



UNIVERSIDAD DE CUENCA
FACULTAD DE INGENIERIA
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL

**ESTUDIO HIDROMETEOROLÓGICO Y ANÁLISIS DE CAUDALES DE
CRECIENTES EN LA CUENCA HIDROGRÁFICA DEL RÍO CATARAMA**

Tesis previa

a la obtención del

Título de Ingeniero Civil

AUTORES:

Ana Belén Vintimilla Sarmiento

Jenny Patricia Zhungo Ordóñez

DIRECTOR:

Ing. Felipe Eduardo Cisneros Espinoza, PhD

TUTOR:

Ing. Cristian Iván Coello Granda, MSc

Cuenca – Ecuador

2013



ESTUDIO HIDROMETEOROLÓGICO Y ANÁLISIS DE CAUDALES DE CRECIENTES EN LA CUENCA HIDROGRÁFICA DEL RÍO CATARAMA

RESUMEN

El desarrollo de la presente tesis consta de un estudio climatológico e hidrológico de la cuenca hidrográfica del río Catarama, para un área de 3729 km² determinada en el programa ArcGIS 10.1 con cartografía de la provincia de Los Ríos escala 1:50000.

Dentro del capítulo uno se realizó un análisis de parámetros meteorológicos como nubosidad, heliofanía, humedad relativa, temperatura máxima y mínima, temperatura media y determinación de evapotranspiración de referencia por el método de Penman - Monteith. También se determinó la precipitación media para la cuenca elaborando mapas de isoyetas mensual y anual en el programa ArcGIS 10.1. Por último, se obtuvo la precipitación máxima con las distribuciones de Gumbel y Log normal para varios periodos de retorno.

En el capítulo dos se obtuvieron hidrogramas de máxima crecida mediante el programa HEC-HMS 3.4 para 5, 10, 25, 50 y 100 años de periodo de retorno elaborados en base a las características del método SCS, puesto que este método presenta mayor exactitud en sus resultados ya que considera parámetros que están en función de las características físicas de la cuenca y de la cantidad de lluvia.

Adicionalmente, el Capítulo 2 contiene el tema de sedimentología como parte del estudio hidrológico, en el que se determinaron la cantidad de sólidos suspendidos para la estación de Zapotal en Lechugal en base a la relación sedimentos - caudal y curvas de duración, obtenidas también en esta tesis, y transporte de fondo aplicando las fórmulas de Meyer - Peter, Meyer Peter y Müller, y Schoklitsch.

Palabras clave: parámetros meteorológicos, mapas de isoyetas, precipitación máxima, hidrogramas de máxima crecida, sedimentología.

ABSTRACT

The development of the present thesis contains the climatologic and hydrological study of the Catarama river basin, which area is 3729 km²; this area has been determined using Arcgis 10.1 and maps of the province of Los Ríos.

Chapter 1 has an analysis of climatological parameters such as cloudiness, sunshine duration, relative humidity, maximum and minimum air temperature, mean temperature and the calculation of the reference evapotranspiration by means of the Penman – Montheith method. Also the average precipitation for the basin has been determined by monthly and annual isohyete maps made with Arcgis 10.1. Finally, the maximum precipitation was obtained by Gumbel and Log normal probability distributions for different return periods.

In chapter 2 was obtained the stream discharge hydrograph using HEC – HMS 3.4 for return periods of 5, 10, 25, 50 and 100 years by SCS methodology, because this method gives a better accuracy in results for the reason that it considers parameters that are in function of the physical characteristics of the basin and the rainfall.

Beside, chapter 2 contains the subject of sedimentology, as fact of the hydrological study where were determined the quantity of suspended solids for Zapotal en Lechugal station based on the sediment – waterflow equation and flow duration curves, obtained in this thesis too, and bed – load transport by Meyer – Peter, Meyer – Peter and Müller, and Schoklitsch formulas.

Key words: climatological parameters, isohyete maps, maximum precipitation, stream discharge hydrograph, sedimentology.



CONTENIDO

RESUMEN	2
ABSTRACT	3
AGRADECIMIENTO.....	16
DEDICATORIA.....	17
CAPITULO 1	18
1.INTRODUCCIÓN	18
1.1. Antecedentes	18
1.2. Alcance	18
1.3. Justificación.....	19
1.4. Metodología.....	19
1.5. Objetivos	20
1.5.1. Objetivo General	20
1.5.2. Objetivos específicos	20
CAPITULO 2	22
2.ESTUDIO CLIMATOLÓGICO.....	22
2.1. Disponibilidad de información	22
2.1.1. Recopilación de información	22
2.1.2. Ubicación de estaciones representativas de la cuenca	26
2.2. Parámetros meteorológicos.....	27
2.2.1. Nubosidad.....	27
2.2.2. Horas del sol	28
2.2.3. Humedad relativa	29
2.2.4. Viento	30
2.2.5. Temperatura	31
2.2.6. Evapotranspiración de referencia.....	34
2.3. Análisis de precipitaciones	39



2.3.1.	Precipitaciones medias mensuales	39
2.3.2.	Precipitación media de la Cuenca	41
2.4.	Determinación del mapa de isoyetas anual y mensual	43
2.5.	Precipitación máxima en 24 Horas en estaciones representativas	44
2.5.1.	Análisis de la calidad de la información: Bondad de ajuste	44
2.5.2.	Distribución de probabilidad de diseño	45
2.5.3.	Precipitación máxima para varios periodos de retorno	52
2.5.4.	Trazado de isoyetas para precipitación máxima en 24 horas para la zona del proyecto	54
CAPÍTULO 3		56
3. ESTUDIO HIDROLÓGICO		56
3.1.	Recopilación de información	56
3.2.	Propiedades geomorfológicas de la cuenca de interés	56
3.3.	Datos hidrológicos	57
3.4.	Procesamiento de la información	58
3.4.1.	Calidad de la información: Doble masa, análisis de correlación ..	58
3.4.2.	Relleno de la información faltante	61
3.4.3.	Caudales medios	63
3.4.4.	Caudales específicos	63
3.5.	Curvas de duración	65
3.6.	Curvas de variación estacional	66
3.7.	Caudales máximos empleando análisis estadístico:	
	Bondad de ajuste	68
3.7.1.	Análisis de caja	68
3.7.1.1.	Distribución de probabilidad de diseño	70
3.8.	Caudales máximos con el uso del modelo hidrológico HEC-HMS	72
3.8.1.	Requerimientos y componentes del modelo HEC-HMS	72
3.8.2.	Análisis de alternativas	73



3.8.3.	Parámetros de diseño	80
3.8.4.	Hietograma de diseño	84
3.8.5.	Hidrograma de diseño	89
3.8.6.	Caudales de diseño para 100 – 50 – 25 – 10 - 5 años de periodo de retorno	91
3.8.7.	Caudales de diseño en sitios de obra	93
3.9.	Estudio de sedimentos	95
3.9.1.	Aforos líquidos y sólidos	95
3.9.2.	Curva de Gasto sólido.....	97
3.4.4.	Sólidos en suspensión en sitios de aforo	98
3.4.5.	Transporte de sedimentos de fondo.....	100
3.4.6.	Determinación de la producción de sedimentos en el río Zapotal	108
3.4.7.	Análisis y discusión de resultados.....	109
CAPITULO 4		110
4.CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES GENERALES		110
4.4.	Conclusiones.....	110
4.5.	Recomendaciones.....	112
CAPITULO 5		114
5.BIBLIOGRAFIA		114
ANEXOS		116



INDICE DE TABLAS

Tabla 2.1	Estaciones y parámetros meteorológicos recopilados.....	23
Tabla 2.2	Estaciones empleadas para análisis de precipitaciones.....	24
Tabla 2.3	Estaciones meteorológicas representativas de la cuenca.	26
Tabla 2.4	Nubosidad (Octas).	28
Tabla 2.5	Horas de sol.....	29
Tabla 2.6	Humedad relativa (%).	30
Tabla 2.7	Velocidad del viento (km/h).	31
Tabla 2.8	Temperatura máxima absoluta (°C).	32
Tabla 2.9	Temperatura mínima absoluta (°C).	33
Tabla 2.10	Temperatura media (°C).	34
Tabla 2.11.	Evapotranspiración: Método de Penman- Monteith para estación Pichilingue.	37
Tabla 2.12.	Evapotranspiración: Método de Hargreaves para estación Pichilingue.....	38
Tabla 2.13	Precipitación media mensual en mm.	40
Tabla 2.14	Precipitación media de la cuenca (mm).	42
Tabla 2.15	Años de información utilizados en pruebas de bondad de ajuste.....	45
Tabla 2.16	Parámetros estadísticos de las estaciones de control.....	47
Tabla 2.17	Resultados prueba de bondad de ajuste.....	51
Tabla 2.18	Precipitación máxima en 24 horas en mm para varios periodos de retorno.....	53
Tabla 2.19	Precipitación máxima de diseño en 24 horas (mm).....	55
Tabla 3.1	Estaciones hidrológicas empleadas.	56
Tabla 3.2	Propiedades geomorfológicas de la cuenca de interés.	57
Tabla 3.3	Estaciones hidrológicas y series disponibles de información.	57
Tabla 3.4	Tabla de resumen caudales medios y específicos.	64



Tabla 3.5	Caudales medios diarios (m ³ /s) con probabilidad de excedencia para la estación Zapotal en Catarama.	66
Tabla 3.6	Caudales medios diarios (m ³ /s) con probabilidad de excedencia para la estación Zapotal en Lechugal.....	67
Tabla 3.7	Resultados del análisis de caja.	69
Tabla 3.8	Parámetros estadísticos de la estación H346.	70
Tabla 3.9	Resultados prueba de bondad de ajuste para caudales máximos instantáneos.	71
Tabla 3.10	Caudales máximos teórico obtenido mediante distribución Log normal.....	71
Tabla 3.11	Grupos hidrológicos de suelo.....	77
Tabla 3.12	Condiciones de humedad antecedente.....	77
Tabla 3.13	Estimación del número de curva de escorrentía para condiciones de humedad II.....	79
Tabla 3.14	Proceso de cálculo de CN para subcuenca del río Calabí.	83
Tabla 3.15	Número de curva para cada subcuenca.	83
Tabla 3.16	Parámetros de diseño para el método SCS.....	84
Tabla 3.17	Relaciones Intensidad-Duración- Frecuencia para estación Pichilingue M006.	86
Tabla 3.18	Valores calculados para la construcción del Hietograma (TR = 50 años).....	87
Tabla 3.19	Precipitación de diseño para la cuenca del río Catarama (mm).	89
Tabla 3.20	Parámetros del hidrograma triangular unitario SCS para cada subcuenca.	90
Tabla 3.21	Caudales máximos de crecida en la salida de la cuenca para varios períodos de retorno.....	92
Tabla 3.22	Puntos de captación.	93
Tabla 3.23	Caudales de diseño en puntos de captación (m ³ /s).	93
Tabla 3.24	Resultado de aforos líquidos y de sólidos en suspensión. Estación Zapotal en Lechugal (H346).....	96
Tabla 3.25	Sólidos en suspensión.	99



Tabla 3.26	Sección transversal para modelación en HEC – RAS.....	103
Tabla 3.27	Arrastre de fondo según fórmula de Meyer – Peter para Zapotal en Lechugal.....	105
Tabla 3.28	Arrastre de fondo según fórmula de Meyer – Peter y Müller para Zapotal en Lechugal.....	106
Tabla 3.29	Arrastre de fondo según fórmula de Schoklitsch para Zapotal en Lechugal.....	107
Tabla 3.30	Producción de sedimentos en ton/ día en la cuenca del río Zapotal (en sitio Zapotal en Lechugal).....	108

INDICE DE FIGURAS

Figura 2.1	Ubicación de estaciones representativas en la cuenca del río Catarama.	27
Figura 2.2	Esquema de mapa de isoyetas.	41
Figura 2.3	Mapa de isoyetas anual para la cuenca del río Catarama.	43
Figura 2.4	Mapa de isoyetas de precipitación máxima en 24 horas (TR=50años).	54
Figura 3.1	Curva de doble masa Catarama – Zapotal.	59
Figura 3.2	Curva de correlación Zapotal – Lechugal.	60
Figura 3.3	Curva de correlación Lechugal - Zapotal.	61
Figura 3.4	Caudales diarios rellenados para Lechugal.	62
Figura 3.5	Caudales diarios rellenados para Zapotal.	62
Figura 3.6	Curvas de duración para Zapotal en Catarama y Zapotal en Lechugal.	65
Figura 3.7	Curva de variación estacional para estación Zapotal en Catarama.	67
Figura 3.8	Curvas de variación estacional para estación Zapotal en Lechugal.	68
Figura 3.9	Curvas del método SCS.	76
Figura 3.10	Distribución de subcuencas y elementos para modelación en HEC – HMS.	81
Figura 3.11	Mapa de uso de suelo.	82
Figura 3.12	Relaciones ITR/IdTR para la estación Pichilingue M006. Rectificación.	85
Figura 3.13	Curvas IDF para estación Pichilingue M006.	86
Figura 3.14	Hietograma de diseño (TR = 50 años).	87
Figura 3.15	Forma del hidrograma unitario SCS.	90
Figura 3.16	Hidrograma de máxima crecida en la salida de la cuenca del río Zapotal (en sitio Zapotal en Lechugal)	91
Figura 3.17	Hidrogramas de máxima crecida para diferentes periodos de retorno.	92



Figura 3.18	Hidrograma y hietograma en el punto de presa Lechugal (TR = 50 años).....	94
Figura 3.19	Hidrograma y hietograma en el punto de presa Aguacatal (TR = 50 años).....	94
Figura 3.20	Hidrograma y hietograma en el punto de trasvase Calabí (TR = 50 años).....	95
Figura 3.21	Curva de gasto sólido para la estación de Zapotal en Lechugal (H346).	98
Figura 3.22	Granulometría Zapotal.	104



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Fundada en 1867

Yo, Ana Belén Vintimilla Sarmiento, autor de la tesis "Estudio hidrometereológico y análisis de caudales en la cuenca hidrográfica del río Catarama", reconozco y acepto el derecho de la Universidad de Cuenca, en base al Art. 5 literal c) de su Reglamento de Propiedad Intelectual, de publicar este trabajo por cualquier medio conocido o por conocer, al ser este requisito para la obtención de mi título de Ingeniero Civil. El uso que la Universidad de Cuenca hiciere de este trabajo, no implicará afección alguna de mis derechos morales o patrimoniales como autor.

Cuenca, 21 de Octubre de 2013


Ana Belén Sarmiento Vintimilla
CI: 010394177-9

Cuenca Patrimonio Cultural de la Humanidad. Resolución de la UNESCO del 1 de diciembre de 1999

Av. 12 de Abril, Ciudadela Universitaria, Teléfono: 405 1000, Ext.: 1311, 1312, 1316

e-mail cdjbv@ucuenca.edu.ec casilla No. 1103

Cuenca - Ecuador



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Fundada en 1867

Yo, Ana Belén Vintimilla Sarmiento, autor de la tesis "Estudio hidrometereológico y análisis de caudales en la cuenca hidrográfica del río Catarama", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor/a.

Cuenca, 21 de Octubre de 2013



Ana Belén Vintimilla Sarmiento
CI: 0103941779

Cuenca Patrimonio Cultural de la Humanidad. Resolución de la UNESCO del 1 de diciembre de 1999

Av. 12 de Abril, Ciudadela Universitaria, Teléfono: 405 1000, Ext.: 1311, 1312, 1316

e-mail cdjbv@ucuenca.edu.ec casilla No. 1103

Cuenca - Ecuador




UNIVERSIDAD DE CUENCA

Fundada en 1867

Yo, Jenny Patricia Zhungo Ordoñez, autor de la tesis "Estudio hidrometereológico y análisis de caudales en la cuenca hidrográfica del río Catarama", reconozco y acepto el derecho de la Universidad de Cuenca, en base al Art. 5 literal c) de su Reglamento de Propiedad Intelectual, de publicar este trabajo por cualquier medio conocido o por conocer, al ser este requisito para la obtención de mi título de Ingeniero Civil. El uso que la Universidad de Cuenca hiciere de este trabajo, no implicará afección alguna de mis derechos morales o patrimoniales como autor.

