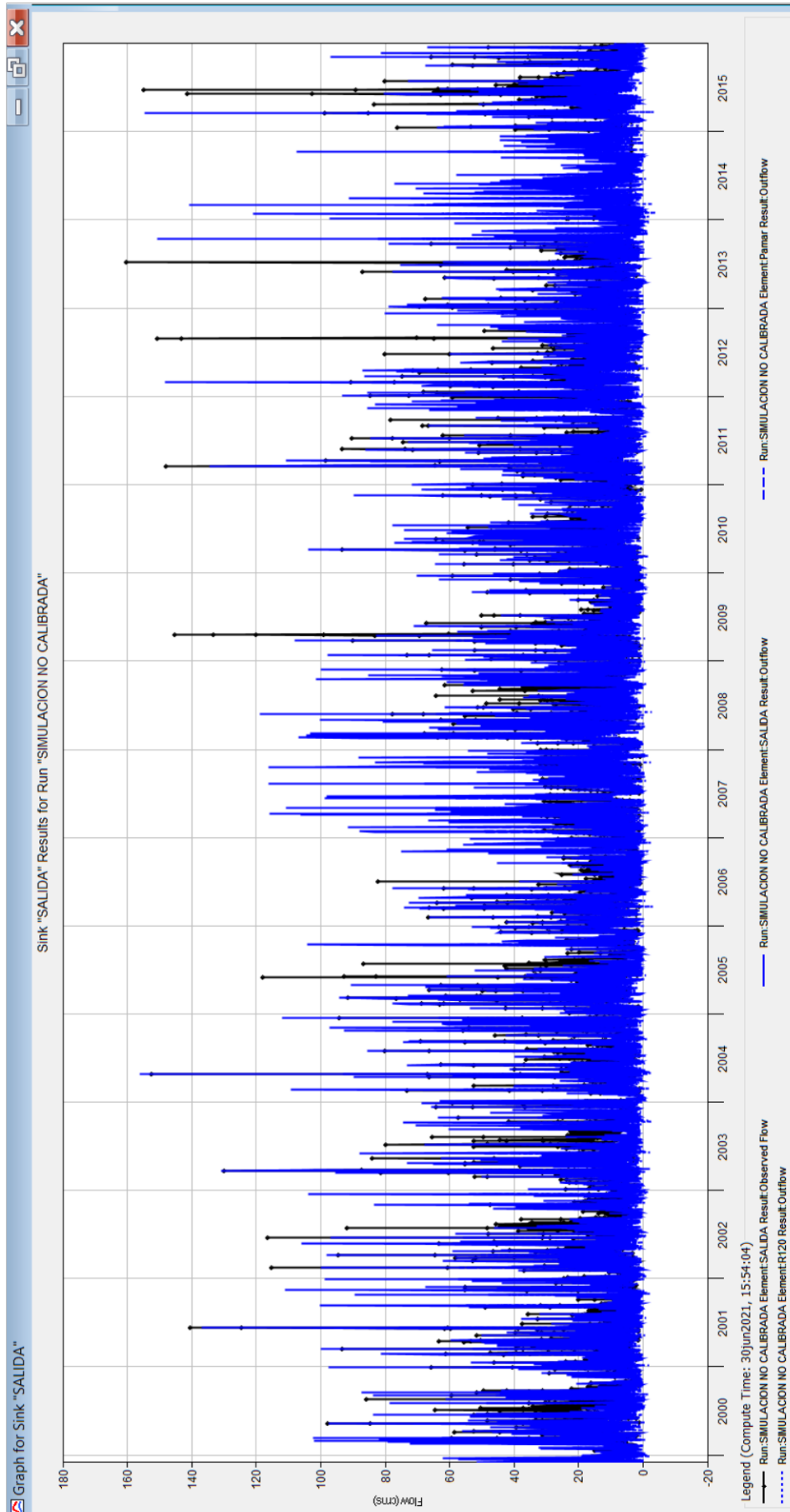


Anexo 9.

