

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
VICERRECTORÍA DE DOCENCIA
ESCUELA DE INGENIERÍA AGRÍCOLA



Informe del Trabajo Final de Graduación presentado a la
Escuela de Ingeniería Agrícola como requisito parcial para
optar al grado de Licenciado en Ingeniería Agrícola

MODELACIÓN HIDROLÓGICA DE LA SUBCUENCA DEL RIO BALSAR EN EL
DISTRITO DE CIUDAD CORTÉS.

JOSELYN SUSANA ORTIZ TENCIO

CARTAGO ENERO, 2021

ACTA DE CALIFICACION DE TRABAJOS DE GRADUACION

A las 09:00 horas del día 21 del mes de enero del año 2021, la estudiante Joselyn Susana Ortiz Tencio, carné 2014065133, presenta y defiende su trabajo de graduación titulado: **Modelación hidrológica de la subcuenca del río Balsar en el distrito de Ciudad Cortés**, ante el Tribunal de Evaluación compuesto por los siguientes miembros:

Presidente (a): Ing. Armando Alvarado Chaves

Asesor (a) de la Escuela: Ing. Laura Patricia Segura Serrano

Lector (a): Ing. Fernando Watson Hernández

y se le confiere la nota de **95** y firman conforme lo dispone el Reglamento de Trabajos Finales de Graduación.

ARMANDO ELIECER
ALVARADO CHAVES
(FIRMA)

Firmado digitalmente por
ARMANDO ELIECER ALVARADO
CHAVES (FIRMA)
Fecha: 2021.01.21 16:00:04 -06'00'

PRESIDENTE (A)

Firma digital por LAURA PATRICIA SEGURA SERRANO (FIRMA)
Fecha: 2021.01.21 16:10:31 -06:00
Razón: No estoy aprobando
Localización: Tecnológico de Costa Rica

ASESOR (A) DE LA ESCUELA

FERNANDO WATSON
HERNANDEZ (FIRMA)

Firmado digitalmente por FERNANDO
WATSON HERNANDEZ (FIRMA)
Fecha: 2021.01.21 16:24:52 -06'00'

LECTOR (A)

ESTUDIANTE

MODELACIÓN HIDROLÓGICA DE LA SUBCUENCA DEL RIO BALSAR EN EL
DISTRITO DE CIUDAD CORTÉS.

JOSELYN SUSANA ORTIZ TENCIO

Informe de Trabajo Final de Graduación presentado a la
Escuela de Ingeniería Agrícola como requisito parcial para
optar al grado de Licenciado en Ingeniería Agrícola

Laura Segura Serrano

Asesor

Isabel Guzmán Arias

Director Escuela
Ingeniería Agrícola

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA

CARTAGO ENERO, 2021

Dedicatoria

Quiero dedicar este triunfo primeramente a Dios, por ser soporte en todo momento de mi vida. A mi madre Romy Tencio y a mi padre Ronald Ortiz, porque me enseñaron a nunca darme por vencida, me educaron con amor y a pesar de la distancia todos estos años, me hicieron sentir cerca de sus corazones, me enseñaron a tener coraje, perseverancia, fuerza y valentía ante los malos momentos.

A mis hermanos: Verónica Ortiz por ser un ejemplo para mí y estar cuando más la necesité, Karina Ortiz porque a pesar de estar a miles de kilómetros siempre creyó en mí y a Andrés Ortiz, que siempre me hizo saber lo orgulloso que estaba de mí. Gracias familia amada por ser parte de esta etapa que hoy culmino con éxito, por aportar a mi formación tanto profesional como ser humano.

Agradecimientos

Son muchas las emociones que invaden mi ser al culminar esta etapa en el TEC, me siento bendecida, llena de amor y agradecimiento por lo vivido y logrado. Principalmente agradezco a Dios y a mi familia.

Agradezco a mis asesores: al Ing. Alejandro Ramírez del SENARA y a la Ing. Laura Segura profesora del TEC, por su acompañamiento y conocimientos compartidos durante el desarrollo de esta tesis.

Al TEC por brindarme apoyo económico durante mis años de estudio, me siento honrada al egresar de una universidad con tanto prestigio. A la Escuela de Ingeniería Agrícola por la formación académica adquirida, especialmente a los docentes que realmente enseñaron con verdadera vocación, amor y comprensión.

A mis compañeros y amigos del TEC, por compartir tantos momentos dentro y fuera de las aulas, que hicieron cada escalón menos difícil durante estos años.

Especialmente quiero agradecer a Laura Valenciano, Karen Vargas, Sergio Guillén y Leandro Peñaranda los cuales conocí en el transcurso de esta etapa, todos me enseñaron mucho, gracias por ser personas de bien en mi vida, por darme apoyo incondicional, por sus buenos consejos, en fin, gracias por hacer esta etapa aún más valiosa.

Finalmente agradezco por estar viva y tener la oportunidad de dar desenlace a la etapa más enriquecedora que he vivido hasta el momento, ya que no solo adquirí conocimiento académico, sino que también aprendí a vivir y a ser una persona más fuerte y perseverante.

Gracias a cada persona que creyó en mí, que me motivó cuando más lo necesité, por hacer de esta etapa, algo inolvidable.

ÍNDICE DE CONTENIDO

1) CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	1
1.1) UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	2
1.2) ANTECEDENTES Y PROBLEMÁTICA.....	3
1.3) OBJETIVOS	5
1.3.1) Objetivo general.....	5
1.3.2) Objetivos específicos	5
2) CAPÍTULO 2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	6
2.1) SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA Y LA CUENCA HIDROGRÁFICA COMO SISTEMA DE MANEJO HACIA EL CONTROL DE INUNDACIONES.....	7
2.1.1) Sistemas de información geográfica y sus aplicaciones en la hidrología.	7
2.1.2) Inundaciones y la importancia de su gestión	7
2.2) CARACTERIZACIÓN MORFOLÓGICA DE UNA CUENCA	9
2.2.1) Parámetros relacionados a la forma de la cuenca	9
2.2.1.1) Área y perímetro de drenaje	9
2.2.1.2) Índices de forma	9
2.2.1.2.1) Índice de compacidad o de Gravelius (kc)	9
2.2.1.2.2) Coeficiente de circularidad (Cc).....	10
2.2.1.2.3) Factor de forma de Horton	10
2.2.2) Parámetros asociados al relieve	10
2.2.2.1) Pendiente de la cuenca.....	10
2.2.2.2) Longitud y pendiente promedio del cauce principal	11
2.2.2.3) Perfil longitudinal del cauce principal.....	11
2.2.2.4) Histograma de frecuencia de altitudes.....	11
2.2.2.5) Curva hipsométrica.....	11

2.2.3)	Parámetros que caracterizan el sistema de drenaje	12
2.2.3.1)	Red de drenaje	12
2.2.3.2)	Orden de las corrientes	13
2.2.3.3)	Densidad de drenaje	13
2.3)	PRECIPITACIÓN.....	14
2.3.1)	Polígonos de Thiessen	14
2.3.2)	Validación de datos.....	14
2.3.2.1)	Google Earth Engine	15
2.3.2.2)	Misión de Medición de Lluvias Tropicales (TRMM)	16
2.3.3)	Justificación del uso de precipitación satelital.....	16
2.3.3.1)	Ventajas y desventajas del uso de datos de precipitación satelital y estaciones meteorológicas físicas.....	17
2.3.3.1.1)	Precipitación satelital	17
2.3.3.2)	Estaciones meteorológicas físicas:	18
2.4)	CURVAS INTENSIDAD-DURACIÓN-FRECUENCIA (IDF)	19
2.4.1)	Análisis de datos dudosos	19
2.4.2)	Análisis de distribución de frecuencia	20
2.4.2.1)	Distribución de Gumbel	20
2.4.3)	Pruebas de bondad de ajuste	21
2.4.3.1)	Smirnov Kolmogorov	21
2.4.3.2)	Coeficiente de determinación	21
2.4.4)	Método analítico	21
2.4.4.1)	Análisis de varianza.....	22
2.4.4.1.1)	Distribución de Fisher o F	22

2.5)	MODELACIÓN HIDROLÓGICA	23
2.5.1)	Tiempo de concentración y de retardo.....	25
2.5.2)	Hietograma e hidrograma	26
2.5.2.1)	Método de bloque alterno.....	26
2.5.3)	Método del número de curva	26
2.5.3.1)	Tipo de suelo	27
2.5.3.2)	Uso de suelo	28
2.5.4)	HEC-HMS	30
2.5.4.1)	Componentes básicos	32
2.5.4.1.1)	Modelo de la cuenca.....	32
2.5.4.1.2)	Modelo meteorológico	34
2.5.4.1.3)	Especificaciones de control.....	34
2.5.4.2)	Interfaz del usuario	35
2.5.4.2.1)	Explorador de cuencas.....	35
2.5.4.2.2)	Editor de componentes	36
2.5.4.2.3)	Mensajes de registro.....	36
2.5.4.2.4)	Escritorio	36
2.6)	MÉTODOS EMPÍRICOS PARA DETERMINAR CAUDALES MÁXIMOS.....	36
2.6.1)	Método Racional y Mac Math	36
3)	CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA	40
3.1)	CARACTERIZACIÓN MORFOLÓGICA DE LA SUBCUENCA CON EL USO DEL PROGRAMA QGIS.....	42
3.1.1)	Preparación del MED.....	43
3.1.2)	Delimitación.....	43

3.1.3)	Forma de la cuenca	44
3.1.3.1)	Área y perímetro de la cuenca	44
3.1.3.2)	Índice de compacidad de Gravelius y el factor de forma de Horton	44
3.1.4)	Red hidráulica	45
3.1.4.1)	Red de drenaje	45
3.1.4.2)	Longitud de la red de drenaje	45
3.1.4.3)	Longitud y perfil del cauce principal.....	45
3.1.4.4)	Orden de corrientes.....	45
3.1.4.5)	Densidad de drenaje	45
3.1.5)	Relieve	46
3.1.5.1)	Elevación mayor y menor del cauce principal.....	46
3.1.5.2)	Elevaciones mínima, media, máxima y la pendiente promedio	46
3.1.5.3)	Curva hipsométrica.....	46
3.1.5.4)	Histograma de frecuencia de altitudes.....	48
3.2)	ANÁLISIS DE PRECIPITACIÓN	48
3.2.1)	Polígonos de Thiessen	50
3.2.2)	Validación de datos de precipitación entre la estación meteorológica y datos satelitales	51
3.2.2.1)	Descarga de datos	51
3.2.2.2)	Correlaciones entre los datos.....	53
3.2.3)	Curvas IDF a partir de los datos de precipitación estimada satelitalmente	53
3.2.3.1)	Análisis de datos dudosos.....	53
3.2.3.2)	Análisis de distribución de frecuencia.....	54
3.2.3.2.1)	Distribución por el método de Gumbel	54

3.2.3.3)	Método analítico.....	55
3.2.3.4)	Pruebas de bondad de ajuste para los resultados de Gumbel	57
3.2.3.4.1)	Prueba Kolmogorov-Smirnov	57
3.2.3.4.2)	Coefficiente de determinación.....	58
3.2.3.5)	Análisis de varianza en regresión lineal múltiple.....	59
3.2.3.5.1)	Distribución de Fisher o F.....	59
3.3)	MODELACIÓN HIDROLÓGICA	60
3.3.1)	Tiempo de concentración, retardo y periodos de retorno a utilizar	61
3.3.2)	Hietogramas a partir del método del bloque alterno.....	61
3.3.3)	Método del número de curva a partir del uso de SIG	62
3.3.3.1)	Tipo de suelo	62
3.3.3.2)	Uso de suelo	63
3.3.4)	HEC-HMS	63
3.3.4.1)	Modelo de la cuenca.....	64
3.3.4.2)	Modelo meteorológico.....	64
3.3.4.3)	Especificaciones de control	64
3.3.4.4)	Corrida de simulación.....	65
3.4)	CAUDALES MÁXIMOS A PARTIR DE MÉTODOS EMPÍRICAS	65
4)	CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	67
4.1)	DATOS MORFOLÓGICOS DE LA CUENCA.....	68
4.1.1)	Parámetros relacionados a la forma de la cuenca	68
4.1.2)	Parámetros asociados al relieve	69
4.1.3)	Parámetros que caracterizan la red de drenaje.....	71
4.1.3.1)	Perfil del cauce principal	72

4.2)	ANÁLISIS DE PRECIPITACIÓN	73
4.2.1)	Validación de datos.....	74
4.3)	USO DE DATOS DE PRECIPITACIÓN SATELITAL PARA LA SUBCUENCA DEL RÍO BALSAR	76
4.3.1)	Ajuste de datos de precipitación satelital.....	78
4.3.1.1)	Análisis de datos dudosos.....	78
4.3.1.2)	Ajuste de datos a la función de distribución Gumbel.....	78
4.3.1.3)	Prueba de bondad de ajuste	79
4.3.1.4)	Método analítico.....	80
4.4)	MODELACIÓN HIDROLÓGICA	81
4.4.1)	Número de curva.....	84
4.4.2)	HEC-HMS	85
4.5)	CAUDALES MÁXIMOS OBTENIDOS POR MÉTODS EMPÍRICOS	86
4.5.1)	Método racional	86
4.5.2)	Método Mac Math	87
4.6)	COMPARACIÓN DE CAUDALES PARA CADA PERIODO DE RETORNO	89
5)	CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	92
6)	CAPÍTULO 6. BIBLIOGRAFÍA	96
	ANEXOS.....	106

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1	Delimitación del área de estudio de la subcuenca del río Balsar	3
Figura 2.2	Cambio de forma de la curva hipsométrica de acuerdo con la edad del río.....	12
Figura 2.3	Orden de los cursos de agua.....	13
Figura 2.4	La cuenca de drenaje como sistema hidrológico.....	24
Figura 2.5	Esquema típico del tratamiento de las variables en el modelo hidrológico HEC-HMS.....	31
Figura 3.1	Metodología resumen utilizada en el proyecto.....	41
Figura 3.2	Metodología resumen de la caracterización morfológica.....	42
Figura 3.3	Metodología resumen para el análisis de precipitación.....	49
Figura 3.4	Código para la descarga de datos de precipitación a partir del satélite TRMM (3B42)	52
Figura 3.5	Metodología resumen de la modelación hidrológica.	61
Figura 3.5	Metodología resumen para la obtención de caudales máximos.	65
Figura 4.1	Delimitación de la subcuenca del río Balsar.	68
Figura 4.2	Curva hipsométrica de la cuenca.....	69
Figura 4.3	Histograma de frecuencia de altitudes de la subcuenca del río Balsar.....	70
Figura 4.4	Mapa de elevaciones de la subcuenca del río Balsar	71
Figura 4.5	Orden de la red de drenaje de la subcuenca del río Balsar.....	72
Figura 4.6	Perfil del cauce principal.....	73
Figura 4.7	Estaciones meteorológicas con influencia sobre la subcuenca del río Balsar	74
Figura 4.8	Correlación de datos de precipitación de la estación de Palmar Sur vs los datos de precipitación satelital de la subcuenca del Río Balsar	75
Figura 4.9	Correlación de datos de la estación de Palmar Sur vs los datos de precipitación satelital del polígono sobre el punto de la estación de Palmar Sur.....	76
Figura 4.10	Curvas IDF de la subcuenca en estudio	80

Figura 4.11	Precipitaciones para un periodo de retorno de 1 año.....	82
Figura 4.12	Precipitaciones para un periodo de retorno de 2 años	82
Figura 4.13	Precipitaciones para un periodo de retorno de 10 años	83
Figura 4.14	Precipitaciones para un periodo de retorno de 25 años	83
Figura 4.15	Número de curva de la subcuenca del río Balsar.	85
Figura 4.16	Modelaciones hidrológicas a partir de HEC HMS para un CHA II	86
Figura 4.17	Coefficientes de escorrentía para el método de Mac Math.....	88
Figura 5.1	Orden del suelo de la subcuenca del río Balsar.....	111
Figura 5.2	Uso de suelo de la subcuenca del río Balsar.	111
Figura 5.3	Pendientes reclasificadas para determinar el coeficiente de escorrentía.....	112
Figura 5.4	Coefficientes de escorrentía para un periodo de retorno de 1 año.....	112
Figura 5.5	Coefficientes de escorrentía para un periodo de retorno de 2 años	113
Figura 5.6	Coefficientes de escorrentía para un periodo de retorno de 10 años	113
Figura 5.7	Coefficientes de escorrentía para un periodo de retorno de 25 años	114
Figura 5.8	Pendientes reclasificadas para obtención del coeficiente de escorrentía compuesto	114
Figura 5.9	Porcentajes de cobertura de la cuenca para determinar el coeficiente de escorrentía compuesto	115

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 2.1	Clasificación de tamaños de cuenca en función de su área.	9
Cuadro 2.2	Rangos de coeficientes de Gravelius (K_c)	10
Cuadro 2.3	Clasificación de densidad de drenaje en una cuenca	14
Cuadro 2.4	Números primo y clasificación del tipo de suelo de acuerdo con el SCS	27
Cuadro 2.5	Números primos en función del uso de suelo	29
Cuadro 2.6.	Número de curva (NC) para condición de humedad antecedente II.....	30
Cuadro 2.7	Elementos hidrológicos del software HEC-HMS.....	33
Cuadro 2.8	Descripción de los métodos del modelo meteorológico	34
Cuadro 3.1	Información de las estaciones meteorológicas con influencia en la cuenca.....	50
Cuadro 3.2	Ejemplo para determinar las variables iniciales de la ecuación de intensidad	57
Cuadro 3.3	Asignación de números primos a la capa de uso de suelo.....	63
Cuadro 4.1	Parámetros asociados al relieve de la subcuenca.....	69
Cuadro 4.2	Parámetros relacionados a la red de drenaje.....	71
Cuadro 4.3	Intensidades de precipitación (mm/h) para distintos periodos de retorno	78
Cuadro 4.4	Resultados del test Kolmogorov-Smirnov.....	79
Cuadro 4.5	Uso de suelo de la subcuenca con su respectiva condición hidrológica.....	84
Cuadro 4.6	Caudales máximos a partir del método racional para distintos periodos de retorno.	87
Cuadro 4.7	Caudales máximos a partir del método Mac Math para distintos periodos de retorno.	89
Cuadro 4.8	Comparación de los caudales (m^3/s) obtenidos mediante la modelación en HEC- HMS, método racional y Mac Math según periodos de retorno.	89
Cuadro 4.9	Porcentajes de excedencia de los caudales obtenidos a partir los métodos empíricos que superan los caudales obtenidos en HEC.HMS.....	90
Cuadro 5.1	Registro de datos de precipitación horaria de la estación 98002 de Palma Sur	107

Cuadro 5.2 Y_n y S_n para ser utilizados en el análisis de distribución de frecuencia de Gumbel	107
Cuadro 5.3 Test de Kolmogorov-Smirnov como prueba de bondad de ajuste en función del nivel de significancia (α) y el número de datos (n)	108
Cuadro 5.4 Distribución F de Fisher para un nivel de significancia de 0,05	108

RESUMEN

El proyecto fue enfocado en un análisis hidrológico en la cuenca de río Balsar debido a que su respuesta hidrológica ha afectado el distrito de Ciudad Cortés dando como resultado el desbordamiento del río Balsar, el cual se ubica sobre la ruta 32, en la provincia de Puntarenas. Con el programa QGIS se delimitó la cuenca y se caracterizó morfológicamente, seguidamente se realizó un análisis de precipitación en donde debido a las condiciones propias de la misma, se optó por el uso de datos de precipitación satelital a partir de un ajuste de datos, posteriormente se crearon las Curvas IDF y la ecuación de intensidad para realizar las modelaciones hidrológicas con el programa HEC-HMS bajo condiciones de humedad media (CHA II) para periodos de retorno de 1,2,10 y 25 años con duraciones iguales al tiempo de concentración de la cuenca (79,03 min), dando como resultados caudales de 138,83-172,65-285,43 y 387,44 m³/s respectivamente, finalmente se calcularon los caudales mediante métodos empíricos (Racional y Mac Math) para ser comparados con los anteriores. Se concluye que el análisis realizado debe ser la base para una posterior validación de los datos de precipitación satelital a partir de un análisis de precipitación con estaciones meteorológicas.

Palabras clave

Cuenca, precipitación satelital, validación, modelación hidrológica, caudales.

ABSTRACT

This project was focused on hydrological analysis in the Balsar river basin because of the hydrological response has affected the district of Ciudad Cortés resulting in the overflow of the Balsar river, which is located on route 32, in the Puntarenas province. With the program QGIS the basin was delimited and characterized morphologically a precipitation analysis was the performed where, due to its specific conditions the use of satellite precipitation was chosen from an adjustment of data, subsequently, the IDF curve was created and the intensity equation for hydrological modelling with the program HEC-HMS under average humidity conditions (CHA II) for return of periods of 1,2,10 and 25 year with durations equal to the concentration time of the basin (79,03min) giving the caudal results of 138.83-172.65-285.43 and 387,44 m³/s respectively, finally, the caudal were calculated using empirical methods (Rational and Mac Math) to be compared to the previous ones. It is concluded that the analysis carried out should be the base for further validation of satellite precipitation data from a precipitation analysis using meteorological stations.

Keywords

Basin, satellite precipitation, validation, hydrological modelling, cauda

1) CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1) UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

En el distrito de Ciudad Cortés se ubica el Río Balsar, el cual atraviesa parte del distrito, así como la carretera Nacional número 34, el mismo se puede describir como un pequeño puerto fluvial en las orillas del río Térraba a 10 km de su desembocadura en el Océano Pacífico. El distrito se ubica en la provincia de Puntarenas, cantón de Osa, y es perteneciente a la Región Pacífico Sur o Brunca, limitando al norte con Pérez Zeledón, al noreste con Buenos aires, al este con Coto Brus y al sureste con Golfito.

El cantón de Osa cuenta con un sistema o red fluvial bien definida, conformado por grupos de ríos y quebradas que son el foco de las amenazas hidrometeorológicas de la zona, dicha red de drenaje está conformada principalmente por los ríos: Grande de Térraba, Sierpe, Balsar, Coronado, Uvita, Higuerón, Caña blanca, Carmonal, Chowaco y las quebradas Azul, Zapatero y Cuachi (CNE, 2017).

El río Balsar se ubica en la vertiente del pacífico específicamente en la cuenca hidrográfica más grande del país, la del Río Grande de Térraba, siendo una de las 3 cuencas principales del cantón. Esta cuenca se localiza entre la Cordillera de Talamanca y la Fila costera, posee un área de 5,077 km² de drenaje y se caracteriza por tener una alta pluviosidad, con presencia de frecuentes deslizamientos e inundaciones a lo largo del cauce. (Astorga, n.d.).

La morfología de la zona en su mayor parte es irregular, conformada por montañas, filas, valles y llanuras; y la economía de la zona se ve influenciada por diferentes actividades tales como: pesca artesanal, producción de arroz y palma aceitera, desarrollo de actividades ganaderas, turismo, así como diferentes actividades agroindustriales y agropecuarias (Amador, 2016).

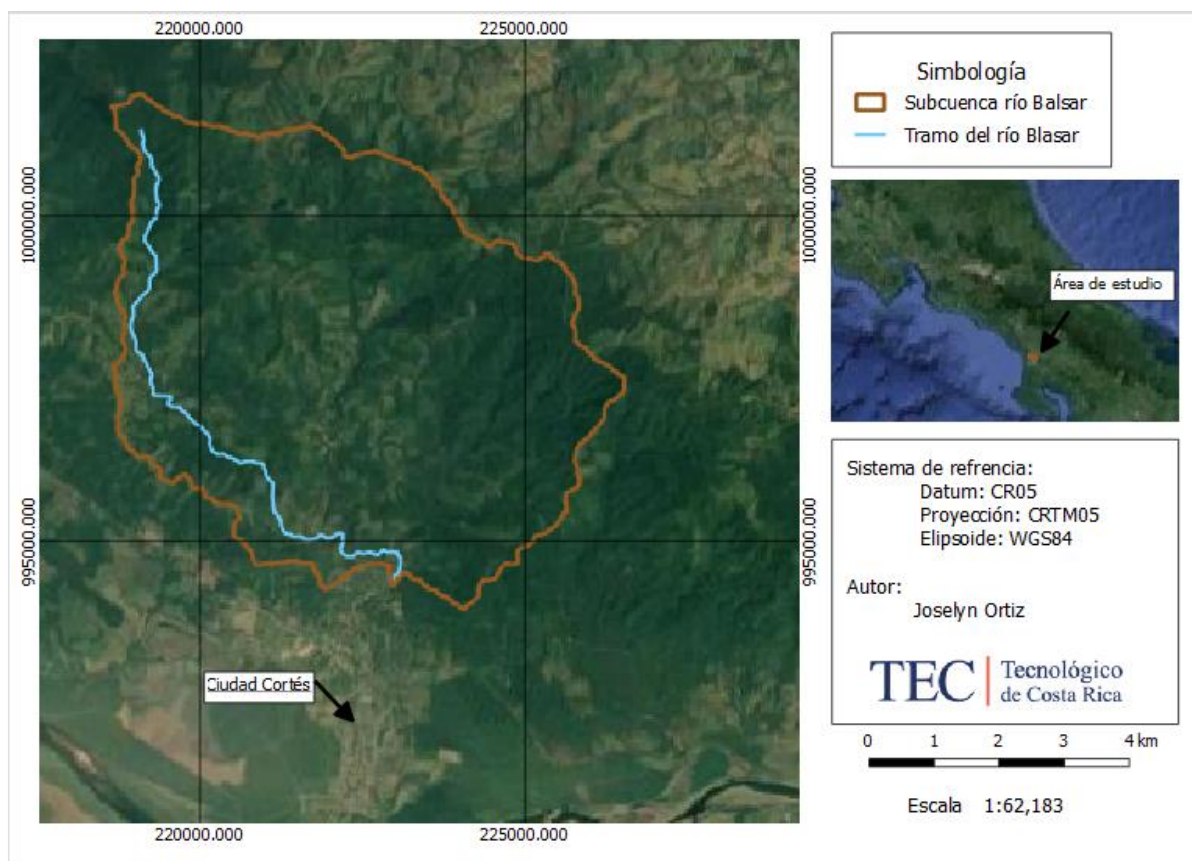


Figura 1.1 Delimitación del área de estudio de la subcuenca del río Balsar

1.2) ANTECEDENTES Y PROBLEMÁTICA

Debido a que el río Balsar al igual que los demás citados con anterioridad están dentro del foco de amenazas hidrometeorológicas en el cantón de Osa, surge la necesidad de realizar un estudio hidrológico que analice el comportamiento de la zona en estudio.

Las zonas que pueden ser más afectadas y con alto riesgo por las inundaciones y avalanchas de los ríos y quebradas antes mencionadas son: Vergel, Caña Blanca, Palmar Norte-Sur, Delicias, La Navidad, Pavón, Sierpe, Finca 12, Ciudad Cortés, Tres Ríos, Coronado y Uvita. De los cursos de agua que afectan a dichas comunidades, algunos han disminuido el periodo de recurrencia de inundaciones, a causa del desarrollo urbano y agropecuario en forma desordenada y sin ninguna planificación, la ocupación de las planicies de inundación al margen de las leyes que regulan el desarrollo urbano y forestal (CNE, 2017).

Las inundaciones han sido y son un problema característico del distrito de Ciudad Cortés, el cual ha percibido pérdidas de diferentes tipos (estructural, sectores productivos, aspectos socioeconómicos, etc.), ya que por ejemplo en el año 2019, vecinos de la zona fueron afectados por el desbordamiento de dicho río en donde tuvieron pérdidas de todo tipo producto de una Convergencia Intertropical encima del territorio nacional (Repretel, 2017).

El Servicio Nacional de Aguas Subterráneas, Riego y Avenamiento (SENARA); institución pública del estado el cual posee un rol estratégico en la gestión del recurso hídrico, da atención a los problemas mencionados anteriormente. En el año 2017 el departamento de Dirección de Ingeniería y Desarrollo de Proyectos, propuso el proyecto “Construcción de obras de protección para los sectores de Palmar Sur, Palmar Norte y Ciudad Cortés, río Grande de Térraba, Osa, Puntarenas”. siendo estos 3 los más afectados por los desbordamientos del río Térraba, registrando más de 150 viviendas afectadas, contabilizadas en esas 3 zonas, interrupción de paso a una población cercana a los 1000 habitantes, así como la socavación sobre ambos márgenes con la posibilidad de colapso de viviendas, red vial y de una extensa área agroproductiva.

Este proyecto nació debido a que el Instituto Meteorológico Nacional (IMN) conforme protocolos de operación nacional, emitió el 03 de octubre del año 2017 un informe en donde se dio a conocer el desarrollo de un sistema de baja presión en el suroeste del Mar Caribe, el cual generaría fuertes lluvias en el país en los siguientes días, siendo esta noticia el inicio de una alerta temprana para iniciar la vigilancia del fenómeno así como la activación de las alertas para informar a la población (SENARA, 2017).

Otro aspecto que dio auge al fenómeno que estaba por venir se dio durante las semanas del 21 de setiembre del mismo año, ya que, gracias a la influencia de la Zona de Convergencia Intertropical, el país había sufrido fuertes precipitaciones que provocaron eventos como desbordamiento de cauces, deslizamientos, dando auge a las inundaciones e interrupción de paso a poblados, siendo estos problemas favorables para que el nuevo fenómeno resultara en un evento de desastre intenso, afectando casi todo el territorio nacional (SENARA, 2017).

Como resultado de los eventos mencionados anteriormente y con el fin de dar protección a las comunidades, se diseñó un dique en la zona de Ciudad Cortés bajo pocos parámetros

hidrológicos debido a la necesidad de pronta respuesta del distrito, a pesar de la falta de información disponible en su momento; es decir, actualmente existe un dique en la zona, pero el mismo fue diseñado bajo un estudio hidrológico muy superficial tomando en consideración únicamente un hidrograma representativo de la zona. En consecuencia, surge la necesidad de realizar estudios hidrológicos más completos que incluyan: las características propias de la cuenca y el cauce, la distribución de la lluvia en la cuenca para varios periodos de retorno. Con dicha información es posible realizar una modelación hidrológica para obtener como resultado principal datos de caudal ligados a un periodo de retorno específico (Jorquera et al., 2012).

Finalmente, es importante conocer los parámetros hidrológicos y morfológicos que caracterizan una cuenca, así como la disponibilidad de datos, ya que mediante dicha información se pueden realizar estudios hidrológicos confiables ante el diseño de futuras obras de protección, siendo esta la principal razón de realizar dicho trabajo, en donde se pretende desarrollar una metodología que se apropie a las características propias de la zona en estudio.

1.3) OBJETIVOS

1.3.1) Objetivo general

Desarrollar una metodología para el modelado hidrológico de la subcuenca del río Balsar, basada en la disponibilidad de datos propios de la zona en estudio para la obtención de caudales máximos para diferentes periodos de retorno.

1.3.2) Objetivos específicos

- Determinar parámetros morfológicos de un área con influencia hidrológica en la subcuenca del Río Balsar mediante el uso de Sistemas de información geográfica.
- Crear curvas intensidad-duración-frecuencia (IDF) para la subcuenca del río Balsar.
- Generar una ecuación de Intensidad válida para la subcuenca a partir de las Curvas IDF.
- Estimar hidrogramas base a través de una simulación hidrológica utilizando HEC-HMS y caudales mediante métodos empíricos para posteriores análisis hidráulicos.

2) CAPÍTULO 2. REVISIÓN BILIOGRÁFICA

2.1) SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA Y LA CUENCA HIDROGRÁFICA COMO SISTEMA DE MANEJO HACIA EL CONTROL DE INUNDACIONES

2.1.1) Sistemas de información geográfica y sus aplicaciones en la hidrología.

Los sistemas de información geográfica (SIG) son muy útiles para las ciencias básicas y la ingeniería ya que ofrecen diferentes tipos de aplicaciones que favorecen el análisis de diferentes tipos de variables, estos se pueden definir según Naranjo (2014), como un complejo sistema de almacenamiento y procesamiento de datos que tiene como fin la producción de información espacial útil en diferentes campos de conocimiento. Un SIG se utiliza para la elaboración de mapas, modelos espaciales y datos estandarizados que facilitan el procesamiento de la información, siendo esta información almacenada en diferentes softwares que procesan los datos espaciales a manera de puntos, líneas, polígonos y áreas a las cuales se les otorgan valores que pueden ser geo-referenciados por el programa elegido.