Cuenca, 21 de Octubre de 2013


Jenny Patricia Zhungo Ordoñez
CI: 190062319-8

Cuenca Patrimonio Cultural de la Humanidad. Resolución de la UNESCO del 1 de diciembre de 1999

Av. 12 de Abril, Ciudadela Universitaria, Teléfono: 405 1000, Ext.: 1311, 1312, 1316

e-mail cdjbv@ucuenca.edu.ec casilla No. 1103

Cuenca - Ecuador



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Fundada en 1867

Yo, Jenny Patricia Zhungo Ordoñez, autor de la tesis “Estudio hidrometereológico y análisis de caudales en la cuenca hidrográfica del río Catarama”, certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor/a.

Cuenca, 21 de Octubre de 2013

Jenny Patricia Zhungo Ordoñez
CI: 190062319-8

Cuenca Patrimonio Cultural de la Humanidad. Resolución de la UNESCO del 1 de diciembre de 1999

Av. 12 de Abril, Ciudadela Universitaria, Teléfono: 405 1000, Ext.: 1311, 1312, 1316

e-mail cdjbv@ucuenca.edu.ec casilla No. 1103

Cuenca - Ecuador



AGRADECIMIENTO

Agradezco a los amigos y familia que han estado presentes en la realización de esta tesis y que han estado junto a mi mostrando su apoyo y cariño.

Un agradecimiento especial al Ing. Cristian Coello, tutor de esta tesis, quien con sus conocimientos ha sabido guiarnos de la mejor forma.

A mi compañera de tesis, Jenny, ya que no solo es una compañera de trabajo sino una gran amiga.

Ana Belén

Agradecimiento a cada uno de los que son parte de mi familia a mi madre, mi padre, a mis hermanos y a todos mis tíos; por siempre haberme dado su fuerza y apoyo que me han ayudado y llevado hasta donde estoy ahora.

Un agradecimiento especial para nuestro tutor de tesis, Ing. Cristian Coello, quién nos ha brindado todo su conocimiento y esfuerzo para la realización de esta tesis.

A mi compañera de tesis Anita, quien ha estado junto a mí en las largas jornadas de trabajo.

Jenny



DEDICATORIA

Dedicado especialmente a mi madre y mi abuela, gracias a su esfuerzo he podido llegar a esta meta.

A Valentina, por tu paciencia y apoyo incondicional durante mis estudios y ahora en la realización de esta tesis y sobre todo por todo el cariño que me das.

A Esteban, por todo tu amor y apoyo que me hacen ser alguien mejor.

Ana Belén

A mis padres Esthela y Luis, por ser el pilar más importante y quienes han estado a lo largo de mi vida velando por mi bienestar y educación, brindándome todo su apoyo en cada momento.

A mi hermana Karolina, por toda su paciencia y cariño.

A toda mi familia y amigos en especial.

Jenny



CAPITULO 1

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

El proyecto Control del Agua de la provincia de Los Ríos “PACALORI” es una iniciativa que surgió con el fin de proveer de agua para riego a una extensión de aproximadamente 170 000 has mediante la implementación de obras hidráulicas, a partir de un conjunto de presas y trasvases que permitan la regulación del agua de riego en verano. El área del proyecto se ubica en la parte central de la provincia, entre los ríos Zapotal, Vinces y Macul, ya que por sus características constituyen un sector agrícola de gran importancia para Ecuador.

Este proyecto realizará también el control de crecientes en el área del proyecto en los ríos Vinces, Calabi-Zapotal y Macul, motivados por el incremento del caudal en los ríos de la zona en época de invierno.

La UNIVERSIDAD DE CUENCA a través del PROMAS “Programa de Manejo del Agua y el Suelo”, firmó contrato con la SENAGUA para ejecutar los estudios de consultoría que intervienen en todas las fases del proyecto.

1.2. Alcance

Esta tesis desarrolla el “Estudio hidrometeorológico y análisis de caudales de crecientes en la cuenca hidrográfica del río Catarama”, debido a que este río se forma de la unión de ríos importantes para el proyecto como son: Calabi, Zapotal que luego toma el nombre de Catarama y afluentes como Lechugal, Pueblo Viejo, Aguacatal donde se tiene previsto la implantación de presas y trasvases como objetivos fundamentales de proyecto. El tema propuesto se desarrollará durante los estudios de pre – factibilidad y factibilidad del proyecto PACALORI.



El estudio preciso de la climatología de la cuenca permitirá a partir de valoraciones estadísticas la implementación y validación del modelo hidrológico HEC - HMS y consecuentemente la obtención de hidrogramas de diseño requeridos para los diseños de obras hidráulicas así como para análisis de inundaciones.

1.3. Justificación

La abundancia de agua en ciertas zonas y, por el contrario, la escasez en otras durante la época seca en la provincia de Los Ríos constituye un problema de especial importancia para la población. Un factor directamente relacionado con dicho problema es la tala indiscriminada de bosques tropicales debido al aumento de la frontera agrícola.

Para disminuir la problemática se efectuará la distribución del agua mediante estructuras hidráulicas como los trasvases. Por lo que mediante esta tesis se determinarán el caudal de creciente y estimación de producción de sedimentos del río Zapotal; los cuales son influenciados por diversos parámetros meteorológicos.

La información obtenida servirá principalmente para la fase de factibilidad del proyecto PACALORI, para así contribuir en los diseños definitivos de las obras hidráulicas que se construirán en este río en las etapas posteriores.

1.4. Metodología

La formulación del tema de tesis presenta la siguiente metodología:

- Recopilación de información hidrometeorológica a partir de registros históricos de las estaciones de control dentro y fuera de la cuenca hidrográfica del río Zapotal.
- Estudio climatológico completo con la caracterización de las precipitaciones medias, máximas en la cuenca de estudio y elaboración de líneas isoyetas; completando con los demás parámetros para el cálculo de la evapotranspiración.



- Obtención de parámetros e índices hidrológicos para la implementación del modelo matemático, aplicación de Sistemas de información geográfica para cálculo de modelo digital del terreno.
- Implementación del modelo matemático HEC HMS para el análisis hidrológico del río Zapotal con la determinación de crecientes, determinando los hidrogramas para diferentes periodos de retorno y para varios puntos de diseño.
- Estimación de la producción de sedimentos en los ríos de interés del sistema hidrográfico del río de estudio a partir de información histórica y el empleo de ecuaciones existentes para el objetivo planteado.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo General

El Objetivo es el “Estudio hidrometeorológico y análisis de caudales de crecientes en la cuenca hidrográfica del río Catarama” mediante la implementación del modelo hidrológico HEC HMS para la valoración de crecientes en sitios específicos de esta cuenca enmarcado dentro del proyecto Control del Agua de la provincia del Los Ríos “PACALORI”.

1.5.2. Objetivos específicos

- Recopilar, revisar y analizar la información disponible de instituciones públicas y privadas de la red hidrológica y meteorológica de estaciones que pertenezcan a la zona de estudio para determinar la consistencia y confiabilidad de la misma, y en caso de requerirse se corregirá y complementarán datos faltantes.
- Determinar los parámetros meteorológicos y morfométricos de interés que afectan a la cuenca de estudio con la aplicación del GIS para



realizar el análisis de precipitaciones y establecer la precipitación máxima para varios períodos de retorno.

- Establecer caudales máximos con el uso del modelo hidrológico HEC HMS, con los cuales se definirán caudales de diseño para 100, 50, 25, 10, 5 años de período de retorno en sitios de medición, caudales de diseño en sitios de obras.
- Cuantificar la producción de sedimentos en suspensión y arrastre de fondo en sitios de aforo y determinar los sedimentos esperados en sitios previstos de obras.

CAPITULO 2

2. ESTUDIO CLIMATOLÓGICO

2.1. Disponibilidad de información

El estudio climatológico contemplado en esta tesis corresponde al análisis de los principales parámetros que regulan el comportamiento climático de la cuenca en estudio. La información disponible, se encuentra en los anuarios meteorológicos publicados por el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI). Los cuales, que se pueden encontrar en formato digital e impreso, contienen datos históricos de heliofanía, temperatura, humedad relativa, punto de rocío, tensión de vapor, precipitación, evaporación, nubosidad y velocidad del viento.

La cartografía para el análisis espacial de la cuenca del río Catarama es la que dispone el departamento de Geomática del PROMAS-UNIVERSIDAD DE CUENCA.

2.1.1. Recopilación de información

Para la recopilación de información se identificaron en total 20 estaciones meteorológicas ubicadas dentro y en las cercanías de la cuenca de estudio, posteriormente se revisaron las series históricas de los parámetros climatológicos que cada una contiene.

De estas estaciones, solo 8 son climatológicas completas y se utilizaron para el análisis de parámetros meteorológicos y de las cuales se extrajo la siguiente información: nubosidad, horas de sol, humedad relativa, velocidad del viento, temperaturas absolutas máximas y mínimas, temperatura media. Las estaciones empleadas con los periodos de información disponible para cada parámetro se muestran en la Tabla 2.1.



Tabla 2.1 Estaciones y parámetros meteorológicos recopilados.

Estación	Código	Heliofanía	Temperatura del aire a la sombra (°c)			Humedad relativa (%)			Nubosidad	Velocidad
		(horas)	Absolutas		Me d i a				Media	Media
			Máxima	Mínima	Mensual	Máxima	Mínima	Media	(Octas)	(Km/h)
Pichilingue	M006	1972 - 2010	1972 - 2010	1972 - 2010	1972 - 2010	1984 - 2010	1984 - 2010	1972 - 2010	1972 - 2005	1984 - 2010
Pilalo	M122		1991 - 1994, 2005 - 2010	1991 - 1994, 2005 - 2010	1991 - 1994, 2005 - 2010	1991 - 1995, 2000, 2007 - 2009	1991 - 1995, 2007, 2008	1991 - 2001, 2005 - 2010	1990 - 2010	-
El Corazón	M123	2006 - 2008	1972 - 2010	1975 - 2008	1972 - 2008	1984 - 2008	1984 - 2008	1972 - 2008	1972 - 2008	1984 - 1985, 2001, 2006 - 2008
San Juan La Maná	M124	1972 - 1986, 1990, 1991, 1994 - 2001	1972 - 1991, 1994 - 1996, 2000 - 2008	1972 - 1975, 1977 - 1991, 1994, 1998 - 2008	1972 - 1991, 1994 - 2008	1984 - 1991, 1994 - 2008	1984 - 1991, 1994 - 2008	1972 - 1991, 1994 - 2008	1972 - 2008	-
Caluma	M129	2009, 2010	1990 - 1995, 2006 - 2010	1990 - 1995, 2006 - 2010	1991 - 1995, 2006 - 2010	1991 - 1995, 2008, 2009	1991 - 1995, 2008, 2009	1991 - 1995, 2006 - 2009	1991 - 1995, 2006 - 2010	-
Cayapas	M154		-	-	-	-	-	1990 - 2010	1990 - 2010	-
Pueblo Viejo	M172	1988	1980, 1985 - 2008	1980, 1985 - 2008	1980, 1985 - 2008	1980, 1985 - 2008	1980, 1985 - 2008	1980, 1985 - 2008	1981, 1988 - 2008	1987, 1988, 1991 - 2008
Calamaca	MA1Y	1990 - 1992, 1999, 2001, 2009, 2010	-	-	-	-	-	1990 - 1992, 1999, 2001 - 2010	1990 - 1992, 1999, 2001 - 2010	1990 - 1992, 1999, 2001 - 2010

Fuente: Anuarios meteorológicos INAMHI

Elaboración: Vintimilla A., Zhungo J.

El análisis de precipitaciones está dividido en dos partes: la primera que es la elaboración de mapas de isoyetas anual y mensuales, para lo que se emplearon la totalidad de estaciones e información de precipitación media mensual. La segunda, que es el análisis de precipitaciones máximas en 24 horas, donde se usaron 12 estaciones. Las estaciones empleadas con los periodos de información disponible para cada parámetro se muestran en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2 Estaciones empleadas para análisis de precipitaciones.

Estación	Código	Precipitación	
		Media Mensual (mm)	Máxima en 24 hrs (mm)
Pichilingue	M006	1947 - 2010	1959 – 2010
Pilalo	M122	1990 - 2010	1990 - 1997, 2000, 2001, 2003 – 2008
El Corazón	M123	1972 - 2010	1972 -2010
San Juan La Maná	M124	1972 -2010	1972 - 1991, 1994 – 2008
Caluma	M129	1990 - 1995, 2006 - 2010	1990 - 1995, 2006 – 2008
Cayapas	M154	1982 - 2008	1990 – 2010
Pueblo Viejo	M172	1980, 1981, 1985 - 2008	1980, 1981, 1985 – 2010
Pinllopata	M367	1972 - 1993, 1996, 2003 - 2010	-
Moraspungo - Cotopaxi	M368	1964 -2010	1963 - 1978, 1991 -1994, 2002 – 2010

Tabla 2.2 (Continuación) Estaciones empleadas para análisis de precipitaciones.

Estación	Código	Precipitación	
		Media Mensual (mm)	Máxima en 24 hrs (mm)
Cusubamba	M369	1990 -2010	1990 - 2001, 2005 – 2010
Ramón Campana	M370	1972 - 2010	-
Echeandía	M383	1972 - 2010	-
Salinas – Bolívar	M385	1970 - 1987, 1990 - 2003, 2006 - 2010	-
Ventanas INAMHI	M465	1972 - 2010	-
Mocache	M470	1976 - 2010	1990 - 2003, 2007 – 2010
Zapotal Los Ríos	M471	1972 - 1987, 1991 - 2010	-
El Triunfo	M789	1984 - 1994, 1996 - 2008	-
Solano	M906	1990 -1995, 1999, 2000, 2006	-
Laguacoto	MA37	1994, 2007 - 2011	-
Calamaca	MA1Y	1991, 1992, 1997 - 2010	1990 - 1992, 1997 - 2006, 2010

Fuente: Anuarios meteorológicos INAMHI**Elaboración: Vintimilla A., Zhungo J.**

De la información meteorológica recopilada de las estaciones que se encuentran en la zona predominante del proyecto PACALORI, se debe indicar que la estación meteorológica Pichilingue (M006) es la más representativa en lo que se refiere al tipo de clima; debido a que esta estación contiene información completa de cada uno de los parámetros que regulan el clima.

2.1.2. Ubicación de estaciones representativas de la cuenca

Se ubicaron en total 20 estaciones meteorológicas representativas dentro de la cuenca y fuera de ella. En la Tabla 2.3 se presentan cuales son estas y las características de cada una de ellas.

Tabla 2.3 Estaciones meteorológicas representativas de la cuenca.

Código	Estación	Coordenadas		Elevación	Tipo	Provincia
		UTM-X (m)	UTM-Y (m)			
M006	Pinchilingue	671166	9878374	120	AP	Los Ríos
M122	Pívalo	723122	9895639	2504	CO	Cotopaxi
M123	El Corazón	714141	9874601	1471	CO	Cotopaxi
M124	San Juan La Maná	695231	9898665	215	CO	Esmeraldas
M129	Caluma	689892	9820862	350	CO	Los Ríos
M154	Cayapas	726776	9905131	55	CO	Cotopaxi
M172	Pueblo Viejo	662236	9832155	19	CO	Cotopaxi
MA1Y	Calamaca	742485	9858358	3437	CO	Cotopaxi
M367	Pinllopata	719644	9873829	2259	PV	Cotopaxi
M368	Moraspungo-Cotopaxi	697781	9869942	409	PV	Cotopaxi
M369	Cusubamba	756050	9882037	2990	PV	Bolívar
M370	Ramón Campana	712967	9876537	1462	PV	Bolívar
M383	Echeandia	690311	9842333	308	PV	Los Ríos
M385	Salinas_Bolívar	720488	9844766	3600	PV	Los Ríos
M465	Ventanas-Inamhi	670711	9840319	52	PV	Los Ríos
M470	Mocache	667545	9869868	80	PV	Manabí
M471	Zapotal-Los Ríos	687194	9850413	140	PV	Los Ríos
M789	El Triunfo	685463	9904168	140	PV	Bolívar
M906	Solano	728310	9883869	3820	PV	Tungurahua
MA37	Laguacoto	722692	9821446	2622	CO	Los Ríos

Fuente: Anuarios meteorológicos INAMHI

Elaboración: Vintimilla A., Zhungo J.