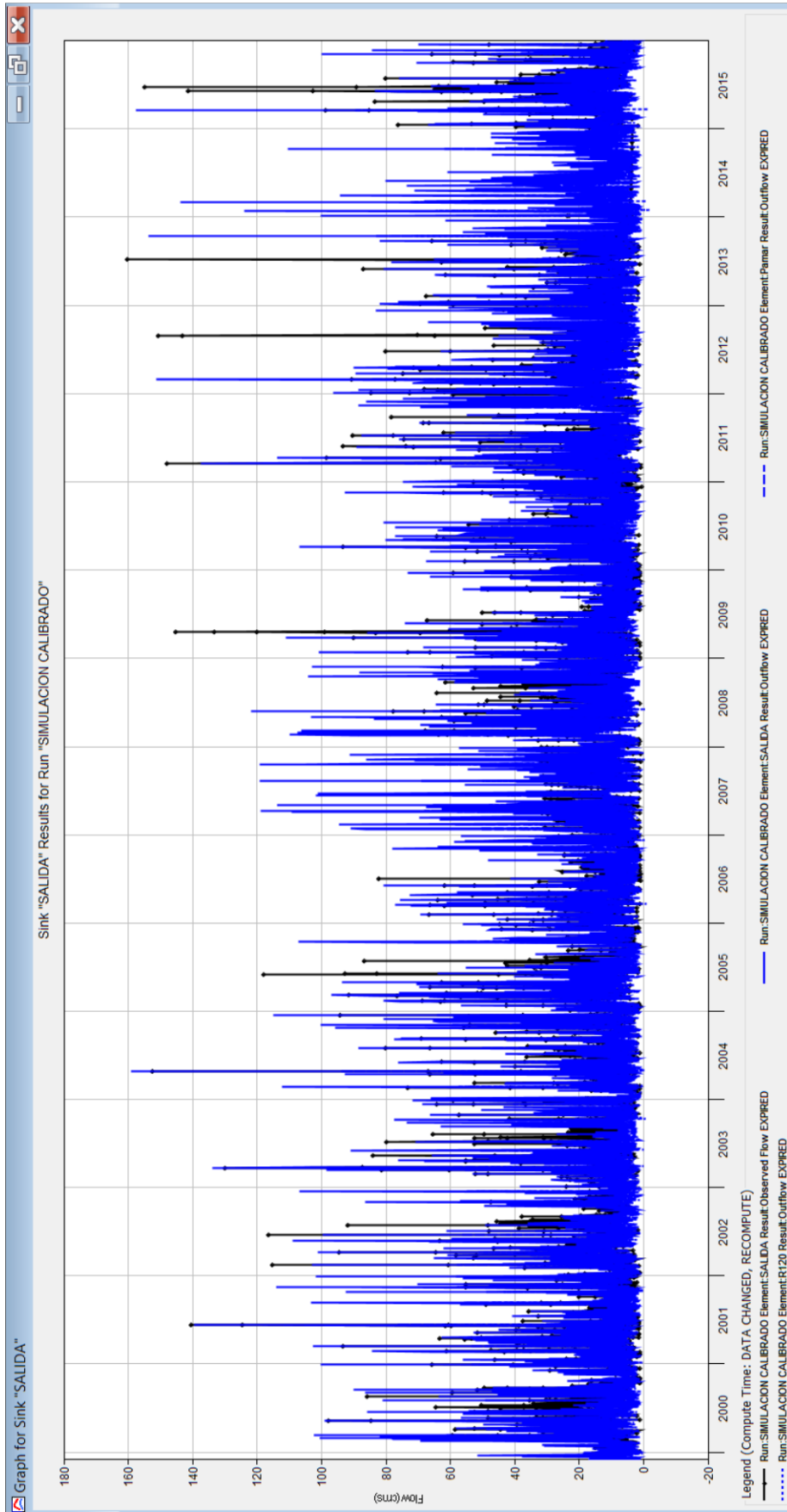
```
library(climatol)
setwd(C:/Users/smjs0/Desktop/TESIS 2020)
setwd("C:/Users/smjs0/Desktop/TESIS 2020")
setwd(C:/Users/smjs0/Desktop/CLIMATOL_TESIS)
setwd("C:/Users/smjs0/Desktop/CLIMATOL_TESIS")
dat<-as.matrix(read.table("pmax_2000_2015.csv",sep=";"))
View(dat)
dat<-as.matrix(read.table("pmax_2000_2015.csv",sep=";"))
write(dat,'pmax_2000-2015.dat')
View(dat)
View(dat)
dat<-as.matrix(read.table("pmax_2000_2015.csv",sep=";"))
write(dat,'pmax_2000-2015.dat')
library(climatol)
setwd(C:/Users/smjs0/Desktop/TESIS 2020)
setwd("C:/Users/smjs0/Desktop/TESIS 2020")
dat<-as.matrix(read.table("pmax_2000_2015.csv",sep=";"))
setwd("C:/Users/smjs0/Desktop/CLIMATOL_TESIS")
dat<-as.matrix(read.table("pmax_2000_2015.csv",sep=";"))
View(dat)
dat<-as.matrix(read.table("pmax_2000_2015.csv",sep=";"))
setwd("C:/Users/smjs0/Desktop/CLIMATOL_TESIS")
write(dat,'tmax_1995-2015.dat')
homogen('tmax',1995,2015,expl=TRUE)
setwd("C:/Users/smjs0/Desktop/CLIMATOL_TESIS")
dat<-as.matrix(read.table("pmax_2000_2015.csv",sep=";"))
View(dat)
dat<-as.matrix(read.table("pmax_2000_2015.csv",sep=";"))
View(dat)