Una de las muchas aplicaciones de los SIG está asociada a la gestión de recursos hídricos, ya que estos sistemas, se emplean en su mayoría para estimar y describir el estado en el que se encuentra el medio natural y los recursos que lo conforman, así como para desarrollar un inventario estandarizado con la información necesaria para la toma de decisiones estratégicas orientadas a la gestión y mejor conocimiento de los recursos que hay disponibles; así mismo, para la realizar predicciones, y el desarrollo de modelos según (Lazarte, 2002).

Para este mismo autor, otro aporte importante de los SIG referente a los recursos hídricos son los modelos de simulación distribuida donde el almacenamiento, tratamiento y producción de datos sirven de entrada para estas modelaciones, ya que son muy útiles para llevar a cabo la calibración y verificación del análisis del estudio en interés.

2.1.2) Inundaciones y la importancia de su gestión

Es necesario conocer algunas causas del por qué se le debe dar un buen manejo a las cuencas hidrográficas; entre ellas están: riesgos catastróficos, disminución del potencial productivo de

los recursos naturales, crecientes conflictos en el uso de los recursos y también las alteraciones antrópicas y naturales afectan la estabilidad de dichas cuencas dando como resultado catastróficas inundaciones, sequías, aluviones, así como fenómenos hidrometeorológicos (Francke, 2002). Siendo una de las principales razones del por qué el análisis y estudio de una cuenca es importante.

Las inundaciones son el flujo o invasión de agua causadas por el exceso de escurrimiento superficial o por acumulación en los terrenos planos a causa de insuficiencia de drenaje natural o artificial y pueden ser consecuencia de fenómenos hidrométricos (lluvia, huracanes, fretes fríos, entre otros) así como por la falla en obras hidráulicas tales como (canales, presas diques, etc), la magnitud de una inundación dada por estos fenómenos dependen de diferentes factores tales como: intensidad de la lluvia, distribución en tiempo y espacio, tamaño y forma de la cuenca hidrográfica, características del suelo, vegetación, drenaje natural, etc., provocando alteración de cauces, dañando infraestructura urbana, vías de comunicación, pérdida bienes muebles e inmuebles en la población (Arreguín et al., 2017).

Costa Rica es un país altamente expuesto a eventos extremos hidrometeorológicos, el cual ha sido provocado constantemente por amenaza de tormentas tropicales, huracanes, con efectos potencialmente devastadores debido principalmente a su posición geográfica. Dado el tamaño del país, los eventos frecuentemente tienen un impacto nacional, con daños en carreteras e inundaciones dispersas prácticamente en todo el territorio nacional (Alpízar et al., 2018).

Algunos de los fenómenos hidrometeorológicos que han causado daños de vidas humanas y materiales en el país son el Huracán Otto en el año 2016 y la tormenta Nate en el 2017, dejando dichos eventos climáticos 21 fallecidos, daños en carreteras, puentes, acueductos y viviendas y miles de damnificados.

De acuerdo con los autores Guzmán et al (2017), la gestión de inundaciones se considera un proceso complejo donde interactúan aspectos hidrológicos, hidráulicos, geotécnicos, ambientales, económicos y sociales. Utiliza, además, un sistema para la toma de decisiones basado, principalmente, en herramientas de modelos de acceso remoto, para sistemas de

información geográfica, para simulaciones (hidrológicas, hidráulicas, meteorológicas, etc), para el análisis de riesgo y de políticas, entre otros.

2.2) CARACTERIZACIÓN MORFOLÓGICA DE UNA CUENCA

2.2.1) Parámetros relacionados a la forma de la cuenca

2.2.1.1) Área y perímetro de drenaje

El primero se refiere a la proyección horizontal de toda el área de drenaje de un sistema de escorrentía dirigido directa o indirectamente a un mismo cauce natural, medido usualmente en km^2 o ha, en el *Cuadro 2.1* se puede observar su clasificación de acuerdo al tamaño de la cuenca (Ordóñez, 2011).

Cuadro 2.1 Clasificación de tamaños de cuenca en función de su área.

Rangos de áreas (km^2)	Clasificación
< 25	Microcuenca
25 - 250	Pequeña
250 - 500	Intermedia
500 - 2500	Intermedia-pequeña
2500 - 5000	Grande
> 5000	Muy grande

Fuente: (Ramírez, 2015)

El perímetro se define como la longitud total del contorno del área de la cuenca, este parámetro se considera importante, ya que en conexión con el área puede predecir la forma de la cuenca. Siendo normalmente expresado en km (Ordóñez, 2011).

2.2.1.2) Índices de forma

2.2.1.2.1) Índice de compacidad o de Gravelius (*kc*)

Corresponde a la relación del perímetro de la cuenca entre la circunferencia de un círculo con el área de la cuenca, y entre más cercano se encuentre el valor a 1, esta será más susceptible a crecidas.

Cuadro 2.2 Rangos de coeficientes de Gravelius (K_c)

K_c	Forma de la cuenca
1,00 - 1,25	Redonda
1,25 - 1,50	Oval redonda
1,50 - 1,75	Oblonga
> 1,75	Rectangular

Fuente: (Ramírez, 2015)

2.2.1.2.2) Coeficiente de circularidad (C_c)

Este valor varía entre 0 y 1, en donde los valores cercanos a 1 indican morfologías ensanchadas, mientras que los cercanos a 0, indican que las cuencas son alargadas (Ordóñez, 2011).

2.2.1.2.3) Factor de forma de Horton

Permite aproximar la forma de la cuenca a una forma geométrica, a fin de poder determinar la velocidad con la que el agua llega al río principal de la cuenca, en donde una cuenca alargada ($F_f < 1$) es menos susceptible a crecidas de gran magnitud que una redondeada ($F_f > 1$) (Ramírez, 2015).

2.2.2) Parámetros asociados al relieve

El tipo de relieve existente es de gran importancia para el estudio de la cuenca, ya que la duración del tiempo de concentración de las aguas de escorrentía en la red de drenaje y afluentes del curso principal van a depender de parámetros como la pendiente de la cuenca, longitud de cauce principal; su pendiente, histograma de frecuencia de altitudes y la curva hipsométrica.

2.2.2.1) Pendiente de la cuenca

Es el valor medio del declive del terreno y la inclinación, respecto a la horizontal, de la vertiente sobre la cual se ubica la cuenca, influye en el tiempo de concentración de esta y controla la velocidad con que se dará la escorrentía superficial en dicha cuenca (Ordóñez, 2011).

2.2.2.2) Longitud y pendiente promedio del cauce principal

El primero corresponde a la longitud del cuerpo de agua que le da nombre a la cuenca de estudio, siendo la distancia equivalente que recorre el río desde el punto de desagüe aguas abajo hasta el punto aguas arriba situado a mayor topografía y el segundo se determina tomando los valores extremos de altura propios del cauce, el cual consiste en determinar el desnivel H entre el punto más elevado y bajo del río en estudio y luego dividirlo entre longitud del mismo cauce (Brieva, 2018).

2.2.2.3) Perfil longitudinal del cauce principal

Para Gaspari et al (2013), este describe la forma en el que varía su cota a lo largo de su longitud y recorrido; de tal modo que refleja la pendiente, determinando su inicio desde las condiciones impuestas por el tramo superior aguas arriba hasta su desembocadura.

2.2.2.4) Histograma de frecuencia de altitudes

Representa el grado de incidencia de las áreas comprendidas entre curvas de nivel con respecto al total del área de la cuenca (Ordóñez, 2011).

2.2.2.5) Curva hipsométrica

Distribución del área de la cuenca con base a su elevación, en otras palabras, es una representación gráfica en dos dimensiones que plotea en el eje vertical la elevación y en el horizontal el porcentaje de área sobre cada curva de nivel, en relación con el área total (Guerra & Julio, 2002).

En la *Figura 2.2* se observa el comportamiento de la cuenca según la distribución de elevaciones de acuerdo con el porcentaje de área, en donde:

- a. *Ríos jóvenes*: Cuenca con gran potencial erosivo.
- b. *Ríos maduros*: Cuenca en equilibrio.
- c. *Ríos viejos*: Cuenca con poca capacidad erosiva.

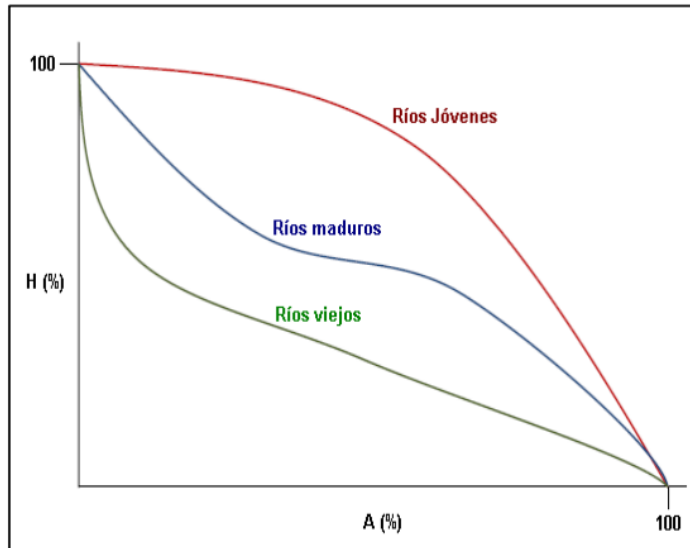


Figura 2.2 Cambio de forma de la curva hipsométrica de acuerdo con la edad del río.

Fuente: (S. Ibáñez et al., 2010)

Para Villón (2004), a partir de los dos parámetros mencionados anteriormente, se puede determinar lo siguiente:

- a. Altura media: Ordenada media de la curva hipsométrica, en donde el 50% del área de la cuenca, está situado por encima de esa altitud y el 50% está situado por debajo.
- b. Altura más frecuente: Es el máximo valor en porcentaje de la curva de frecuencia de altitudes.
- c. Altitud de frecuencia media: Corresponde al punto abscisa media de la curva de frecuencia de altitudes.

2.2.3) Parámetros que caracterizan el sistema de drenaje

2.2.3.1) Red de drenaje

Es el sistema interconectado de diferentes cauces mediante el cual, el agua captada en las partes altas se recolecta y es conducida a las partes más bajas (Breña & Jacobo, 2006).

2.2.3.2) Orden de las corrientes

Se propuso la clasificación de cauces de acuerdo con el orden de un río como la medida de ramificación del cauce principal en una cuenca hidrográfica, en donde clasificó el grado de ramificaciones o bifurcación dentro de una cuenca (Becerra, 2007).

- Corrientes de primer orden: Pequeños canales que no tienen tributarios.
- Corrientes de segundo orden: Cuando dos corrientes de primer orden se unen.
- Corrientes de tercer orden: Cuando dos corrientes de segundo orden se unen.
- Corrientes de cuarto orden: Cuando dos corrientes de tercer orden se unen.

Según Gaspari et al (2013) a mayor número de orden, es mayor el potencial erosivo, mayor el transporte de sedimentos y por tanto mayor también la componente de escurrimiento directo que en otra cuenca de similar área.

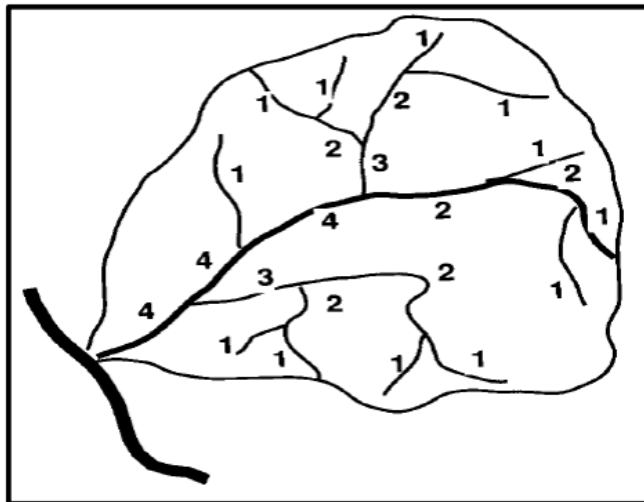


Figura 2.3 Orden de los cursos de agua.

Fuente: (Breña & Jacobo, 2006)

2.2.3.3) Densidad de drenaje

Es el reflejo de la dinámica de la cuenca, de la estabilidad de la red hidrográfica y del tipo de escorrentía de superficie, así como de la respuesta de la cuenca a una precipitación,

obteniéndose a partir de la relación entre la longitud de total de los cursos de agua y su área total (Ordóñez, 2011).

Cuadro 2.3 Clasificación de densidad de drenaje en una cuenca

Rangos de densidad (km/km ²)	Clase
0,1-1,8	Baja
1,9-3,6	Moderada
3,7-5,6	Alta

Fuente: (Camino et al., 2018)

2.3) PRECIPITACIÓN

De acuerdo con Villón (2004), la precipitación se puede definir como toda forma de humedad que, originándose en las nubes, llega hasta la superficie del suelo.

Según Aravena et al (2009), la mayoría de los estudios relacionados con hidrología y en investigaciones de los recursos naturales o relacionados con el medio ambiente, el punto de partida es la estimación de las precipitaciones, por ello, conocer el comportamiento y la forma de evaluación que tiene la precipitación es de gran importancia. Lo normal es trabajar con estaciones meteorológicas las cuales muchas veces brindan información completa, pero a veces no.

2.3.1) Polígonos de Thiessen

Existen diferentes maneras de ubicar las estaciones meteorológicas que influyen sobre una cuenca, uno de ellos es mediante el método del polígono de Thiessen, el cual estima el porcentaje de influencia de las estaciones con respecto al área donde están ubicadas; en otras palabras, crea una distribución más cercana a la realidad del comportamiento de la lluvia en la zona de interés (Bateman, 2011).

2.3.2) Validación de datos

Para conocer el comportamiento de la precipitación en una cuenca en estudio, lo ideal es contar con la mayor cantidad de estaciones meteorológicas posible dentro de ella, de no ser así,

al menos contar con estaciones cercanas, pero con una influencia significativa; ya que existen diferentes escenarios donde, por ejemplo, la única estación con la que se puede realizar el estudio, se encuentra aguas abajo de la cuenca o simplemente influye muy poco o hay total ausencia de datos, ante este último escenario, esto da auge a que se realicen correlaciones en los datos de precipitación.

Una manera de realizar dicha validación es mediante la determinación del coeficiente de Correlación (R). Para Aravena et al (2009), se puede estimar el grado de correlación lineal que existe, en donde cuyo valor debe oscilar entre -1 y 1, donde el valor 0 indica una correlación nula, en tanto los valores 1 y -1, denotan una correlación total. En términos hidrológicos, se considera aceptable una regresión cuyo valor de R sea mayor a 0,8 ó menos que -0.8.

2.3.2.1) Google Earth Engine

La descarga de series temporales de datos de precipitación se puede realizar desde diferentes plataformas, una de ellas es Google Earth Engine, la cual permite visualizar y analizar datos geoespaciales mediante imágenes satelitales, esta plataforma permite disponer de datos, algoritmos y potencia de cómputo desde cualquier punto desde cualquier browser en forma online, reduciendo la complejidad y el costo de los datos geoespaciales. El sistema experto que se crea en Google Earth Engine permite obtener y visualizar colecciones de datos para diferentes ventanas de tiempo seleccionadas, generar gráficos temporales de precipitación y exportar los datos en formato “csv” (Gavilan et al., 2019).

Los satélites son considerados cuerpos que poseen la función de realizar un movimiento alrededor de un objeto de mayor tamaño, existen los de tipo natural tal como la luna, así como los artificiales que han sido contruidos por el hombre, estos últimos observan el planeta mediante sensores multiespectrales, realizando diferentes tareas, entre ellas conocer el comportamiento de distintas variables meteorológicas como precipitación, radiación solar, temperatura. La mayoría de los satélites tienen órbitas polares o geoestacionarias, pero a excepción se encuentra el TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission) el cual no funciona con ninguna de esas dos órbitas, ya que el recorrido de la órbita ha sido modificado para satisfacer requerimientos específicos de la ciencia (Caicedo, 2008).

2.3.2.2) Misión de Medición de Lluvias Tropicales (TRMM)

Existen diferentes satélites o sensores que se utilizan para la descarga de datos de precipitación, uno de ellos es la Misión de Medición de Lluvias Tropicales (TRMM), la cual es una misión conjunta entre la National Aeronautics and Space Administration (NASA) de los Estados Unidos y la National Space Development Agency (NASDA) de Japón. Uno de los principales objetivos de la TRMM es medir la lluvia en las regiones tropicales y subtropicales del mundo, el cual utiliza un producto llamado 3B42 que contiene una estimación de precipitación (mm/h) de sensores infrarrojos fusionados con microondas con una resolución temporal de 3 horas (1:30-4:30-7:30-10:30-13:30-16:30-19:30-22:30) y una resolución espacial de 0.25 grados. Estos datos ofrecen una alternativa de fuente de datos para la variable precipitación en cuencas hidrográficas con escasez de datos o sin datos (Gavilan et al, 2019).

2.3.3) Justificación del uso de precipitación satelital

Cuando hay carencias de datos, existen diversos métodos que van desde avanzadas tecnologías como el uso de satélites ante el limitado acceso de estaciones meteorológicas en la zona de interés de la cuenca.

La variabilidad temporal y espacial de la precipitación, sumado a las limitaciones de redes pluviométricas, representan un gran desafío, esta problemática motiva el uso de estimaciones de esta variable a través de satélites (Hobouchian, 2015).

Durante la última década, diversos grupos de investigación se han enfocado en el desarrollo de la tecnología de sensores de satélites y su explotación con el fin de obtener en tiempo real una estimación de la lluvia a escala global. Y es clara la utilidad de estas estas mediciones, tanto para los modelos de circulación global como para la modelización hidrológica en escalas menores, como sería el caso de cuencas poco o nada instrumentalizadas y con ello, fortalecer la capacidad gestión de los recursos hídricos, mejorar la predicción del clima y desastres naturales y ofrecer rigor científico que ayude a tomar decisiones informadas (Ramos, 2013).

Para Francés (2014), en aspectos relacionados a la gestión del agua y del ambiente, la modelación hidrológica cumple un papel de suma importancia, sin embargo, la eficacia de este tipo de modelos depende totalmente de la disponibilidad de los datos de entrada, es decir, la precipitación.

2.3.3.1) Ventajas y desventajas del uso de datos de precipitación satelital y estaciones meteorológicas físicas

2.3.3.1.1) Precipitación satelital

De acuerdo con los estudios de Francés (2014) y Ravelo & Santa (2000) se listan las siguientes ventajas:

- Ofrece una adecuada cobertura regional, a la vez que permite capturar la variabilidad espacial de las precipitaciones.
- La lluvia estimada por satélite proporciona información en regiones que son inaccesibles para otros sistemas de observación tales como pluviómetros y radar.
- Los datos son de fácil acceso para la población en comparación con las estaciones meteorológicas físicas.
- Registro de datos completos.
- Frente a los datos convencionales que representan mediciones en un punto, las realizadas con sensores de satélite son promedios espaciales en los pixeles, y como tales, se ajustan a la necesidad de los modelos hidrológicos con una cobertura mundial

Según estudios de Castro (2014) y Francés (2014) se mencionan las siguientes desventajas:

- La estimación de la lluvia por satélite está sujeta a errores debido a problemas de instrumentación, naturaleza del sistema de medición, simplificaciones teóricas, relación no lineal entre la variable observada (temperatura) y la lluvia.
- Provee estimación de precipitación cada 3 horas.
- Toma precipitaciones promedio en una determinada área.
- Poseen la limitación de que dependen de las propiedades de las nubes.

2.3.3.2) Estaciones meteorológicas físicas:

De acuerdo con estudios realizados por Guillén & Novao (2018) y Ureña (2011) se enlistan las siguientes ventajas:

- Obtienen datos a pequeños intervalos de tiempo.
- Se pueden ubicar en lugares que son difícil de acceder.
- Registros históricos más extensos.
- Información meteorológica en tiempo real.
- Por todo lo anterior, ofrece mayor confiabilidad en algunos datos meteorológicos.
- Estos funcionan para analizar eventos específicos debido a su nivel de confiabilidad.

Para Coaquira (2018), Francés (2014) y según lo comentado personalmente con el Ingeniero Luis Ramírez en noviembre de 2020 se encuentran las siguientes desventajas:

- Las mediciones de pluviómetros convencionales son relativamente escasas y están mal distribuidos, lo que significa una limitante para una evaluación hidrológica.
- Registro de datos incompletos en horas, días e incluso meses.
- Algunas veces no se les da el mantenimiento adecuado, lo que da paso a posibles errores en los datos de precipitación o datos faltantes.
- No todas las estaciones son colocadas bajo análisis previos, es decir, se colocan en zonas donde muchas veces no son aprovechadas o simplemente no se tienen prioridades de dónde colocarlas de acuerdo con las posibles maneras de su aprovechamiento, tal como lo es una modelación hidrológica.
- El acceso a los datos es ilimitado dependiendo de la institución encargada, ya que las mismas rigen bajo protocolos de obtención muy estrictos.
- Los pluviómetros se encuentran escasamente y se limitan a las mediciones en un único punto, mientras que en datos de radar su cobertura es limitada por la topografía.

2.4) CURVAS INTENSIDAD-DURACIÓN-FRECUENCIA (IDF)

Las curvas que resultan de la unión de puntos representativos de la intensidad media en intervalos de diferente duración, y cada uno de ellos correspondiente a una misma frecuencia o periodo de retorno, se conocen como curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF) (Chetyrina, 2017). Existen diferentes métodos para su diseño, pero en general se deben seguir los siguientes pasos:

- a. Identificar los valores de intensidad máximas para las duraciones de interés y disponibles.
- b. Elaborar el ajuste de una función de distribución de extremos para cada intervalo de tiempo considerados.
- c. Estimar los parámetros de la familia de curvas IDF.

Para Rojas et al (2011), las curvas IDF son una herramienta de fácil uso que permite la estimación de crecidas de cuencas hidrográficas y su utilidad principal corresponde a la estimación de la intensidad, duración y frecuencia de la precipitación en un lugar que no posee pluviógrafo, solamente pluviómetros totalizadores que entregan precipitaciones diarias (24 horas) o lugares donde no existe información pluviométrica. En Costa Rica, en muchos lugares cuando se requiere la realización de un análisis hidrológico, se encuentra la ausencia casi total de los datos de lluvia o caudal, situación que impone fuertes limitaciones a toda investigación técnico-científica en esta disciplina, es por ello que las curvas IDF son una herramienta de primera mano cuando no se cuenta con la información requerida para el desarrollo de este tipo de estudios.

2.4.1) Análisis de datos dudosos

Al tener una serie de datos, es habitual encontrar valores que no parecen ser congruentes con los demás valores, por esta razón, es importante realizar un análisis o prueba de datos dudosos que compruebe si los datos presentan o no algún error, ya que, si esto se presenta independientemente del origen de error, estos datos afectan de manera significativa los

parámetros estadísticos calculados a partir de la información a la que pertenecen (Paniagua, 2016).

Los diferentes procedimientos para determinar los posibles datos dudosos requieren un criterio que involucra consideraciones matemáticas e hidrológicas, entre ellas el *U.S Water Resources Council*, propone un método que funciona como herramienta para seleccionar qué datos utilizar en el análisis y qué datos omitir del análisis de frecuencia. Dicho método es expuesto por Chow (1994) en su libro *Hidrología Aplicada* el cual básicamente se basa en una ecuación de frecuencia que establece los umbrales para los datos dudosos altos y bajos.

2.4.2) Análisis de distribución de frecuencia

Estimar la frecuencia con la que ocurre un evento específico se realiza mediante un análisis de frecuencia, con la finalidad de obtener cada cuánto tiempo, en promedio, ocurrirá un evento determinado. Para determinar la frecuencia de eventos de precipitación extrema se hace uso de un análisis de frecuencia en donde generalmente se utilizan distribuciones probabilísticas para valores extremos (Paniagua, 2016).

2.4.2.1) Distribución de Gumbel

Para realizar el análisis de frecuencia se puede trabajar con métodos paramétricos o no paramétricos, en donde los primeros modelan la serie de datos a través de fórmulas algebraicas basadas en unos parámetros que es preciso ajustar a partir de la muestra (Chetyrina, 2017), una de las distribuciones utilizadas para este tipo de métodos es la de Gumbel, siendo una de las más utilizadas en la actualidad para el cálculo de la precipitación para un periodo de retorno escogido (García, 2013), esta es un distribución de valores extremos formulada por Gumbel en 1941 y posteriormente por Chow en 1954, que es una distribución logarítmica normal, para lo cual, el valor extremo o valor máximo X se obtiene mediante una ecuación llamada análisis de frecuencia (Ghanem et al., 2006).

2.4.3) Pruebas de bondad de ajuste

Para (Chinchilla et al., 2010), estas pruebas miden la compatibilidad de una muestra aleatoria con una función teórica de distribución de probabilidades, ya sea mediante la comprobación gráfica o por la frecuencia empírica de la serie analizada. En otras palabras, estas pruebas demuestran qué tan bien la distribución seleccionada se ajusta a sus datos. En teoría existen diferentes métodos de comprobación de la determinación de una función de probabilidades, entre ellos se encuentra el de Smirnov Kolmogorov.

2.4.3.1) Smirnov Kolmogorov

De acuerdo con los mismos autores, este método consiste en comparar las diferencias existentes entre la probabilidad empírica de los datos de la muestra y la probabilidad teórica, tomando el valor máximo del valor absoluto (D), de la diferencia entre el valor observado o frecuencia observada acumulada $F_n(x)$ y el valor de la recta teórica del modelo o frecuencia teórica acumulada $F(x)$, con el objetivo de compararlo con un valor crítico estadístico (Dt) dado partir del número de datos de la muestra y un nivel de significancia (α), para finalmente verificar si el ajuste es bueno o no es bueno mediante las siguientes hipótesis:

- a. Si $D < Dt \Rightarrow$ el ajuste es bueno, al nivel de significación seleccionado.
- b. Si $D > Dt \Rightarrow$ el ajuste no es bueno, al nivel de significación seleccionado, siendo necesario probar con otra distribución

2.4.3.2) Coeficiente de determinación

El coeficiente de determinación señala qué proporción de la variación total de las frecuencias observadas es explicada por las frecuencias acumuladas (Pizarro et al., n.d.).

2.4.4) Método analítico

Otra forma de desarrollar las Curvas IDF es de una manera analítica a través un modelo de regresión lineal múltiple que relacione simultáneamente la intensidad, duración y periodo de retorno de un grupo de curvas establecidas para una región o bien para una zona específica

generando una ecuación que pueda ser extrapolada a aquellas zonas que carezcan de registros. A este procedimiento se le conoce como método analítico el cual básicamente consiste en ajustar los valores originales de precipitación a una distribución teórica (Rojas et al., 2011).

Una manera de relacionar las variables de intensidad, duración y frecuencia simultáneamente es mediante una ecuación a partir de los datos de una familia de curvas IDF (Aparicio, 1989).

2.4.4.1) Análisis de varianza

Este análisis es un procedimiento que descompone la varianza en sus diversas fuentes, el cálculo del análisis produce una razón F (F por Sir Ronald A. Fisher su inventor), la cual, junto con los grados de libertad y un valor alfa predeterminado o también llamado nivel de significancia, contribuye a decidir si se mantiene o se rechaza la hipótesis nula (H_0). Cuando se rechaza la H_0 en un análisis de este tipo se afirma que existen diferencias estadísticamente significativas entre las medias aritméticas (promedios) de las muestras, es decir, una diferencia mucho mayor de la que se hubiera encontrado por casualidad (Jiménez et al., 2002).

2.4.4.1.1) Distribución de Fisher o F

Según Alperín (2013), la distribución Fisher es una familia de las distribuciones de frecuencia teóricas para la relación entre dos varianzas obtenidas de un muestreo independiente de dos poblaciones cuyas observaciones están normalmente distribuidas y cuyas varianzas son iguales.

Esta prueba se utiliza para probar la hipótesis nula de que no existe relación en la población, entre las variables independientes consideradas como grupo y la variable dependiente. La distribución F depende del 1% de probabilidad y de los grados de libertad del numerador y del denominador.

2.5) MODELACIÓN HIDROLÓGICA

Primeramente, es importante conocer el concepto de simulación, de acuerdo con Parra et al (2005) este constituye un soporte indispensable para el proceso de construcción de un modelo en sus diferentes aproximaciones (niveles de agregación), ya que ella aporta imágenes (comportamiento de cada variable) que van indicando al modelador, que tan acertado está en la representación matemática de la realidad. Así mismo, la simulación es la herramienta para la validación final de un modelo, el análisis de sensibilidad y en general para la experimentación con propósitos de conocimiento o de definición de estrategias de control o intervención sobre la realidad.

De acuerdo con (Pascual & Díaz, 2016) los modelos hidrológicos intentan representar los diferentes procesos que se dan dentro de un espacio (generalmente es una cuenca) que transforman, en principio, una precipitación en escorrentía, siendo este último concepto (Precipitación $I(t)$) la entrada del sistema en donde queda definida como la distribuida en el plano superior del espacio de la cuenca, el caudal ($Q(t)$) es la salida, y es el resultante de la interacción de los distintos planos dentro de los límites de la cuenca: flujo que se concentró en el espacio del sistema hidrológico y se cuantifica a la salida de la cuenca (*figura 2.4*). La evaporación y el flujo subsuperficial también son salidas, pero si no intervienen como componentes que contribuyen al caudal modelado, se consideran pérdidas que escapan de los límites de la cuenca.

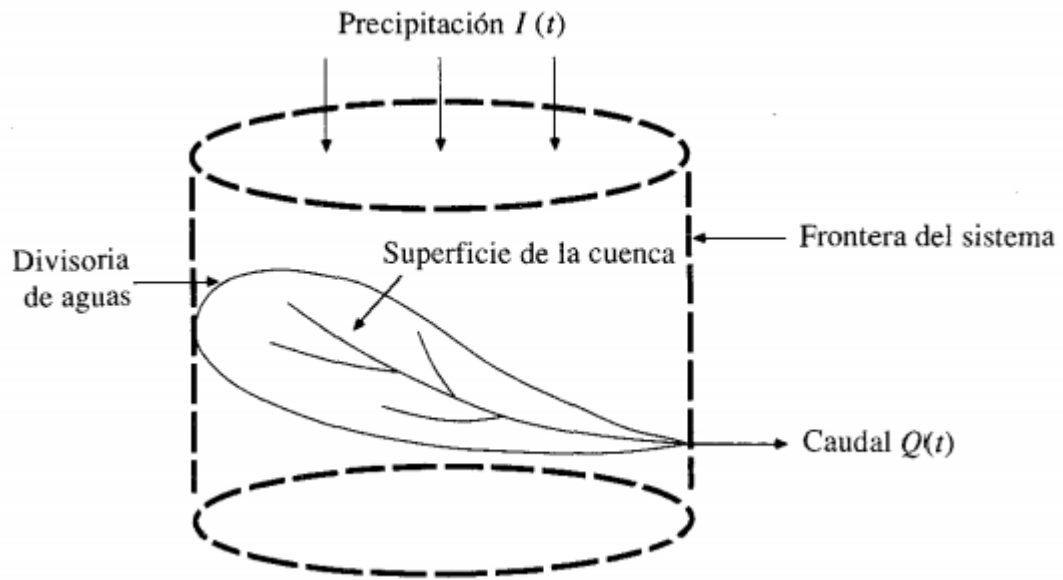


Figura 2.4 La cuenca de drenaje como sistema hidrológico.

Fuente: (Chow, 1994)

Es importante hacer énfasis en la gran relación de las avenidas máximas con las modelaciones hidrológicas, ya que según Diaz et al., (2017) la modelación hidrológica es una herramienta de gran importancia para el estudio de avenidas que se han extendido por todo el mundo. En la actualidad, con el empleo de estos modelos, se realiza el análisis y la prevención de las inundaciones; además es posible manejar hipótesis suficientemente realistas o previsibles que ofrezcan un cierto grado de confianza para la toma de decisiones, ya sea en la ordenación del territorio en torno a los ríos o para exigir criterios de diseño de obras e infraestructuras capaces de soportar y funcionar adecuadamente en situaciones de emergencia. Incluso, alertar a los servicios de protección civil y establecer protocolos de actuación ante posibles situaciones de peligro por intensas lluvias.