Figura 2.1 Ubicación de estaciones representativas en la cuenca del río Catarama.



En la sección 2.1.2 se explicó que para el estudio climatológico se recopiló información de un total de 8 estaciones meteorológicas, pero se debe señalar que los valores representativos para la zona del proyecto y empleados en los cálculos corresponden a la estación Pichilingue (M006).

En los anuarios meteorológicos del Instituto Nacional de Hidrología y Meteorología – INAMHI, se define a la nubosidad como la “fracción de bóveda terrestre cubierta por la totalidad de nubes visibles, se divide a la bóveda celeste en octavos llamados octas”. En la Tabla 2.4 se presentan los valores

de nubosidad recopilados y procesados a nivel mensual de las estaciones de control de la cuenca en estudio.

Tabla 2.4 Nubosidad (Octas).

Mes	Pichilingue	Píalo	El Corazón	San Juan La Maná	Cayapas	Caluma	Pueblo Viejo	Calamaca
	M006	M122	M123	M124	M129	M154	M172	MA1Y
Ene	7.1	6.8	6.7	6.4	5.8	7.2	7.2	5.3
Feb	7.1	6.8	6.9	6.2	5.5	7.2	7.3	2.1
Mar	6.8	6.9	6.4	6.1	5.4	7.4	7.0	6.2
Abr	6.7	6.8	6.3	6.1	5.2	7.4	7.0	6.1
May	6.8	6.2	5.8	6.3	5.6	7.5	7.1	6.1
Jun	6.6	5.5	4.9	6.5	5.7	7.6	7.1	6.4
Jul	6.6	5.0	4.2	6.4	5.5	7.4	7.3	6.2
Ago	6.2	5.0	4.1	6.4	5.6	7.4	7.2	6.4
Sep	6.6	5.0	4.5	6.5	5.5	7.6	7.4	5.9
Oct	6.8	5.7	4.6	6.5	5.8	7.3	7.1	5.4
Nov	6.8	5.5	5.2	6.6	5.9	7.6	7.1	5.3
Dic	6.9	6.2	6.1	6.4	6.0	7.7	7.0	5.5
Media	6.7	5.9	5.5	6.4	5.6	7.4	7.1	5.6

Fuente: Anuarios meteorológicos INAMHI

Elaboración: Vintimilla A., Zhungo J.

La nubosidad media anual es de 6.3 octas, valor que corresponde a una media global calculado con las 8 estaciones mencionadas. Según este valor se puede decir que la nubosidad media es alta.

2.2.2. Horas del sol

Las horas de sol o heliofanía, son “el tiempo de duración del brillo solar”. Las unidades para expresarlas son las horas y minutos de brillo solar (Anuario meteorológico INAMHI, 2002)

La Tabla 2.5 contiene los valores mensuales promedios de la serie disponible obtenidos para heliofanía.

Tabla 2.5 Horas de sol.

Mes	Pichilingue	El Corazón	San Juan La Maná	Cayapas	Pueblo Viejo	Calamaca
	M006	M123	M124	M129	M172	MA1Y
Ene	70.6	10.1	48.6	19.1	40.6	144.1
Feb	79.3	27.1	52.1	25.8	88.6	109.2
Mar	111.2	30.2	78.8	13.8	117.9	121.1
Abr	109.3	38.2	70.8	18.2	90.4	125.0
May	83.2	53.1	48.7	43.6	58.5	121.4
Jun	59.0	93.5	42.5	40.2	25.5	93.7
Jul	60.3	130.1	55.4	36.8	32.2	108.1
Ago	69.8	136.4	52.3	45	50.6	89.9
Sep	67.2	108.3	43.8	33.4	48.3	143.5
Oct	56.5	112.5	40.7	21.8	47.1	149.4
Nov	56.6	66.5	39.2	16.5	76.5	158.9
Dic	64.7	45.2	43.9	11.1	74.7	156.4
Media	74.0	70.9	51.4	27.1	62.6	126.7
Suma	887.6	850.9	616.8	325.1	750.9	1520.5

Fuente: Anuarios meteorológicos INAMHI

Elaboración: Vintimilla A., Zhungo J.

Por día se pueden esperar hasta 12 horas de sol, lo que significaría que las horas de sol posibles en un año son 4000 aproximadamente. De acuerdo a los valores de la suma anual, que son 1520 horas, se determina que las horas reales de sol son pocas, lo que también tiene que ver con que la nubosidad media es alta.

2.2.3. Humedad relativa

Es la relación entre la presión de vapor real y la de saturación, la cual se expresa en porcentaje (%). La humedad relativa se relaciona con la presión de vapor y la temperatura. (Aparicio, 1989)

En la Tabla 2.6 se presenta la humedad relativa media expresada en porcentaje (%) para las 8 estaciones seleccionadas.

Tabla 2.6 Humedad relativa (%).

Mes	Pichilingue	Pívalo	El Corazón	San Juan La Maná	Cayapas	Caluma	Pueblo Viejo	Calamaca
	M006	M122	M123	M124	M129	M154	M172	MA1Y
Ene	84.8	96.0	96.0	90.5	91.2	87.7	87.7	87.1
Feb	86.2	95.9	95.9	90.0	90.5	87.9	88.7	86.2
Mar	85.3	95.5	95.5	89.1	88.1	87.3	88.5	86.9
Abr	85.8	95.4	95.4	89.7	91.1	87.6	88.8	125.0
May	85.9	94.8	94.8	91.1	90.9	88.0	89.0	87.4
Jun	86.5	93.2	93.2	91.9	91.9	88.4	88.8	88.6
Jul	85.2	92.7	92.7	91.5	91.3	88.3	88.9	87.7
Ago	83.2	92.0	92.0	90.8	90.8	88.2	88.8	88.7
Sep	80.3	92.5	92.5	89.7	89.7	87.9	87.6	88.3
Oct	79.5	93.1	93.1	89.7	90.4	87.5	87.0	86.8
Nov	78.0	93.6	93.6	85.3	91.0	87.2	86.6	87.1
Dic	80.0	95.0	95.0	89.2	89.7	87.4	85.7	87.3
Media	83.4	94.1	94.1	89.9	90.5	87.8	88.0	90.6

Fuente: Anuarios meteorológicos INAMHI

Elaboración: Vintimilla A., Zhungo J.

Se puede observar que la humedad relativa media de cada una de las estaciones es mayor para los meses de Diciembre a Junio, debido a que corresponde a los meses de invierno y tiende a disminuir para los meses de Julio hasta Noviembre que son épocas de verano.

2.2.4. Viento

El viento es el aire en movimiento, se determina por la dirección o punto del horizonte desde donde sopla, y por su velocidad de la cual depende su mayor o menor fuerza. Las unidades en que se expresa la velocidad del viento son en metros por segundo (m/s) o kilómetros por hora (km/h). Generalmente, se le llama "viento" sólo al componente horizontal del movimiento del aire, pues el vertical casi siempre es muy pequeño. (Aparicio, 1989)

Los valores de la velocidad del viento que se presentan en la Tabla 2.7 corresponden solamente a tres puntos de control, debido a que en las demás estaciones no se dispone información de este parámetro.

Tabla 2.7 Velocidad del viento (km/h).

Mes	Pichilingue	Pueblo Viejo	Calamaca
	M006	M172	MA1Y
Ene	1.9	1.4	2.4
Feb	1.9	1.3	2.1
Mar	1.8	1.2	1.9
Abr	1.7	1.0	2.1
May	1.6	1.0	2.0
Jun	1.7	1.3	2.7
Jul	1.9	1.6	2.3
Ago	2.0	1.8	2.4
Sep	2.3	2.0	2.2
Oct	2.4	2.1	1.8
Nov	2.4	2.0	1.4
Dic	2.1	1.8	2.2
Media	2.0	1.6	2.1

Fuente: Anuarios meteorológicos INAMHI

Elaboración: Vintimilla A., Zhungo J.

La velocidad del viento será mayor de acuerdo a la altitud en la que se encuentra ubicada la estación, por tal razón se puede observar que en la estación Calamaca (3437 msnm) se tiene un velocidad de 2.1 km/h; que es mayor a los valores medios de las otras dos estaciones que están localizadas en zonas más planas. Dando así una velocidad media de 2 km/h aproximadamente para la cuenca.

2.2.5. Temperatura

La temperatura es un elemento climático que indica lo caliente o fría que se encuentra la atmósfera. El análisis de la temperatura es de gran importancia dentro del estudio de una cuenca debido a que esta variable climática tiene

alta incidencia en el proceso de la evapotranspiración como también en los procesos del balance del ciclo hidrológico y demanda de agua dentro de una cuenca hidrográfica.

Los datos de temperatura corresponden al valor señalado en un termómetro expuesto al aire y que está protegido de la radiación solar directa. La unidad de medición son los grados centígrados y décimas de grados. (Anuarios INAMHI)

2.2.5.1. Temperatura máxima y mínima

a) Temperatura máxima

Es la temperatura más elevada en el transcurso de un intervalo determinado de tiempo. En la Tabla 2.8 se presentan los valores de temperatura máxima mensual de cada estación de control. Los valores calculados son la media de los valores de temperatura de todos los años de registro.

Tabla 2.8 Temperatura máxima absoluta (°C).

Mes	Pichilingue	Píllalo	El Corazón	San Juan La Maná	Cayapas	Caluma	Pueblo Viejo	Calamaca
	M006	M122	M123	M124	M129	M154	M172	MA1Y
Ene	33.2	19.8	22.3	31.3	30.6	32.3	33.4	18.1
Feb	33.1	19.4	22.3	31.3	30.8	32.0	33.1	18.0
Mar	33.6	18.6	23.3	31.8	31.7	31.5	33.5	18.4
Abr	33.6	20.3	23.3	32.0	31.6	33.0	33.6	17.0
May	33.0	20.7	23.4	31.2	30.9	30.2	33.0	16.5
Jun	32.2	19.7	23.6	30.4	30.7	31.0	32.0	16.7
Jul	31.7	20.4	23.7	30.1	29.8	31.5	32.1	16.8
Ago	32.6	20.4	24.0	30.7	30.3	30.7	31.7	17.2
Sep	33.7	20.2	24.0	31.3	31.3	31.2	32.4	18.6
Oct	33.7	20.5	24.0	31.1	31.8	32.8	32.9	18.1
Nov	34.1	19.9	24.0	30.3	31.5	31.7	33.3	22.4
Dic	34.1	20.0	23.5	31.4	31.2	31.9	33.7	19.7
Media	33.2	20.0	23.4	31.1	31.0	31.6	32.9	18.1

Fuente: Anuarios meteorológicos INAMHI

Elaboración: Vintimilla A., Zhungo J.

b) Temperatura mínima

Corresponde a la temperatura más baja en el transcurso de un intervalo de tiempo determinado. En la Tabla 2.9 se indican los valores de temperatura mínima de la cuenca en estudio. Los valores se obtuvieron de la misma forma que para temperatura máxima.

Tabla 2.9 Temperatura mínima absoluta (°C).

Mes	Pichilingue	Pilalo	El Corazón	San Juan La Maná	Cayapas	Caluma	Pueblo Viejo	Calamaca
	M006	M122	M123	M124	M129	M154	M172	MA1Y
Ene	20.5	5.9	13.8	18.9	15.3	18.4	20.2	1.5
Feb	20.9	7.5	14.1	18.9	18.7	17.9	21.3	1.9
Mar	20.8	7.7	14.4	18.6	19.0	17.8	21.3	1.4
Abr	21.0	8.1	14.2	18.8	19.5	18.1	21.5	2.1
May	20.4	7.6	14.0	18.6	19.1	18.5	20.9	1.9
Jun	19.3	6.0	13.7	17.9	16.4	17.5	18.9	1.8
Jul	18.3	6.5	13.3	17.6	15.9	17.9	17.9	0.4
Ago	17.9	6.3	13.1	17.2	16.9	18.2	17.5	1.1
Sep	18.7	6.2	13.2	17.5	16.7	17.2	17.3	0.0
Oct	19.0	6.6	13.2	17.8	17.3	17.7	19.1	0.5
Nov	19.0	5.9	13.3	17.5	17.2	18.7	19.6	1.2
Dic	19.7	5.8	13.4	18.2	18.1	17.6	19.7	19.7
Media	19.6	6.7	13.6	18.1	17.5	18.0	19.6	2.8

Fuente: Anuarios meteorológicos INAMHI

Elaboración: Vintimilla A., Zhungo J.

La variación de la temperatura está en función de la altitud en la que se ubica la estación, por lo que se pueden observar que los valores máximos están alrededor de 33°C, correspondiente a las estaciones localizadas en zonas más planas como Pichilingue (M006) y Pueblo Viejo (M172). Las temperaturas mínimas se registran en las estaciones de Calamaca (MA1Y) y Píalo (M122) cuya altitud sobrepasa los 2500 msnm.

2.2.5.2. Temperatura media

En la Tabla 2.10 se presentan los valores calculados para temperatura media ($^{\circ}\text{C}$), los cuales son la media de los valores de temperatura de todos los años de registro.

Para el análisis se han eliminado estaciones debido a que estas presentaban series de datos muy cortas e incontinuas. La temperatura media para la cuenca en estudio es de 23°C , los resultados para cada estación no presentan grandes fluctuaciones ya que no están ubicadas en cotas muy elevadas en sectores cercanos al proyecto PACALORI.

Tabla 2.10 Temperatura media ($^{\circ}\text{C}$).

Mes	Pichilingue	El Corazón	San Juan la Maná	Cayapas	Pueblo Viejo
	M006	M123	M124	M129	M172
Ene	25.2	17.5	24.3	23.9	26.3
Feb	25.5	17.7	24.8	24	26.5
Mar	25.9	18	25.2	24.6	27
Abr	25.9	18.1	25.2	24.8	27
May	25.4	18.2	24.7	24.3	26.5
Jun	24.3	18.3	23.6	23	25.6
Jul	23.6	18.1	23.2	22.5	25.1
Ago	23.6	18.1	23.2	22.3	25
Sep	24.2	18.3	23.3	22.6	25.4
Oct	24.5	18.2	23.3	22.7	25.8
Nov	24.9	18.1	23.6	22.6	26.1
Dic	25.3	17.8	24.1	23.7	26.5
Media	24.9	18	24	23.4	26.1

Fuente: Anuarios meteorológicos INAMHI

Elaboración: Vintimilla A., Zhungo J.

2.2.6. Evapotranspiración de referencia

La evapotranspiración (ET) es la combinación de dos procesos separados en donde se pierde agua de la superficie del suelo por la evaporación y por la transpiración del cultivo. La evaporación es el proceso que convierte el agua

líquida en vapor de agua para luego retirarse de la superficie evaporante. La transpiración consiste en la vaporización del agua líquida contenida en los tejidos de las plantas y su posterior remoción hacia la atmósfera.

La evapotranspiración de referencia (ET_o) es un parámetro relacionado con el clima que expresa el poder evaporante de la atmósfera, independientemente del tipo de desarrollo de cultivo, y de las prácticas de manejo. Debido a que la ET_o es un parámetro climático puede ser calculado a partir de datos meteorológicos.

Las ecuaciones que se emplean para la determinación de este parámetro son las de Penman-Monteith y Hargreaves. El método de Penman- Monteith se recomienda como el único procedimiento estándar para la definición y el cálculo de la evapotranspiración de referencia, esto es debido a que el método predice correctamente los valores de ET_o. Se requieren datos de radiación, temperatura del aire, humedad relativa y velocidad del viento.