write(dat,'pmax_2000-2015.dat')
setwd("C:/Users/smjs0/Desktop/CLIMATOL_TESIS")
dat<-as.matrix(read.table("pmax_2000_2015.csv",sep=";"))
write(dat,'pmax_2000-2015.dat')
est<-as.matrix(read.table("pmax1_1998-2015.csv",sep=";"))
write(est,'tmax_1995-2015.est')
dat<-as.matrix(read.table("pmax1_1998-2015.csv",sep=";"))
View(dat)
write.table(est.c,'pmax_1995-2015',row.names = FALSE,col.names = FALSE)
write.table(est.c,'pmax_1995-2015.est',row.names = FALSE,col.names = FALSE)
write.table(dat,'pmax_1995-2015.est',row.names = FALSE,col.names = FALSE)
homogen('pmax',2000,2015,expl=TRUE)
est.c<-as.matrix(read.table("pmax1_2000_2015.csv",sep=";"))
write.table(dat,'pmax_2000-2015.est',row.names = FALSE,col.names = FALSE)
dat<-as.matrix(read.table("pmax_2000_2015.csv",sep=";"))
write(dat,'pmax_2000-2015.dat')
homogen('pmax',2000,2015,expl=TRUE)
homogen('pmax',2000,2015,expl=TRUE)
dahstat('pmax',2000,2015,stat = 'series')
> est.c<-as.matrix(read.table("pmax1_2000_2015.csv",sep=";"))
> write.table(dat,'pmax_2000-2015.est',row.names = FALSE,col.names = FALSE)
> dat<-as.matrix(read.table("pmax_2000_2015.csv",sep=";"))
> write(dat,'pmax_2000-2015.dat')
```