Existen diferentes representaciones gráficas que muestran la precipitación y su transformación como lo es la escorrentía, así como otros conceptos importantes que deben tomarse en cuenta y saber interpretar para comprender el funcionamiento de una modelación hidrológica. Sus definiciones y algunas características importantes se muestran a continuación:

2.5.1) Tiempo de concentración y de retardo

El primero es conocido también tiempo de equilibrio o el requerido para que, durante un aguacero uniforme, alcance el estado estacionario, es decir, el tiempo necesario para que todo el sistema (toda la cuenca) contribuya eficazmente a la generación de flujo en el sitio de desagüe. Este también se atribuye al tiempo que tarda una gota de agua caída en el punto más alejado de la cuenca hasta el punto de aforo. (Botero & Vélez, 2011).

Para el cálculo del tiempo de concentración existen diferentes ecuaciones empíricas, Batanero (2007) menciona dos de las más utilizadas, donde la *Ecuación 1* corresponde al método de Kirpich y la *Ecuación 2* al Servicio de Conservación de suelos (SCS).

$$T_C = 0,0195 * \frac{L^{1.155}}{H^{0.385}} \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde:

T_C : Tiempo de concentración (min)

L : Máxima longitud del recorrido del agua (m)

H : Desnivel entre el punto más alejado y la salida del agua (m/m)

$$T_C = \frac{0,02872 * L^{0.80} * \left(\frac{1000}{NC} - 9\right)^{1.67}}{S^{0.50}} \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde:

T_C = Tiempo de concentración (min)

NC = Número de curva

El tiempo de retardo o respuesta (*lag time* (T_{lag})) corresponde al tiempo que transcurre desde el centro de gravedad del hietograma de precipitación neta hasta la punta del hidrograma, dicho valor es estimado para cada una de las subcuencas y es función del tiempo de concentración (*Ecuación 3*) (Pascual & Díaz, 2016).

$$Tlag=0.6*Tc$$

Ecuación 3

2.5.2) Hietograma e hidrograma

Un hietograma representa la intensidad de precipitación en función del tiempo, su obtención se basa en el análisis estadístico de varios elementos (altura, duración, forma) de eventos lluviosos, una vez obtenido, se transforma mediante un modelo lluvia-escorrentía en parámetros de escorrentía cuya probabilidad de ocurrencia se asocia a la tormenta de diseño, es decir un hidrograma, el cual va a mostrar un caudal pico en función del hidrograma y otras variables como tipo de suelo, pendiente, uso de suelo y demás (Balbastre, 2015).

De los métodos más conocidos para obtener un hietograma se encuentra el del bloque alterno, el cual se explica a continuación:

2.5.2.1) Método de bloque alterno

Este método es considerado útil para desarrollar un hietograma de diseño a partir de Curvas IDF. Este hietograma especifica la profundidad de precipitación que sucede en un número definido de intervalos de cierta duración fraccionaria de la duración total y con un tiempo de retorno específico. En otras palabras, en este hietograma se simula una tormenta en la que se alternan los incrementos de precipitación de cada intervalo de tiempo sucesivo, de tal manera que la intensidad máxima ocurra en el centro de la duración requerida, en donde los demás bloques son ordenados descendente y alternativamente hacia la derecha e izquierda del bloque central (Elizondo, 2016).

2.5.3) Método del número de curva

Este método fue desarrollado por el Servicio de Conservación de Recursos Naturales de EE.UU (Natural Resources Conservation Service-NRSC), originalmente llamado Servicio de Conservación de Suelos (Soil Conservation Service - SCS), el cual se utiliza para calcular la precipitación efectiva como una función de la lluvia acumulada, la cobertura del suelo y las condiciones de humedad. Esta metodología del número de curva es la que más se emplea para transformar la precipitación total en precipitación efectiva y nació de la observación del

fenómeno hidrológico en distintas condiciones de humedad antecedente (Lavao & Corredor, 2014).

Para los mismos autores, la representación gráfica de la profundidad de precipitación (P) y la profundidad de exceso de precipitación (P) escurrentía directa (Pe), permite obtener una familia de curvas las cuales fueron estandarizadas a partir de un número adimensional de curva CN, que varía de 1 a 100, en función del grado de escurrimiento directo, en donde un número de curva $CN = 100$ indica que toda la lluvia se escurre y un $CN = 1$ indica que toda la lluvia se infiltra por tal razón los números de curva representan los coeficientes de escurrentía.

Una manera de determinar el número de curva es mediante la automatización del cálculo aplicando sistemas de información geográfica (SIG). El empleo de SIG en la modelización permite atenuar problemas existentes debidos a la variabilidad de las características físicas y geomorfológicas de una cuenca hidrográfica (Amarilla et al., 2013).

Para Estrela et al (1995), la determinación del parámetro del número de curva resulta mediante la realización de operaciones de reclasificación y superposición de las siguientes capas de información, permitiendo obtener el parámetro del número de curva de una forma precisa y automatizada en donde se le debe asignar un número primo con respecto a la variable analizada.

2.5.3.1) Tipo de suelo

Este se clasifica según los cuatro grupos que establece el SCS, los cuales se describen en función de características tales como productividad, clima, drenaje, vegetación etc.

Cuadro 2.4 *Números primo y clasificación del tipo de suelo de acuerdo con el SCS*

Grupo	Características	Número primo
A	En ellos el agua se infiltra rápidamente, aún cuando estén muy húmedos. Profundos y de texturas gruesas (arenosas o areno-limosas), están excesivamente drenados	3
B	Cuando están muy húmedos tienen una capacidad de infiltración moderada. La profundidad de suelo es de media a profunda y su textura es franco-arenosa, franca, franco-arcillosa o franco-limosa. Están bien o moderadamente drenados	5

C	Cuando están muy húmedos, la infiltración es lenta, La profundidad de suelo es inferior a la media y su textura es franco-arcillosa, franco-arcillo-limosa o arcilla-arenosa. Son suelos imperfectamente drenados.	7
D	Cuando están muy húmedos, la infiltración es muy lenta. Tienen horizontes de arcilla en la superficie o próximos a ella y están pobremente o muy pobremente drenados. También se incluyen aquí los terrenos con nivel freático permanentemente alto y suelos de poco espesor (litosuelos)	11

Fuente: (Estrela et al., 1995)

También se debe tener en cuenta la siguiente información de los órdenes del suelo, ya que, según el orden, los mismos se relacionan con los grupos hidrológicos.

- Entisoles, constituidos por aluviones: Grupo de suelos A.
- Inceptisoles, suelos de débil desarrollo: Grupo de suelos B.
- Alfisoles, suelos jóvenes, pero con horizonte B arcilloso, enriquecido por elevación. Se considera conjuntamente, con los ultisoles (enriquecidos en arcilla): Ambos forman parte del grupo C.
- Vertisoles, suelos ricos en arcilla y Aridisoles, constituidos por suelos secos, con sales y yesos : Grupos de suelos D.

2.5.3.2) Uso de suelo

Conocer el mapa del uso de suelo permite diferenciar el aprovechamiento que posee el mismo, en donde existen diferentes usos tales como: vegetación, forestal, cultivos, espejos de agua y demás. El mapa se puede obtener mediante imágenes satelitales y para obtener la capa ráster de uso de suelo, se debe reclasificar con un numero primo según el obtenido en la clasificación según el *Cuadro 2.5* (Gómez & Vargas, 2019).

Cuadro 2.5 *Números primos en función del uso de suelo*

Número primo	Uso/cobertura de suelo
2	Pradera buena
3	Pradera pobre
5	Espejos de agua
7	Plantaciones de aprovechamiento
11	Masa forestal media
13	Masa forestal muy clara
17	Tierra cultivada en general
19	Tierra en cultivada desnuda
23	Suelos desnudos
29	Residencial de muy baja densidad
31	Residencial de baja densidad
37	Residencial de baja media
41	Residencial de densidad alta
43	Zonas comerciales
47	Áreas verdes

Fuente: (Cuenca, 2017)

Existen diferentes condiciones de humedad antecedente (I,II, y III) el cual, en función de cada uno, así como a partir del uso de suelo, condición hidrológica, y grupo de suelo se obtienen diferentes números de curva. En dicho proyecto se utilizará la CHA II ya que esta es asumida bajo condiciones media de humedad debido a que, para este caso, no se analiza un evento en específico. El *Cuadro 2.6* muestra el valor de los números de curva.

Cuadro 2.6. Número de curva (NC) para condición de humedad antecedente II

Uso de suelo	Condición hidrológica	Grupo de suelo			
		A	B	C	D
Cultivos alineados	Mala	71	81	88	91
	Buena	67	78	85	89
Pastizales	Mala	68	79	85	89
	Regular	49	69	79	84
	Buena	39	61	74	80
Bosques (forestales)	Mala	45	66	77	83
	Regular	36	60	73	79
	Buena	25	55	70	77
Caseríos	-	59	74	82	86
Suelo desnudo	-	72	82	87	89

Fuente: (Ibáñez et al., 2011)

Según Villón (2004), la condición hidrológica se refiere a la capacidad de la superficie de la cuenca para favorecer o dificultar el escurrimiento directo, esto se encuentra en función de la cobertura vegetal y se obtiene de la siguiente manera:

- a. Condición hidrológica buena: Cobertura vegetal mayor al 75% del área.
- b. Condición hidrológica regular: Cobertura vegetal entre 50% y 75% del área.
- c. Condición hidrológica pobre: Cobertura vegetal menor al 50% del área.

2.5.4) HEC-HMS

Hay diferentes sistemas de modelado hidrológico que permiten desarrollar los procesos anteriormente mencionados, entre ellos se encuentra el Sistema de Modelado hidrológico (Hydrologic Modeling System, HMS), desarrollado por el centro de Ingeniería Hidrológica (Hydrologic Engineering Center HEC), del Cuerpo de Ingenieros del Ejército Estadunidense.

Según Umaña (2014), hay un tratamiento general y de manera resumida que se le da a las variables introducidas en el modelo confeccionado en el HEC-HMS; donde se inicia con los datos de precipitación, los cuales son manipulados por medio del modelo de pérdidas de infiltración para generar la precipitación neta (obtenida al restarle a la precipitación total, la

precipitación que es capturada por la vegetación, infiltrada en el suelo y/o evaporada). Luego se emplea una función de transformación de precipitación escorrentía, la cual dará como resultado un hidrograma de escorrentía superficial. El proceso mencionado se observa en la *Figura 2.5*.

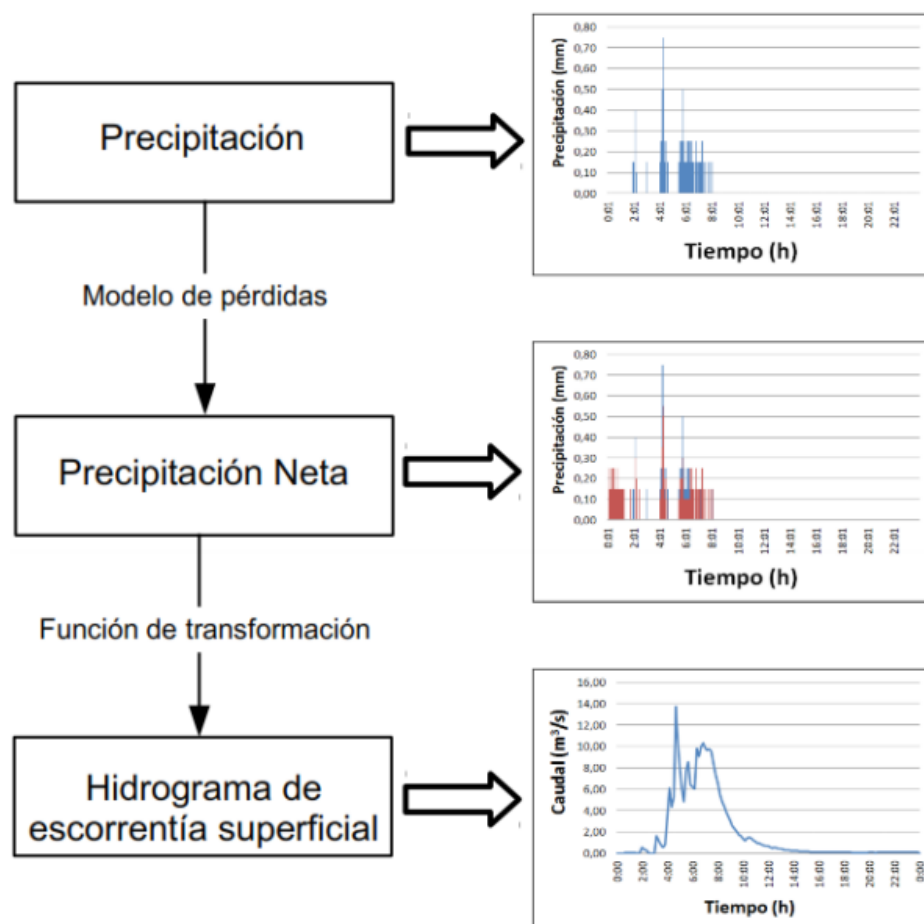


Figura 2.5 Esquema típico del tratamiento de las variables en el modelo hidrológico HEC-HMS

Fuente:(Umaña, 2014)

Para los autores Carrillo & Mejía (2016), el modelo hidrológico HEC-HMS se usa para simular la respuesta hidrológica de una cuenca. Incluye los modelos de cuenca, modelos meteorológicos, especificaciones de control y datos de salida. El programa crea una corrida de simulación, combinando los modelos y las especificaciones. Puede hacer corridas de precipitación o de la proporción de flujo, tienen la capacidad de salvar toda la información de estado de la cuenca en un punto de tiempo y habilidad de comenzar una nueva corrida de simulación, basada en la información de estado previamente guardada.

Hay cinco grupos básicos de información que deben suministrarse al programa HEC-HMS para llevar a cabo las simulaciones (Lagos & Rubio, 2015), entre ellas se encuentran:

- a. Precipitación histórica o de diseño.
- b. Características del suelo.
- c. Información morfométrica de las subcuencas.
- d. Datos hidrológicos del proceso de transformación de lluvia en escorrentía.
- e. Características hidráulicas de los tramos de canal o cauce y de la capacidad de los embalses (métodos de tránsito).

2.5.4.1) Componentes básicos

Además de conocer los procedimientos hidrológicos que posee HEC-HMS, es importante conocer los componentes base para llegar a los resultados esperados, los cuales se explican a continuación de acuerdo con Castillo & Ramirez (2017).

2.5.4.1.1) Modelo de la cuenca

Este modelo es representado por la descripción física de la cuenca, permite la inclusión de las características morfométricas y de condición del suelo. Esto se logra con la interconexión de elementos hidrológicos que se consideren lo más semejante a la realidad de la cuenca. Cada elemento hace uso de un modelo matemático que describe su proceso físico. Dichos elementos hidrológicos se describen en el *Cuadro 2.7*.

Cuadro 2.7 Elementos hidrológicos del software HEC-HMS

<i>Elemento</i>	<i>Descripción</i>
Subcuenca (Subbasin)	El elemento subcuenca es utilizado para representar la parte física de la cuenca. Dada la precipitación, el caudal de salida de la subcuenca es calculado restando las pérdidas de precipitación, y transformando el exceso de precipitación en caudal de salida sumándole el gasto base.
Canal (Reach)	Este elemento es utilizado para trasladar el flujo aguas abajo en el modelo de la cuenca. El gasto de entrada a este elemento puede venir de uno o más elementos aguas arriba. El flujo de salida es calculado en base al tránsito y la atenuación del hidrograma de entrada.
Unión (Junction)	Una unión se utiliza para unir el caudal proveniente de uno o más elementos hidrológicos. El caudal de salida es calculado simplemente sumando todas las entradas y asumiendo que no existe almacenamiento en la unión
Fuente (Source)	Este elemento se utiliza para introducir caudal en la cuenca, no tiene entradas, el gasto de salida es definido por el usuario
Salida (Sink)	El elemento salida es utilizado para representar la salida de la cuenca. El gasto de entrada de este elemento puede venir de uno o más elementos. No hay gasto de salida en este elemento.
Reservorio (Reservoir)	Se utiliza para modelar la detención y atenuación de un hidrograma causada por un reservorio, estanque de detención, embalse. El gasto de entrada puede venir de uno o más elementos hidrológicos. El caudal de salida puede ser calculado de tres formas. El usuario puede definir Cuadros de: almacenamiento-descarga, elevación-almacenamiento-descarga, altura-área de descarga. Se puede introducir también una relación entre la elevación y el almacenamiento o la elevación y el área y definir una o más estructuras de salida, o especificar una serie de tiempo de caudal de salida.
Desviación (Diversion)	Se modela el caudal que deje el canal principal. La entrada puede venir de uno o más elementos. La salida es de dos tipos, el caudal desviado, y el caudal que no es desviado, el primero es calculado utilizando información de entrada, y cada una de estas salidas puede ser conectada a elemento hidrológicos.

Fuente: (Castillo & Ramirez, 2017)

2.5.4.1.2) Modelo meteorológico

Dicho modelo calcula la precipitación requerida en la subcuenca, en donde se puede utilizar precipitación puntual o por grillas, tiene la capacidad de modelar la precipitación sólida y líquida junto con evapotranspiración. A continuación, en el *Cuadro 2.8* se muestran los diferentes métodos que el programa ofrece.

Cuadro 2.8 Descripción de los métodos del modelo meteorológico

Método para la precipitación	Descripción
Frecuencia de las tormentas (Frequency Storm)	Se utiliza para desarrollar un evento de precipitación en el cual el valor de la precipitación para diferentes duraciones tiene una probabilidad de excedencia consistente
Estaciones por peso (Gage Weights)	Permite asignar pesos a las diferentes estaciones definidas por el usuario.
Precipitación por grilla (Gridded Precipitation)	Permite el uso de precipitación por grilla, tal como puede ser la proveniente de un radar meteorológico.
Inverso de la distancia (Inverse Distance)	Calcula el promedio en la subcuenca aplicando la ecuación del inverso de la distancia al cuadrado para las estaciones definidas por el usuario.
Tormenta del SCS (SCS Storm)	Este método aplica una distribución específica del SCS a una tormenta con una duración total de 24 horas.
Hietograma (Specified Hyetograph)	En este método el usuario introduce el hietograma para la subcuenca.
Tormenta estándar de proyecto (Standard Project Storm)	Este método aplica una distribución en el tiempo a un valor de precipitación dado.

Fuente: (Castillo & Ramirez, 2017)

2.5.4.1.3) Especificaciones de control

Para las especificaciones de control se considera desde cuando comienza y cuando termina el proceso de cálculo del modelo. Con respecto al incremento de tiempo que el programa tendrá en cuenta para realizar los cálculos, se recomienda que se considere un 29% del tiempo de concentración. La información en las especificaciones de control incluye una fecha de inicio, una fecha de finalización y el intervalo de tiempo de duración.

2.5.4.2) Interfaz del usuario

Consiste en una barra de menú, barra de herramientas y cuatro paneles importantes. Estos paneles son conocidos como: el explorador de cuenca, editor de componentes, los mensajes de registro, y el escritorio (Bastidas, 2005).

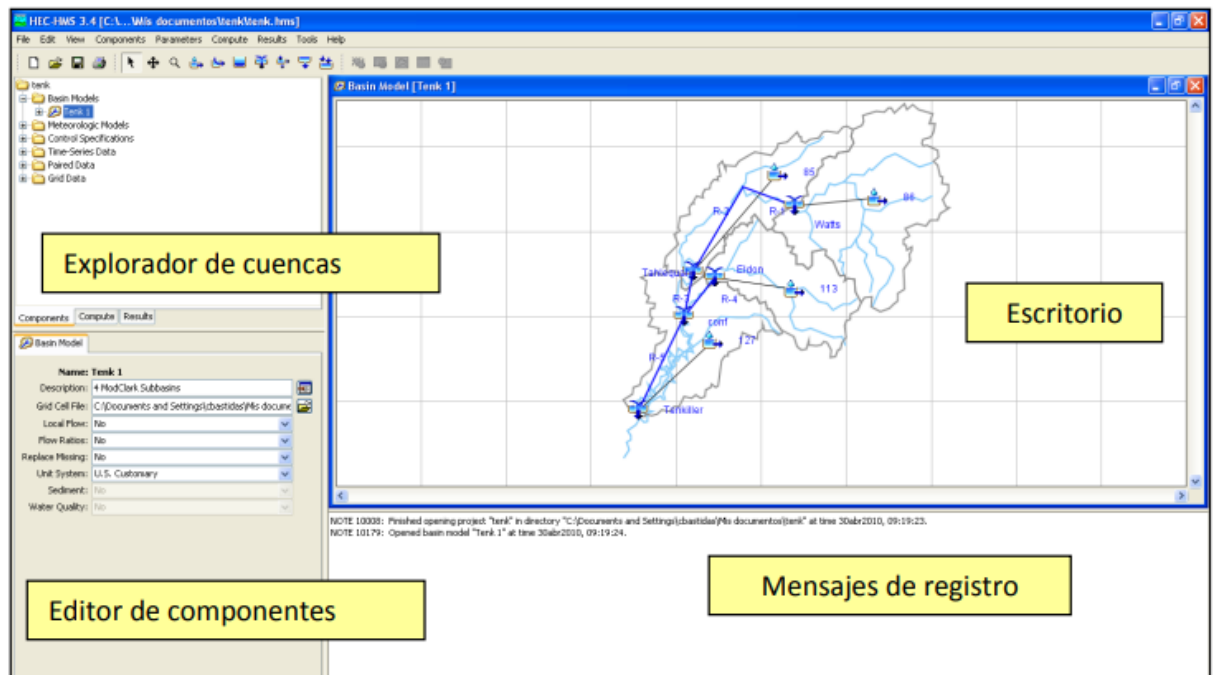


Figura 2.6 Interfaz del programa HEC HMS.

Fuente: (Bastidas, 2005)

A continuación se explica cada uno de los componentes anteriormente mencionados según (Bastidas, 2005).

2.5.4.2.1) Explorador de cuencas

Este brinda un acceso rápido a todos los componentes de un proyecto, en este apartado el usuario puede navegar de una manera fácil desde el modelo de cuencas hasta una estación precipitación y al modelo meteorológico sin utilizar las opciones de menú. Este explorador se divide en tres: componentes (components), cálculos (compute) y resultados (results).

2.5.4.2.2) Editor de componentes

Funciona para cuando un componente o un subcomponente en el explorador de la cuenca necesita ser editado.

2.5.4.2.3) Mensajes de registro

En este apartado, el programa muestra notas, advertencias y errores. Dichos mensajes son de gran utilidad para identificar el por qué una simulación está fallando o por qué una acción no se ejecuta.

2.5.4.2.4) Escritorio

En este se incluye tablas de resúmenes, series de tiempo, gráficos, editores globales y el mapa del modelo de la cuenca. Los elementos pueden ser arrastrados desde la barra de herramientas y conectados para que representen físicamente la red de drenaje de la cuenca del área de estudio, también se puede cargar mapas de fondo para ayudar a visualizar la forma de la cuenca.

2.6) MÉTODOS EMPÍRICOS PARA DETERMINAR CAUDALES MÁXIMOS

2.6.1) Método Racional y Mac Math

Según Villón (2004), este primer método supone que la máxima escorrentía ocasionada por una lluvia se produce cuando la duración de esta es igual al tiempo de concentración (T_c), cuando esto ocurre, toda la cuenca contribuye con el caudal en el punto de salida. Si se usan duraciones mayores o menores al T_c pasaría lo siguiente:

- a. Si la duración es mayor que el T_c , contribuye asimismo a toda la cuenca, pero en ese caso la intensidad de la lluvia es menor, por ser mayor su duración y, por tanto, también es menor el caudal.
- b. Si la duración de la lluvia es menor que el T_c , la intensidad de la lluvia es mayor, pero en el momento en el que se acaba la lluvia, el agua caída en los puntos más alejados aún

no ha llegado a la salida; solo contribuye una parte de la cuenca a la escorrentía; por lo que el caudal es menor.

Aceptando este planteamiento, el caudal máximo se calcula por medio de la siguiente expresión, el cual representa la fórmula racional.

$$Q = \frac{CIA}{360} \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde:

Q: Caudal máximo (m³/s)

C: Coeficiente de escorrentía que depende del uso de suelo y la pendiente (sin dimensiones) (*Cuadro 2.9*)

I: Intensidad máxima de la lluvia para una duración igual al tiempo de concentración, y para un periodo de retorno dado (mm/h)

A: Área de la cuenca (ha)

Cuadro 2.9. Coeficientes de escorrentía para ser utilizados en el método racional

Uso de suelo	Pendiente (%)	Periodo de retorno				
		1	2	5	10	25
Concreto/techo	-	0,73	0,75	0,80	0,83	0,88
Suelo desnudo	< 2	0,31	0,32	0,34	0,37	0,40
	2-7	0,36	0,37	0,40	0,43	0,46
	> 7	0,39	0,40	0,43	0,45	0,49
Cultivos	< 2	0,30	0,31	0,34	0,36	0,40
	2-7	0,34	0,35	0,38	0,41	0,44
	> 7	0,38	0,39	0,42	0,44	0,48
Pastos	< 2	0,24	0,25	0,28	0,30	0,34
	2-7	0,32	0,33	0,36	0,38	0,42
	> 7	0,36	0,37	0,40	0,42	0,46
Bosques	< 2	0,21	0,22	0,25	0,28	0,31
	2-7	0,30	0,31	0,34	0,36	0,40
	> 7	0,33	0,35	0,39	0,41	0,45

Fuente: (Espejo, 2010)

El segundo método se deriva del racional y se calcula con la *Ecuación 5*.

$$Q=0,009CIA^{4/5}S^{1/5} \qquad \text{Ecuación 5}$$

Donde:

S: Pendiente promedio del cauce principal (‰)

C: Coeficiente de escorrentía compuesto, el cual representa las características de la cuenca (*Cuadro 2.10*)

De los parámetros que intervienen en esta fórmula, se debe incidir sobre el factor *C*, el cual posee tres componentes: *C*₁, *C*₂ y *C*₃, donde el primero está en función de la cobertura vegetal, el segundo en función de la textura del suelo y el tercero en función de la pendiente.

Cuadro 2.10 *Coeficientes de escorrentía para el método Mac Math*

Vegetación		Suelo		Topografía	
Cobertura (%)	<i>C</i> ₁	Textura	<i>C</i> ₂	Pendiente (%)	<i>C</i> ₃
100	0,08	Arenoso	0,08	0,0 - 0,2	0,04
80-100	0,12	Ligera	0,12	0,2 - 0,5	0,06
50-80	0,16	Media	0,16	0,5 - 2,0	0,06
20-50	0,22	Fina	0,22	2,0 - 5,0	0,10
0-20	0,30	Rocosa	0,30	5,0 - 10,0	0,15

Fuente: (Villón, 2004)

Para conocer la clase textural del suelo según la textura general se tiene el siguiente *Cuadro 2.11*.

Cuadro 2.11 Clase textural en función de la textura general del suelo.

Textura general	Case textural
Suelos arenosos (textura gruesa)	Arenoso
Suelos francos (textura mediana)	Franco Arenoso
Suelos francos (textura moderadamente gruesa)	Franco arenoso
Suelos francos (textura mediana)	Franco
	Franco limoso
	Limoso
Suelos francos (textura moderadamente fina)	Franco arcilloso
	Franco arenoso arcilloso
	Franco limoso arcilloso
Suelos arcillosos (textura fina)	Arcilloso arenoso
	Arcilloso limoso
	Arcilloso

Fuente: (FAO, n.d.)

3) CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA

La metodología en estudio contempla muchos procesos, ya que primeramente se realizó una caracterización morfológica de la cuenca para seguidamente obtener un análisis de precipitación que permita un ajuste de datos correcto para finalmente determinar caudales mediante una modelación hidrológica y el uso de métodos empíricos, dicho procedimiento en forma de resumen se muestra la *Figura 3.1*.

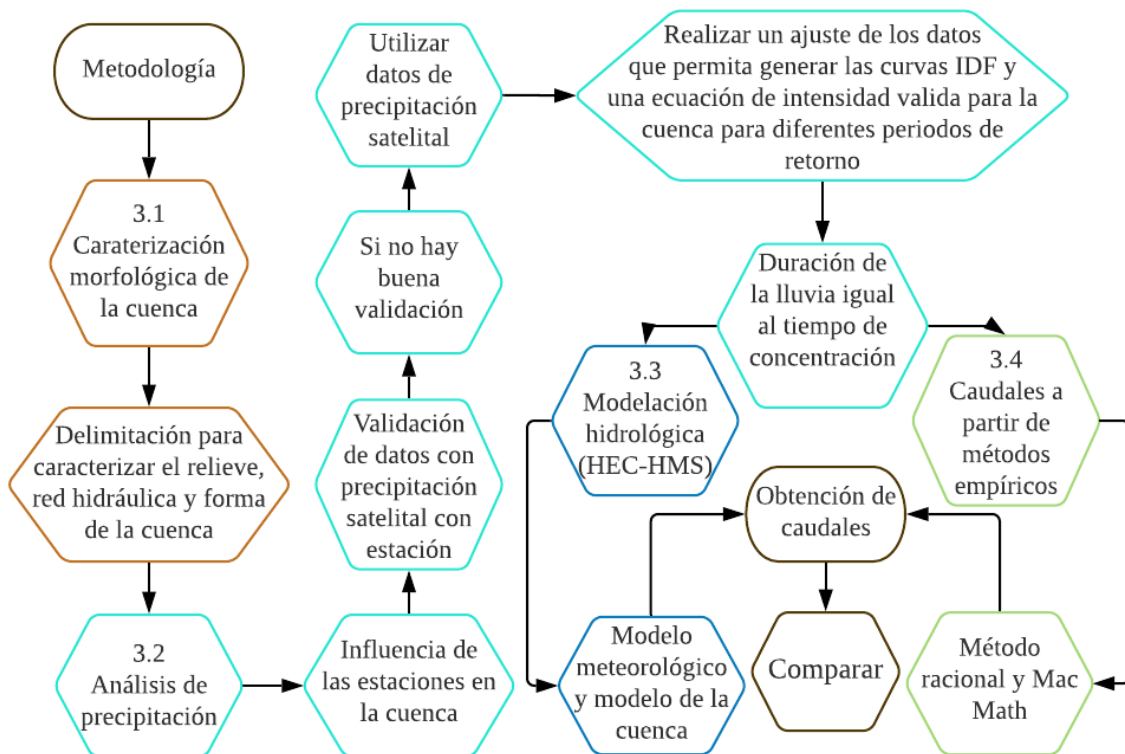


Figura 3.1 Metodología resumen utilizada en el proyecto.

En la figura anterior se observa que los datos de entrada corresponden a la delimitación de la cuenca y al análisis de precipitación, siendo ambos análisis los iniciales para lograr obtener caudales de la cuenca en estudio. Las metodologías para cada uno de los apartados mostrados, 3.1, 3.2, 3.3 y 3.4 así como sus respectivos diagramas se muestran a continuación.

3.1) CARACTERIZACIÓN MORFOLÓGICA DE LA SUBCUENCA CON EL USO DEL PROGRAMA QGIS

En la *Figura 3.2* se muestra la metodología resumen utilizada para lo que respectó a la caracterización morfológica la cuenca para la obtención de parámetros importantes necesarios para los cálculos posteriores.

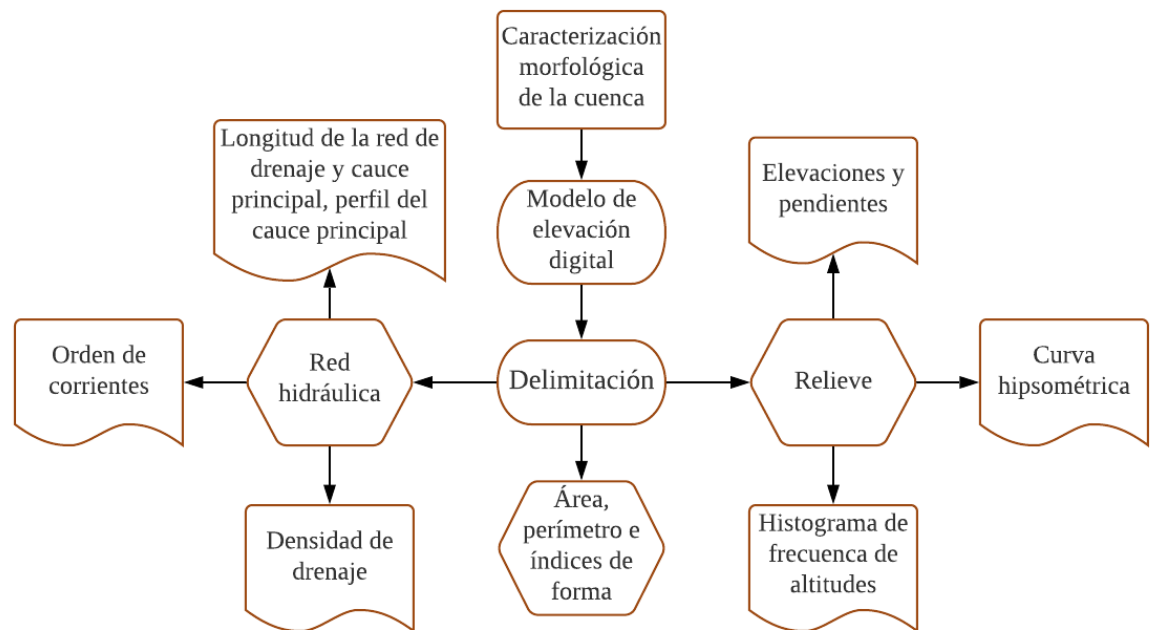


Figura 3.2 Metodología resumen de la caracterización morfológica.