La ecuación de Hargreaves necesita datos de temperatura máxima y mínima y valores de la radiación extraterrestre, la cual depende de la latitud y del mes. Esta ecuación tiene la tendencia a subestimar los valores de ET_o bajo condiciones de viento fuerte (velocidad mayor a 3 m/s) y a sobrestimar en condiciones cuando la humedad relativa es elevada. (FAO, 2006)

2.2.6.1. Ecuación Penman –Monteith

En 1948, Penman combinó el balance energético con el método de la transferencia de masa y derivó una ecuación para calcular la evaporación de una superficie abierta de agua a partir de datos climáticos estándar de horas sol, temperatura, humedad atmosférica y velocidad de viento. El método Penman-Monteith fue desarrollado haciendo uso de la definición del cultivo de referencia como un cultivo hipotético con una altura asumida de 0.12 m, con una resistencia superficial de 70 s m⁻¹ y un albedo de 0.23 y que representa a la evapotranspiración de una superficie extensa de pasto verde de altura uniforme, creciendo activamente y adecuadamente regado. La ecuación que derivó la FAO es la siguiente:

Ecuación 2.1

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)}$$

Donde,

ET_0 = Evapotranspiración de referencia (mm d^{-1});

R_n = Radiación neta en la superficie del cultivo ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$);

G = Densidad del flujo de calor en el suelo ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$);

T = Temperatura media del aire ($^{\circ}\text{C}$);

u_2 = Velocidad del viento (m s^{-1});

e_s = Presión de vapor de saturación (kPa);

e_a = Presión de vapor (kPa);

$e_s - e_a$ = Déficit de presión de vapor de saturación (kPa);

Δ = Pendiente de la curva de presión de vapor ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$);

γ = Constante psicrométrica ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$).

Los valores obtenidos de ET_0 con la ecuación antes descrita, son los que se presentan en la Tabla 2.11. En esta tabla se puede observar cada uno de los parámetros obtenidos para la aplicación de la ecuación de Penman- Monteith.

Tabla 2.11. Evapotranspiración: Método de Penman- Monteith para estación Pichilingue.

Mes	Ra	Rn	T	es-ea	G	u ₂	Eto	Eto *#días
	(MJ mm/d)	(MJ mm/d)	(°C)	(Kpa)	(MJ m ⁻² d ⁻¹)	(m/s)	(mm d ⁻¹)	(mm d ⁻¹)
Ene	36.6	10.5	25.2	1.1	1.1	0.5	3.2	95.2
Feb	37.7	11.5	25.5	1.0	1.2	0.5	3.4	101.4
Mar	38.0	13.5	25.9	1.0	1.4	0.5	3.9	117.4
Abr	36.6	12.8	25.9	1.1	1.3	0.5	3.7	111.6
May	34.4	10.5	25.4	1.0	1.1	0.4	3.1	92.3
Jun	33.0	8.8	24.3	0.9	0.9	0.5	2.6	78.0
Jul	33.5	8.9	23.6	0.9	0.9	0.5	2.7	79.8
Ago	35.4	10.0	23.6	1.1	1.0	0.6	3.0	90.9
Sep	37.1	10.4	24.2	1.2	1.0	0.6	3.3	97.7
Oct	37.6	9.9	24.5	1.3	1.0	0.7	3.2	95.3
Nov	36.7	9.6	24.9	1.4	1.0	0.7	3.2	94.8
Dic	36.0	9.9	25.3	1.3	1.0	0.6	3.1	94.4
							Suma	1148.8

Elaboración: Vintimilla A., Zhungo J.

2.2.6.2. Ecuación de Hargreaves

Hargreaves and Samani (1985) desarrollaron una ecuación simplificada que requiere sólo la temperatura, el día del año y la latitud para el cálculo de la ETo. A continuación se escribe la ecuación del método de Hargreaves.

Ecuación 2.2
$$ET_o = 0.0023 R_a (T_m + 17.8) (T_{m\acute{a}x} - T_{m\acute{i}n})^{0.5}$$

Donde,

ETo = Evapotranspiración de referencia (m.m/día);

Tm = Temperatura media (°C);

Tmáx = Temperatura máxima (°C);

Tmin = Temperatura mínima (°C);

Ra = Radiación solar extraterrestre (m.m/día).

La radiación solar extraterrestre se la determina en función de la latitud y de acuerdo al mes, para ello existen tablas de donde se extrae el valor de la radiación para la estación en estudio. El valor de R_a es para la estación Pichilingue (M006), la cual tiene una latitud de 1.1° sur. En la Tabla 2.12 se indica el valor de R_a para la latitud señalada, que para su determinación tuvo que ser interpolado entre cero grados (0°) y dos grados (2°), también se indica el valor obtenido de la evapotranspiración de referencia (E_{To}) para la cuenca en estudio.

Tabla 2.12. Evapotranspiración: Método de Hargreaves para estación Pichilingue.

Mes	Ra (MJ mm/d)			ET _o	ET _o *# días
	0(°C)	2(°C)	1.1(°C) (interpolado)	(mm/día)	(mm/día)
Ene	36.2	36.9	36.6	5.5	169.4
Feb	37.5	37.9	37.7	5.5	171.9
Mar	37.9	38	38.0	5.7	177.5
Abr	36.8	36.4	36.6	5.5	170.1
May	34.8	34.1	34.4	5.1	158.5
Jun	33.4	32.6	33.0	4.8	150.0
Jul	33.9	33.1	33.5	4.9	152.7
Ago	35.7	35.2	35.4	5.5	170.2
Sep	37.2	37.1	37.1	6.0	184.6
Oct	37.4	37.7	37.6	6.0	184.9
Nov	36.3	37	36.7	5.9	183.8
Dic	35.6	36.4	36.0	5.7	177.6
				Suma	2051.3

Elaboración: Vintimilla A., Zhungo J.

La evapotranspiración obtenida corresponde a la estación Pichilingue (M006), para la que se aplicaron los métodos de Penman – Monteith y Hargreaves. El primer método da como resultado una E_{To} de 1150 mm, mientras el segundo 2050 mm, por lo que se puede notar que el método de Hargreaves sobreestima los valores debido a que considera menos parámetros climatológicos que el método de Penman – Monteith.

En la zona del proyecto se ha evaluado una evapotranspiración aproximada de 1350 mm mediante Penman – Monteith. El valor es semejante al obtenido en esta tesis, aunque presenta una diferencia gracias a que los parámetros introducidos en la evaluación por los especialistas del PROMAS – UNIVERSIDAD DE CUENCA han sido ya depurados y sometidos a un análisis más profundo.

2.3. Análisis de precipitaciones

La precipitación es la fuente primaria del agua de la superficie terrestre, y sus mediciones forman el punto de partida de la mayor parte de los estudios concernientes al uso y control del agua. (Aparicio, 1989)

2.3.1. Precipitaciones medias mensuales

Las precipitaciones medias mensuales son calculadas en base a todas las estaciones que están dentro de la cuenca. De cada estación se calculó la media de las precipitaciones registradas cada mes de cada uno de los años en lo que existe datos de registro.

Los valores de precipitación media mensual de la cuenca se pueden ver en la Tabla 2.13, donde están precipitaciones por mes y el total anual que se obtiene de la suma de los valores mensuales.

**Tabla 2.13 Precipitación media mensual en mm.**

Código	Estación	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
M006	Pichilingue	419.3	451.4	434.6	397.3	148.5	50.5	30.1	10.8	18.4	21.3	43.9	143.1	2169.4
M122	Pívalo	185.1	205.2	219.1	196	88.4	35.5	16.9	11.9	43.1	52.2	73.3	141.3	1267.8
M123	El Corazón	418.8	460.5	531.6	424.1	243.4	71	31.6	21.8	45.5	63.6	90.6	268.5	2671.1
M124	San Juan La Maná	452.5	535.4	551.6	505.9	263	87.2	47	36.6	39.9	60.7	69.5	244.7	2894.1
M129	Caluma	437.1	544.8	516.1	320.9	178	36.4	20.7	10.8	7.9	15.5	25.8	201.2	2315.2
M154	Cayapas	313.4	313.4	313.9	315.8	315.7	316.1	314.3	314.3	314.9	314.9	314.9	314.9	3776.4
M172	Pueblo Viejo	354.7	401.7	400.4	346.9	105.8	23.5	15.8	3.7	19.1	4.9	23.1	126.3	1825.9
M367	Pinllopata	303.7	325.4	356.1	355.9	138.1	63.9	12.2	12.5	25.2	59.3	59.2	211.8	1923.4
M368	Moraspungo-Cotopaxi	420.9	495.7	535.4	460	208.5	101.9	33.5	24.1	29.8	48.1	60.4	180.6	2598.9
M369	Cusubamba	47.8	47.2	70.6	73.7	56.4	27.8	14	9.6	26.6	46.8	63.5	61.2	545.4
M370	Ramón Campana	440.2	495.5	510.8	429	201.4	68.5	36.9	24.5	49.5	55.3	80.3	243.5	2635.4
M383	Echeandia	363	448.1	464.2	351.9	148.6	59.3	33.7	17.4	34.6	50.9	61.5	194.9	2228.1
M385	Salinas_Bolivar	153	194.8	213.6	241.8	178.9	65.4	29.4	44.3	107.2	117.9	78.6	105.6	1530.5
M465	Ventanas- Inamhi	473.9	520.7	509	405.4	171	39.5	22.1	18.2	22	33.7	58.2	171.3	2445
M470	Mocache	322.3	386.4	353.5	368	191.3	27.1	20.1	15	30.3	19.6	50.2	148.9	1932.6
M471	Zapotat-Los Ríos	274.2	409.5	360.9	240.9	103.2	53.3	8.5	8.4	24.6	13.6	20.5	79.2	1596.6
M789	El Triunfo	198.4	296.5	269.3	178.5	77.9	45	19.9	14.9	20.9	41.8	46.7	78.8	1288.7
M906	Solano	334.6	412.7	317.9	299.8	135.8	25.9	9.6	10.5	10	25.7	30.7	78.7	1533.2
MA1Y	Calamaca	111.7	125.3	134.6	161.5	68.1	23.8	28.2	11.6	13.2	29.8	40.2	74	821.9
MA37	Laguacoto	49.4	65.3	80.9	69.3	65.4	84.5	65.5	49.8	40.2	37.6	48.7	55.9	712.3

Fuente: INAMHI**Elaboración: Vintimilla A., Zhungo J.**

2.3.2. Precipitación media de la Cuenca

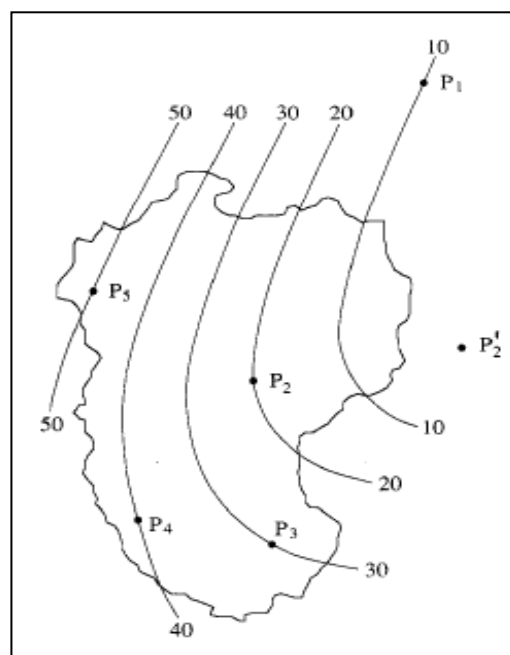
El cálculo de la precipitación media de la cuenca se hace por el método de las isoyetas, debido a que este presenta mayor precisión que el método de los polígonos de Thiessen y la media aritmética. El método aplicado se describe a continuación.

2.3.2.1. Método de las Isoyetas

Este método consiste en trazar, con la información registrada en las estaciones, líneas que unen puntos de igual altura de precipitación llamadas isoyetas, de modo semejante a como se trazan las curvas de nivel en topografía. (Aparicio, 1989)

En la Figura 2.2 se presenta un esquema de mapa de isoyetas, tomado de Chow (1994), en el que se puede ver como se generarían las isoyetas en el área de una cuenca determinada.

Figura 2.2 Esquema de mapa de isoyetas.



Fuente: Chow, 1994.

Para el cálculo de la precipitación media en la cuenca se requiere conocer el área total de la cuenca en estudio, el área entre cada dos isoyetas y la

precipitación promedio entre dos isoyetas. Información que se obtiene de la realización de un mapa de precipitaciones en el programa ArcGIS 10.1. La expresión empleada es:

Ecuación 2.3

$$h_p = \frac{1}{A_T} \sum_{i=1}^{n'} (\bar{h}_{pi} \dot{A}_i)$$

Donde,

H_p = Precipitación media de la cuenca (mm);

A_T = Área total de la cuenca (m²);

H_{pi} = Precipitación promedio entre dos isoyetas (mm);

A_i = Área entre dos curvas (m²).

Luego de reemplazar los valores en la Ecuación 2.3, los resultados de precipitación media mensual para la cuenca son los que se presentan en la Tabla 2.14.

Tabla 2.14 Precipitación media de la cuenca (mm).

Mes	Precipitación media (mm)
Enero	336.11
Febrero	397.06
Marzo	399.98
Abril	340.81
Mayo	163.37
Junio	62.47
Julio	30.42
Agosto	23.90
Septiembre	38.89
Octubre	49.27
Noviembre	60.36
Diciembre	164.17
Suma	2066.81

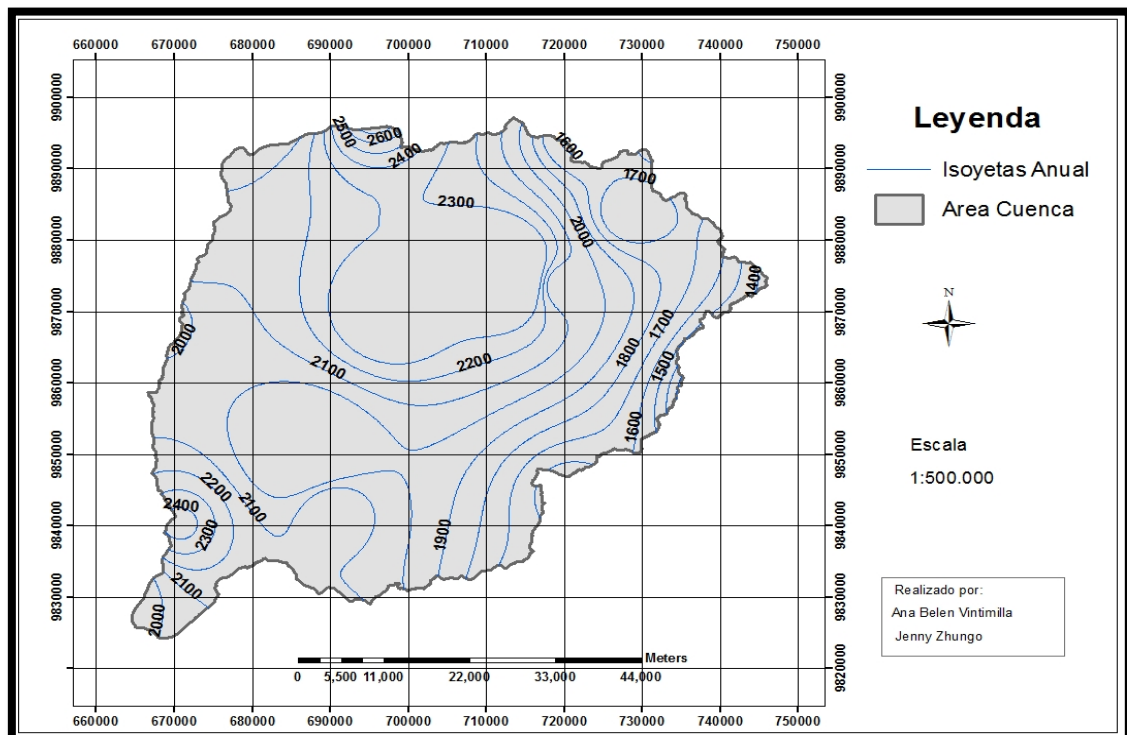
Elaboración: Vintimilla A., Zhungo J.