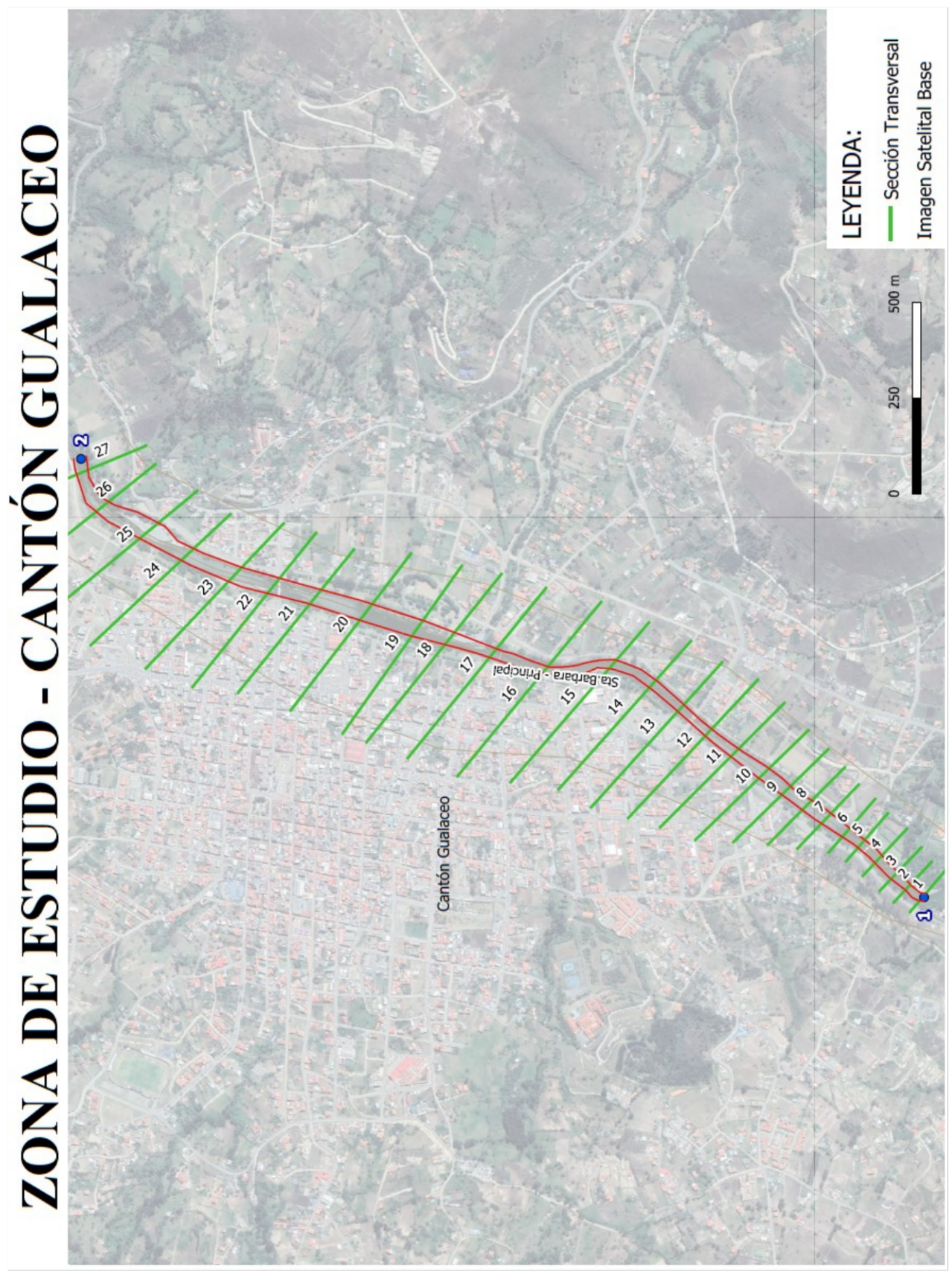
Las matrices corresponden a los archivos con la recapitulación de cada uno de los datos de precipitación los mismos que son ordenados por fecha de orden.