Primeramente, para caracterizar la subcuenca del río Balsar, se realizó la descarga del modelo de elevación digital (MED) el cual pertenece a la Agencia Japonesa de Exploración Aeroespacial (JAXA) mediante la plataforma Alaska Satellite Facility, la cual es una extensión de la Earth Data Nasa. El satélite del que se realizó dicha descarga se conoce como Satélite de Observación de Tierra Avanzado Radar de Apertura Sintética de Banda tipo L (ALOS PALSAR) el cual posee un periodo de mapeo histórico comprendido entre 2006 y 2011 con una resolución nativa de 30 y 12,5 m. Para realizar la descarga se logró delimitar un cuadrante que contenía la subcuenca. El archivo descargado fue el del año 2011 con una resolución de 12,5 m.

A partir del programa Sistema de Información Geográfica Cuántico (QGIS) 2.18.23 se delimitó la subcuenca del río Balsar en donde se obtuvieron diferentes parámetros que caracterizaron la cuenca tales como forma, relieve y red hidráulica, esto con la finalidad de analizar las características que posee la subcuenca del río Balsar, características, indispensables para realizar la modelación hidrológica.

3.1.1) Preparación del MED

Es importante, antes de realizar la delimitación y obtener los parámetros mencionados, preparar el MED de la subcuenca, debido a que puede tener errores o deficiencias, por lo tanto, en el programa mencionado, se procedió a realizar la corrección del MED descargado. Se utilizó “toolbox” el cual se encontraba en el menú processing para buscar la herramienta r.fill.dir de GRASS (Geographic Resources Analysis Support System). Al abrir la ventana de r.fill.dir se especificó como capa de entrada “elevation” el MED descargado y se definió un tamaño de celda de 12,5 en “Grass region cellsize” para finalmente obtener el MED de la cuenca corregido.

3.1.2) Delimitación

Con en la herramienta r.water.shed desde “toolbox” se especificó como capa de entrada el MED anteriormente obtenido y se especificó un valor de 10000 en la cantidad de pixeles para la delimitación de la cuenca, este valor se colocó en la casilla de “mínimum size of exterior watershed basin” todos estos como datos de entrada, seguidamente en la casilla llamada “Grass region extent” especificó la extensión de la región a utilizar con base a la capa ráster del MED corregido, seguidamente en “Grass region cellsize” se colocó el valor de 12,5, ya que ese es el tamaño del pixel del MED, después se guardaron únicamente dos archivos de interés que ofrece esta herramienta: Drainage direction el cual se guardó con el nombre de “Flow_dir_10000” y Stream segments guardada como “drenajes_10000”.

Seguidamente se creó el punto de aforo en el río Balsar, aguas arriba del río con la finalidad de realizar la modelación hidrológica e hidráulica a partir de este punto. Con la herramienta r.water.outlet se determinó la capa de entrada el ráster “Flow_dir_10000”, seguidamente se

digitaron las coordenadas (x, y) del punto de aforo, se asignó los valores del tamaño del pixel (12,5 x 12,5) y finalmente se obtuvo la delimitación de la subcuenca en archivo raster.

Mediante la herramienta r.to.vect se procedió a vectorizar el ráster obtenido anteriormente para determinar algunos datos importantes de la cuenca que no se pueden calcular en formato ráster. A continuación, se muestran los parámetros morfológicos calculados con el uso de las capas: MED de la subcuenca en formato ráster y vectorial, flow_dir_10000 y drenajes_10000.

3.1.3) Forma de la cuenca

3.1.3.1) Área y perímetro de la cuenca

Con la capa vectorial de la subcuenca se calcularon los parámetros de área y perímetro mediante el uso de la Cuadro de atributos de la capa de la cuenca, específicamente en la herramienta de calculadora de campos.

3.1.3.2) Índice de compacidad de Gravelius y el factor de forma de Horton

El índice de forma de la cuenca se obtuvo analizando estos dos parámetros, los cuales se pueden observar en las *Ecuaciones 6* y *7*.

$$IG=0,28 \left(\frac{P}{\sqrt{A}} \right) \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde:

IG: Índice de compacidad de Gravelius

P: Perímetro de la cuenca (km)

A: Área de la cuenca (km²)

$$F_f = \frac{A}{L_c} \quad \text{Ecuación 7}$$

Donde:

F_f: Factor de forma de Horton

L_c : Longitud de la cuenca (km)

3.1.4) Red hidráulica

3.1.4.1) Red de drenaje

A partir del MED obtenido y utilizando la herramienta “red de canales y cuencas de drenaje” (channel network and drainage basins) se obtuvo la red de drenaje.

3.1.4.2) Longitud de la red de drenaje

En la tabla de atributos de la capa de líneas de la red de drenaje se asignó un nuevo campo llamado “longitud_red_drenaje” y con el uso de la herramienta de calculadora de campos se calculó la longitud.

3.1.4.3) Longitud y perfil del cauce principal

El primero se calculó con la herramienta measure (medir) sobre el cauce que presentara mayor longitud y el segundo se obtuvo con el plugging (profile tool) utilizando el MED de la cuenca y la capa vectorial del cauce principal.

3.1.4.4) Orden de corrientes

Mediante la herramienta “orden de Strahler” (Strahler order), se seleccionó el MED de la cuenca, seguidamente se le aplicó una clasificación al ráster obtenido desde las propiedades de la capa con la finalidad de observar la clasificación del número de corrientes.

3.1.4.5) Densidad de drenaje

Implementando la herramienta “red de canales y cuencas de drenaje” (channel network and drainage basins) al MED de la cuenca se obtuvo la red de drenaje y seguidamente se obtuvo la densidad de drenaje (D_d) mediante la *Ecuación 8*, para seguidamente clasificarla según el *Cuadro 2.3*.

$$D_d = \frac{\sum Lc}{A}$$

Ecuación 8

Donde:

Lc : Longitud de los cauces (km)

3.1.5) Relieve

3.1.5.1) Elevación mayor y menor del cauce principal

Primeramente, se creó una capa vectorial con dos puntos, el primero se ubicó en el punto de aforo el cual correspondía al punto de menor elevación y el segundo al final del cauce que representa el de mayor elevación, seguidamente con la “herramienta de muestro puntual” (point sampling tool) en la primera casilla se seleccionó la capa de puntos y en la segunda el MED de la cuenca, de esta manera se creó en la Cuadro de atributos las elevaciones de cada uno de los puntos.

3.1.5.2) Elevaciones mínima, media, máxima y la pendiente promedio

Para obtener la elevación mínima, media y máxima de la cuenca, las mismas se calcularon mediante la herramienta “zonal statistics” y para calcular las pendientes, se utilizaron las herramientas SAGA “área ascendente ” (upslope area) y GDAL “pendiente” (upslope) en donde los valores calculados se guardaron en la capa vectorial de la cuenca, en la tabla de atributos. El cálculo se realizó con dos herramientas para posteriormente calcular un promedio entre ambas y tener datos más precisos de la pendiente.

3.1.5.3) Curva hipsométrica

Primeramente, en un archivo de Excel “csv”, se le asignó un número de clase al desnivel de la cuenca para poder conocer el rango de elevaciones en el que va a fluctuar, en donde se inició con la cota más baja y para generar un intervalo se le sumó el rango según el número de clases y así sucesivamente hasta llegar a la cota máxima de la cuenca, seguidamente a partir de cada intervalo, se calculó la cota media, es decir, el promedio entre ambos valores.

Para calcular qué tanta área posee el MED sobre cada intervalo calculado anteriormente, se creó inicialmente en un archivo “Notepad” la lista de los intervalos para ser utilizados posteriormente en Qgis con la finalidad de realizar una reclasificación y así obtener un ráster con el número de clases escogido, se procedió a enlistar cada uno de los intervalos de la siguiente manera: por ejemplo, suponiendo que se escogieron 15 clases y la cota más baja es 41, la más alta 1000, y el intervalo al que va a fluctuar es de 65, se escribe: 41 thru 106 = 1 y así sucesivamente hasta llegar a 1000, es decir al número 15; es importante que los valores estén redondeados y que a partir del = 2 se le asigne un .1 a los primeros valores antes del thru, ya que solo de esta manera el Qgis lo va a saber interpretar.

Seguidamente, a través de “toolbox” > SAGA > re.reclass en la primera casilla se seleccionó el MED y en la segunda el archivo de Notepad creado, seguidamente se guardó el archivo como “reclass_dem” y se dejaron las demás casillas por defecto, obteniendo el mismo ráster, pero ya reclasificado. Después se vectorizó el ráster para poder obtener las áreas parciales entre cada uno de los intervalos con el uso de “r.to.vec” en donde en la primera casilla se colocó “reclass_dem”, en la segunda se seleccionó “área” y en la tercera se marcó la opción de “suavizar las esquinas” y se guardó como “cuenca_rangos_elevacion”. Siguiendo el procedimiento de SAGA > Polygon dissolve (by attribute) se seleccionó en la primera casilla la capa “cuenca_rangos_elevacion”, en la segunda casilla “value” y lo demás quedó por defecto, todo esto para eliminar en la Cuadro de atributos de la capa, la columna de “valor” (value) para que permitiera el posterior cálculo de las áreas parciales y finalmente se guardó con el nombre de “rangos_elevacion_dissolve”.

Sobre la capa creada anteriormente, con la herramienta de calculadora de campos en la Cuadro de atributos se calcularon las áreas, en donde primeramente se agregó un campo llamado “Area_km2”, seguidamente en la calculadora se seleccionó el campo agregado y se calcularon las áreas parciales para cada uno de los rangos establecidos.

En Excel se colocó toda la información obtenida y se procedió a calcular el área acumulada, es decir, la suma de las áreas parciales de manera acumulativa. Después se calculó el porcentaje

de área total para cada intervalo y se ploteó dicho valor en el eje “x” y las cotas desde la mínima hasta máxima en el eje “y” obteniendo finalmente la curva hipsométrica.

3.1.5.4) Histograma de frecuencia de altitudes

Se obtuvo el porcentaje de altitudes (%A) mediante la *Ecuación 9* en donde se observó el porcentaje de área que cada cota media tiene sobre la cuenca, así como la cota que más se frecuenta.

$$\%A = A_{par} * \frac{100}{A_{tot}} \quad \text{Ecuación 9}$$

Donde:

A_{par} : Área parcial de cada intervalo (km²)

A_{tot} : Área total, la cual corresponde a la total acumulada (km²)

Seguidamente se plotearon los valores de porcentaje de altitudes en el eje “y” y los de las alturas media en el eje “x” y se obtuvo el histograma de frecuencia de altitudes.

3.2) ANÁLISIS DE PRECIPITACIÓN

En la *Figura 3.3* se observa el procedimiento que se utilizó para lograr un buen análisis de precipitación, de acuerdo con las condiciones encontradas en la cuenca.

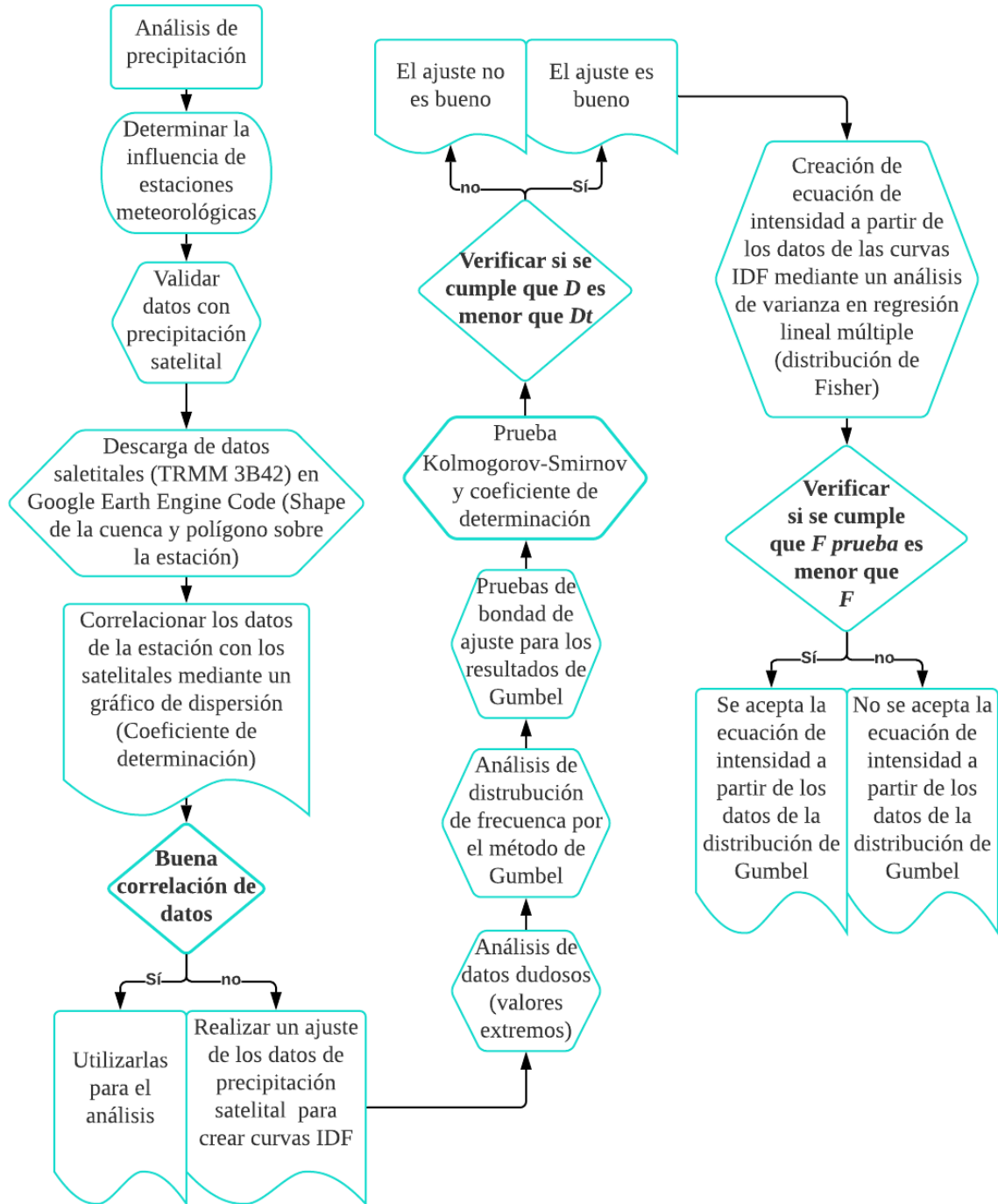


Figura 3.3 Metodología resumen para el análisis de precipitación

3.2.1) Polígonos de Thiessen

Para determinar las estaciones que influían en la subcuenca se aplicó el método de polígono de Thiessen mediante el software Quantum Qgis (2.18.23) y se siguió el procedimiento que se muestra a continuación:

- a. Se cargó la capa de estaciones meteorológica del Atlas Costa Rica 2014 y la de la subcuenca del río Balsar.
- b. Se seleccionaron las estaciones cercanas a la subcuenca y se guardaron como una nueva capa.
- c. Seguidamente sobre la barra de menú en vectorial > herramientas de geometría vectorial > polígonos de voronoi, se seleccionó en la capa de entrada la última capa creada y dando click en *run* se obtuvieron los polígonos.

Una vez obtenidas las estaciones meteorológicas que influyen en la cuenca, se solicitó dicha información en donde se obtuvo lo siguiente:

Cuadro 3.1 Información de las estaciones meteorológicas con influencia en la cuenca

Estación		Coordenadas Geográficas		Altitud (m.s.n.m)	Respuesta de solicitud (Si/No)	Información brindada	Periodo	
No.	Nombre	Latitud Norte	Latitud Oeste				Inicio	Fin
98038	Alto de la escuadra	09°03'00"	83°30'00"	825	No			
98099	Palmar Sur	08°56'4"	83°28'04"	15	Si	Horaria	6/19/2008	10/22/2018

En el registro de datos de precipitación para estación de Palmar Sur se encontraron datos faltantes en rangos de horas, días y meses, dichos registros se pueden observar de forma resumida en el *Cuadro 5.1* en la sección de anexos, en donde los números corresponden a la cantidad de días faltantes de datos por año y mes y la x significa que para todo el mes no hay

ningún dato, mostrándose únicamente los años donde no hay datos, sino aparece el año es porque estaba completo.

3.2.2) Validación de datos de precipitación entre la estación meteorológica y datos satelitales

Ante el limitado acceso de la obtención de datos de precipitación de la estación que más influye en la cuenca (Alto de la escuadra, 98038), así como el hecho de tener únicamente la influencia de una sola estación que influye muy poco en la subcuenca, se realizó una descarga de datos de precipitación por medio de la herramienta Google Earth Engine Code a través del Satélite TRMM (3B42), con la finalidad de poder observar si el comportamiento de la estimación de precipitación satelital daba una buena correlación con respecto a los datos de la precipitación de la estación de Palmar sur.

3.2.2.1) Descarga de datos

La interfaz del código permite agregar capas vectoriales con la finalidad de poder realizar la descarga en un área específica, para este caso se utilizaron dos; la de la subcuenca y un polígono representativo sobre el punto de la estación en donde se realizaron dos correlaciones totales (los datos de la estación con cada una de las capas mencionadas) y se utilizó un registro de 22 años, correspondiente del 01 de enero del 1998 al 31 de diciembre del 2019 para realizar la descarga de datos ya que este es el máximo registro que tiene la plataforma.

En la *Figura 3.4* se muestra el código que se utilizó para realizar la descarga satelital de los datos de precipitación en Google Earth Engine Code.

```

Import (2 entries)
var roi = table2;
var NunData = 8000000;
var precipitation =
ee.ImageCollection('TRMM/3B42').select('precipitation','HQprecipitation',
'IRprecipitation');

var datetotalFilter = ee.Filter.date('1998-01-01','2019-31-12');
var allSeasonsFilter = ee.Filter.or(datetotalFilter);
var dataset = precipitation.filter(allSeasonsFilter);

Map.addLayer(roi);
var BasinMean = roi.map(function(f) {
  return dataset.map(function(i) {
    var mean = i.reduceRegion({
      geometry: f.geometry(),
      reducer: ee.Reducer.mean(),
    });
    return f.setMulti(mean).set({date: i.date()});
  });
});
Map.centerObject(roi,8);
BasinMean = BasinMean.flatten();
print(BasinMean.limit(NunData));

Export.table.toDrive({
  collection:BasinMean.limit(NunData),
  folder: "Google EE results",
  selectors:[["date","precipitation", "HQprecipitation", "IRprecipitation"]],
});

```

Figura 3.4 Código para la descarga de datos de precipitación a partir del satélite TRMM (3B42)

De acuerdo con la *Figura 3.4*, se realizó lo siguiente: primeramente se importaron las 2 capas vectoriales anteriormente mencionadas, seguidamente se generó una colección de imágenes del producto 3B42 para una ventana de tiempo desde 1998-01-01 hasta el 2019-12-31, filtrada por el área definida anteriormente, seguidamente a la colección de datos satelitales se le mapeó una función de reducción a partir de un promedio generalizado en cada región del pixel y después se cargó a partir de un número que limita la cantidad de datos; y finalmente se exportaron los datos directamente al drive del usuario en un archivo “csv”.

3.2.2.2) Correlaciones entre los datos

La estación de Palmar Sur fue validada con respecto al periodo registrado dado en el *Cuadro 3.1* y los datos de precipitación satelital se convirtieron según la información brindada, es decir, horaria, mediante el uso de tablas dinámicas en Excel.

Las correlaciones se realizaron por medio de un gráfico de dispersión en Excel el cual mostró una línea de tendencia y el valor del coeficiente de correlación R^2 , si este valor daba mayor o igual que 0,8 ó -0,8, si existe correlación, y si, por el contrario; daban valores menores, se optaba por usar los datos de precipitación obtenidos satelitalmente, con un registro de años de 22 (mencionado anteriormente) el cual corresponde al máximo registro que ofrece el satélite TRMM (3B42).

3.2.3) Curvas IDF a partir de los datos de precipitación estimada satelitalmente

A partir de los datos de precipitación descargados satelitalmente, se crearon las curvas IDF y como el satélite ofrece datos de intensidad (mm/h) cada 3 horas, se procedió a determinar las intensidades máximas (mm/h) con duraciones cada 3 horas (3,6,9,12,15,18 y 24 horas). Una vez obtenidas las intensidades para cada una de las duraciones con su respectivo año, se procedió a realizar un análisis y ajuste de datos el cual se muestra a continuación.

3.2.3.1) Análisis de datos dudosos

Para determinar el valor extremo superior e inferior de la muestra de datos, es decir, las intensidades (mm/h), se utilizaron las *Ecuaciones 10 y 11*, donde se verificó que todos los datos se encontraran dentro del rango de datos a partir del valor máximo y mínimo, ya que, si alguno de los datos se sale, este se convierte en un dato dudoso que debe ser analizado.

$$X_H = \bar{X} + K_N S \quad \text{Ecuación 10}$$

$$X_L = \bar{X} - K_N S \quad \text{Ecuación 11}$$

$$K_N = -0,9043 + 3,345 \sqrt{\log(N)} - 0,4046 \log(N) \quad \text{Ecuación 12}$$

Donde:

X_H : Umbral del valor extremo superior de la muestra

X_L : Umbral del valor extremo inferior de la muestra

\bar{X} : Promedio del logaritmo de los datos en estudio (intensidades)

S : Desviación estándar del logaritmo de los datos en estudio

K_N : Parámetro para el cálculo de datos dudosos el cual está en función del tamaño de la muestra (N)

3.2.3.2) Análisis de distribución de frecuencia

3.2.3.2.1) Distribución por el método de Gumbel

Para trabajar con los datos de intensidad y crear las curvas IDF se realizó un ajuste de estos mediante el método de Gumbel. Para determinar los valores extremos o máximos (X) por duración de las intensidades en función del periodo de retorno, se utilizó la ecuación de análisis de frecuencia (*Ecuación 13*).

$$X = \bar{X} + KS \quad \text{Ecuación 13}$$

Donde:

\bar{X} : Media de la muestra de valores de intensidad de precipitación (mm/h)

K : Factor de frecuencia, el cual depende del periodo de retorno

S : Desviación estándar de la muestra

El valor de K y Y_t se obtuvieron con las *Ecuaciones 14* y *15*.

$$K = \frac{Y_t - Y_n}{S_n} \quad \text{Ecuación 14}$$

$$Y_t = -\ln \ln \left(\frac{T}{T-1} \right) \quad \text{Ecuación 15}$$

Donde:

Y_t : Variable reducida, la cual es función del periodo de retorno

Y_n : Media de la variable reducida (*cuadro 5.2* en la sección de anexos)

S_n : Desviación de la variable reducida (*cuadro 5.2* en la sección de anexos)

T : Periodo de retorno

Aplicando la ecuación de análisis de frecuencia se obtuvieron los valores para la intensidad máxima por duración para cada uno de los periodos de retorno de interés, los cuales fueron de 2,5,10,15 y 20 años, finalmente se graficaron las curvas IDF ploteando las duraciones (eje x) contra las intensidades (eje y) para cada uno de los periodos de retorno mencionados.

3.2.3.3) Método analítico

A partir de los datos de la distribución de Gumbel, se obtuvo una ecuación que relacionó simultáneamente las tres variables de intensidad, duración y frecuencia.

$$I = \frac{k T^m}{D^n} \quad \text{Ecuación 16}$$

Donde:

K, m, n : Son constantes que se calculan mediante un análisis de correlación lineal múltiple

I : Intensidad máxima (mm/h)

T : Periodo de retorno

D : Duración (min)

Se tomaron los logaritmos de la ecuación anterior en donde se obtuvo:

$$\log(I) = \log(K) + m\log(T) - n\log(D) \quad \text{Ecuación 17}$$

O lo mismo

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 \quad \text{Ecuación 18}$$

Relacionando las *Ecuaciones 17 y 18* se obtuvieron las siguientes igualdades.

$$y = \log(I), \quad a_0 = \log(K), \quad a_1 = m, \quad x_1 = \log(T), \quad a_2 = -n, \quad x_2 = \log(D)$$

Al realizar un ajuste de correlación lineal múltiple de una serie de tres datos, y teniendo N cantidad de datos (años de registro más uno), para este caso 23, se obtuvo el siguiente sistema de ecuaciones.

$$\begin{aligned} \sum y &= Na_0 + a_1 \sum x_1 + a_2 \sum x_2 \\ \sum (x_1 y) &= a_0 \sum x_1 + a_1 \sum (x_1)^2 + a_2 \sum (x_1 x_2) \\ \sum (x_2 y) &= a_0 \sum x_2 + a_1 \sum (x_1 x_2) + a_2 \sum (x_2)^2 \end{aligned}$$

Donde:

a_0, a_1, a_2 : Incógnitas

x_1 : Logaritmos del periodo de retorno

x_2 : Logaritmos de las duraciones

y : Logaritmos de las intensidades

Es importante recalcar que la cantidad de datos de intensidades con la que se trabajó debe ser la misma cantidad de datos para las duraciones y los periodos de retorno, ya que los logaritmos deben ser aplicados para cada una de las intensidades, con su respectiva duración y periodo de retorno. Por ejemplo, si se tienen 2 duraciones y 2 periodos de retorno, son 4 la cantidad de datos de intensidad, se forma un cuadro como el *Cuadro 3.2* y a partir de ahí se calcularon los parámetros dados en el sistema de ecuaciones.

Cuadro 3.2 Ejemplo para determinar las variables iniciales de la ecuación de intensidad

Numero de datos	Periodo de retorno (T)	Intensidades (mm/h)	Duración (min)	Log(T)	Log(I)	Log (D)
1	10	149.40	5	1	2,17	0,70
2	25	169.22	5	1,38	2,23	0,70
3	10	120.28	10	1	2,08	1
4	25	132.86	10	1,38	2,13	1

Seguidamente se resolvió el sistema de ecuaciones y se obtuvieron los valores de a_0, a_1, a_2 y a partir de ellos mediante las igualdades anteriormente mostradas, se calcularon las constantes k, m y n para finalmente formar la ecuación de intensidad (*Ecuación 16*).

3.2.3.4) Pruebas de bondad de ajuste para los resultados de Gumbel

3.2.3.4.1) Prueba Kolmogorov-Smirnov

Para verificar si el ajuste de la distribución de datos de Gumbel fue el adecuado, primeramente, utilizando el *Cuadro 5.3* de la sección de anexos se asumió un nivel de confiabilidad o valor de significancia (α) de 0,05 y con base al número de datos de intensidad, es decir, del tamaño de la muestra, se interceptaron esos dos valores y se obtuvo un valor de la tabla (Dt) el cual sirvió de comparación para aceptar o no el ajuste realizado.

Primeramente, se ordenaron los datos de intensidad de menor a mayor y se determinó la frecuencia observada acumulada mediante la *Ecuación 19*.

$$F_n = \frac{n}{N-1} \quad \text{Ecuación 19}$$

Donde:

F_n : Frecuencia observada acumulada

n : Número de orden

N : Número de datos

Después para hallar la frecuencia teórica acumulada se usó la *Ecuación 20*.

$$F(x) = e^{-e^{-d(x-u)}} \quad \text{Ecuación 20}$$

Donde:

$F(x)$: Frecuencia teórica acumulada

x : Valor de la intensidad (mm/h)

d y u : Parámetros que dependen de la desviación estándar (S) y la media aritmética (\bar{X}) de la muestra.

Se determinaron los parámetros d y u mediante las *Ecuaciones 21* y *22*.

$$u = \bar{X} - 0.450045S \quad \text{Ecuación 21}$$

$$\frac{1}{d} = 0,779696S \quad \text{Ecuación 22}$$

Determinadas cada una de las frecuencias se obtuvo el máximo de las diferencias entre cada uno de los datos y aplicando la *Ecuación 23* de igual forma para cada dato de intensidad, se buscó cuál de las diferencias era la máxima.

$$D = \text{Sup } |F_n(X)_i - F(X)_i| \quad \text{Ecuación 23}$$

Finalmente se verificó si el ajuste fue el adecuado con el nivel de confiabilidad asumido.

3.2.3.4.2) Coeficiente de determinación

Se determinó este coeficiente con la *Ecuación 24*.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (F_n(X)_i - F(X)_i)^2}{\sum (F_n(X)_i - \bar{F(X)})^2} \quad \text{Ecuación 24}$$

Donde:

R^2 : Coeficiente de determinación ($0 \leq R^2 \leq 1$)

$\overline{F(X)}_j$: Promedio de las frecuencias teóricas acumuladas.

3.2.3.5) Análisis de varianza en regresión lineal múltiple

3.2.3.5.1) Distribución de Fisher o F

Se calcularon los grados de libertad del nominador (GLn) y los del denominador (GLd) mediante las *Ecuaciones 25* y *26*.

$$GLn=k-1 \quad \text{Ecuación 25}$$

$$GLd=k(n-1) \quad \text{Ecuación 26}$$

Donde:

k : Cantidad de datos de las duraciones

n : Cantidad de datos de los periodos de retorno

A partir de los grados de libertad obtenidos y asumiendo un valor de significancia (α) de 0,05, se obtuvo un valor teórico F (*Cuadro 5.4* de la sección de anexos), en donde los grados de libertad del nominador se ubicaron en las columnas de la tabla y los grados de libertad del denominador en las filas.

Se calculó el valor de F_{prueba} a partir de los datos de las intensidades (x_i) de la siguiente manera:

Primeramente, se calcularon las medias (\bar{x}) y las varianzas (s^2) para cada una de las intensidades por duración con las *Ecuaciones 27* y *28*.

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n} \quad \text{Ecuación 27}$$

$$s^2 = \frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n-1} \quad \text{Ecuación 28}$$

Seguidamente se determinó la estimación interna de varianza (s_w^2)

$$s_w^2 = \frac{s_1^2 + s_2^2 + s_3^2 + \dots + s_k^2}{k} \quad \text{Ecuación 29}$$

Se calculó la estimación intermedia de varianzas (s_x^2), en donde primeramente se calculó la varianzas de las medias aritméticas ($s_{\bar{x}}^2$) a partir de la media aritmética de las medias aritméticas ($\bar{\bar{x}}$)

$$\bar{\bar{x}} = \frac{\sum x_i}{k} \quad \text{Ecuación 30}$$

$$s_{\bar{x}}^2 = \frac{\sum (\bar{x} - \bar{\bar{x}})^2}{k-1} \quad \text{Ecuación 31}$$

$$s_x^2 = n * s_{\bar{x}}^2 \quad \text{Ecuación 32}$$

Se obtuvo el valor de F_{prueba} a partir de los cálculos anteriores, utilizando la *Ecuación 33*

$$F_{prueba} = \frac{s_w^2}{s_x^2} \quad \text{Ecuación 33}$$

Finalmente se determinó si la hipótesis nula aceptó o rechazó la ecuación de regresión comparando los valores de F y F_{prueba} .

3.3) MODELACIÓN HIDROLÓGICA

En la *Figura 3.5* se observa la metodología resumen que se utilizó para realizar la modelación hidrológica, una vez obtenida la delimitación de la cuenca y el análisis de precipitación.