2.4. Determinación del mapa de isoyetas anual y mensual

Para la generación del mapa de isoyetas se debe disponer de los registros de precipitación, distribuidos en diferentes puntos. Los programas especializados de Sistemas de Información Geográfica utilizan diferentes métodos de procesamiento de esta información mediante la interpolación de datos de precipitación. El método que se usó para la generación de estos mapas, en ArcMap 10.1, fue IDW (Inverse Distance Weighted), el cual interpola una superficie a partir de puntos utilizando una técnica de distancia inversa ponderada y combina la idea de un cambio gradual en ella; se supone que el valor del atributo Z en una posición específica no es conocido, por lo que toma el promedio de los valores de sus vecinos.

La información utilizada para la elaboración de los mapas de isoyetas anual y mensuales, corresponde a los promedios anuales y mensuales de precipitación para las estaciones y períodos especificados en la Tabla 2.2. En la Figura 2.3 se indica el mapa de isoyetas anual para la cuenca del río Catarama, los mapas mensuales se pueden observar en el Anexo 2.

Figura 2.3 Mapa de isoyetas anual para la cuenca del río Catarama.



Elaboración: Vintimilla A., Zhungo J.

2.5. Precipitación máxima en 24 Horas en estaciones representativas

La precipitación máxima en 24 horas es el máximo valor anual registrado para un día de toma de datos en la estación correspondiente, la cual debe ser mayor que cada una de las precipitaciones registradas para cada uno de los días del mes, caso contrario el dato sería erróneo.

En la Tabla 2.2 se detallaron las estaciones y los períodos de información disponibles para análisis de precipitación máxima en 24 horas, mientras que en el Anexo 1 se presentan los valores máximos de precipitación en milímetros (mm) para cada año en cada una de las estaciones.

2.5.1. Análisis de la calidad de la información: Bondad de ajuste

La calidad de la información puede verse afectada muchas de las veces por causa del sensor (error del registro en el sitio), en el registro en la estación de recepción, en el procesamiento y análisis de los datos.

La bondad del ajuste de una distribución de probabilidad puede probarse comparando los valores teóricos y muestrales de las funciones de frecuencia relativa o de frecuencia acumulada (Chow et al., 1994).

Una de las pruebas en la teoría estadística más conocidas es la de Kolmogorov – Smirnov, la cual se emplea en esta tesis.

2.5.1.1. Test de Kolmogorov-Smirnov

Para llevar a cabo esta prueba debe compararse el máximo valor absoluto de la diferencia D entre la función de frecuencia relativa $F_n(x)$ y la teórica $F(x)$

Ecuación 2.4.
$$D = \max |F_n(x) - F(x)|$$

Con un valor crítico D_t que está condicionado por el número de datos de la serie pluviográfica y de la confiabilidad seleccionada. Si la condición $D < D_t$ se cumple, el ajuste de la prueba corresponde al valor de D (Aparicio, 1989).

Luego, asumiendo un valor de significancia del 95%, se recurre a la tabla de valores críticos (Dt), el cual depende del número de datos de la serie pluviográfica y del parámetro de escala ($\alpha=0.05$), se selecciona el valor o se calcula en caso de que el número de datos sea grande. La tabla de valores críticos se puede ver en el Anexo 3.

2.5.2. Distribución de probabilidad de diseño

Según Chow, et al. (1994), “una distribución de probabilidad es una función que representa la probabilidad de ocurrencia de una variable aleatoria”. En este caso, dicha variable aleatoria corresponde a una serie pluviográfica

Los registros disponibles de información hidrológica generalmente proporcionan un número limitado de datos, razón por la que resulta conveniente probar diferentes distribuciones para obtener aquella que mejor se ajuste. (Fattorelli y Fernández, 2011)

Las distribuciones que se utilizaron son la distribución de Gumbel y Log Normal, con información de precipitación máxima en 24 horas, donde el número de años disponibles de información son los de la Tabla 2.15

Tabla 2.15 Años de información utilizados en pruebas de bondad de ajuste.

Código	Estación	# años de información
M006	Pinchilingue	51
M122	Pilalo	12
M123	El Corazon	38
M124	San Juan La Mana	35
M129	Caluma	7
M154	Cayapas	19
M172	Pueblo Viejo	25
M368	Moraspungo-Cotopaxi	29
M369	Cusubamba	16
M385	Salinas - Bolivar	11
M470	Mocache	13
MA1Y	Calamaca	12

Elaboración: Vintimilla A., Zhungo J.

2.5.2.1. Parámetros estadísticos de la muestra

Dentro del análisis intervienen, además, parámetros estadísticos que indican las características de la población (Chow et al., 1994). Los principales son la media, varianza (de la cual se obtiene la desviación estándar) y coeficiente de variación.

a) Media (\bar{x}):

La media (\bar{x}) es un parámetro simple, es el primer momento alrededor del origen de la variable aleatoria.

Según Chow et al. (1994), “para una variable aleatoria X , la media es $E(X)$, y se calcula como el producto de x y la correspondiente densidad de probabilidad $f(x)$, integrando sobre el rango factible de la variable aleatoria”.

Ecuación 2.5
$$E(X) = \mu = \int_{-\infty}^{\infty} x f(x) dx$$

El valor de la media para la muestra es el promedio aritmético de la serie de datos:

Ecuación 2.6
$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

b) Varianza (σ^2):

La varianza (σ^2) es un parámetro que mide la variabilidad de la información:

Ecuación 2.7
$$E[(x - \mu)^2] = \sigma^2 = \int_{-\infty}^{\infty} (x - \mu)^2 f(x) dx$$

El valor de la varianza para la muestra está dado por:

Ecuación 2.8
$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$$

La desviación estándar (σ) tiene las mismas dimensiones de la variable aleatoria X y resulta de la raíz cuadrada de la varianza, es representada por s . La dispersión en la serie de datos es mayor a medida que la desviación estándar aumenta.

c) Coeficiente de variación (Cv):

Este es una medida adimensional de la variabilidad, es estimado por:

$$\text{Ecuación 2.9} \quad C_v = \frac{\sigma}{\mu}$$

Mediante la aplicación de las expresiones ya indicadas en esta sección, se obtuvieron los siguientes valores para los parámetros estadísticos:

Tabla 2.16 Parámetros estadísticos de las estaciones de control.

Código	M006	M122	M123	M124	M129	M154
Estación	Pinchilingue	Pilalo	El Corazon	San Juan La Mana	Caluma	Cayapas
# Años de información	51	12	38	35	7	19
Media (\bar{x})	120.54	39.18	90.37	118.64	116.87	123.26
Desviación estándar (s)	29.48	12.32	42.37	40.07	38.68	32.61
Coeficiente de variación (Cv)	0.24	0.31	0.47	0.34	0.33	0.26

Tabla 2.16 (Continuación) Parámetros estadísticos de las estaciones de control.

Código	M172	M368	M369	M385	M470	MA1Y
Estación	Pueblo Viejo	Moraspungo -Cotopaxi	Cusubamba	Salinas -Bolivar	Mocache	Calamaca
# Años de información	25	29	16	11	13	12
Media (\bar{x})	113.17	90.02	31.81	29.9	121.33	25.92
Desviación estándar (s)	26.24	25.7	6.45	20.1	35.11	12.97
Coeficiente de variación (Cv)	0.23	0.29	0.2	0.37	0.29	0.5

Elaboración: Vintimilla A., Zhungo J.

La información empleada en estos análisis se presenta en el Anexo 1 de este documento.

2.5.2.2. Funciones de distribución de probabilidad

Para la determinación de parámetros de diseño para una obra hidráulica debe establecerse un período de diseño, para el cual, generalmente es necesario hacer extrapolaciones a partir de la serie de datos históricos ya que dicho período es usualmente mayor al número de años de registro de información.

Aparicio (1989), explica que la extrapolación de los datos puede ser realizada al ojo, es decir, gráficamente por una persona con experiencia. Aplicar este método tiene la desventaja de la subjetividad, ya que depende estrechamente del criterio del profesional que lo lleve a cabo. Emplear una función de distribución de probabilidad teórica elimina la subjetividad en los resultados, por lo que se debe buscar entre las distintas funciones existentes la que se ajuste mejor a los datos, y usarla para la extrapolación.

En el análisis de precipitaciones para la cuenca del río Catarama se aplicaron dos tipos de distribución de probabilidad a la serie histórica de precipitación máxima en 24 horas a las estaciones de control cercanas al proyecto: Gumbel – Tipo I y Log normal.

a) Distribución de Gumbel – Tipo 1

Gumbel desarrolló las propiedades de la distribución de valores extremos tipo 1. Esta ley de distribución presenta una adecuada capacidad de ajuste a valores de precipitación para distintos períodos de tiempo.

En el caso de la distribución de Gumbel, se ordena la información en orden ascendente y se calcula la frecuencia relativa ($F_n(x)$) mediante la expresión de Weibull:

Ecuación 2.10
$$F_n(x) = \frac{n}{N+1}$$

Donde,

$F_n(x)$ = Frecuencia observada acumulada;

n = Número de orden;

UNIVERSIDAD DE CUENCA

N = Número total de datos.

Dentro de las propiedades, Gumbel estableció dos parámetros en función de la media y desviación estándar: α y u . Los cuales se obtienen a partir de las expresiones:

Ecuación 2.11
$$\alpha = \frac{s\sqrt{6}}{\pi}$$

Ecuación 2.12
$$u = \bar{x} - 0.5772 \alpha$$

Donde,

s = Desviación estándar de la muestra;

u = Moda de la distribución o punto de máxima densidad de probabilidad;

\bar{x} = Media de la muestra.

La función de distribución de probabilidad ($F(x)$) para esta distribución se comporta de la siguiente forma:

Ecuación 2.13
$$F(x) = e^{-e^{-y}}$$

y viene dado por:

Ecuación 2.14
$$y = \frac{x - \bar{x}}{\alpha}$$

Donde,

x = Valor de la variable aleatoria;

\bar{x} = Media de la muestra;

α = Parámetro.

b) Distribución Log Normal

En esta función los logaritmos naturales de la variable aleatoria se distribuyen normalmente (Aparicio, 1989).

La distribución log normal tiene dos ventajas principales sobre la distribución normal: en primer lugar, está limitada por ($X > 0$), y en segundo lugar la transformación log tiende a reducir la asimetría positiva que usualmente se encuentra en información hidrológica ya que al tomar logaritmos los números grandes se reducen en una proporción mayor que los pequeños (Chow et al., 1994).

Para el cálculo de la frecuencia relativa se sigue el mismo procedimiento utilizado para la distribución Gumbel, es decir, se ordena la información en orden ascendente y se aplica la expresión de Weibull (Ecuación 2.10).

La función de densidad de probabilidad que se emplea en la distribución log normal es:

Ecuación 2.15

$$F(x) = \frac{1}{x s \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln x - \bar{y})^2}{2s^2}}$$

Donde,

$F(x)$ = Frecuencia teórica;

x = Valor de la variable aleatoria;

s = Desviación estándar del logaritmo de la variable;

\bar{y} = Media del logaritmo de la variable.

Para la aplicación de las distribuciones de probabilidad a las series históricas de precipitación máxima en 24 horas se emplearon un total de 12 estaciones de control cercanas al proyecto. En todas se aplicaron los métodos de Gumbel – Tipo 1 y Log normal; y luego se escogió la distribución que mejor se ajusta a cada serie de datos. En la Tabla 2.17 se exponen los resultados y parámetros de la distribución seleccionada en cada caso, y en el Anexo 4 el proceso de cálculo para el tipo de distribución escogida para cada estación.



Tabla 2.17 Resultados prueba de bondad de ajuste.

Código	M006	M122	M123	M124	M129	M154	M172	M368	M369	M385	M470	MA1Y
Estación	Pichilingue	Pívalo	El Corazón	San Juan La Maná	Caluma	Cayapas	Pueblo Viejo	Moraspung Cotopaxi	Cusubamba	Salinas Bolivar	Mocache	Calamaca
# datos	51	12	38	35	7	19	25	29	16	11	13	12
Distribución	Gumbel	Gumbel	Log normal	Log normal	Log normal	Log normal	Gumbel	Gumbel	Gumbel	Log normal	Log normal	Log normal
α	22.99	9.61					20.46	20.04	5.03			
u	107.27	33.63					101.36	78.45	28.91			
\bar{Y}			4.4	4.72	4.71	4.78				3.33	4.76	3.14
S_y			0.45	0.33	0.32	0.26				0.36	0.28	0.47
D_t	0.19	0.375	0.215	0.224	0.483	0.301	0.264	0.246	0.327	0.391	0.361	0.375
D	0.112	0.183	0.079	0.085	0.153	0.148	0.135	0.107	0.23	0.127	0.137	0.087

Elaboración: Vintimilla A., Zhungo J.

2.5.3. Precipitación máxima para varios periodos de retorno

El período de retorno se define como el tiempo que transcurre entre dos sucesos iguales. Se lo denomina con la letra T.

La probabilidad de excedencia está relacionada con el período de retorno.

Ecuación 2.16
$$P(x > X) = \frac{1}{T}$$

La función de distribución de probabilidad F(X), que es la probabilidad que la variable aleatoria tome un valor igual o inferior a X, viene dada por:

Ecuación 2.17
$$F(X) = P(x \leq X) = 1 - \frac{1}{T}$$

Entonces, se consideraron diferentes períodos de retorno y se obtuvo la función de distribución de probabilidad F(X) para cada uno de ellos. Finalmente, aplicando la expresión de la distribución Gumbel – Tipo 1 o Log normal (según la seleccionada para cada estación) y despejando de ella la variable X, se obtuvieron las precipitaciones máximas en 24 horas para 5, 10, 25, 50 y 100 años. La información para el análisis se presenta en el Anexo 1 y los resultados se muestran en la tabla a continuación:

Tabla 2.18 Precipitación máxima en 24 horas en mm para varios periodos de retorno.