Anexo 10.



Anexo 11.

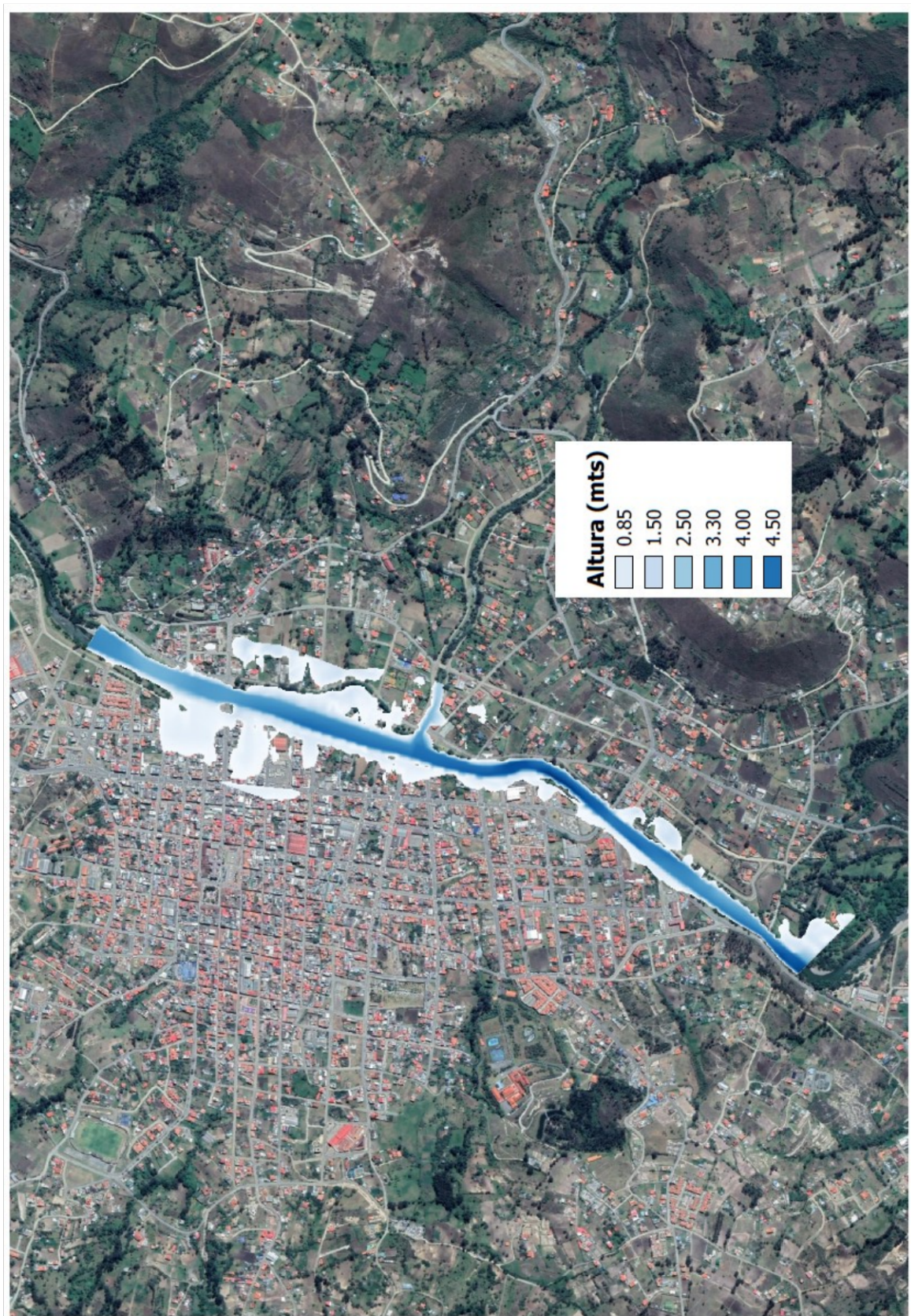


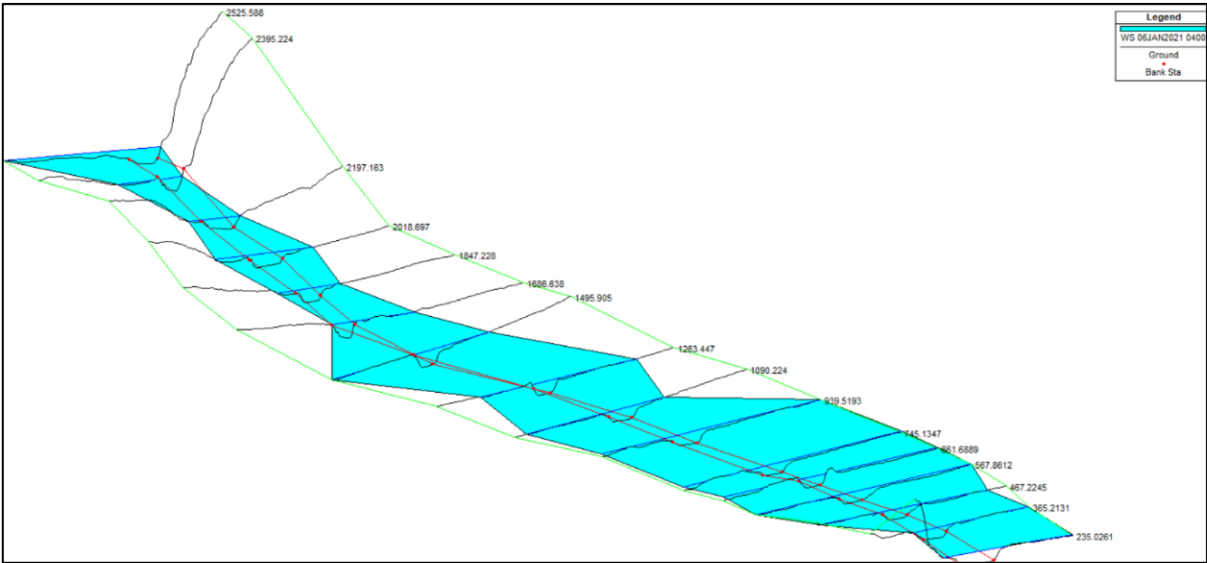


Anexo 13. Mapa de inundación para un periodo de retorno de 2 años.



Anexo 14. Mapa de inundación para un periodo de retorno de 50 años.