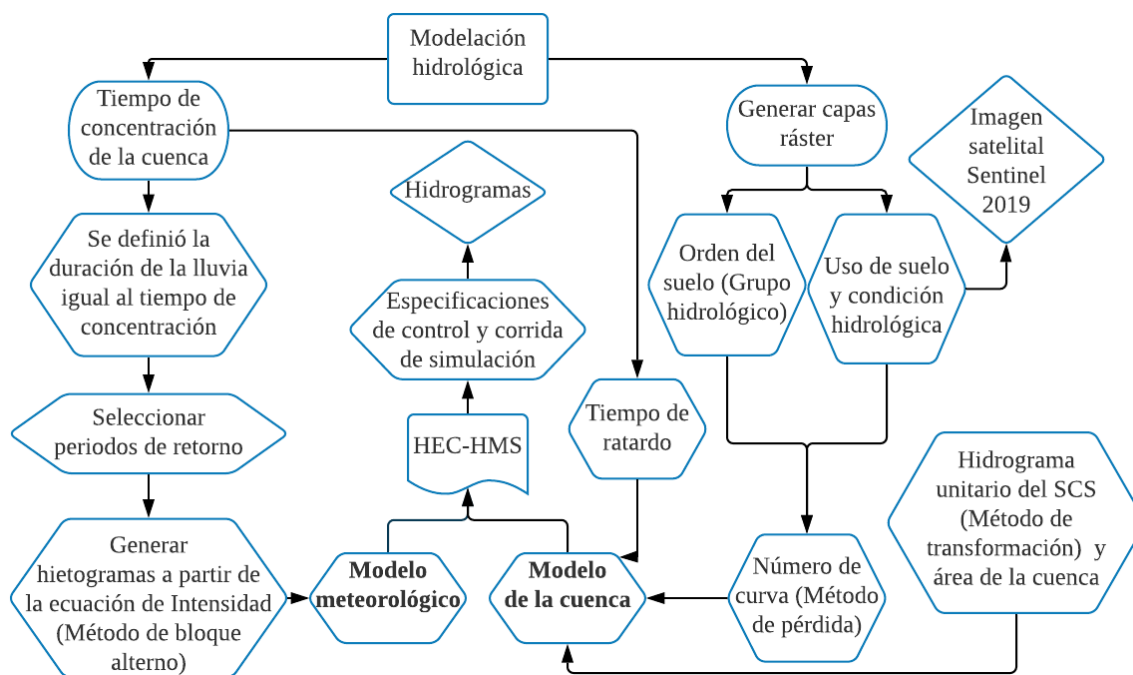


Figura 3.5 Metodología resumen de la modelación hidrológica.

Con la delimitación de la cuenca, así como el ajuste de datos realizado anteriormente, se procedió primeramente a calcular los siguientes parámetros como base para la modelación hidrológica.

3.3.1) Tiempo de concentración, retardo y periodos de retorno a utilizar

El tiempo de concentración de la cuenca se calculó mediante el método de Kirpich con la *Ecuación 1* y el de retardo con la *Ecuación 3*. Seguidamente se utilizó la *Ecuación 16* obtenida mediante el método analítico para determinar la intensidad máxima para periodos de retorno de 1,2,10 y 25 años en donde la duración se asumió igual al tiempo de concentración.

Se creó un proyecto en file > new en la barra de menú, y en la pestaña *create a new Project* se le dio nombre al proyecto. Seguidamente se introdujo los datos de series de tiempo utilizando los editores de componentes con los pasos: *menú > components > time series data manager*.

3.3.2) Hietogramas a partir del método del bloque alterno

El procedimiento para construir el hietograma partir de este método fue el siguiente:

- a. Se determinó la duración de la tormenta como el tiempo de concentración de la cuenca y se dividió ese tiempo en intervalos de tiempo $\Delta t = 10$ min para periodos de retorno de 1,2,10 y 25 años de periodo de retorno.
- b. A partir de la ecuación 16 resultante de las curvas IDF se obtuvieron los valores de intensidad de precipitación para cada intervalo $\Delta t, 2\Delta t, 3\Delta t, 4\Delta t, \dots$ hasta llegar a la duración total de la precipitación, es decir, al tiempo de concentración de la cuenca
- c. A partir de la ecuación 16 resultante de las curvas IDF se obtuvieron los valores de intensidad de precipitación para cada intervalo $\Delta t, 2\Delta t, 3\Delta t, 4\Delta t, \dots$ hasta llegar a la duración total de la precipitación, es decir, al tiempo de concentración de la cuenca.
- d. Se calculó la profundidad de precipitación caída en cada intervalo, esto se obtuvo multiplicando la intensidad por la duración del intervalo en horas.
- e. Se procedió a restar los valores sucesivos de profundidad de precipitación (mm) calculado antes.
- f. Finalmente, se reordenaron los resultados de tal manera que el valor máximo de precipitación esté en medio de la serie, y se alternaron en orden descendente alternativamente a lado y lado de ese máximo.

3.3.3) Método del número de curva a partir del uso de SIG

Para determinar el número de curva primeramente se crearon 2 tipos de ráster, en donde se obtuvo un mapa de número de curva a partir de tipo de suelo y uso de suelo. La metodología que se empleó para crear cada uno de los mapas se muestra a continuación:

3.3.3.1) Tipo de suelo

Para obtener la capa vectorial del suelo, primeramente, se descargó el mapa digital de suelos de Costa Rica de la página del Centro de Investigaciones Agronómicas (CIA) de la Universidad de Costa Rica, el cual muestra los órdenes y subórdenes de los suelos para el año 2015 y a partir de esta información, así como la clasificación de la densidad de drenaje (*Cuadro 2.3*) se relacionó el grupo de suelo al que pertenecen (A,B,C,D). Seguidamente, con los datos de la tabla de atributos de la capa obtenida y con la información del *Cuadro 2.4* se obtuvo el número primo

según el tipo de suelo, asignando el número 5 para el grupo B y el 7 para el grupo C. Finalmente la capa mencionada se convirtió a ráster.

3.3.3.2) Uso de suelo

Este se determinó mediante el uso de Qgis. La clasificación se realizó de forma supervisada con una imagen satelital Sentinel del año 2019 a través de la herramienta SCP y con la unión de diferentes bandas se estableció un área de entrenamiento para lograr una clasificación según los mostrados en el *Cuadro 2.5*, seguidamente se reclasificó el ráster obtenido con la asignación de los siguientes números primos (cabe mencionar que, al realizar la clasificación del uso de suelo, se tomaron los caminos de tierra como suelo desnudo).

Cuadro 3.3 Asignación de números primos a la capa de uso de suelo

Número primo	Uso o cobertura del suelo
29	Casas
11	Cuerpos de agua
17	Cultivos
13	Bosque
19	Pastos
23	Suelo desnudo

A partir de los números primos asignados anteriormente se utilizó la calculadora ráster en donde se obtuvo una única capa ráster relacionada con orden del suelo y uso de suelo, seguidamente a este mapa se le asignó el número de curva con condición de humedad antecedente II según la relación de los dos parámetros mencionados, a partir del *Cuadro 2.6*. Para para conocer el porcentaje de cobertura vegetal, este se determinó en función del área, en donde se determinó la condición hidrológica que presentaba cada uno de los usos de suelo. Finalmente, se le asignó un número de curva promedio a la capa resultante del número de curva a través de “zonal statistics” (estadísticas de zona).

3.3.4) HEC-HMS

Se utilizó la versión 4.5 siguiendo el procedimiento que se muestra a continuación:

3.3.4.1) Modelo de la cuenca

Este modelo se agregó desde la barra de menú: *components > Basin model manager*. Una vez agregado, los elementos hidrológicos se agregaron y se conectaron para representar la hidrología de la cuenca. Se incorporaron los datos de la cuenca y de los elementos hidrológicos desde el editor de componente donde se agregaron datos en los apartados de: subbasin, loss, transform, baseflow y options.

Los métodos que se emplearon en el apartado de subbasin para lograr la simulación en el programa fueron los siguientes:

- a. Método de transformación (transform method): Hidrograma unitario del Servicio de Conservación de Suelos
- b. Método de pérdida (loss method): Número de curva (NC).

3.3.4.2) Modelo meteorológico

Se creó desde *components > meteorologic model manager* el modelo meteorológico. Seguidamente en la ventana *Creat a new Meteorologic Model* se le dio un nombre al modelo y en la ventana de editor de componentes se colocaron las propiedades de este, en el mismo panel se dio click en la pestaña *Basin* y se seleccionó *yes* en donde se incluyó el método meteorológico en donde se utilizó el de hietograma especificado, para este caso el obtenido por el método de bloque alterno para cada uno de los periodos de retorno mencionados.

3.3.4.3) Especificaciones de control

Se agregaron al proyecto seleccionando *components > control specifications manager* desde la barra de menú, seguidamente en la opción *new* se introdujo un nombre y descripción. Después se le asignó una fecha y hora de inicio y una fecha y hora de finalización, así como un intervalo de tiempo.

3.3.4.4) Corrida de simulación

Se ejecutó la orden `compute > create simulation run` desde la barra de menú, seguidamente se definió un nombre a la corrida que se creó, y finalmente después de dar click en *next*, se seleccionaron los modelos anteriormente creados: el de la cuenca y el meteorológico, así como las especificaciones de control.

Finalmente se corrió la modelación a partir de toda la información ingresada anteriormente en el modelo de la cuenca, modelo meteorológico y especificaciones de control en donde se obtuvo como resultado los hidrogramas de caudal de salida mediante el método del bloque alterno para cada uno de los periodos de retorno.

3.4) CAUDALES MÁXIMOS A PARTIR DE MÉTODOS EMPÍRICAS

En la *Figura 3.5* se observa la metodología empleada para la obtención de caudales por los métodos racional y Mac Math.

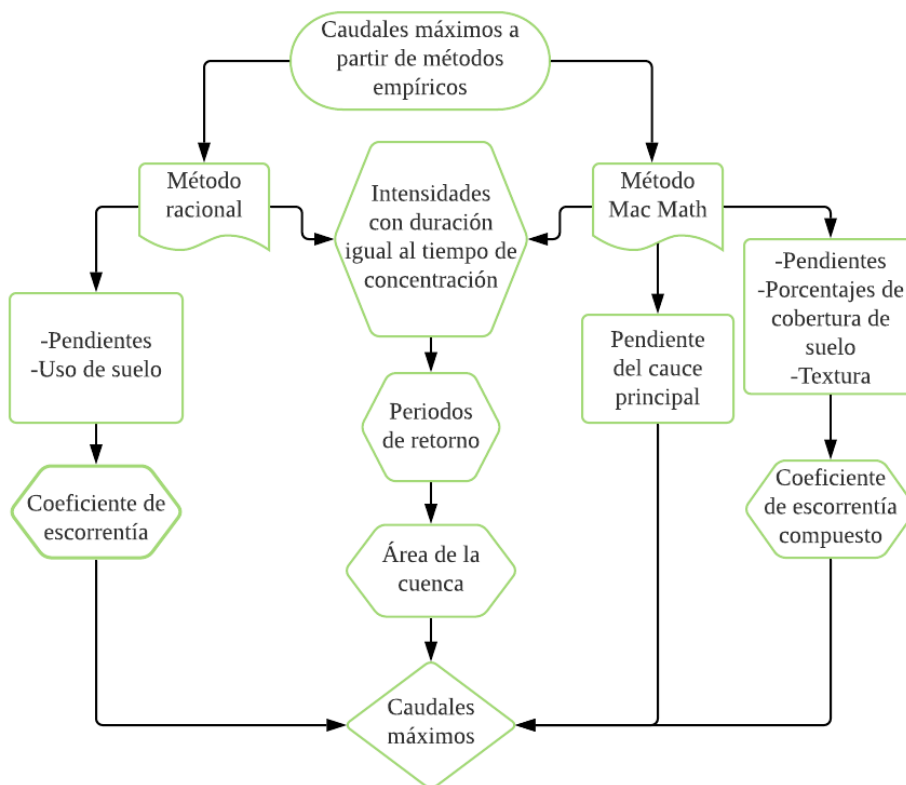


Figura 3.5 Metodología resumen para la obtención de caudales máximos.

Para determinar y poder comparar los caudales obtenidos con las calculadas a partir de la modelación hidrológica en HEC-HMS se aplicaron las *Ecuaciones 4 y 5* para los periodos de retorno de 1,2, 10 y 25 años.

Para el método racional, se obtuvo el coeficiente de escorrentía por medio de una reclasificación de pendientes, primeramente, se le asignó un número primo a cada uno de los valores según mostrados en el *Cuadro 2.9*, es decir, siguiendo el mismo procedimiento que para el número de curva, en cuanto a la reclasificación de las capas. Los números primos seleccionados para las pendientes fueron de 2 y 3 y la capa del uso de suelo ya se tenía. Con estos números primos, se multiplicaron ambas capas en la calculadora ráster y se obtuvo una capa con valores primos diferentes y según estas multiplicaciones, se les asignó el coeficiente de escorrentía en la calculadora ráster según el *Cuadro 2.9* en donde se obtuvo el mapa de coeficientes de escorrentía. Después, a la capa resultante, se le asignó un coeficiente de escorrentía promedio a través de “zonal statistics” estadísticas de zona.

Para obtener el coeficiente de escorrentía compuesto por el método Mac Math se utilizaron los *Cuadros 2.10 y 2.11* siguiendo la misma metodología del coeficiente de escorrentía por el método racional.

Seguidamente se compararon los caudales picos obtenidos en cada uno de los hietogramas a partir del método de bloque alterno y número de curva con los obtenidos a partir del método racional y el de Mac.

4) CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1) DATOS MORFOLÓGICOS DE LA CUENCA

La zona en estudio fue caracterizada morfológicamente para conocer algunos parámetros importantes que evidencien su comportamiento tanto a nivel de topografía como a nivel de cauce. En la *Figura 4.1* se muestra la delimitación de la subcuenca del río Balsar con su respectivo punto de aforo.

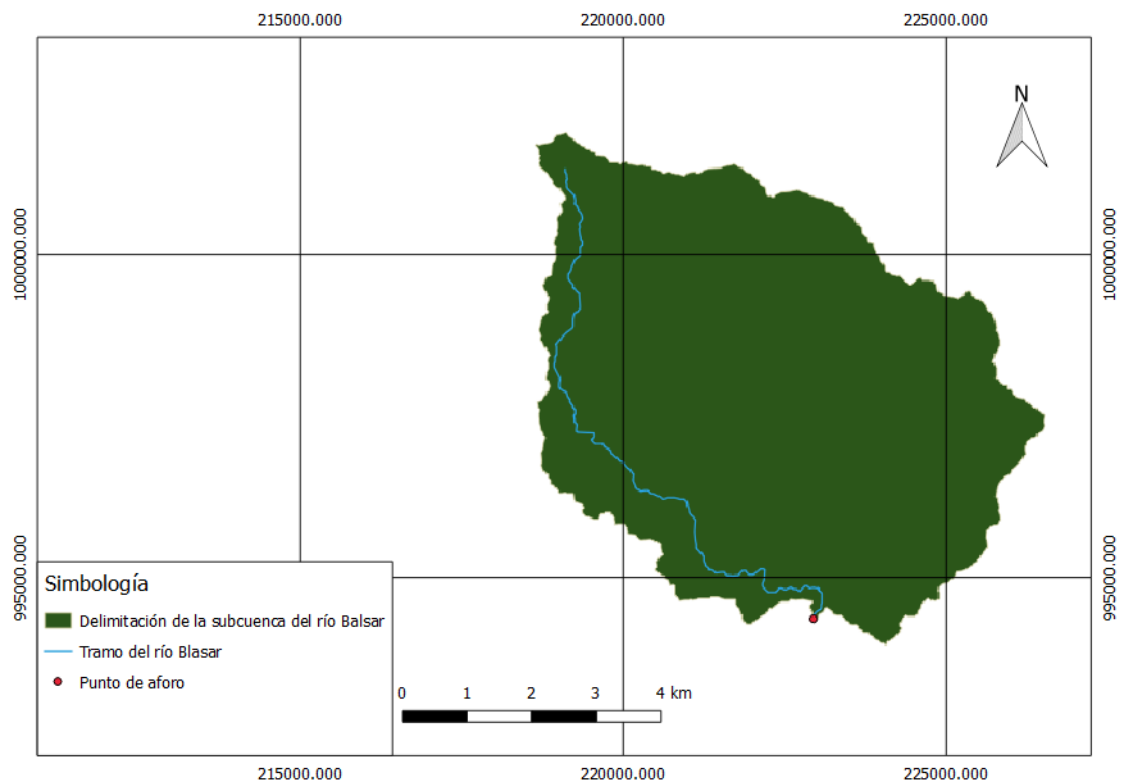


Figura 4.1 Delimitación de la subcuenca del río Balsar.

4.1.1) Parámetros relacionados a la forma de la cuenca

De acuerdo con la sección de la delimitación obtenida en la *Figura 4.1*, se obtuvieron los siguientes datos generales para la subcuenca: un perímetro de 39,225 km, un área de 40,397 km², longitud máxima de 9,411 km, ancho de 4,293 km y se clasificó como una subcuenca pequeña de acuerdo con el *Cuadro 2.1*. Con respecto a los índices de forma, la subcuenca presenta forma oblonga según el índice de compacidad (*Cuadro 2.2*), ya que este índice dio un valor de 1,72; y se consideró también menos susceptible a crecidas de gran magnitud, en

comparación con una cuenca redondeada, debido a que el factor de forma de Horton dio un valor de 0,45 ($F < 1$).

4.1.2) Parámetros asociados al relieve

En el *Cuadro 4.1* se muestran los diferentes parámetros asociados al relieve, los cuales indican diferentes valores que influyen directamente en la duración del tiempo de concentración de las aguas de escorrentía en la red de drenaje y afluentes del curso principal.

Cuadro 4.1 Parámetros asociados al relieve de la subcuenca

Parámetro	Valor
Cota máxima (msnm)	1005
Cota mínima (msnm)	41
Altura media (msnm)	394,324
Altitud más frecuente (msnm)	204

Para determinar la etapa de madurez de la cuenca se obtuvo la curva hipsométrica, dicha curva se muestra en la *Figura 4.2*.

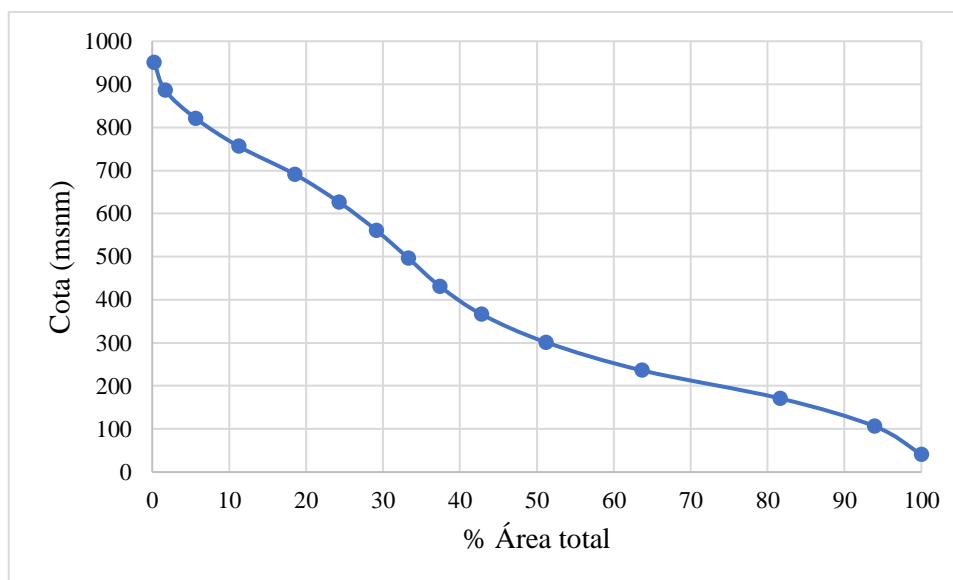


Figura 4.2 Curva hipsométrica de la cuenca

Tal y como se observa en la *Figura 4.2*, el comportamiento de la curva la calificó como una cuenca en equilibrio, ya que su comportamiento es similar a los ríos maduros.

A partir de las alturas medias obtenidas de la curva hipsométrica y el porcentaje de área total sobre cada una de las alturas, se obtuvo el histograma de frecuencia de altitudes, dicho histograma se muestra en la *Figura 4.3*.

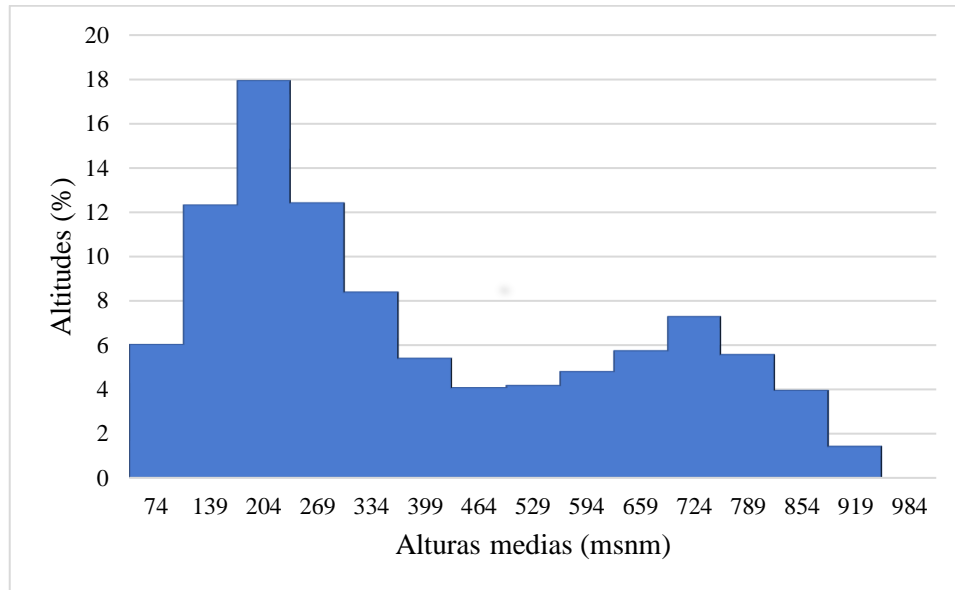


Figura 4.3. Histograma de frecuencia de altitudes de la subcuenca del río Balsar.

A partir de la *Figura 4.3* se puede observar que la altura media que más se frecuentó en la cuenca fue la de 204 msnm con un 18% , y la que menos se frecuentó fue la de 919 msnm con un 0,75%.

Para una mejor visualización de las elevaciones en la cuenca, se muestra la *Figura 4.4*, en donde puede observar que predominan más las alturas bajas que las altas y las elevaciones van desde los 41-1005 msnm.

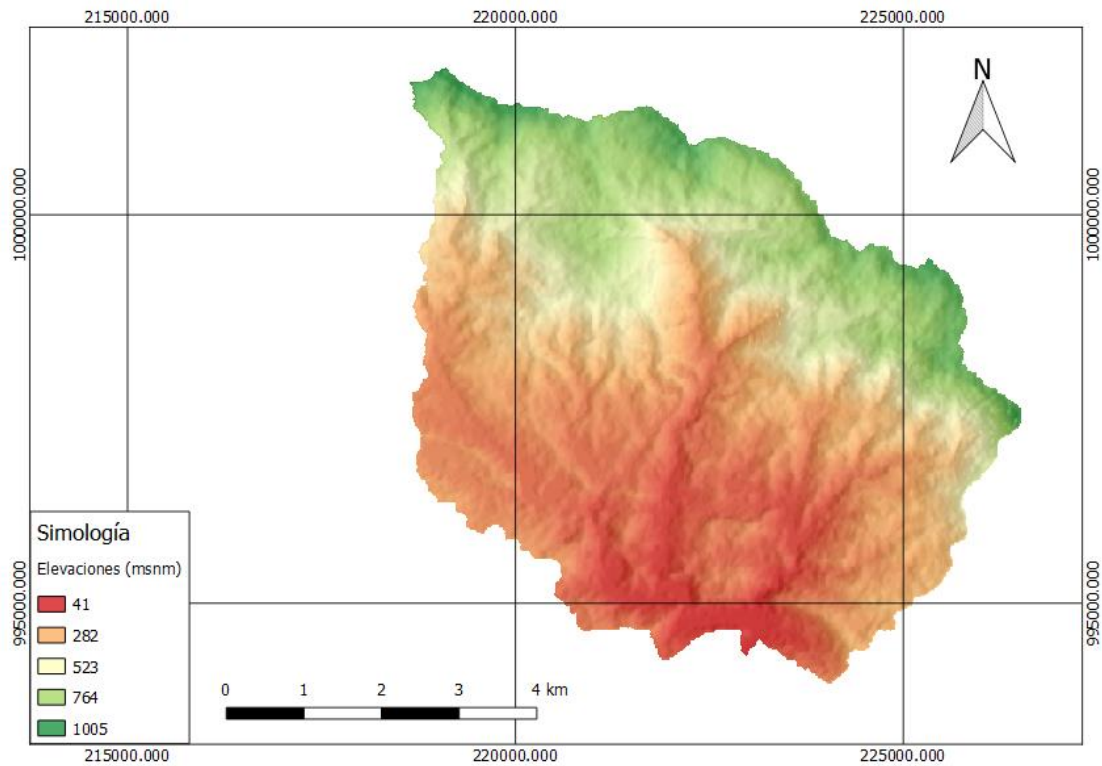


Figura 4.4 Mapa de elevaciones de la subcuenca del río Balsar

4.1.3) Parámetros que caracterizan la red de drenaje

A partir de la red de drenaje se obtuvieron los parámetros del Cuadro 4.2.

Cuadro 4.2 Parámetros relacionados a la red de drenaje

Parámetro	Valor
Orden de corrientes	5
Longitud de la red de drenaje (km)	91,740
Densidad de drenaje	2,271
Desnivel de cauce principal (msnm)	712
Longitud del cauce principal (km)	11,840
Pendiente del cauce principal (%)	6,009

La cuenca resultó tener una densidad de drenaje de 2,271 km/km², la cual se calificó como moderada ya que se ubicó en el rango de 1,9 y 3,6, lo que refleja que va a responder relativamente normal a la influencia de la precipitación, y no va a ser de respuesta hidrológica

lenta, ya que este caso sería si se posee una densidad baja, por lo que se puede afirmar que se encuentra en un nivel bueno de respuesta ante la influencia de las precipitaciones.

La red de drenaje con su respectivo número de orden de corrientes se muestra en la *Figura 4.5*.

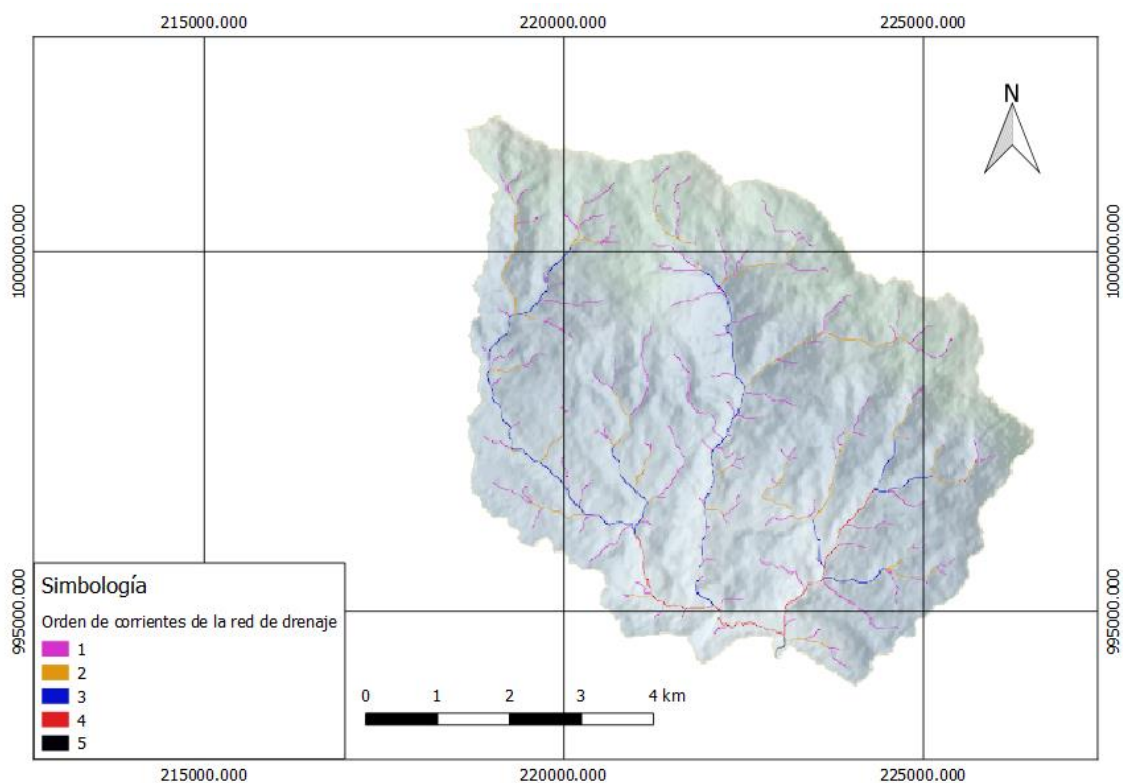


Figura 4.5 Orden de la red de drenaje de la subcuenca del río Balsar.

En la *Figura 4.5* se puede observar que el mayor orden de corrientes que presenta la subcuenca es de 5, el cual representa un alto grado de bifurcación dentro de la cuenca, elevado potencial erosivo y mayor transporte de sedimentos, ya que, a mayor número de orden, mayor vulnerabilidad a los factores mencionados.

4.1.3.1) Perfil del cauce principal

Las elevaciones obtenidas a partir del perfil del cauce principal se observan en la *Figura 4.6*.

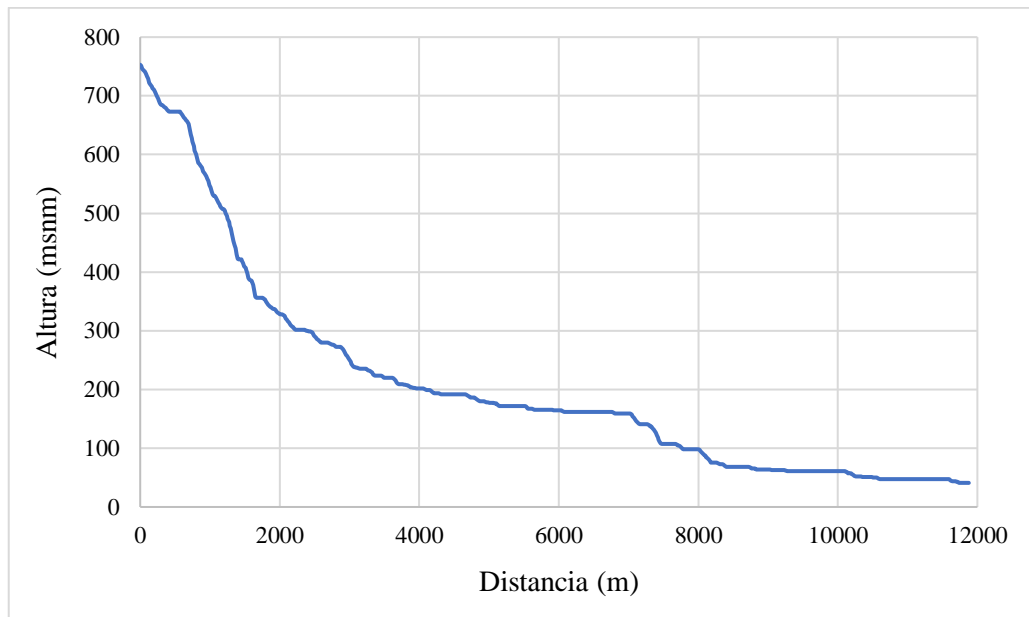


Figura 4.6 Perfil del cauce principal

De acuerdo con la *Figura 4.6*, el cauce principal posee elevaciones que van desde los (41-753) msnm y en los primeros 2000 m del cauce es en donde se observó un mayor pronunciamiento, seguidamente entre los 2000 m y los 7800 m reduce la pendiente considerablemente, hasta llegar a los 11840 m con una pendiente más suave.

Según su forma a partir de las elevaciones obtenidas, este se relaciona a ríos viejos el cual representa poca capacidad erosiva. Si bien es cierto, se ha analizado anteriormente, que, por el orden de los ríos, así como por el comportamiento de la curva hipsométrica de la cuenca, esta se calificada como vulnerable para ser erosionada, sin embargo, el río específicamente presenta un comportamiento diferente.

4.2) ANÁLISIS DE PRECIPITACIÓN

Las estaciones que influyen en la subcuenca obtenidas a partir de los polígonos de Thiessen se muestran en la *Figura 4.7*.