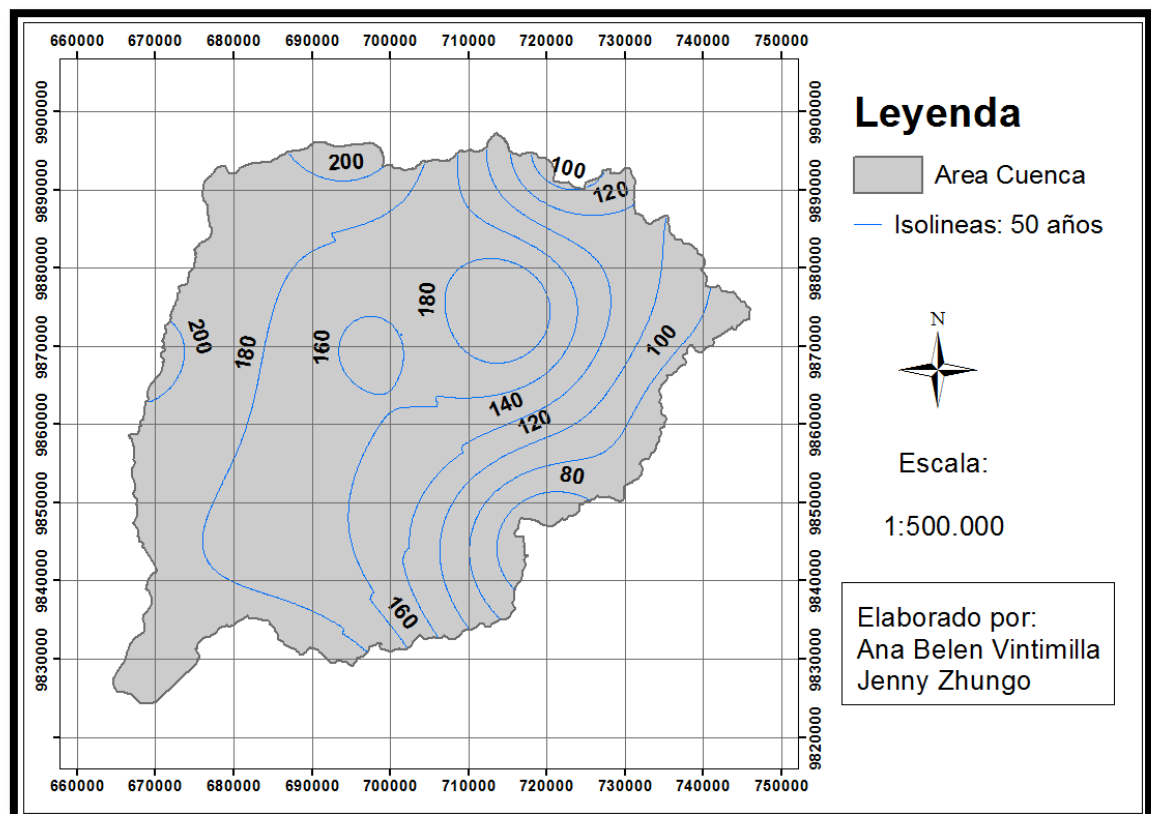
Código	M006	M122	M123	M124	M129	M154	M172	M368	M369	M385	M470	MA1Y
Estación	Pichilingue	Pilalo	El Corazón	San Juan La Maná	Caluma	Cayapas	Pueblo Viejo	Moraspungo Cotopaxi	Cusubamba	Salinas Bolivar	Mocache	Calamaca
# datos	51	12	38	35	7	19	25	29	16	11	13	12
Distribución	Gumbel	Gumbel	Log normal	Log normal	Log normal	Log normal	Gumbel	Gumbel	Gumbel	Log normal	Log normal	Log normal
5	141.75	48.04	118.95	148.08	145.38	148.24	132.05	108.51	36.45	37.83	147.77	34.31
10	159.01	55.26	144.99	171.21	167.35	166.20	147.4	123.55	40.23	44.32	167.14	42.20
25	180.80	64.37	179.08	199.88	194.46	186.76	166.80	142.55	45.00	52.47	190.60	52.61
50	196.98	71.13	205.24	220.91	214.26	203.16	181.19	156.64	48.54	58.52	207.48	60.66
100	213.03	77.84	232.03	241.7	233.79	218.08	195.48	170.64	52.05	64.55	223.94	68.95

Elaboración: Vintimilla A., Zhungo J.

2.5.4. Trazado de isoyetas para precipitación máxima en 24 horas para la zona del proyecto

El procedimiento para la obtención de la precipitación máxima de diseño para la cuenca del río Zapotal inicia con la aplicación de las distribuciones de probabilidad Gumbel – Tipo I y Log normal a la información de precipitación máxima en 24 horas de las estaciones enumeradas en la sección 2.1.1 (ver Tabla 2.2) y la selección de aquella distribución que mejor se ajuste, para luego realizar en ArcGIS 10.1 el mapa de isoyetas correspondiente y obtener una precipitación promedio para cada uno de los diferentes períodos de retorno analizados (5, 10, 25, 50 y 100 años). A continuación se muestra el mapa de isoyetas para un período de retorno de 50 años, los mapas para los demás períodos de retorno se presentan en el Anexo 5.

Figura 2.4 Mapa de isoyetas de precipitación máxima en 24 horas (TR = 50 años).



Elaboración: Vintimilla A., Zhungo J.



Los valores de precipitación máxima de diseño en 24 horas dados en milímetros, calculados mediante el método de las isoyetas, para toda la cuenca de análisis y varios períodos de retorno se observan en la Tabla 2.19.

Tabla 2.19 Precipitación máxima de diseño en 24 horas (mm).

Período de retorno	Precipitación máx. 24 horas
(años)	(mm)
5	104.51
10	120.91
25	141.51
50	158.32
100	173.16

Elaboración: Vintimilla A., Zhungo J.

CAPÍTULO 3

3. ESTUDIO HIDROLÓGICO

3.1. Recopilación de información

La información recopilada para el desarrollo de este capítulo corresponde caudales medios diarios y caudales máximos instantáneos, en m^3/s , de las estaciones hidrológicas Zapotal en Catarama (H345) y Zapotal en Lechugal (H346) y para la sección de estudio de sedimentos se emplean solamente datos de la estación Zapotal en Lechugal (H346); las cuales se encuentran dentro de la cuenca en estudio. Sus características se indican en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1 Estaciones hidrológicas empleadas.

Estación	Código	Coordenadas		Elevación (msnm)	Tipo	Provincia
		UTM-X (m)	UTM-Y (m)			
Zapotal en Catarama	H345	669944	9824983	120	LM	Los Ríos
Zapotal en Lechugal	H346	674218	9846789	40	LG	Los Ríos

Fuente: INAMHI

Elaboración: Vintimilla A., Zhungo J.

La información de cartografía que se recopiló es la misma que se usó en el Capítulo 2. La escala de la cartografía es 1:50000.

3.2. Propiedades geomorfológicas de la cuenca de interés

Se trazó la cuenca para la estación hidrológica de control Zapotal en Catarama (H345) en base a cartografía a escala 1:50000 mediante ArcGIS 10.1, con el que también se determinaron las propiedades geomorfológicas de interés. Estas han sido divididas en cuatro grupos: propiedades de superficie, alturas características, pendiente y parámetros de la red hídrica. (ver Tabla 3.2)

Tabla 3.2 Propiedades geomorfológicas de la cuenca de interés.

Propiedades de superficie		
Parámetro	Unidad	
Área	km ²	3729.24
Perímetro	km	312868.6
Cota máxima	msnm	4560
Cota mínima	msnm	20
Alturas características		
Parámetro	Unidad	
Altitud de frecuencia media	m	1487.87
Altitud de mayor frecuencia	m	237.50
Altitud media	m	1936.81
Pendiente		
Parámetro	Unidad	
Pendiente media	%	28.67
Parámetros de la red hídrica		
Parámetro	Unidad	
Longitud del cauce principal	m	141180
Orden		7
Longitud de la red hídrica	km	5336.86
Pendiente promedio	%	2.23

Elaboración: Vintimilla A., Zhungo J.

3.3. Datos hidrológicos

Los datos fueron tomados de los anuarios hidrológicos publicados por el INAMHI en forma digital e impresa, por lo que se pudo recopilar información correspondiente a los períodos que se especifican en la tabla a continuación:

Tabla 3.3 Estaciones hidrológicas y series disponibles de información.

Estación	Código	Q medios diarios (m³/s)	Q máximos instantáneos (m³/s)	Aforos líquidos y sólidos
Zapotal en Catarama	H345	1982 - 1996	1980 - 1989, 1991 - 1995	
Zapotal en Lechugal	H346	1982 - 2009	1965 - 2009	1978 - 2013

Fuente: INAMHI**Elaboración: Vintimilla A., Zhungo J.**



Como se pudo ver en la Tabla 3.3, la estación Zapotal en Lechugal (H346) contiene una serie histórica de caudales medios diarios más extensa que Zapotal en Catarama (H345), por esta razón se analizará la posibilidad de usar esta información para el relleno de información faltante.

3.4. Procesamiento de la información

3.4.1. Calidad de la información: Doble masa, análisis de correlación

La calidad de la información puede verse afectada muchas de la veces por un error en el registro del dato in situ, en la transmisión del dato, en el registro en la estación de recepción, en el procesamiento y análisis de los datos; por tales razones es importante realizar un adecuado control de calidad de los datos.

Datos erróneos se pueden verificar simplemente con una revisión visual, seleccionando los valores de caudales que presenten un valor muy elevado que el dato anterior; o al contrario, que de un valor elevado exista un cambio brusco y se convierta en uno muy bajo.

3.4.1.1. Análisis de doble masa

En el análisis de doble masa se realiza un gráfico de los valores acumulados de la una estación versus los acumulados de la otra empleando la información de caudales medios diarios, aplicados en un período de tiempo común. Esto generará una línea, que guardará la misma pendiente siempre y cuando los datos mantengan la misma constante de proporcionalidad entre ellos (James y Clayton, 1985).

James y Clayton (1985) explican que un cambio o “pico” en la pendiente de la recta, significa un cambio en la constante de proporcionalidad de los datos, o que tal vez la proporcionalidad no es constante en los valores acumulados. Por lo que la inclinación general de esta recta, que suele ser 45° , se ve afectada. Identificar estos “picos”, por medio de la comparación de la información de una estación con otra, permite detectar posibles errores en los

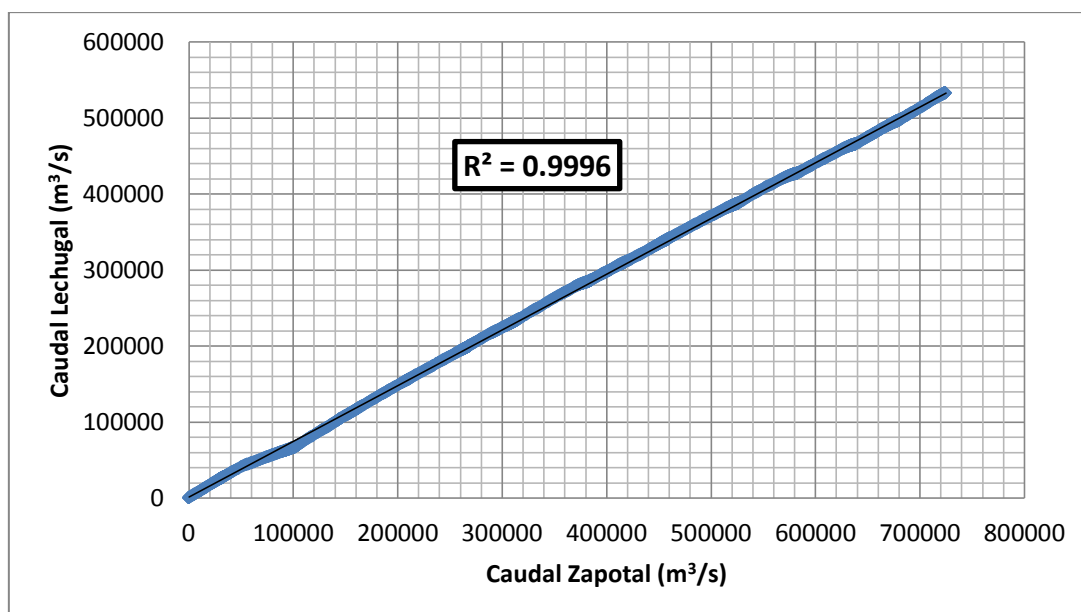
registros de datos y, si es posible, corregirlos para establecer períodos de registro más homogéneos.

Para la construcción de la curva, el primer paso consiste en ordenar de forma ascendente los datos recopilados de caudales medios diarios, se debe mencionar que previamente en los casos en donde solo se encontró un dato faltante se rellenó la información con la media de los caudales consecutivos. De esta manera se pudo realizar un gráfico preliminar con los valores acumulados para observar los puntos en donde se producían picos.

Mediante el análisis de la curva de doble masa preliminar se identificaron los valores “outliers” en la serie histórica y se estableció que entre dos datos que tengan la misma fecha debe existir una relación igual a uno para considerarlos correctos, caso contrario estos se eliminan.

Para validar la curva debe obtenerse una correlación R^2 igual o mayor a 0.999 y posteriormente los datos son rellenados empleando la ecuación resultante del análisis de correlación. Como se puede observar en la Figura 3.1 el coeficiente de determinación es de 0.9996, valor que se obtiene luego de la eliminación de los datos que producían “picos” en la pendiente de la recta.

Figura 3.1 Curva de doble masa Catarama – Zapotal.



Elaboración: Vintimilla A., Zhungo J.

La curva de doble masa fue elaborada para un período de datos comprendido entre 1982 y 2009, pero la tendencia de la misma para los dos primeros años presenta cierta variabilidad que no se considera representativa. Obteniendo así un coeficiente de determinación igual 0.9996, por lo que se acepta la confiabilidad y validez de la información.

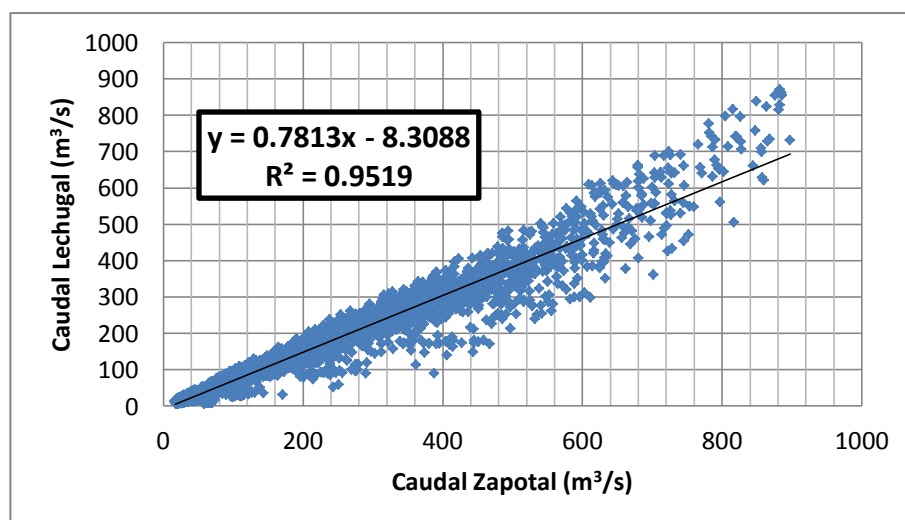
3.4.1.2. Análisis de correlación

El análisis de correlación consiste en graficar los datos de caudales medios diarios en m^3/s de la estación Zapotal en Lechugal versus los datos de Catarama en Catarama y viceversa, luego de haber establecido un período común de información, y obtener una curva de ajuste que presente una ecuación con la que se rellenarán los datos faltantes.

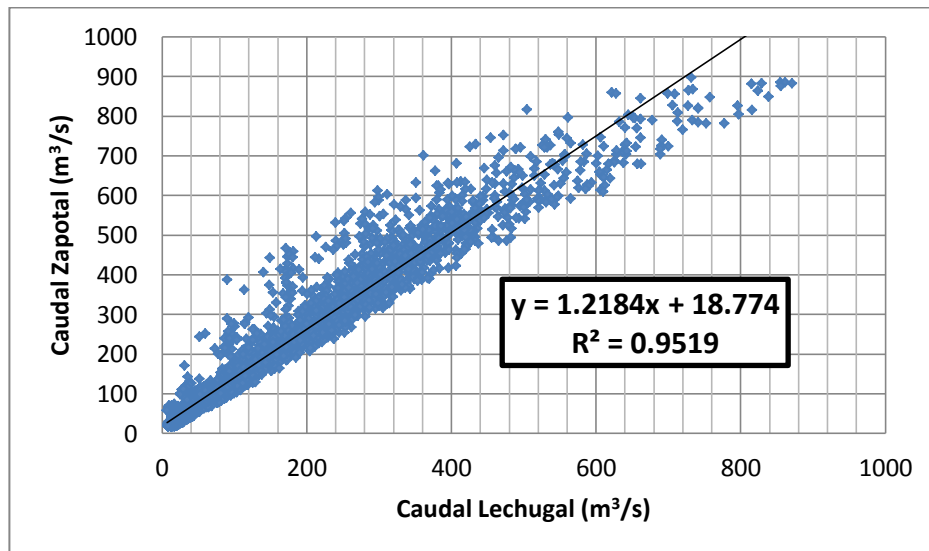
De la misma manera que para el trazado de la curva de doble masa, los valores son ordenados de forma ascendente y anteriormente se rellena aquellos espacios en donde solo falte un dato con la media aritmética de dos datos consecutivos.