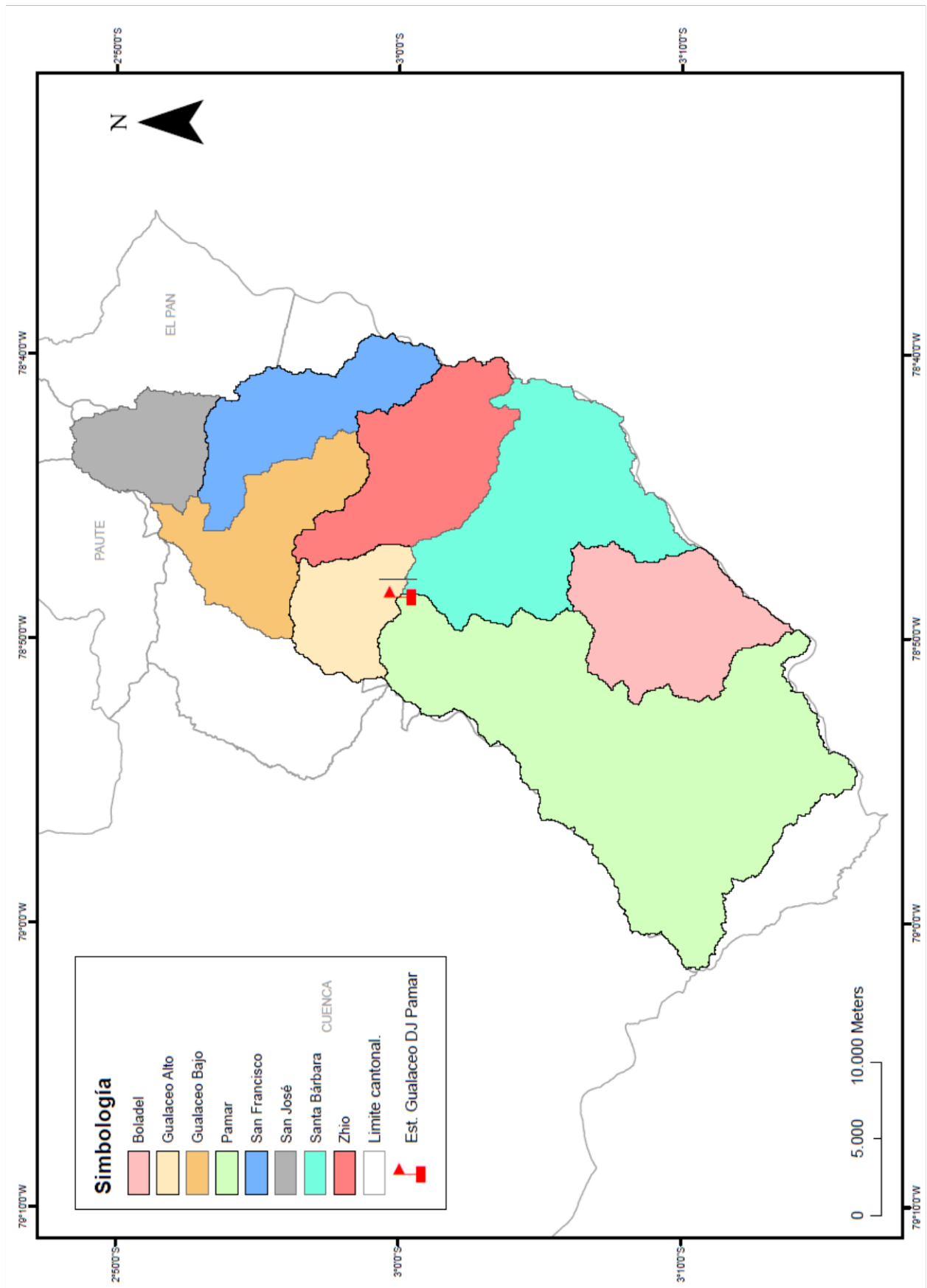
Anexo 15. Vuelo de la zona de estudio en el cantón Gualaceo.







Anexo 16: Localización Punto de Interés.



AUTORIZACION DE PUBLICACION EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL

Yo, **Stalin Manuel Jiménez Sigüenza** portador de la cédula de ciudadanía N.º 0105266217. En calidad de autor/a y titular de los derechos patrimoniales del trabajo de titulación **“Modelación hidrológica de la cuenca del río Santa Bárbara considerando herramientas de geo información”**,” de conformidad a lo establecido en el artículo 114 Código Orgánico de la Economía Social de los Conocimientos, Creatividad e Innovación, reconozco a favor de la Universidad Católica de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos, Así mismo; autorizo a la Universidad para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el Repositorio Institucional de conformidad a lo dispuesto en el artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, **26 de noviembre de 2021.**



F:

Stalin Manuel Jiménez Sigüenza.

0105266217.