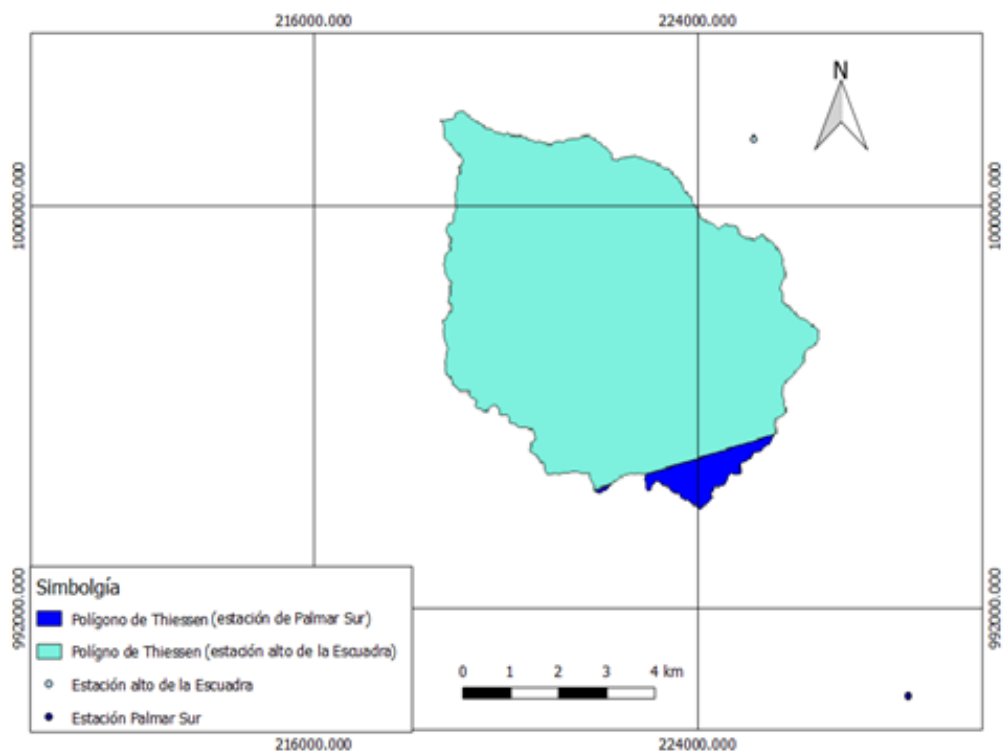


Figura 4.7 Estaciones meteorológicas con influencia sobre la subcuenca del río Balsar

Al realizar la solicitud de datos de precipitación para cada una de las estaciones, se obtuvo únicamente el registro de datos para la estación de Palmar Sur, misma que influye muy poco en la cuenca en comparación con la del alto de la Escuadra tal y como se observa en la *Figura 4.7*, esta estación, además de influir muy poco en la cuenca, influye en la zona baja de la misma, es decir; cerca del punto de aforo, situación que no favorece el uso de los datos de precipitación de estas estaciones ya que lo ideal sería que las estaciones influyan en la mayoría del área de la subcuenca.

A raíz de lo expuesto anteriormente, se propuso realizar una validación de los datos de la estación de Palmar Sur con datos satelitales con la finalidad de determinar si hay o no, una buena correlación entre los mismos.

4.2.1) Validación de datos

A partir de la descarga de los datos satelitales de precipitación mediante el satélite TRMM 3B42, se obtuvieron los datos de precipitación para un registro total de 10 años (registro de datos

para la estación de Palmar Sur) específicamente para las capas vectoriales correspondientes a la de la subcuenca en estudio y la del polígono sobre el punto de la estación de Palmar Sur, mismas que sirvieron como base el nivel de correlación entre los datos.

En la *Figura 4.8* se puede observar la correlación dada entre los datos de precipitación de la estación meteorológica de Palmar Sur y la precipitación satelital obtenida mediante la capa vectorial de la subcuenca del río Balsar.

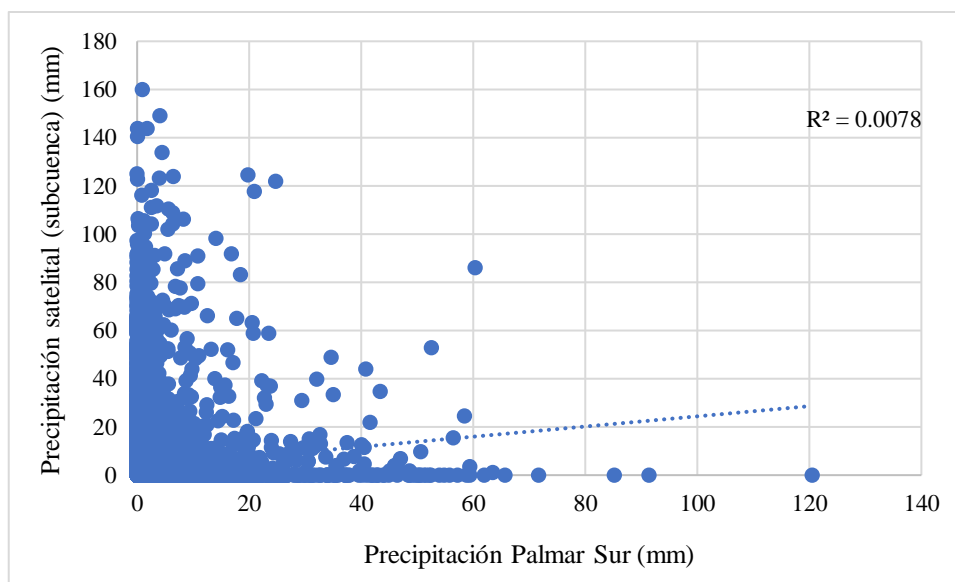


Figura 4.8 Correlación de datos de precipitación de la estación de Palmar Sur vs los datos de precipitación satelital de la subcuenca del Río Balsar

El valor obtenido según la *Figura 10* correspondió a 0,0078, valor que se alejó considerablemente del valor esperado, ya que en términos hidrológicos se considera aceptable una regresión cuyo valor del factor de correlación sea mayor a 0,8 ó menor que -0,8, lo que fue rechazado totalmente el valor obtenido.

Con la finalidad de al menos saber si los datos se correlacionaban mejor en un área pequeña cercana a la estación de Palmar Sur, se tomó la decisión de hacer la validación a partir de un polígono (cuadrado) sobre la estación de Palmar Sur (*Figura 4.9*), es decir, fuera de la cuenca.

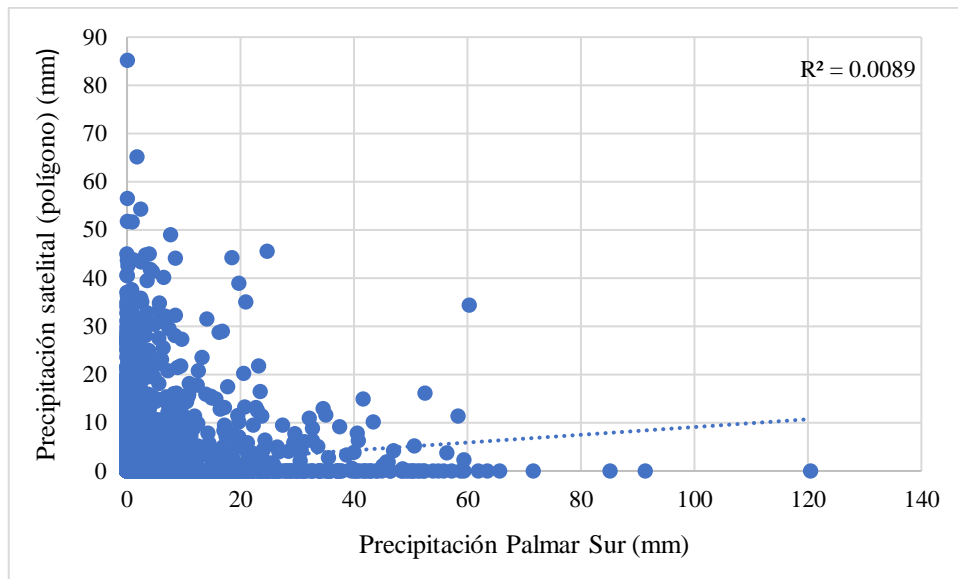


Figura 4.9 Correlación de datos de la estación de Palmar Sur vs los datos de precipitación satelital del polígono sobre el punto de la estación de Palmar Sur

Según la *Figura 4.9*, se obtuvo una mejora en el factor de correlación (0,0089), muy mínima, pero de igual forma se afirmó que los datos satelitales no pudieron ser validados aún en un área representativa a la estación.

4.3) USO DE DATOS DE PRECIPITACIÓN SATELITAL PARA LA SUBCUENCA DEL RÍO BALSAR

Las limitaciones de las redes pluviométricas han representado y representan un gran desafío para cuencas poco instrumentadas, tal y como lo es el caso de la subcuenca del río Balsar, lo cual motiva el uso de estimaciones de esta variable a través de satélites. Normalmente, al realizar un estudio de este tipo, lo ideal es contar con estaciones meteorológicas dentro de la cuenca y tener un buen acceso a los datos, registros completos etc. Por esta razón es importante justificar la razón por la cual se decidió utilizar los datos de precipitación satelital sobre los datos de estaciones meteorológicas.

Tanto los datos de precipitación satelital, así como los de estaciones meteorológicas físicas poseen ventajas y desventajas, para este caso en estudio, las desventajas dadas para las estaciones meteorológicas físicas son las que dan paso para considerar los datos de precipitación

satelital, ya que, por ejemplo, puede haber varios escenarios por los cuales el estudio no pudo analizarse a partir de estaciones meteorológicas físicas, de forma general se mencionan las siguientes:

- a. Los datos de precipitación de la estación que más influía en la cuenca no pudieron obtenerse, misma que está ligada a la desventaja mencionada anteriormente ya que el acceso a los datos es ilimitado dependiendo de la institución encargada, debido a que las mismas rigen bajo protocolos de obtención muy estrictos.
- b. La estación de Palmar Sur al influir muy poco en la cuenca no pudo ser utilizada para el análisis de precipitación, ya que no se podía asumir que el comportamiento de la lluvia en esa zona iba a ser la misma para las otras partes.
- c. No había ninguna estación dentro de la cuenca, dicha desventaja se liga con que muchas veces las estaciones no son colocadas bajo análisis previos, es decir, se colocan en zonas donde no son aprovechadas o simplemente no se tienen prioridades de dónde colocarlas de acuerdo con las posibles maneras de su aprovechamiento.

Estos escenarios reflejan una limitante a nivel de cuencas, ya que el difícil acceso a los datos, así como registros incompletos dan paso a hacer uso de otras metodologías que no son muy comúnmente utilizadas, tal y como es el uso de los datos de precipitación satelital, siendo lo que mejor se apropia a las condiciones en la que se encuentra la zona en estudio.

Por dicha razón, se propuso el uso de una metodología que se adaptara a la situación encontrada en la cuenca a causa de la falta de datos, realizando primeramente un ajuste de los datos de precipitación satelital para seguidamente realizar la modelación hidrológica y obtener caudales máximos, así como la para el cálculo de caudales máximos por métodos empíricos.

4.3.1) Ajuste de datos de precipitación satelital

4.3.1.1) Análisis de datos dudosos

Para un total de 22 años de registro (1998-2019) se trabajó con 8 duraciones diferentes (180,360,540,720,900,1080,1260,1440) min. A partir de estos datos de entrada, el análisis de datos dudosos para los años 1998 -2019 resultó efectivo, ya que tanto el valor extremo superior e inferior se encontraban dentro de los límites de la muestra, donde el valor mínimo fue de 0,1915 y el máximo 1,7481.

4.3.1.2) Ajuste de datos a la función de distribución Gumbel

A continuación, en el *Cuadro 4.3* se observan los valores obtenidos a través del ajuste de datos de la distribución de Gumbel, en donde se obtuvieron las intensidades máximas de precipitación (mm/h) en la zona de estudio para cada una de las duraciones mencionadas anteriormente con los periodos de retorno correspondientes a 2,5,10,15 y 20 años.

Cuadro 4.3 Intensidades de precipitación (mm/h) para distintos periodos de retorno

Duración (min)	T2	T5	T10	T15	T20
180	22,655	30,670	35,976	38,970	41,066
360	15,346	19,442	22,153	23,683	24,754
540	11,658	14,557	16,477	17,559	18,318
720	9,383	11,878	13,530	14,463	15,115
900	7,686	9,849	11,281	12,088	12,654
1080	6,197	8,444	9,932	10,771	11,359
1260	5,798	7,694	8,949	9,657	10,152
1440	5,300	7,115	8,316	8,994	9,469

4.3.1.3) Prueba de bondad de ajuste

Una vez ajustados los datos mediante la función Gumbel, se realizó una prueba de bondad de ajuste a partir de la prueba de Kolmogorv-Smirnov y se determinó el coeficiente de determinación R^2 (0,972). Los resultados de la prueba para cada una de las muestras por duración se muestran en el *Cuadro 4.4*.

Cuadro 4.4 Resultados del test Kolmogorov-Smirnov

Duración (min)	D
180	0,1775
360	0,1775
540	0,2465
720	0,1775
900	0,1775
1080	0,2265
1260	0,1775
1440	0,1775

Según el *Cuadro 4.4*, el ajuste obtenido fue bueno al nivel de significancia seleccionado, debido a que se cumplió que el valor de D para cada una de las duraciones seleccionadas fue menor que Dt (0,2749), es decir; esta función se ajustó satisfactoriamente al análisis de valores extremos y a la distribución Gumbel.

Al alcanzar un buen nivel de ajuste de datos, se obtuvieron las siguientes curvas IDF a partir de los datos del *Cuadro 4.3*.

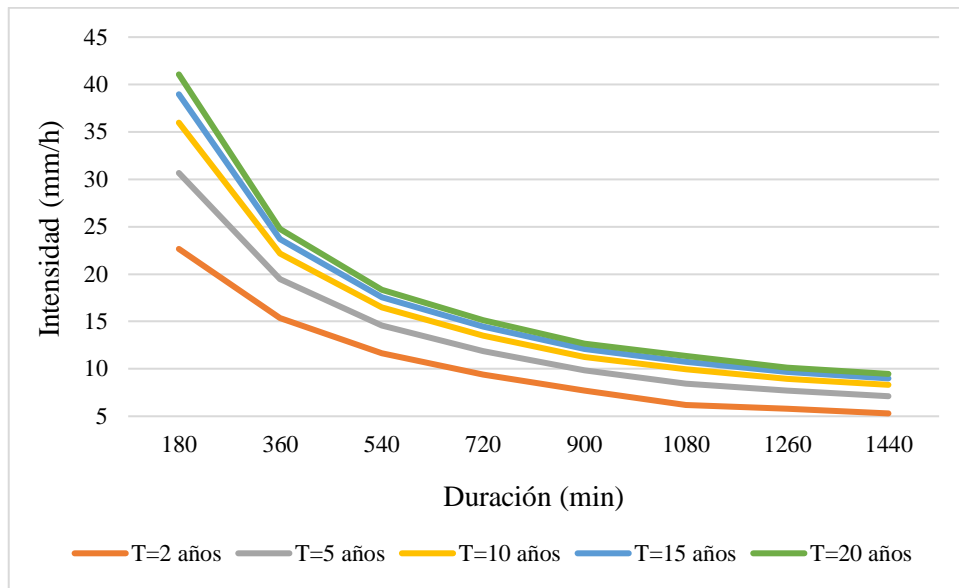


Figura 4.10 Curvas IDF de la subcuenca en estudio

En la *Figura 4.10* se puede observar que las intensidades obtenidas para cada uno de los periodos de retorno se encuentran entre los 5 mm/h hasta los 41,06 mm/h. Las curvas IDF resultaron de gran utilidad, ya que, a partir de estas, se encontró una ecuación que validó el cálculo de las intensidades a partir de diferentes periodos de retorno y duraciones que no se observan en las curvas IDF. Los resultados obtenidos para hallar la ecuación obtenida mediante el método analítico se muestran a continuación.

4.3.1.4) Método analítico

Se generó la *Ecuación 34* correspondiente a la intensidad de precipitación (mm/h) para diferentes duraciones y periodos de retorno a partir de los resultados de la distribución de Gumbel, dicha ecuación fue validada para la subcuenca en estudio a partir de un análisis de varianza correspondiente a la prueba de distribución de Fisher, mediante esta distribución se determinó que F prueba (0,5661) es menor que F tabla (2,490), indicando que con un nivel de confianza de 95% se rechaza la hipótesis nula, la cual acepta la ecuación de regresión lineal múltiple y por ende la ecuación obtenida.

$$I = \frac{862.979T^{0.229}}{D^{0.716}}$$

Ecuación 34

4.4) MODELACIÓN HIDROLÓGICA

Al realizar un modelo de lluvia-escorrentía, la duración de la lluvia fue asumida igual al tiempo de concentración de la cuenca, el cual dio un valor de 79,03 minutos, con esta duración cuando la totalidad de la cuenca está aportando al proceso de escorrentía, va a presentar los caudales máximos. También se obtuvo el valor del tiempo de retardo (*lag time*) el cual correspondió a 47,42 minutos.

Los periodos de retorno seleccionados para generar la modelación hidrológica correspondieron a 1,2,10 y 25 años, debido a que el primero va a representar una probabilidad de ocurrencia del 100%, es decir, es el evento con mayor probabilidad que se pueda tener, el segundo de 2 años con una probabilidad del 50% el cual va a representar las crecidas recurrentes debido a que son las que mueven más sedimentos en una cuenca, 10 años para tener otro parámetro de referencia y finalmente 25 años de periodo de retorno, el cual es el recomendado para diseños de obras para la gestión de inundaciones.

Al tener la duración y los tiempos de retorno establecidos, se generaron diferentes hietogramas a partir del método del bloque alterno para obtener precipitaciones utilizando las curvas IDF a través de la ecuación de intensidad propia de la cuenca para cada periodo de retorno y a partir de estos obtener los caudales mediante HEC-HMS. Los hietogramas obtenidos se muestran en las *Figuras 4.11, 4.12, 4.13 y 4.14*.

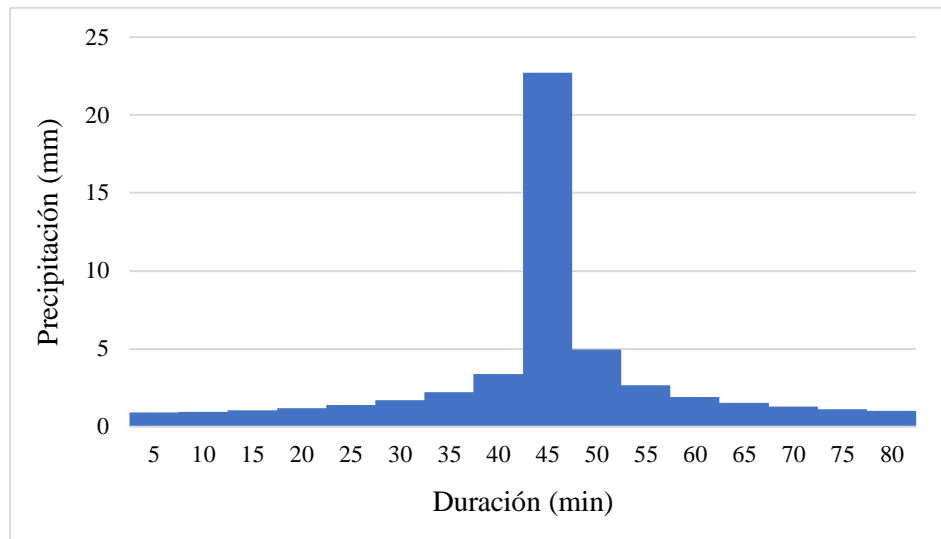


Figura 4.11 Precipitaciones para un periodo de retorno de 1 año

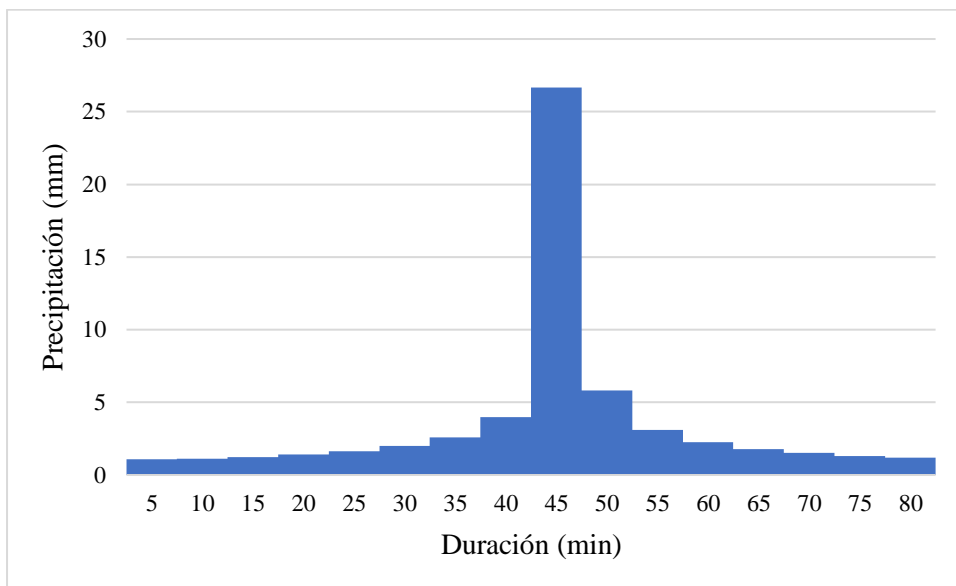


Figura 4.12 Precipitaciones para un periodo de retorno de 2 años

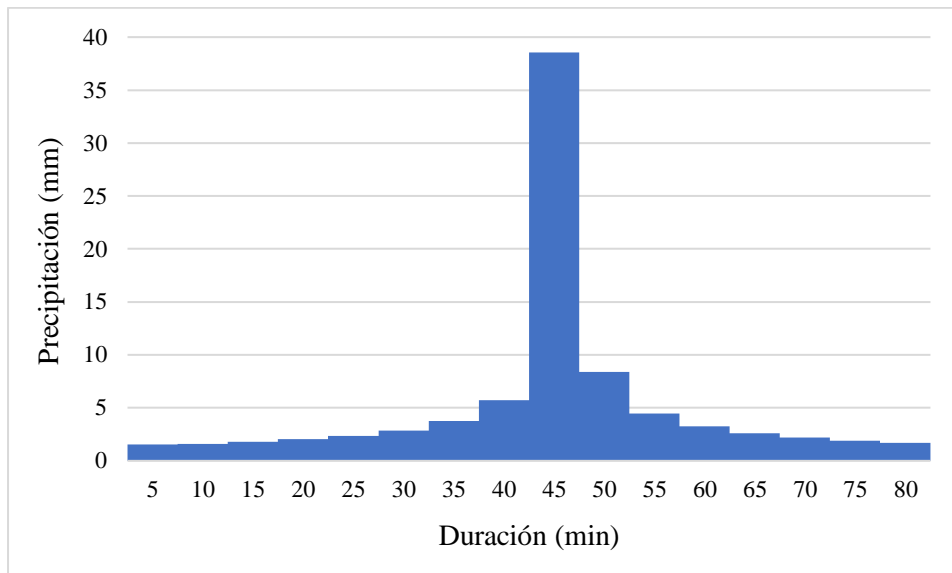


Figura 4.13 Precipitaciones para un periodo de retorno de 10 años

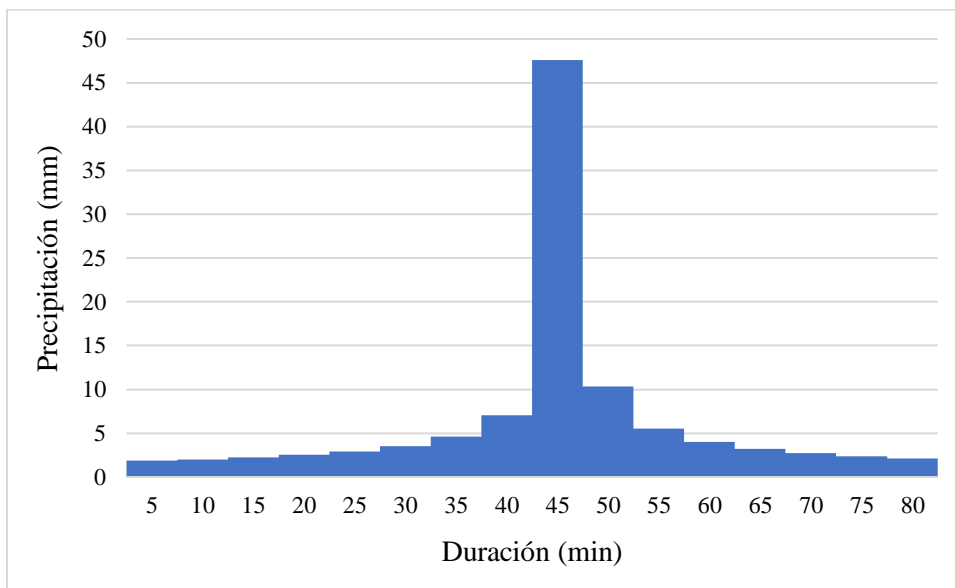


Figura 4.14 Precipitaciones para un periodo de retorno de 25 años

Las precipitaciones obtenidas para cada uno de los periodos de retorno fueron de: 22,73 mm para un periodo de retorno de 1 año (*Figura 4.11*), precipitación de 26,65 mm para un periodo de retorno de 2 años (*Figura 4.12*), una precipitación de 38,55 mm para un periodo de retorno de 10 años (*Figura 4.13*) y una precipitación de 47,57 mm para 25 años de periodo de retorno (*Figura 4.14*), todos con intervalos de tiempo de 5 minutos.

4.4.1) Número de curva

Como método de pérdida para la obtención de caudales al utilizar el número de curva del SCS, primeramente, se obtuvo el mapa del número de curva para la zona en estudio a partir de los ráster del orden del suelo y de uso de suelos, ambos mapas se muestran en las *Figuras 5.1* y *5.2* en la sección de anexos.

Según el mapa observado en la *Figura 5.1*, el orden de suelos para la subcuenca es de Inceptisoles y de Ultisoles, es decir, pertenecientes a los grupos hidrológicos B y C respectivamente.

Respecto al mapa de uso de suelo (*Figura 5.2*) los porcentajes obtenidos para cada uno de los usos de suelo y sus condiciones hidrológicas son los siguientes:

Cuadro 4.5 *Uso de suelo de la subcuenca con su respectiva condición hidrológica*

Uso de suelo	Área (km ²)	Porcentaje de influencia en la cuenca (%)	Condición hidrológica
Bosque	32,696	78,583	Buena
Pasto	5,897	14,173	Pobre
Suelo desnudo	2,812	6,758	Pobre
Casas	0,022	0,0523	Pobre
Agua	0,054	0,130	Pobre
Cultivos	0,126	0,303	Pobre

A partir del *Cuadro 4.5*, se puede afirmar que la cuenca cuenta en su mayoría con cobertura de suelo de tipo bosque con un total de 32,696 km², representado con un 75,58% del área total de la cuenca, lo que la califica con una condición hidrológica buena, mientras que las demás presentaron condiciones hidrológicas pobres, siendo la menor las casas con un 0,0523% del total del área.

El mapa del número de curva obtenido a partir de la reclasificación de los mapas anteriores se muestra en la *Figura 4.15*.

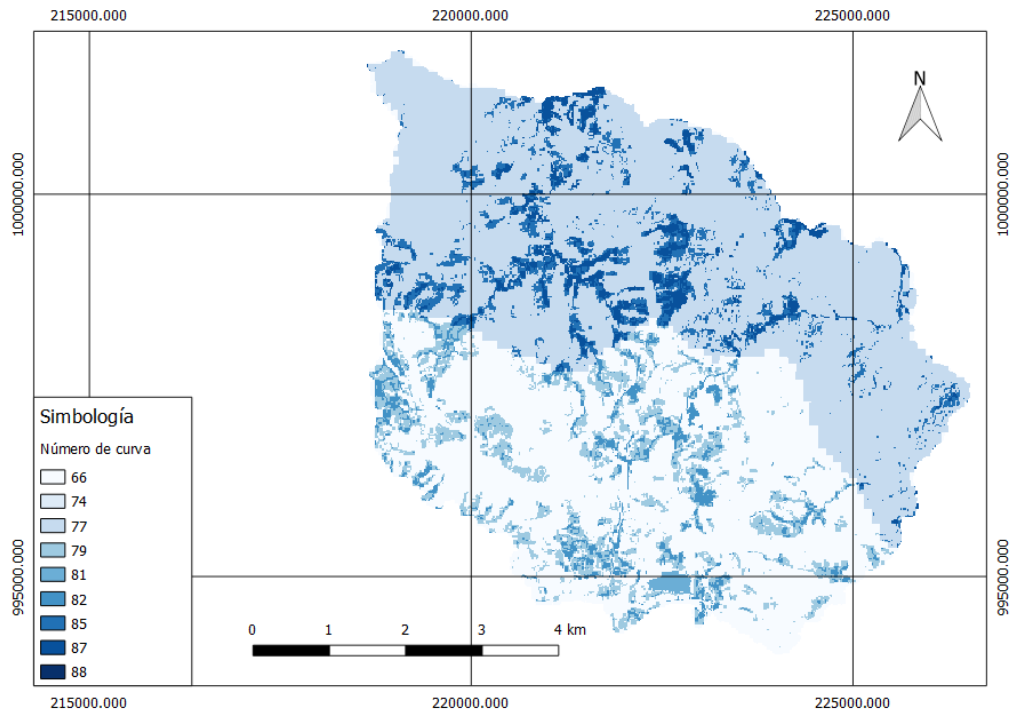


Figura 4.15 Número de curva de la subcuenca del río Balsar.

En la *Figura 4.15* se muestran los diferentes valores de número de curva encontrados en la subcuenca, para un total de 9 diferentes valores, a partir de estos valores y el área de influencia que cada uno de ellos poseía sobre la cuenca, se obtuvo un valor promedio de 73,66 bajo condiciones normales de humedad (CHA II), se asume el número de curva en condiciones medias de humedad, ya que en el estudio realizado no se tomó en cuenta ningún evento específico. Este valor al estar más cerca del 100 que del 0 indica que en la cuenca la mayoría del agua va a correr por escorrentía lo que significa infiltraciones bajas, asociándose esta última característica a un aumento en la erosión hídrica debido a que ocasiona la degradación de laderas.

4.4.2) HEC-HMS

A partir de los resultados anteriores, se obtuvieron las modelaciones hidrológicas en HEC-HMS, los cuales muestran el comportamiento de los caudales mediante hidrogramas unitarios del SCS, obtenidos a partir del número de curva como método de pérdida y bloque alterno como

parte del modelo meteorológico para cada uno de los periodos de retorno y una condición antecedente II. Dichos hidrogramas se observan en la *Figura 4.16*.

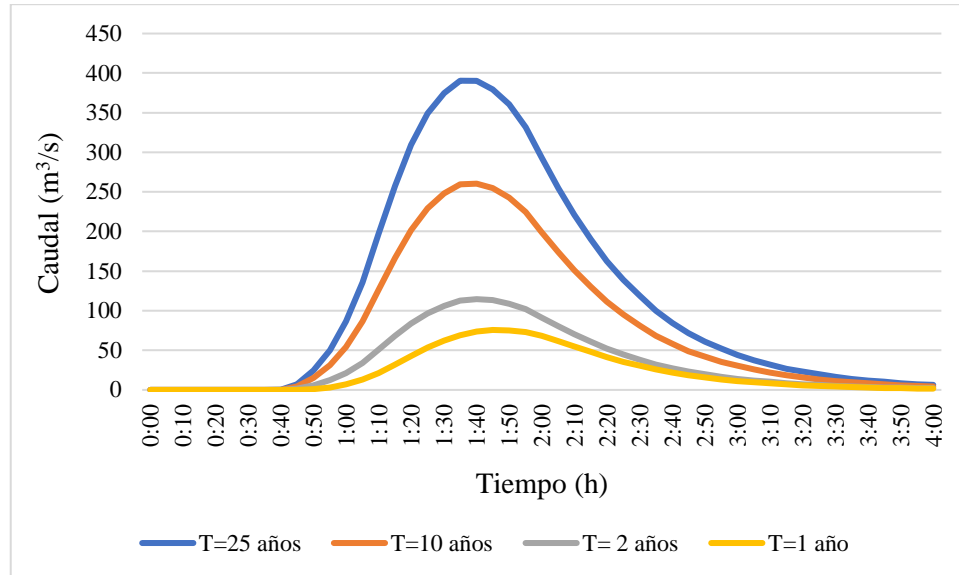


Figura 4.16 Modelaciones hidrológicas a partir de HEC HMS para un CHA II..