En las figuras Figura 3.2 y Figura 3.3 se muestran las curvas de correlación obtenidas para datos de caudales medios diarios con sus respectivas ecuaciones, las cuales serán empleadas en la sección 3.4.2.

Figura 3.2 Curva de correlación Zapotal – Lechugal.



Elaboración: Vintimilla A., Zhungo J.

Figura 3.3 Curva de correlación Lechugal - Zapotal.

Elaboración: Vintimilla A., Zhungo J.

La relación de caudales que existe es de un 20% mayor para Zapotal, esta genera más caudal ya que se encuentra ubicada aguas abajo de Lechugal. Esto ocurre ya que en puntos más bajos existen más entradas de agua y por ende más generación de caudal.

3.4.2. Relleno de la información faltante

El relleno se realiza luego de haber concluido el control de calidad de la información, para así completar la serie de datos y poder utilizarla en cálculos posteriores. Los datos faltantes de caudales fueron rellenos utilizando las ecuaciones obtenidas mediante una regresión lineal en el análisis de correlación.

En la serie histórica de caudales medios diarios de la estación Zapotal en Catarama (H345) se contó con datos desde 1982 hasta 1996, por lo que para los años siguientes la información se relleno en base a la estación Zapotal en Lechugal (H346), la cual disponía de datos hasta el año 2009. Las ecuaciones generadas en el análisis de correlación son:

Ecuación 3.1 $Q_{Zap} = 1.2184 x$

Ecuación 3.2 $Q_{Lech} = 0.7813 x$

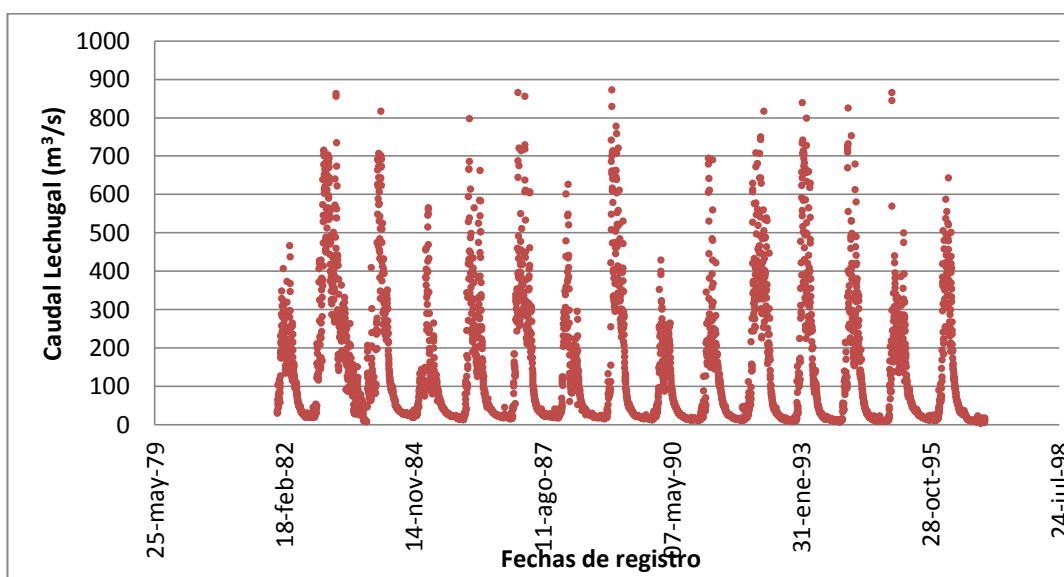
Donde,

Q_{Zap} = Caudal Zapotal (m^3/s);

Q_{Lech} = Caudal Lechugal (m^3/s);

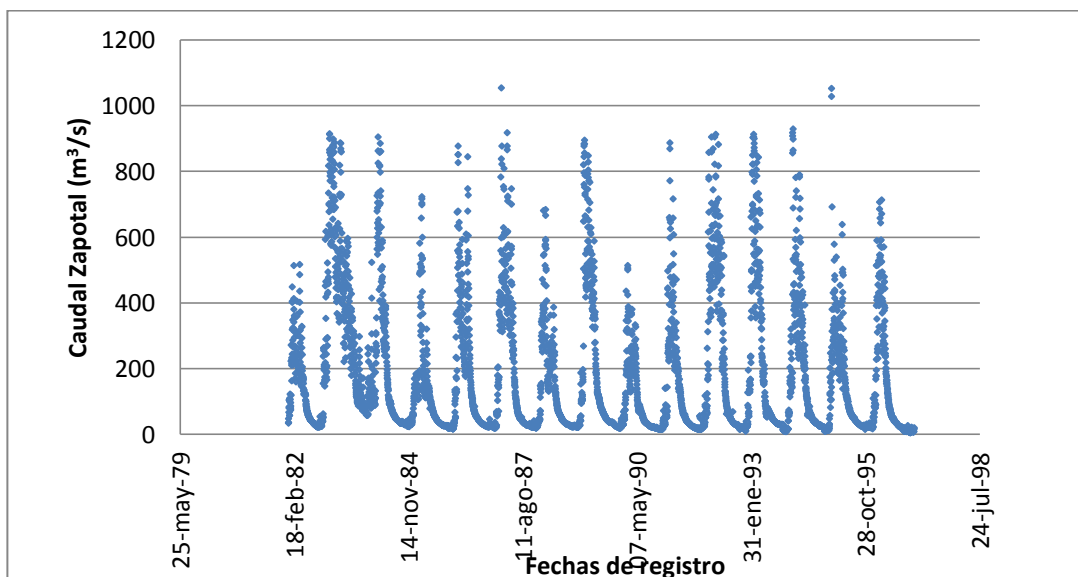
En las figuras Figura 3.4 y Figura 3.5 se presentan los caudales diarios rellenados.

Figura 3.4 Caudales diarios rellenados para Lechugal.



Elaboración: Vintimilla A., Zhungo J.

Figura 3.5 Caudales diarios rellenados para Zapotal.



Elaboración: Vintimilla A., Zhungo J.



Las gráficas de caudales diarios rellenados muestran que entre las series de datos para Zapotal y Lechugal ya no existen picos que representen valores atípicos, en base a esto se obtiene una base de datos normalizada que sirve para cálculos posteriores.

3.4.3. Caudales medios

Los caudales medios se calcularon hallando para cada mes la media aritmética de los caudales medios diarios luego de haber realizado el relleno de datos faltantes. El periodo de información completo está comprendido entre 1982 al 2009, aunque es necesario señalar que para el año 2000 no se disponía de información de caudales para ningún mes en las dos estaciones; y también se encontró la serie con datos faltantes solo para un mes, por lo que tuvieron que ser rellenados.

El relleno para el dato del mes faltante se hizo con la media de dos valores de caudales consecutivos y para cuando se presentaron dos años consecutivos sin información se calculó la media de todo el registro de años.

En el Anexo 6 se proporcionan las series históricas para caudales medios en m^3/s completas luego de la aplicación del análisis de correlación y relleno de datos faltantes, en donde se puede diferenciar a estos últimos. La Tabla 3.4, que se presenta más adelante, contiene los valores de caudales medios generales mensuales para las estaciones de control.

3.4.4. Caudales específicos

Los caudales específicos se determinan dividiendo los datos de caudales medios diarios para el área de la cuenca que abarca la estación, las áreas que comprenden las dos estaciones de control son 3729 km^2 y 2910 km^2 para las estaciones Zapotal en Catarama y Zapotal en Lechugal, respectivamente.

La serie completa de estos caudales se indica en el Anexo 7 y vienen expresados en litros/ kilómetro cuadrado (Lt/km^2).

En la Tabla 3.4 se presenta un resumen de caudales medios y caudales específicos para cada mes.

Tabla 3.4 Tabla de resumen caudales medios y específicos.

Mes	Zapotal en Catarama		Zapotal en Lechugal	
	Q medio (m³/s)	Q específico (Lt/Km²)	Q medio (m³/s)	Q específico (Lt/Km²)
Enero	189	46	151	51
Febrero	432	116	348	119
Marzo	457	122	364	125
Abril	408	109	321	110
Mayo	245	66	190	65
Junio	108	29	79	27
Julio	63	17	44	15
Agosto	42	11	29	10
Septiembre	36	10	25	9
Octubre	31	8	22	8
Noviembre	55	15	43	15
Diciembre	85	23	70	24
Media	179	48	141	48

Elaboración: Vintimilla A., Zhungo J.

Los valores de caudales medios son mayores para las dos estaciones desde el mes de Enero hasta Junio, lo que indica que estos son caudales representativos para la temporada de lluvia, bajando sus valores desde Julio hasta Diciembre que es verano. En general, la estación Zapotal en Catarama presenta un caudal medio anual de 179 m³/s y Zapotal en Lechugal un caudal medio anual de 141m³/s.

La media de los caudales específicos para las dos estaciones es de 48 Lt/km², este valor permitiría conocer la capacidad de aporte para la cuenca del río Zapotal para sitios en donde no estén ubicadas estaciones de aforo de caudales. En este caso, los caudales específicos son iguales debido a que el

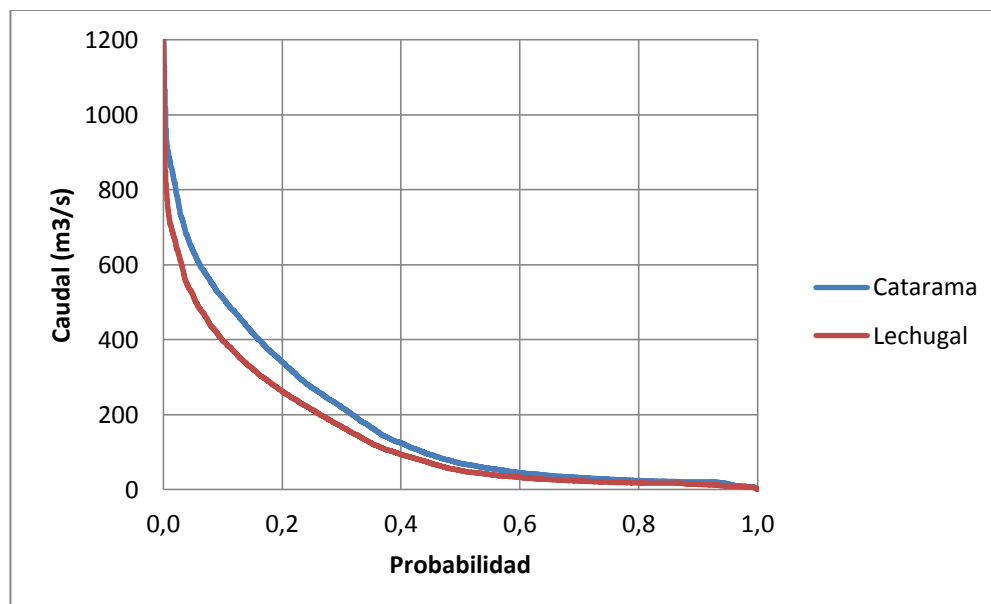
área que cubre la estación Zapotal en Catarama contiene al área de Zapotal en Lechugal.

3.5. Curvas de duración

Las curvas de duración se construyen con la finalidad de determinar la probabilidad de que un caudal sea igualado o excedido. Para la construcción de esta curva, los datos de caudales de medios diarios se ordenan de mayor a menor y se calcula un ranking para determinar la probabilidad de excedencia y así trazar una gráfica en la que se coloca en el eje x la probabilidad de excedencia versus caudal en el eje y.

En estas curvas se puede ver el comportamiento hidrológico de la cuenca, donde la forma de la curva corresponde a una típica representación de una cuenca que está ubicada en la región costa. En la Figura 3.6 se presentan las curvas de las estaciones Zapotal en Catarama y Zapotal en Lechugal.

Figura 3.6 Curvas de duración para Zapotal en Catarama y Zapotal en Lechugal.



Elaboración: Vintimilla A., Zhungo J.

3.6. Curvas de variación estacional

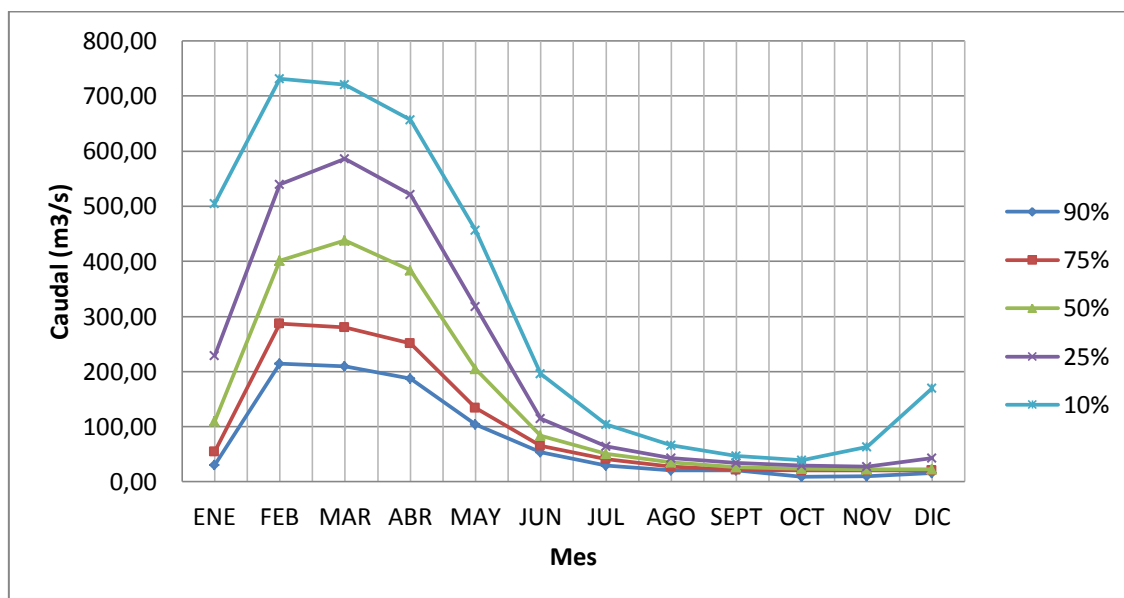
Para la construcción de las curvas de variación estacional, a los datos de caudales medios diarios se los ordena por cada uno de los meses de acuerdo al año de registro; y posteriormente se calcula las probabilidades del 10%, 25%, 50%, 75% y 90%. Se grafica la probabilidad versus los caudales, donde se puede ver las épocas en donde se ha producido la máxima lluvia y la época de menos lluvia.

En las tablas Tabla 3.5 y Tabla 3.6 se presentan los datos de caudales medios diarios para cada una de las probabilidades indicadas para la estación de Zapotal en Catarama y Zapotal en Lechugal, respectivamente. Las figuras Figura 3.7 y Figura 3.8 muestran las curvas de variación estacional correspondientes.

Tabla 3.5 Caudales medios diarios (m³/s) con probabilidad de excedencia para la estación Zapotal en Catarama.

P%	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sept	Oct	Nov	Dic
90	30.9	214	209.2	187.3	104.2	53.9	29.8	21.2	20.7	9.3	10.1	15.8
75	54.8	286.6	280.5	251.6	133.6	65.2	41.3	27.6	21.7	20.9	20.4	20.9
50	110.2	401.6	438.4	383.5	204.6	83.5	51.3	34.9	27	23.5	22.4	22.7
25	228.9	539.9	586.5	521.7	318.4	114.6	64.5	43.3	33.9	29.3	28.0	43.4
10	504.5	731.2	720.9	656.6	456.8	196	104.1	65.8	47.4	39.2	63.5	169.8

Elaboración: Vintimilla A., Zhungo J.