De acuerdo con la figura anterior, los caudales obtenidos para los periodos de retorno de 1,2,10 y 25 años fueron de (73,7-114,6-260,4 y 390,4) m³/s respectivamente.

4.5) CAUDALES MÁXIMOS OBTENIDOS POR MÉTODOS EMPÍRICOS

4.5.1) Método racional

Para determinar los caudales máximos de la cuenca para diferentes periodos de retorno mediante el método racional, inicialmente se obtuvo un mapa de reclasificación de pendientes y otro de uso de suelo anteriormente mostrado con el objetivo de determinar el coeficiente de escorrentía. Dicha reclasificación y los mapas de coeficientes de escorrentía para los periodos de retorno (1,2,10 y 25 años), se muestran en las *Figuras 5.3, 5.4, 5.5, 5.6 y 5.7* en la sección de anexos.

De acuerdo con las figuras correspondientes al coeficiente de escorrentía se puede analizar que para un periodo de retorno de 1 año (*Figura 5.4*), el área en estudio posee coeficientes que van desde los 0,22 hasta los 0,73, para 2 años (*Figura 5.5*) posee un rango de 0,22 a 0,75, para

10 años (*Figura 5.6*) hay valores desde los 0,28 hasta 0,83, mientras que para 25 años (*Figura 5.7*) el rango es mayor con valores desde los 0,32 hasta los 0,88, es decir, el coeficiente de escorrentía va aumentando para la misma área conforme aumenta el periodo de retorno, lo que indica también que debido a este aumento, mayor será la cantidad de agua precipitada que se convertirá en caudal superficial a mayor periodo de retorno.

Finalmente, con una duración de la lluvia igual al tiempo de concentración de la cuenca se obtuvieron las intensidades de precipitación (mm/h) para cada periodo de retorno, las cuales fueron mencionadas con anterioridad para la modelación hidrológica.

Los parámetros mencionados necesarios para el cálculo de los caudales máximos de la cuenca ante diferentes periodos de retorno se muestran en el *Cuadro 4.6*, con su respectivo caudal y coeficientes de escorrentía promedio.

Cuadro 4.6 Caudales máximos a partir del método racional para distintos periodos de retorno.

Periodo de retorno	Intensidad (mm/h)	Coefficiente de escorrentía promedio	Caudal (m ³ /s)
1	37,49	0,33	138,83
2	43,96	0,35	172,65
10	63,59	0,40	285,43
25	78,47	0,44	387,44

4.5.2) Método Mac Math

Otra manera de obtener caudales máximos fue por medio el método Mac Math, el cual, a diferencia del anterior este contempla diferentes parámetros. Inicialmente, se obtuvo una reclasificación de pendientes, dicha reclasificación en la cuenca se observa en la *Figura 5.8* en la sección de anexos.

Seguidamente, conociendo los porcentajes de cobertura de cada uso de suelo, se reclasificó dicha capa para diferenciar los porcentajes en rangos de cada una de las coberturas, dicho mapa reclasificado se muestra en la *Figura 5.9* en la sección de anexos.

En la *Figura 5.9* se observaron dos grupos de cobertura debido a que el bosque era el único que presentaba mayor cobertura con un total de 78,58% del área ubicándose en el rango de (50-80)%, mientras que los demás usos presentaron porcentajes menores al 20% por lo que todos estos usos (pastos, suelo desnudo, agua, cultivos y casas) se ubicaron en el segundo grupo (0-20)%.

Finalmente, para obtener el coeficiente de escorrentía al conocer los grupos hidrológicos de la cuenca (inceptisoles y ultisoles), y relacionar estos a los grupos hidrológicos B y C respectivamente, estas litologías junto con la densidad de drenaje la cual fue moderada, se relacionaron con el *Cuadro 2.4* y se asociaron con la textura del suelo seguidamente con el *Cuadro 2.11*, lo que resultó que los inceptisoles iban a poseer texturas medias y los ultisoles texturas finas, por lo que el mapa de orden de suelo (*Figura 5.1*) es el mismo que el de textura.

A partir del mapa de cobertura, textura del suelo y el de pendientes se obtuvo el mapa de coeficientes de escorrentía tal y como se muestra en la *Figura 4.17*.

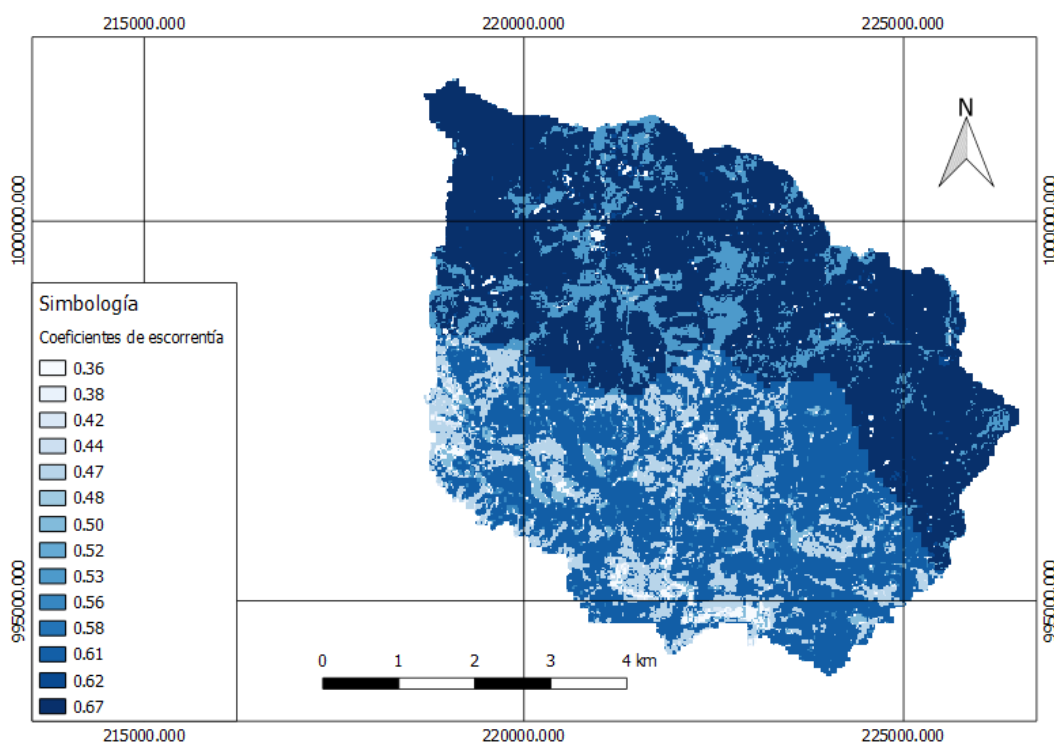


Figura 4.17 Coeficientes de escorrentía para el método de Mac Math

En la *Figura 4.17* se observan los coeficientes de escorrentía obtenidos a partir de la suma de C_1, C_2 y C_3 de acuerdo con la pendiente, textura del suelo y la cobertura de cada una de las zonas de la cuenca, donde finalmente se obtuvo un valor promedio de 0,59.

Como variación del método racional, el de Mac Math contempla la pendiente del cauce principal, el cual como se mencionó con anterioridad, dio un valor de 6,009 %. Finalmente, con la información anterior, y las intensidades ya mencionadas se obtuvieron los caudales máximos, dichos caudales con sus respectivos parámetros se muestran en el *Cuadro 4.7*.

Cuadro 4.7 Caudales máximos a partir del método Mac Math para distintos periodos de retorno.

Periodo de retorno	Intensidad (mm/h)	Coefficiente de escorrentía promedio	Pendiente del cauce principal (‰)	Caudal (m ³ /s)
1	37,49	0,59	60	350,36
2	43,96			410,83
10	63,59			594,28
25	78,47			733,34

4.6) COMPARACIÓN DE CAUDALES PARA CADA PERIODO DE RETORNO

Los caudales obtenidos en cada uno de los métodos se pueden observar en el *Cuadro 4.8*.

Cuadro 4.8 Comparación de los caudales (m³/s) obtenidos mediante la modelación en HEC-HMS, método racional y Mac Math según periodos de retorno.

Periodo de retorno	Modelación HEC HMS	Método racional	Método Mac Math
1	73,7	138,83	350,36
2	114,6	172,65	410,83
10	260,4	285,43	594,28
25	390,4	387,44	733,34

De acuerdo con los caudales obtenidos a partir del hidrograma unitario (modelación), método racional y Mac Math, se puede observar que según el *Cuadro 9*, los caudales obtenidos en la modelación son menores en comparación con los otros dos métodos, sin embargo, presenta mayor acercamiento con los valores de los caudales obtenidos por el método racional. Tomar en cuenta la pendiente del cauce, puede ser un factor que aleje en gran medida los valores de los caudales obtenidos mediante el método Mac Math, así como el coeficiente de escorrentía (0,59) que fue mucho mayor que los obtenidos para el método racional.

El *Cuadro 4.9* muestra los porcentajes de excedencia a partir de los caudales obtenidos en la modelación para una mejor comprensión de lo mencionado anteriormente.

Cuadro 4.9 *Porcentajes de excedencia de los caudales obtenidos a partir los métodos empíricos que superan los caudales obtenidos en HEC-HMS.*

Periodo de retorno	Método racional	Método Mac Math
1	88,3	375,39
2	50,65	258,49
10	9,6	128,22
25	2,96	87,84

A partir del cuadro anterior, se puede afirmar que tomando como base los caudales obtenidos en HEC-HMS, el método racional no excede tanto los caudales, en comparación con el método de Mac Math, ya que este último lo excede mucho más, superando los caudales entre 2 y 3 veces. Conforme aumenta el periodo de retorno, el porcentaje excedido se ve disminuido, por ejemplo, para un periodo de retorno de 25 años, por el método racional, se obtuvo una diferencia mínima del 2,96%, siendo el que presenta un mayor acercamiento con los caudales obtenidos en HEC-HMS.

Finalmente se puede analizar que la obtención de caudales por medio de un modelo lluvia-escorrentía genera mayor confiabilidad en los datos, ya que la obtención de los caudales fue modelada en HEC-HMS bajo métodos de pérdida y de transformación, en comparación de los

otros métodos en donde los caudales calculados fueron de forma empírica y no contemplaron tantos parámetros como si lo hizo el anterior.

5) CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

El uso de Sistemas de Información geográfica (SIG) permitió realizar un análisis morfológico de la subcuenca del río Balsar en donde se logró determinar parámetros necesarios para posteriores estudios tanto hidrológicos como hidráulicos, que permitan comprender de una mejor manera su incidencia ante la presencia de algún evento de precipitación. Entre los más importantes, la cuenca resultó ser: pequeña, de forma oblonga, en equilibrio, de respuesta hidrológica normal ante la influencia de la precipitación, y de alto potencial erosivo.

La falta de acceso a los datos de precipitación de estaciones meteorológicas fue una limitante en dicho proyecto, lo que dio paso a la utilización de datos de precipitación satelital como única alternativa ante la ausencia de la estación más influyente en la cuenca.

Los datos de precipitación satelital se ajustaron de acuerdo con un análisis de distribución de frecuencia (distribución Gumbel) y pruebas de bondad de ajuste (Smirnov-Kolmogorov y coeficiente de determinación) ante la creación de las Curvas IDF y la ecuación de intensidad válida para la cuenca.

La aplicación del modelo lluvia-escorrentía en HEC-HMS, basados en los hidrogramas unitarios dio como resultado, cuatro caudales para los periodos de retorno de 1,2,10 y 25 años correspondientes a (73,7-114,6-260,4 y 390,4) m³/s respectivamente para condiciones de humedad promedio CHA II.

Al comparar los métodos de obtención de caudales, los obtenidos en HEC-HMS (NC) son los más recomendados ya que sus requerimientos de parámetros de entrada son mayores a los modelos del método racional y Mac Math. Los caudales obtenidos por el método racional se acercaron más a los obtenidos en HEC-HMS, en donde hubo porcentajes de excedencia de (88,37-59,65-9,6 y 2,96) para los periodos de retorno de 1,2,10 y 25 años, mientras que los obtenidos por el método Mac Math presentan porcentajes de excedencia mucho mayores (375,66-258,49-128,22 y 87,84).

Finalmente, se concluye que dicho proyecto debe ser la base para una posterior validación de los datos de precipitación satelital a partir de un análisis de precipitación con estaciones meteorológicas para la subcuenca del río Balsar, contando como mínimo con tres estaciones dentro de la zona en estudio para una mejor distribución de la lluvia dentro de la subcuenca.

Recomendaciones

Se recomienda mantener una base de datos reciente de curvas de nivel o modelos de elevación de la zona, ya que esto permite una mejor precisión en la obtención de datos.

Con la finalidad de poder comparar los caudales obtenidos, se recomienda realizar aforos en el río Balsar, debido a que como ya es sabido, no es común el análisis de precipitación a partir de datos satelitales, por lo que un aforo sería una buena opción para lograr la validación o no de los caudales obtenidos.

Es importante realizar una comparación con los caudales obtenidos analizando eventos de precipitación específicos, con la finalidad de realizar estudios posteriores como diseños de obras de protección, ya que en este caso se trabajó únicamente con una duración de lluvia igual al tiempo de concentración de la cuenca.

Se recomienda emplear la metodología utilizada en dicho proyecto para posteriores estudios a cuencas que no posean estaciones meteorológicas.

Dado el inconveniente inicial de dicho proyecto en relación con el análisis de precipitación y con la finalidad de dar un panorama externo a lo obtenido para una mejora de lo realizado, se recomienda:

- a. Realizar un plan nacional de ubicación de estaciones meteorológicas para que las triangulaciones de las precipitaciones sean las más representativas posibles dentro de las zonas de estudio, ya que dentro de muchas cuencas se ubican una importante cantidad de estaciones, mientras que en otras hay ausencia en ellas, tal como lo fue este caso, lo que demuestra una mala distribución de estas debido a que posiblemente no existan análisis previos de la colocación de estas.

- b. Las Instituciones encargadas deben gestionar el acceso a la información, en donde mejoren sus sistemas de solicitud para agilizar el acceso a los datos, así como que estos datos sean de uso público, logrando lo anterior a través de la inversión en recursos y personal para concretar un plan de mediano a largo plazo.
- c. Dar un correcto mantenimiento a las estaciones meteorológicas, ya que es frecuente encontrar registros con datos faltantes (horas, días y meses), lo que limita un correcto análisis de precipitación.
- d. Instalar estaciones hidrométricas las cuales permitan calibrar los modelos meteorológicos de transformación lluvia escorrentía.

6) CAPÍTULO 6. BIBLIOGRAFÍA

- Aguilar, E. (2015). Estadística de la Distribución Gumbel. <https://es.slideshare.net/emerssonbaltazara/estadistica-dist-gumbel>
- Alperín, M. (2013). Introducción al análisis estadístico de datos geológicos. <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/34221>
- Alpízar, F., Madrigal, R., & Salas, A. (2018). Retos ambientales de Costa Rica. Nota Técnica Del BID 1531, 66. <https://doi.org/IBD-TN-153>
- Amador, S. (2016). Caracterización del Territorio Península de Osa. Inder, 1–74. <https://www.inder.go.cr/peninsula-de-osa/Caracterizacion-territorio-Peninsula-Osa.pdf>
- Amarilla, M. E., Farias, H. D., & Villarroja, J. P. (2013). Estimación del parámetro hidrológico del Número de Curva NC : Automatización del cálculo mediante S . I . G . y nuevas fuentes de información cartográfica . Caso del área urbana de Pozo Hondo. 3(1).
- Aparicio, F. J. (1989). Fundamentos De Hidrología De Superficie. In Journal of Chemical Information and Modeling (Vol. 53, Issue 9). http://webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/adamoren/HIDRO/Fundamentos_de_hidrologia_de_superficie_-_Aparicio.pdf
- Aravena, D., Ausensi, P., Pizarro, R., Sangüesa, C., León, L., & Balocchi, F. (2009). Evaluación de Métodos hidrológicos para la Completación De Datos Faltantes De Precipitación En Estaciones De La Región Del Maule , Chile. 1.
- Arreguín, F., Rosengaus, M., Acosta, A., Chávez, R., & López, M. (2017). Manual para el control de inundaciones. Comisión Nacional del Agua. 338. <http://cenca.imta.mx/pdf/manual-para-el-control-de-inundaciones.pdf>
- Astorga, Y. (n.d.). Recurso Aguas Superficiales y Subterráneas con énfasis en las principales cuencas hidrográficas. Décimo Tercer Informe Del Estado de La Nación, 39.
- Balbastre, R. (2015). Análisis comparativo de metodologías de cálculo de tormentas de diseño

para su aplicación en hidrología urbana. Universidad Politécnica de Valencia, 1–69.

- Bastidas, C. (2005). Manual para el uso del modelo hidrológico HEC-HMS. Universidad Cesar Vallejo, 1–20.
https://www.academia.edu/36127656/Manual_para_el_uso_del_modelo_hidrol%C3%B3gico_HEC_HMS
- Batanero, P. (2007). Universidad politécnica de madrid escuela técnica superior de ingenieros de caminos, canales y puertos. Doctor.
http://oa.upm.es/38473/1/Paloma_Batanero_Akerman.pdf
- Bateman, A. (2011). Hidrología básica y aplicada. Brazilian Journal of Biology, 71(1), 241–253. <https://www.upct.es/~minaees/hidrologia.pdf>
- Becerra, R. (2007). Estudio del régimen pluviométrico de una cuenca empleando funciones ortogonales.
<http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/jspui/bitstream/132.248.52.100/1979/1/becerratoria.pdf>
- Botero, A., & Vélez, J. (2011). Estimación del tiempo de concentración y tiempo de rezago en la cuenca experimental urbana de la quebrada San Luis, Manizales. DYNA (Colombia), 78(165), 58–71.
- Breña, A. F., & Jacobo, M. A. (2006). Principios y fundamentos de la hidrología superficial. Universidad Autónoma Metropolitana, 288.
uamenlinea.uam.mx/materiales/licenciatura/hidrologia/principios_fundamentos/libro-PFHS-05.pdf
- Brieva, C. (2018). Caracterización de Cuencas. Caracterización De Cuencas, Junio, 161.
https://inta.gob.ar/sites/default/files/caracterizacion_de_cuencas_0.pdf
- Caicedo, F. (2008). Asimilación de precipitación estimada por imágenes de satélite en modelos hidrológicos aglutinados y distribuidos, caso de estudio afluencias al embalse de Betania (Huila, Colombia). 114. <http://hdl.handle.net/10554/3807>

- Camino, M., Bó, M., Cionchi, J., López de Armentia, A., Del Río, J., & De Marco, S. (2018). Estudio morfométrico de las cuencas de drenaje de la vertiente sur del sudeste de la provincia de Buenos Aires (Argentina). *Revista Universitaria de Geografía*, 27(1), 73–97. <http://bibliotecadigital.uns.edu.ar/pdf/reuge/v27n1/v27n1a05.pdf>
- Carrillo, C., & Mejía, N. (2016). Utilización del modelo “HEC -HMS” en sistemas de pronósticos hidrológicos y verificación de los datos obtenidos por el modelo CMPORH, en la cuenca del río Sucio. 286. [http://ri.ues.edu.sv/id/eprint/9989/1/Utilización del modelo HEC HMS en sistemas de pronósticos hidrológicos y verificación de los datos obtenidos por el modelo CMPORH%2C en la cuenca del Río Sucio.pdf](http://ri.ues.edu.sv/id/eprint/9989/1/Utilización%20del%20modelo%20HEC%20HMS%20en%20sistemas%20de%20pronósticos%20hidrológicos%20y%20verificación%20de%20los%20datos%20obtenidos%20por%20el%20modelo%20CMPORH%2C%20en%20la%20cuenca%20del%20Río%20Sucio.pdf)
- Castillo, G., & Ramirez, S. (2017). Estudio Hidrológico e Hidráulico Para el Diseño del Puente Pucayacu , Localizado en el Tramo : Mayocc – Huanta en la Progresiva 3 + 200 , Aplicando los Softwares HEC-HMS e Iber V2.0. Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, 196.
- Castro, E. S. (2014). Evaluación de Imágenes Satelitales de Precipitaciones (TRMM 3B43 mensual) en Región Costa, Sierra y Oriente del Ecuador. 51. <http://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/20874/1/TESIS.pdf>
- Chetyrina, A. (2017). Análisis y determinación de las curvas IDF en navarra. https://academica-e.unavarra.es/xmlui/bitstream/handle/2454/25380/TFG_.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Chinchilla, R., Fonseca, G., & Herrera, V. (2010). Propuesta de un procedimiento de elaboración de pronósticos para la evaluación financiera de proyectos según el análisis de la variabilidad de los valores promedios del tipo de cambio registrados entre el 17 de octubre del 2006 y 28 de febrero 2010 y su a. [https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/11042/Propuesta de un procedimiento de elaboracion de pronosticos para la evaluacion financiera de proyectos- Trabajo Escrito.pdf?sequence=2&isAllowed=y](https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/11042/Propuesta%20de%20un%20procedimiento%20de%20elaboracion%20de%20pronosticos%20para%20la%20evaluacion%20financiera%20de%20proyectos- Trabajo%20Escrito.pdf?sequence=2&isAllowed=y)
- Chow, V. (1994). Hidrología aplicada. In *Hidrologia aplicada* (p. 575 pp). <http://bases.bireme.br/cgi-bin/wxislind.exe/iah/online/?IsisScript=iah/iah.xis&src=google&base=REPIDISCA&lan>

g=p&nextAction=lnk&exprSearch=158911&indexSearch=ID%5Cnhttp://www.sidalc.net
/cgi-bin/wxis.exe/?IsisScript=BINAI.xis&method=post&formato=2&cantidad=

- Chúa, A. (2017). Desarrollo y calibración de un sistema informático para el análisis de tormentas, máximas avenidas y generación de lluvia escorrentía. 1–245.
<http://repositorio.lamolina.edu.pe/bitstream/handle/UNALM/2947/P40-C28-T.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- CNE. (2017). Amenazas de origen natural del cantón de Osa. 3.
https://www.cne.go.cr/index.php/prevenic-desastres-menuprincipal-93/mapas-de-amenazas/cat_view/276-mapas-de-amenazas/284-alajuela/420-alajuela
- Coaquira, Y. (2018). Análisis Comparativo De Precipitaciones Medias Mensuales, Utilizando Datos De Satélite Trmm Y Estaciones Meteorológicas En La Cuenca Huancané. 1–254.
http://tesis.unap.edu.pe/bitstream/handle/UNAP/2383/Oblitas_Huayllapuma_Elizabeth_Quinto_Apaza_Deyse.pdf?sequence=1
- Cuenca, B. (2017). Variación del coeficiente de escorrentía por el uso de suelo en la subcuenca Alameda-Ayacucho durante el periodo 2005 al 2015.
<https://www.slideshare.net/royHuamCord/juntos-85909264>
- Díaz, A., Guacaneme, F., & Alonso, L. (2017). Estimación de caudales máximos para el sector hidrológico de la quebrada El Diamante, mediante modelación con HEC-HMS. Universidad Católica de Colombia, 46.
https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/15352/1/andres_daniel_lorena_v4.0%281%29%281%29.pdf
- Elizondo, G. (2016). Análisis de la vulnerabilidad a la socavación del puente sobre el río Blanco en la Ruta Nacional No . 32. 32.
- Espejo, A. (2010). Hidrología En Cuencas Pequeñas La Formula Racional.
http://atlas.umss.edu.bo:8080/jspui/bitstream/123456789/241/1/6._ESCORRENTIA.pdf
- Estrela, T., Ferrer, M., & Rodríguez, J. (1995). Generación automática del número de curva con

- sistemas de información geográfica. *Ingeniería Del Agua*, 2(4), 43–58.
<https://doi.org/10.4995/ia.1995.2686>
- FAO. (n.d.). Definición de la textura del suelo.
http://www.fao.org/tempref/FI/CDrom/FAO_Training/FAO_Training/General/x6706s/.!33791!x6706s06.htm
- Francés, F. (2014). Utilidad de la precipitación obtenida por satélite en la modelación hidrológica aplicada a la cuenca del río Júcar. *Anales Científicos*, 75(1), 80.
<https://doi.org/10.21704/ac.v75i1.958>
- Francke, S. (2002). La situación del manejo de cuencas en Chile. 29.
<https://www.eird.org/estrategias/pdf/spa/doc14466/doc14466.pdf>
- García, A. J. (2013). Análisis De Distribuciones Estadísticas Alternativas a Las Tradicionales Para La Optimización De Los Caudales De Cálculo Empleados En Los Estudios Hidrológicos. 222. <https://core.ac.uk/download/pdf/72043241.pdf>
- Gaspari, F. J., Rodríguez Vagaría, A. M., Senisterra, G., Delgado, M. I., & Besteiro, S. (2013). Elementos metodológicos para el manejo de cuencas hidrográficas. *Universidad Nacional de la Plata*. <https://core.ac.uk/download/pdf/15784528.pdf>
- Gavilan, S., Pastore, J. I., Uranga, J., Ferral, A., Lighezzolo, A., & Aceñolaza, P. (2019). Metodología operativa para la obtención de datos históricos de precipitación a partir de la misión satelital Tropical Rainfall Measuring Mission. Validación de resultados con datos de pluviómetros. *Revista de La Facultad de Agronomía*, 118(1), 115–125.
<https://doi.org/10.24215/16699513e011>
- Ghanem, A., Lárez, H., & Ramirez, M. (2006). Estudio Comparativo De Los Diferentes Métodos Utilizados Para La Predicción De Intensidades Máximas De Precipitación Para El Diseño Adecuado De Estructuras Hidraulicas. *SABER. Revista Multidisciplinaria Del Consejo de Investigación de La Universidad de Oriente*, 18(2), 189–196.
- Gómez, N., & Vargas, K. (2019). Diseño de obras d mitigación y encauzamiento mediante

modelaciones hidráulicas e hidrológicas para disminuir la condición por vulnerabilidad de inundaciones en un tramo de 3 km de río comprendido en la cuenca media baja del río corredor. <https://repositoriotec.tec.ac.cr/handle/2238/11295>

Guerra, F., & Julio, G. (2002). Caracterización morfométrica de la cuenca de la quebrada La Bermeja, San Cristóbal, Estado Táchira, Venezuela. <https://www.redalyc.org/pdf/360/36070208.pdf>

Guillén, F., & Novao, A. (2018). Desarrollo de una estación agro-meteorológica automática remota para el levantamiento de información climática en la cuenca río Pisque. <http://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/5081/1/UPS-CYT00109.pdf>

Guzmán, I., Villagra, K., & Watson, F. (2017). Modelación Hidrodinámica y Morfológica del Río La Estrella, Limón Período : https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/9154/Modelacion_hidrodinamica_morfologica_rio_la_estrella.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Hobouchian, M. P. (2015). Estimaciones de precipitación por satélite en el área Subtropical de Sudamérica : análisis y validación. Universidad e Buenos Aires. https://bibliotecadigital.exactas.uba.ar/download/seminario/seminario_nATM000002_Hobouchian.pdf

Ibáñez, S., Moreno, H., & Gisbert, J. (2010). Morfología de las cuencas hidrográficas. Universidad Politécnica de Valencia, 12. [https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/10782/Morfología de una cuenca.pdf](https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/10782/Morfología%20de%20una%20cuenca.pdf)

Ibáñez, Sara, Morenz, H., & Gisbert, J. M. (2011). Valores del Número de curva (cálculo de la escorrentía). 11. <http://riunet.upv.es/handle/10251/10783?locale-attribute=ca>

Jiménez, J. M., Herrera, A. S., & Rojas, W. S. (2002). Fuentes de varianza e índices de varianza. Universidad de Costa Rica, 2(2), 70–74. <https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/pem/article/view/398/389>

Jorquera, E., Reina, S., & Weber, J. (2012). Revisión del estado del arte en la modelación

hidrológica distribuida e integrada. 1° Encuentro de Investigadores En Formación En Recursos Hídricos, October 2014, 18.

Lagos, M., & Rubio, E. (2015). Modelación de hidrogramas de crecidas usando proyecciones de precipitaciones diarias del modelo climático MK3.6. Universidad de Chile.

Lavao, S., & Corredor, J. (2014). Aplicación De La Teoría Del Número De Curva (Cn) a Una Cuenca De Montaña. Caso De Estudio: Cuenca Del Río Murca, Mediante La Utilización De Sistemas De Información Geográfica. Universidad Militar Nueva Granada, 10(2), 1–48. [https://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/handle/10654/13331/Trabajo de Grado Sergio Lavao.pdf?sequence=1](https://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/handle/10654/13331/Trabajo%20de%20Grado%20Sergio%20Lavao.pdf?sequence=1)

Lazarte, E. (2002). SIG de la cuenca del río Puyango Tumbes para la gestión de recursos hídricos. 157. http://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/123456789/1171/ICI_086.pdf?sequence=1

Naranjo, J. (2014). Uso de sistemas de información geográfico en la determinación de amenazas por inundación en el Municipio de Chía. 85(1), 2071–2079. [https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/1569/1/Uso_SIG_determinación_ame nazas_inundación_Chía.pdf](https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/1569/1/Uso_SIG_determinación_ame_nazas_inundación_Chía.pdf)

Ordóñez, J. (2011). ¿Qué Es Cuenca Hidrológica ? Sociedad Geológica de Lima, 1, 1–44. http://www.gwp.org/Global/GWP-SAM_Files/Publicaciones/Varios/Cuenca_hidrologica.pdf

Paniagua, F. (2016). Análisis hidrológico e hidráulico de inundaciones en la Quebrada Valverde de Grecia. <http://repositorio.sibdi.ucr.ac.cr:8080/jspui/handle/123456789/3880>

Parra, L., Rodríguez, A., Beltrán, M., Onofre, G., Bueno, A., López, T., & Uribe, N. (2005). Modelo de simulación, sistema de producción bovino doble propósito. https://repository.agrosavia.co/bitstream/handle/20.500.12324/17150/41453_41414.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Pascual, J. A., & Díaz, M. (2016). Guía Práctica sobre la Modelización Hidrológica y el Modelo

- HEC-HMS. In Información tecnológica (Vol. 29, Issue 4).
[https://www.agua.imdea.org/sites/default/files/pdf/news/20161215/Cuadernos de Geomática 4_b.pdf](https://www.agua.imdea.org/sites/default/files/pdf/news/20161215/Cuadernos%20de%20Geomática%204_b.pdf)
- Pizarro, R., Flores, J., Sangüesa, C., & Martínez, E. (n.d.). Leyes de distribución de procesos hidrológicos. Módulo I.
http://eias.entalca.cl/Docs/pdf/Publicaciones/manuales/a_modulo_leyes.pdf
- Ramírez, J. L. (2015). Alternativas de manejo sustentable de la subcuenca del río Pitura, provincia de Imbabura, Ecuador. Universidad Nacional de La Plata, Argentina, 136.
http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/49801/Documento_completo.pdf-PDFA-U.pdf?sequence=3
- Ramos, L. (2013). Estudio de la utilidad de la lluvia estimada de satélite en la modelación hidrológica distribuida. [https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/27548/Estudio de la utilidad de la lluvia estimada de sat% E9lite en la modelaci% F3n hidrol% F3gica distribuida 5598_5599.pdf?sequence=11](https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/27548/Estudio%20de%20la%20utilidad%20de%20la%20lluvia%20estimada%20de%20sat%E9lite%20en%20la%20modelaci%F3n%20hidrol%F3gica%20distribuida%205598_5599.pdf?sequence=11)
- Ravelo, L., & Santa, A. (2000). Estimación de las precipitaciones utilizando información satelital y terrestre en la provincia de Córdoba (Argentina). *Agriscientia*, 17(0), 21–27.
<https://doi.org/10.31047/1668.298x.v17.n0.2621>
- Repretel. (2017). Luvias causan estragos en Ciudad Cortés.
<https://www.repretel.com/noticia/lluvias-causan-estragos-en-ciudad-cortes/>
- Rojas, N., MINAET, & IMN. (2011). Curvas de Intensidad Duración Frecuencia de algunas estaciones meteorológicas automáticas.
http://www.mag.go.cr/informacion/cursos_agua_pluvial/cidf_automaticas.pdf
- SENARA. (2017). Plan de inversión proyectos amparados a decretos de emergencia. 1–23.
- Umaña, B. E. (2014). Análisis hidrológico de la cuenca del río Toyogres utilizando el modelo HEC-HMS. 1–91. <http://hdl.handle.net/2238/6148>
- Ureña, F. (2011). Utilización de estaciones meteorológicas automáticas como nueva alternativa

para el registro y transmisión de datos. Posgrado y Sociedad de Revista Electronica Del Sistema de Estudios de Posgrado, 11, 33–49.

Villón, M. (2004). Hidrología (Primera ed). Editorial Tecnológica de Costa Rica

ANEXOS

Cuadro 5.1 Registro de datos de precipitación horaria de la estación 98002 de Palma Sur.

Mes/ Año	2008	2009	2010	2011	2014	2018
Enero	x	✓	✓	✓	✓	✓
Febrero	x	26	✓	✓	✓	1
Marzo	x	7	✓	✓	✓	1
Abril	x	✓	8	25	x	✓
Mayo	x	✓	x	✓	x	3
Junio	18	✓	x	7	9	3
Julio	✓	✓	x	✓	✓	✓
Agosto	✓	✓	x	✓	✓	✓
Setiembre	✓	✓	x	✓	✓	✓
Octubre	✓	✓	26	✓	✓	9
Noviembre	✓	✓	✓	✓	✓	x
Diciembre	✓	✓	✓	✓	✓	x

Cuadro 5.2 Y_n y S_n para ser utilizados en el análisis de distribución de frecuencia de Gumbel.

Nº de datos	Y_n	S_n
84	0.5576	1.1976
86	0.5588	1.1980
88	0.5583	1.1994
80	0.5586	1.2007
92	0.5589	1.2020
94	0.5592	1.2032
96	0.5595	1.2044
98	0.5598	1.2055
100	0.5600	1.2065
150	0.5646	1.2253
200	0.5672	1.2360

Fuente: (Aguilar, 2015)

Cuadro 5.3 Test de Kolmogorov-Smirnov como prueba de bondad de ajuste en función del nivel de significancia (α) y el número de datos (n).

$\alpha \backslash n$	0,20	0,10	0,05	0,02	0,01	0,005	0,002	0,001
40	0,16547	0,118913	0,21012	0,23494	0,25205	0,26803	0,28772	0,30171
41	0,16349	0,18687	0,20760	0,23213	0,24904	0,26482	0,28429	0,29811
42	0,16158	0,18468	0,20517	0,22941	0,24613	0,26173	0,28097	0,29465
43	0,15974	0,18257	0,20283	0,22679	0,24332	0,25857	0,27778	0,29130
44	0,15623	0,18051	0,20056	0,22426	0,24060	0,25587	0,27468	0,28802
45	0,15623	0,17856	0,19837	0,22181	0,23798	0,25308	0,27169	0,28493
46	0,15457	0,17665	0,19625	0,21944	0,23544	0,25038	0,26880	0,28190
47	0,15295	0,17481	0,19420	0,21715	0,23298	0,24776	0,26600	0,27896
48	0,15139	0,17301	0,19221	0,21493	0,23059	0,24523	0,26328	0,27611
49	0,14987	0,17128	0,19028	0,21281	0,22832	0,24281	0,26069	0,27339
50	0,14840	0,16959	0,18841	0,21068	0,22604	0,24039	0,25809	0,27067

Fuente:(Aparicio, 1989)

Cuadro 5.4 Distribución F de Fisher para un nivel de significancia de 0,05.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	161,4	199,5	215,7	224,6	230,2	234,0	236,8	238,9	240,5	241,9
2	18,51	19,00	19,16	19,25	19,30	19,33	19,35	19,37	19,39	19,40
3	10,13	9,55	9,28	9,12	9,01	8,94	8,89	8,84	8,81	8,79
4	7,71	6,94	6,59	6,39	6,26	6,16	6,16	6,09	6,04	5,91
5	6,61	5,79	5,41	5,19	5,05	4,95	4,88	4,82	4,77	4,74
6	5,99	5,14	4,76	4,53	4,39	4,28	4,21	4,15	4,10	4,06
7	5,59	4,74	4,35	4,12	3,97	3,87	3,79	3,73	3,68	3,64
8	5,22	4,46	4,07	3,84	3,69	3,58	3,50	3,44	3,39	3,35
9	5,32	4,26	3,86	3,63	3,48	3,37	3,29	3,23	3,18	3,14
10	4,96	4,10	3,71	3,48	3,33	3,22	3,14	3,07	3,02	2,98
11	4,84	3,98	3,59	3,36	3,20	3,09	3,01	2,95	2,90	2,85
12	4,75	3,89	3,49	3,26	3,11	2,99	2,91	2,85	2,80	2,75
13	4,67	3,81	3,41	3,18	3,03	2,92	2,83	2,77	2,71	2,67

14	4,60	3,74	3,34	3,11	2,93	2,85	2,76	2,70	2,65	2,60
15	4,54	3,68	3,29	3,06	2,90	2,79	2,71	2,64	2,59	2,54
16	4,49	3,63	3,24	3,01	2,85	2,74	2,66	2,59	2,54	2,49
17	4,45	3,59	3,20	2,97	2,81	2,70	2,61	2,55	2,49	2,45
18	4,41	3,56	3,16	2,93	2,77	2,66	2,58	2,51	2,46	2,41
19	4,38	3,52	3,13	2,90	2,74	2,63	2,54	2,48	2,42	2,38
20	4,35	3,49	3,10	2,87	2,71	2,60	2,51	2,45	2,39	2,35
21	4,32	3,47	3,07	2,84	2,68	2,57	2,49	2,42	2,37	2,32
22	4,30	3,44	3,05	2,82	2,66	2,55	2,46	2,40	2,34	2,30
23	4,28	3,42	3,03	2,80	2,64	2,53	2,44	2,38	2,32	2,28
24	4,26	3,40	3,01	2,78	2,62	2,51	2,42	2,36	2,30	2,26
25	4,24	3,39	2,10	2,76	2,60	2,49	2,41	2,34	2,27	2,22
26	4,22	3,37	2,98	2,74	2,58	2,47	2,39	2,32	2,27	2,22
27	4,21	3,35	2,96	2,73	2,57	2,46	2,37	2,31	2,25	2,20
28	4,20	3,34	2,95	2,71	2,56	2,45	2,36	2,29	2,24	2,19
29	4,18	3,33	2,94	2,70	2,55	2,43	2,35	2,28	2,22	2,18
30	4,17	3,32	2,92	2,70	2,53	2,42	2,33	2,27	2,21	2,17
31	4,16	3,31	2,91	2,68	2,52	2,41	2,32	2,26	2,00	2,15
32	4,15	3,30	2,90	2,67	2,51	2,40	2,31	2,24	2,19	2,14
33	4,14	3,28	2,89	2,66	2,50	2,39	2,29	2,23	2,18	2,13
34	4,13	3,28	2,88	2,65	2,49	2,38	2,28	2,23	2,17	2,12
35	4,12	3,27	2,87	2,64	2,48	2,37	2,27	2,22	2,16	2,11
40	4,08	3,23	2,84	2,61	2,45	2,34	2,25	2,17	2,12	2,08
60	4,00	3,15	2,76	2,53	2,37	2,25	2,17	2,10	2,04	2,00
80	3,96	3,11	2,72	2,49	2,33	2,21	2,13	2,06	2,00	1,95
90	3,95	3,10	2,71	2,47	2,31	2,20	2,11	2,04	1,99	1,94
100	3,94	3,09	2,70	2,46	2,29	2,19	2,10	2,03	1,97	1,93
120	3,92	3,07	2,68	2,45	2,29	2,18	2,09	2,02	1,96	1,91
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	161,4	199,5	215,7	224,6	230,2	234,0	236,8	238,9	240,5	241,9
2	18,51	19,00	19,16	19,25	19,30	19,33	19,35	19,37	19,39	19,40
3	10,13	9,55	9,28	9,12	9,01	8,94	8,89	8,84	8,81	8,79
4	7,71	6,94	6,59	6,39	6,26	6,16	6,16	6,09	6,04	5,91
5	6,61	5,79	5,41	5,19	5,05	4,95	4,88	4,82	4,77	4,74
6	5,99	5,14	4,76	4,53	4,39	4,28	4,21	4,15	4,10	4,06

7	5,59	4,74	4,35	4,12	3,97	3,87	3,79	3,73	3,68	3,64
8	5,22	4,46	4,07	3,84	3,69	3,58	3,50	3,44	3,39	3,35
9	5,32	4,26	3,86	3,63	3,48	3,37	3,29	3,23	3,18	3,14
10	4,96	4,10	3,71	3,48	3,33	3,22	3,14	3,07	3,02	2,98
11	4,84	3,98	3,59	3,36	3,20	3,09	3,01	2,95	2,90	2,85
12	4,75	3,89	3,49	3,26	3,11	2,99	2,91	2,85	2,80	2,75
13	4,67	3,81	3,41	3,18	3,03	2,92	2,83	2,77	2,71	2,67
14	4,60	3,74	3,34	3,11	2,93	2,85	2,76	2,70	2,65	2,60
15	4,54	3,68	3,29	3,06	2,90	2,79	2,71	2,64	2,59	2,54
16	4,49	3,63	3,24	3,01	2,85	2,74	2,66	2,59	2,54	2,49
17	4,45	3,59	3,20	2,97	2,81	2,70	2,61	2,55	2,49	2,45
18	4,41	3,56	3,16	2,93	2,77	2,66	2,58	2,51	2,46	2,41
19	4,38	3,52	3,13	2,90	2,74	2,63	2,54	2,48	2,42	2,38
20	4,35	3,49	3,10	2,87	2,71	2,60	2,51	2,45	2,39	2,35
21	4,32	3,47	3,07	2,84	2,68	2,57	2,49	2,42	2,37	2,32
22	4,30	3,44	3,05	2,82	2,66	2,55	2,46	2,40	2,34	2,30
23	4,28	3,42	3,03	2,80	2,64	2,53	2,44	2,38	2,32	2,28
24	4,26	3,40	3,01	2,78	2,62	2,51	2,42	2,36	2,30	2,26
25	4,24	3,39	2,10	2,76	2,60	2,49	2,41	2,34	2,27	2,22
26	4,22	3,37	2,98	2,74	2,58	2,47	2,39	2,32	2,27	2,22
27	4,21	3,35	2,96	2,73	2,57	2,46	2,37	2,31	2,25	2,20
28	4,20	3,34	2,95	2,71	2,56	2,45	2,36	2,29	2,24	2,19
29	4,18	3,33	2,94	2,70	2,55	2,43	2,35	2,28	2,22	2,18
30	4,17	3,32	2,92	2,70	2,53	2,42	2,33	2,27	2,21	2,17
31	4,16	3,31	2,91	2,68	2,52	2,41	2,32	2,26	2,00	2,15
32	4,15	3,30	2,90	2,67	2,51	2,40	2,31	2,24	2,19	2,14
33	4,14	3,28	2,89	2,66	2,50	2,39	2,29	2,23	2,18	2,13
34	4,13	3,28	2,88	2,65	2,49	2,38	2,28	2,23	2,17	2,12
35	4,12	3,27	2,87	2,64	2,48	2,37	2,27	2,22	2,16	2,11
40	4,08	3,23	2,84	2,61	2,45	2,34	2,25	2,17	2,12	2,08
60	4,00	3,15	2,76	2,53	2,37	2,25	2,17	2,10	2,04	2,00
80	3,96	3,11	2,72	2,49	2,33	2,21	2,13	2,06	2,00	1,95
90	3,95	3,10	2,71	2,47	2,31	2,20	2,11	2,04	1,99	1,94
100	3,94	3,09	2,70	2,46	2,29	2,19	2,10	2,03	1,97	1,93

Fuente:(Chúa, 2017)

Resultados generados para el cálculo del número de curva.

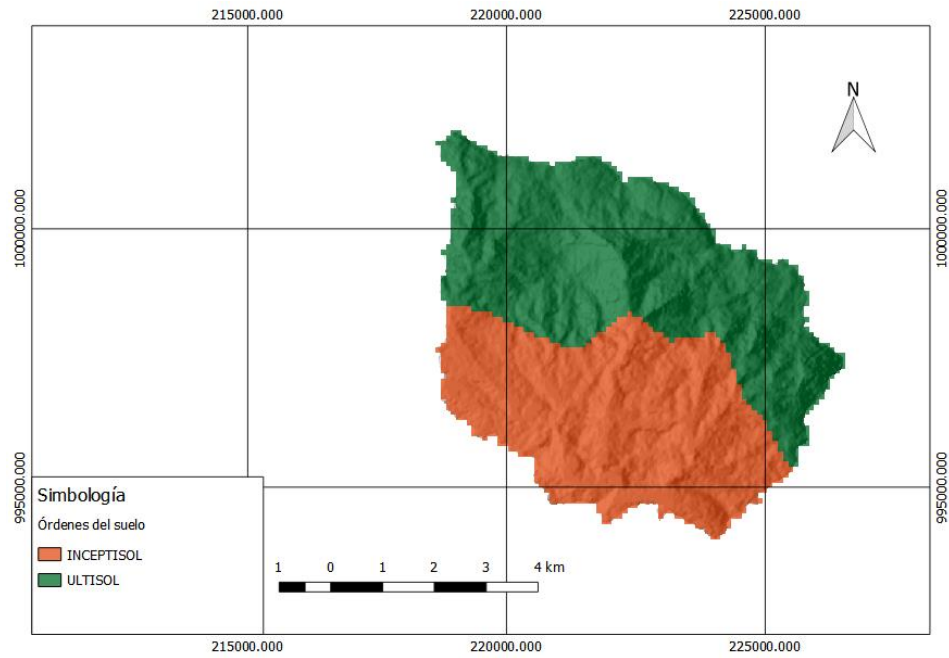


Figura 5.1 Orden del suelo de la subcuenca del río Balsar

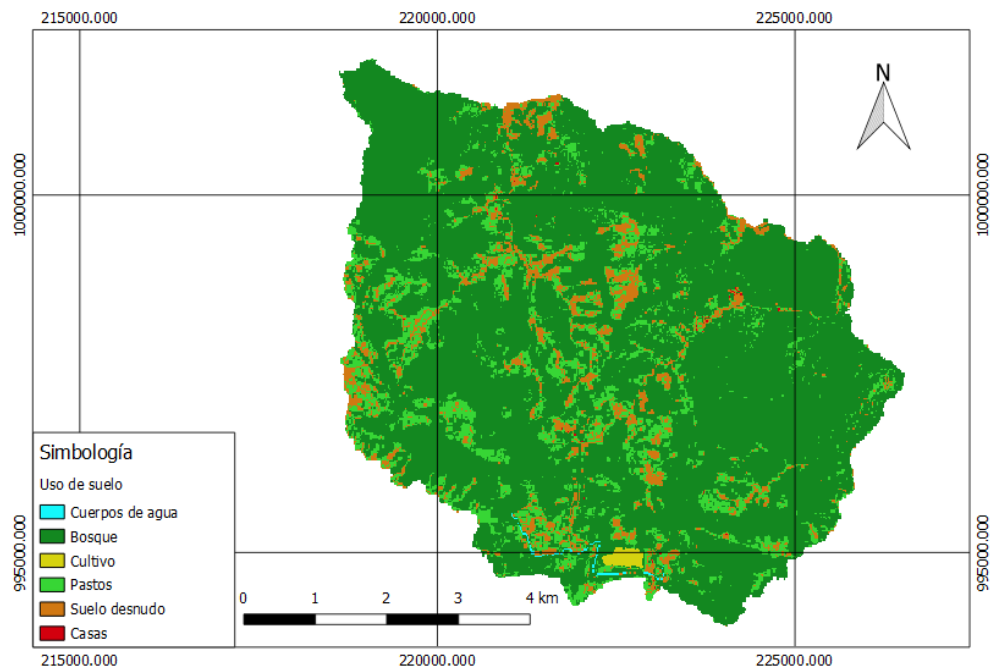


Figura 5.2 Uso de suelo de la subcuenca del río Balsar.

Resultados generados para el coeficiente de escorrentía (Método Racional)

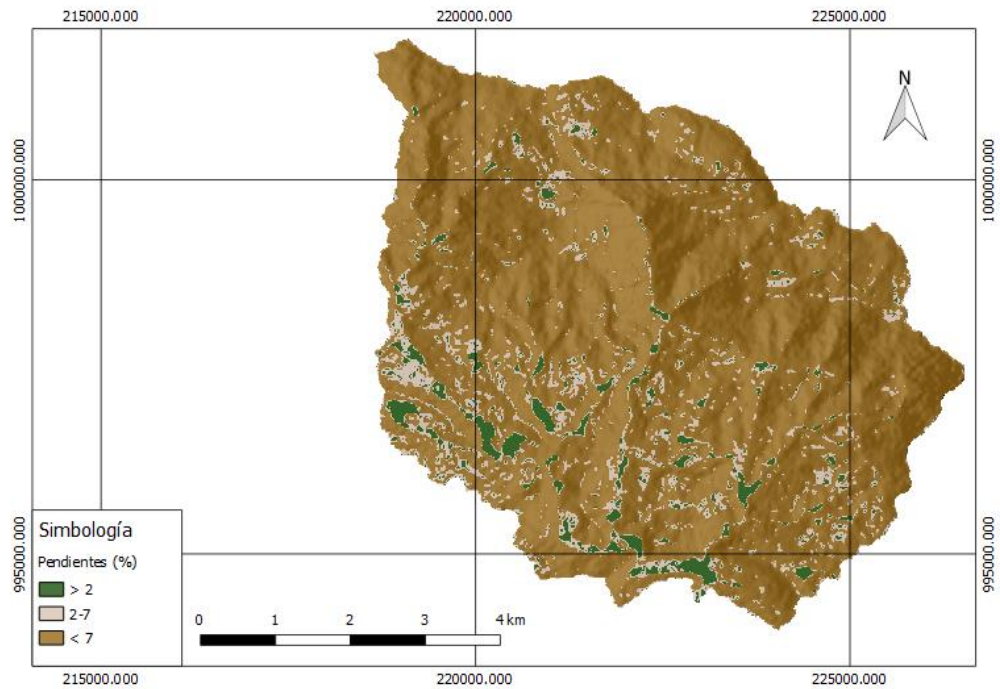


Figura 5.3 Pendientes reclasificadas para determinar el coeficiente de escorrentía.

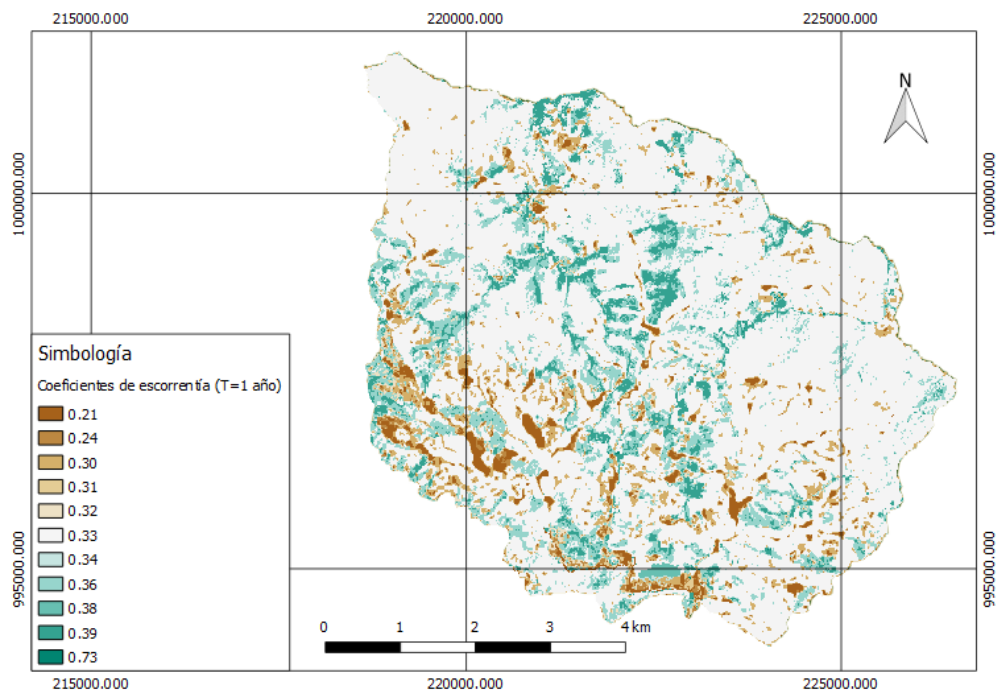


Figura 5.4 Coeficientes de escorrentía para un periodo de retorno de 1 año

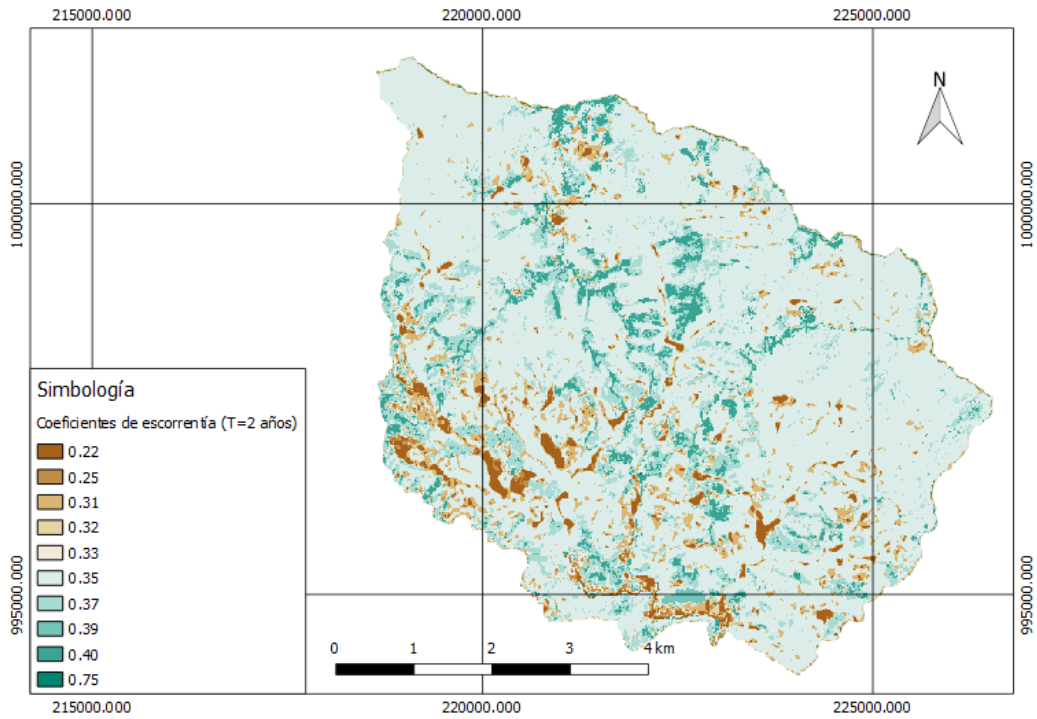


Figura 5.5 Coeficientes de escorrentía para un periodo de retorno de 2 años

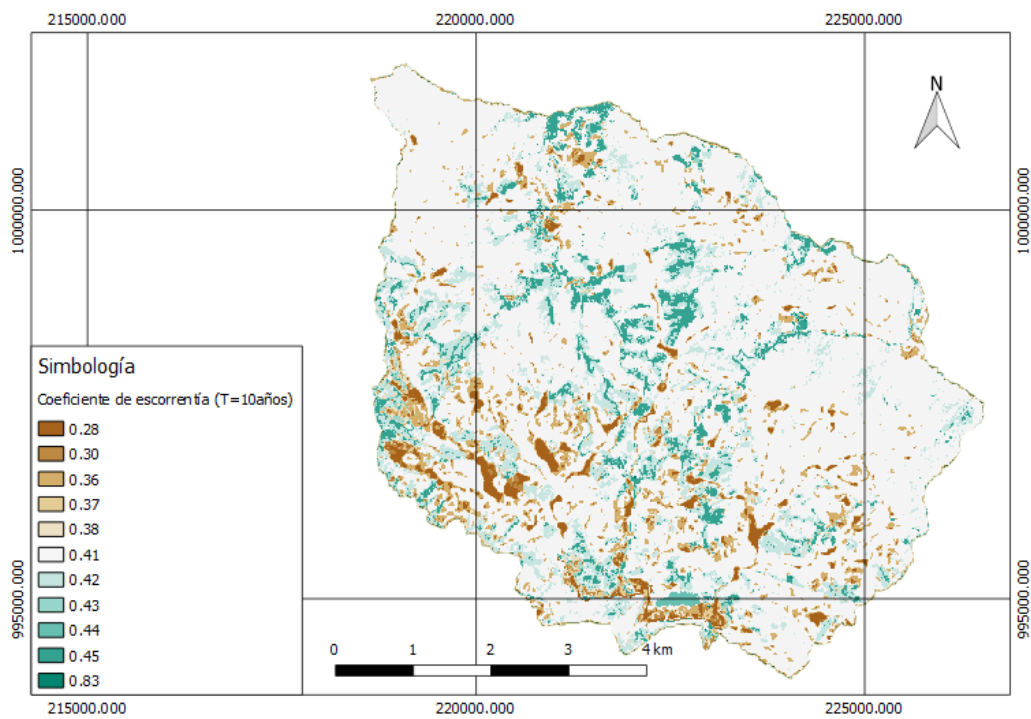


Figura 5.6 Coeficientes de escorrentía para un periodo de retorno de 10 años

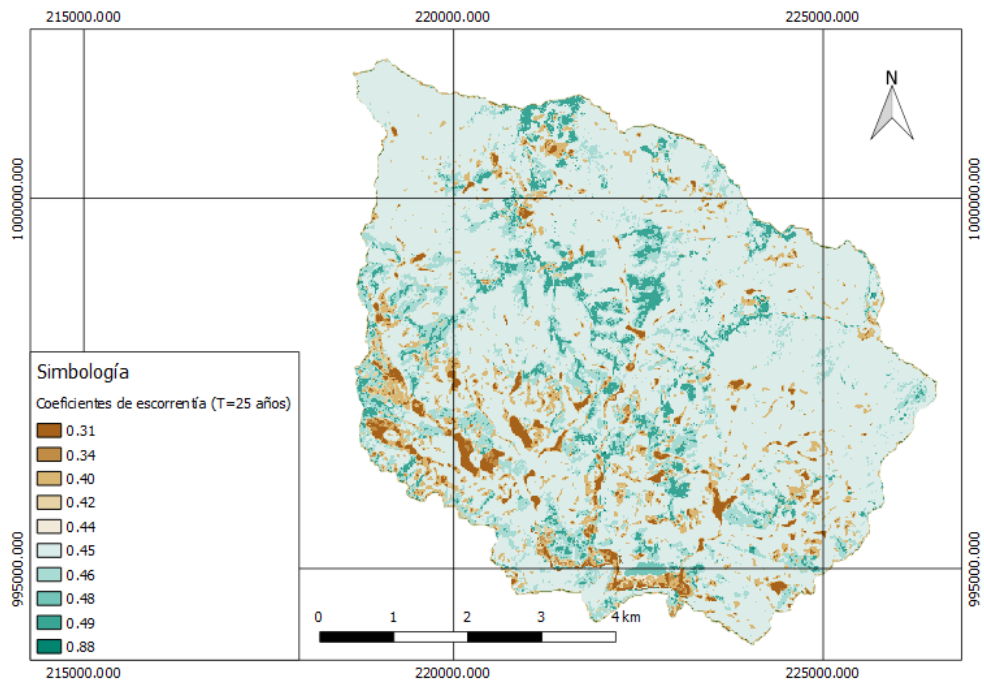


Figura 5.7 Coeficientes de escorrentía para un periodo de retorno de 25 años

Resultados generados para el método Mac Math

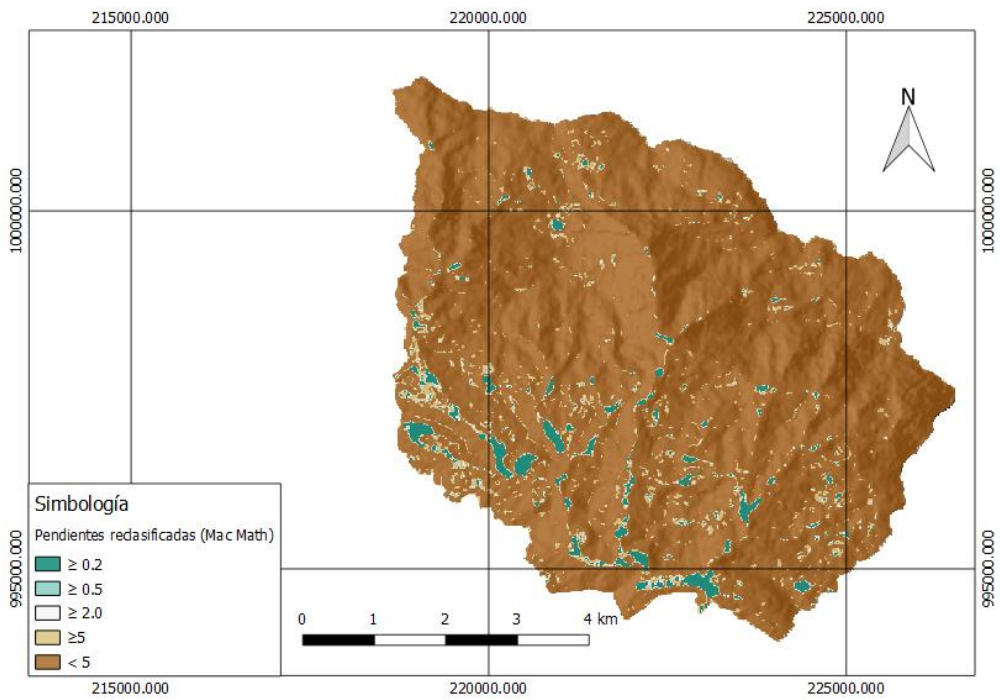


Figura 5.8 Pendientes reclasificadas para obtención del coeficiente de escorrentía compuesto

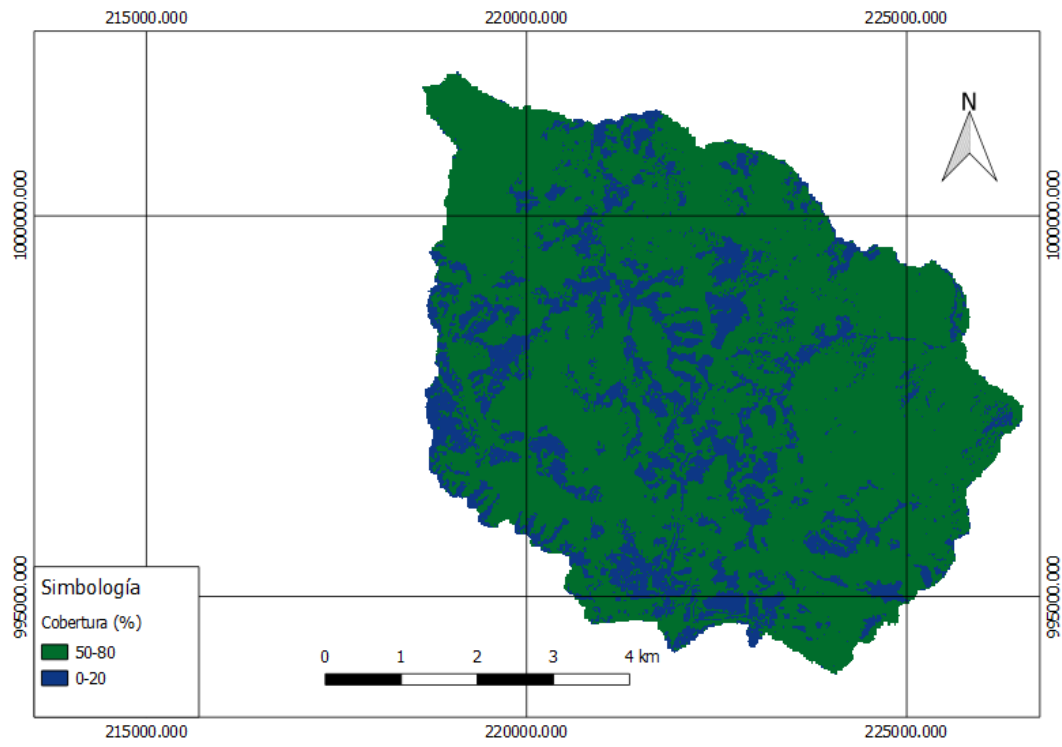


Figura 5.9 Porcentajes de cobertura de la cuenca para determinar el coeficiente de escorrentía compuesto