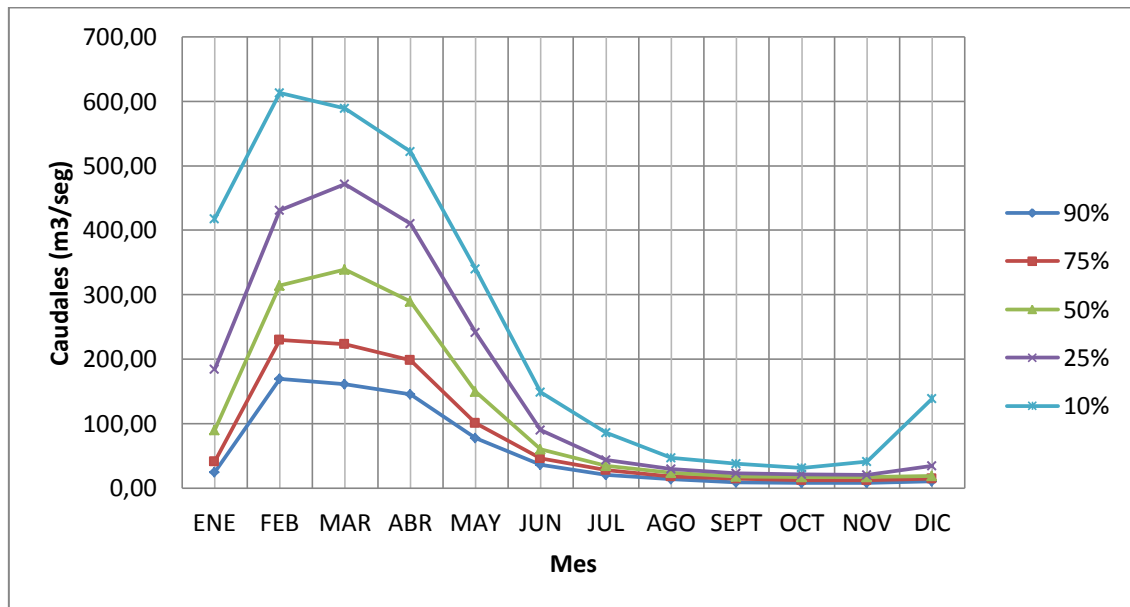
Figura 3.7 Curva de variación estacional para estación Zapotal en Catarama.

Elaboración: Vintimilla A., Zhungo J.

Tabla 3.6 Caudales medios diarios (m³/s) con probabilidad de excedencia para la estación Zapotal en Lechugal.

P%	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sept	Oct	Nov	Dic
90	24.5	169.4	161	145.5	77.5	36.2	20.7	14.1	9.1	7.7	8.1	10.3
75	41.2	230.2	223.4	198	100.9	46.3	27.7	17.8	15.1	12.4	12.3	15.1
50	89.9	314.1	338.9	289.3	149.4	60.5	34.8	23.7	18.2	17.1	17.1	18.5
25	184	430.9	471.5	410.2	241.4	89.6	43.9	29.3	23.1	21.4	20.7	34.9
10	417.7	612.7	588.9	522.1	339.7	148.9	85.5	46.9	38.0	31.0	41.0	139

Elaboración: Vintimilla A., Zhungo J.

Figura 3.8 Curvas de variación estacional para estación Zapotal en Lechugal.

Elaboración: Vintimilla A., Zhungo J.

3.7. Caudales máximos empleando análisis estadístico: Bondad de ajuste

El análisis al que se somete a la serie de datos de caudales máximos instantáneos de las estaciones Zapotal en Catarama (H345) y Zapotal en Lechugal (H346) es el mismo que se realizó en el Capítulo 2, es decir se aplican las funciones de distribución de probabilidad Gumbel – Tipo 1 y Log normal. Posteriormente se aplica el test Kolmogorov – Smirnov. Adicionalmente se incorporó un análisis de caja, debido a que en un primer intento las funciones de distribución de probabilidad no pudieron ser aceptadas para la estación Zapotal en Catarama (H345).

3.7.1. Análisis de caja

Un análisis de caja se emplea para determinar aquellos valores atípicos o “outliers” en una serie histórica, basado en los cuartiles de la misma. Se busca información acerca de los valores mínimo y máximo, los cuartiles Q1 (25% de los datos), Q2 o mediana (50% de los datos) y Q3 (75% de los datos).

El procedimiento consiste en ordenar los datos de forma ascendente y obtener los valores mínimo, máximo y los cuartiles Q1, Q2 y Q3; para así poder estimar el rango inter cuartílico RIC que se obtiene a partir de la diferencia entre los cuartiles Q3 y Q1, es decir

Ecuación 3.3
$$\text{RIC} = \text{Q3} - \text{Q1}$$

Deben calcularse los límites superior e inferior, Li y Ls, que identifiquen a los valores atípicos. Para ello se establecen como atípicos a aquellos menores a $\text{Q1} - 1.5 \text{ RIC}$ o superiores a $\text{Q3} + 1.5 \text{ RIC}$.

Del análisis de caja aplicado a la estación Zapotal en Catarama (H345) se obtuvieron los siguientes resultados: (ver Tabla 3.7)

Tabla 3.7 Resultados del análisis de caja.

Parámetro	Q máximos instantáneos (m3/s)
Mínimo	513
Cuartil 1	868.3
Mediana	901.16
Cuartil 3	911.59
Máximo	928.117
Rango intercuartílico	43.29
Límite superior	976.53
Límite inferior	803.37

Elaboración: Vintimilla A., Zhungo J.

Se determinó que la serie histórica de la estación Zapotal en Catarama (H345) presenta ciertos valores “outliers”, razón por la que no cumple con la hipótesis de la prueba de bondad de ajuste. Se decidió establecer que solamente los resultados para la estación Zapotal en Lechugal (H346) serán válidos para la cuenca en estudio.

3.7.1.1. Distribución de probabilidad de diseño

Las distribuciones que se utilizaron para el análisis de caudales máximos instantáneos para la cuenca del río Catarama son la distribución de Gumbel y Log Normal, y luego se escogió aquella distribución que mejor se ajuste a la serie de datos, finalmente se realizó la prueba de bondad de ajuste de Kolmogorov – Smirnov en la serie de datos de la estación hidrológica Zapotal en Lechugal (H346), donde el período de información disponible está entre los años 1965 a 2009. Mediante la aplicación de las expresiones indicadas en la sección 2.5.2.1 se obtuvieron los siguientes valores para los parámetros estadísticos:

Tabla 3.8 Parámetros estadísticos de la estación H346.

Código	H346
Estación	Zapotal en Lechugal
# Años de información	38
Media (\bar{x})	1057.26
Desviación estándar (s)	292.85
Coefficiente de variación (Cv)	0.28

Elaboración: Vintimilla A., Zhungo J.

Siguiendo las bases teóricas de las secciones 2.5.1.1 y 2.5.2.2 para test de Kolmogorov – Smirnov y funciones de distribución de probabilidad, respectivamente, se determinó que la función que mejor se ajusta a la serie histórica para la estación Zapotal en Lechugal (H346) es la distribución Log normal; cuyos resultados son los que se muestran en la Tabla 3.9 mientras que el proceso de cálculo para la distribución seleccionada se presenta en el Anexo 8.

Tabla 3.9 Resultados prueba de bondad de ajuste para caudales máximos instantáneos.

Código	H346
Estación	Zapotal en Lechugal
# datos	38
Distribución	Log normal
\bar{Y}	6.93
Sy	0.27
Dt	0.215
D	0.109

Elaboración: Vintimilla A., Zhungo J.

Mediante la aplicación de la distribución de probabilidad Log normal se pudieron obtener caudales máximos teóricos para diferentes períodos de retorno, en este caso de 5, 10, 25, 50 y 100 años. (ver Tabla 3.10)

Tabla 3.10 Caudales máximos teórico obtenido mediante distribución Log normal.

Períodos de retorno	Caudal máximo instantáneo
(años)	(m³/s)
5	1283
10	1445
25	1640
50	1780
100	1916

Elaboración: Vintimilla A., Zhungo J.

Los caudales máximos mostrados en la tabla anterior están basados en la serie histórica de la estación Zapotal en Lechugal, estos valores se consideran como una estimación a los caudales que podrían producirse ya que se buscan resultados que consideren más variables hidrológicas mediante la aplicación del modelo HEC – HMS.



3.8. Caudales máximos con el uso del modelo hidrológico HEC-HMS

La modelación se realizó mediante el modelo hidrológico HEC-HMS, el cual es un programa computacional del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de Estados Unidos y desarrollado por el Centro de Ingeniería Hidrológica (HEC). HEC-HMS está diseñado para la simulación del proceso de precipitación-escurrimiento en cuencas, en este caso la cuenca del río Zapotal en la provincia de Los Ríos.

3.8.1. Requerimientos y componentes del modelo HEC-HMS

Los requerimientos del modelo para la validación de caudales de diseño para varios periodos de retorno dependen de la información hidrometeorológica disponible y del método seleccionado para determinarlos. Para el presente caso se requiere como elementos de entrada para el evento el hidrograma y la lluvia. Otro requerimiento para este método son las características físicas como superficie de drenaje, tiempo de concentración de la cuenca y de sus subcuencas, longitud y pendiente del cauce y pendiente de las laderas y estimación del número de curva los cuales fueron obtenidos usando ArcGIS10.1.

Para la obtención del hidrograma de crecida en el programa HEC-HMS se desarrollan los siguientes componentes:

a) Modelo de cuenca (Basin model)

Este es usado para la representación de la parte física de la cuenca, para lo que se agregan elementos hidrológicos conectados entre sí. En este apartado es donde se introduce y edita la red de drenaje, así como las propiedades de la cuenca y también los métodos de cálculo escogidos.

Los elementos utilizados para la modelación fueron los siguientes:

- **Subcuenca (Subbasin):** Representa la parte física de la cuenca.



- **Canal (Reach):** Es el elemento que sirve para el traslado del flujo aguas abajo en el modelo de la cuenca.
- **Unión (Junction):** Empleada para la unión de los caudales provenientes de uno o varios elementos hidrológicos.
- **Salida (Sink):** Representa la salida de la cuenca.

b) Modelo meteorológico (Meteorological model)

El modelo meteorológico es el que calcula la precipitación requerida en una subcuenca. Dentro de esta función se puede interpolar datos de lluvia a partir de las estaciones pluviométricas existentes o utilizar directamente los datos de una estación concreta.

Este modelo cuenta con varios métodos disponibles para el cálculo de la precipitación promedio, de los que se ha escogido el método de tormenta SCS (SCS Storm).

c) Especificaciones de control (Control Specifications)

Se introducen las propiedades temporales de la simulación, como es la fecha y horas de inicio y final de la simulación, es decir se fija el tiempo de duración de una corrida de una simulación.

d) Datos de entrada (Time Series Data)

Es aquí en donde se introduce los valores de lluvia a ser simulados y el intervalo de simulación.

3.8.2. Análisis de alternativas

Las alternativas que se analizan en la presente tesis son las empleadas para la determinación del caudal máximo teórico. Se describen los métodos de Clark, Racional, Snyder y del Soil Conservation Service (SCS).

3.8.2.1. Método de Clark

El método de Clark se basa en la distribución de la superficie total de la cuenca entre líneas isócronas (líneas de tiempo de traslado constante), y así poder conocer el volumen de agua caído sobre cada una de las superficies y considerar el retardo producido por el tránsito del agua a lo largo de la cuenca.

Este método supone el tránsito del caudal en un depósito considerado lineal, en donde el caudal de salida es proporcional al volumen almacenado. Los parámetros de diseño son: el tiempo de concentración (T_c) y el coeficiente de almacenamiento (R) (Fatorelli y Fernández, 2011).

3.8.2.2. Método Racional

Aparicio (1989) explica que el método racional toma en cuenta el área de la cuenca y la intensidad de la precipitación. Si se acepta que durante la lluvia no cambia la capacidad de infiltración de la cuenca la fórmula racional es la siguiente:

Ecuación 3.4
$$Q = Ci A$$

Donde,

Q = Caudal máximo (m^3/s);

i = Intensidad máxima de la lluvia (mm/h);

A = Área de la cuenca en estudio (km^2);

C = Coeficiente de escurrimiento entre 0 y 1.

3.8.2.3. Método de Snyder

El método de Snyder propone ecuaciones que se han desarrollado para calcular el pico y la base del hidrograma unitario. Empíricamente, se definen el ancho del hidrograma unitario igual al 50% y 75% del caudal pico. (Fatorelli y Fernández, 2011)



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Las ecuaciones fundamentales de este método, en el sistema internacional de unidades, son:

Ecuación 3.5
$$T_R = C_I C_t (L_{ca} * L)^{0.3}$$

Ecuación 3.6
$$Q_p = \frac{0.2778 C_p A}{T_p}$$

Donde,

T_R = Tiempo de retardo (horas);

L_{ca} = Distancia desde la estación de salida de la cuenca y el centroide de la misma medido a lo largo del canal principal (km);

L = Distancia desde la estación de salida al borde más alejado de la cuenca medido a lo largo del canal principal (km);

C_t = Coeficiente empírico que depende las características de la cuenca;

C_I = Constante igual a 0.7517;

Q_p = Caudal piso (m^3/s);

C_p = Coeficiente empírico de retención y almacenamiento, entre 0.4 y 0.9;

A = Área de la cuenca (km^2).

3.8.2.4. Método del Soil Conservation Service (SCS, 1972)

Según Fattorelli y Fernández (2011), este método ha sido usado con mayor frecuencia que los otros gracias a su practicidad, capacidad operativa y aceptables resultados. Además de que en sus primeros trabajos fue aplicado en áreas cultivadas, pero luego ha podido ser empleado en áreas naturales y urbanas.

El Soil Conservation Service desarrolló un método para calcular las abstracciones iniciales de la precipitación de una tormenta. La profundidad de

exceso de precipitación o escorrentía directa P_e es siempre menor o igual a la profundidad de precipitación P . Después de que la escorrentía inicia, la profundidad adicional del agua retenida en la cuenca F_a es menor o igual a alguna retención potencial máxima S , luego existe una cantidad de precipitación I_a en la que no se presente escorrentía, dando una escorrentía potencial $P-I_a$. El método SCS establece una relación de igualdad entre las dos cantidades reales y las dos cantidades potenciales, la cual se describe a continuación:

Ecuación 3.7

$$\frac{F_a}{S} = \frac{P_e}{P-I_a}$$

Del principio de continuidad se establece lo siguiente:

Ecuación 3.8

$$P = P_e + I_a + F_a$$

Combinando estas dos ecuaciones se tiene una ecuación básica para el cálculo de la profundidad de exceso de precipitación.

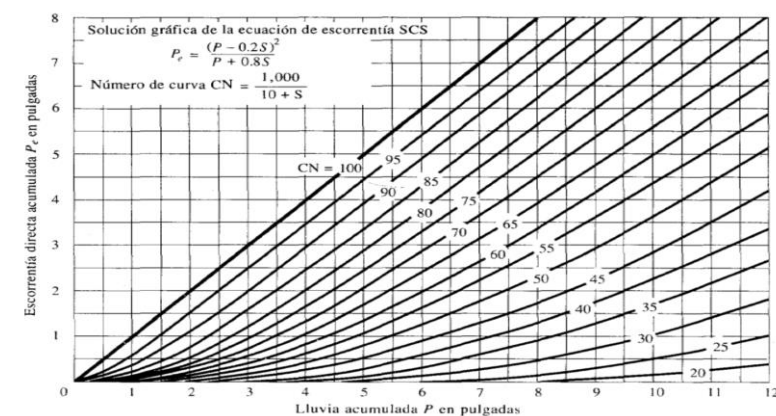
Ecuación 3.9

$$P_e = \frac{(P-I_a)^2}{P-I_a+S}$$

Donde $I_a = 0.2 S$

El SCS definió un número adimensional CN correspondiente a una curva determinada al realizar las gráficas de P y P_e (ver Figura 3.9) para $0 \leq CN \leq 100$.

Figura 3.9 Curvas del método SCS.



Fuente: Chow, 1994.



La ecuación que relaciona el número de curva y la capacidad máxima de retención del suelo S , es la que se presenta a continuación:

Ecuación 3.10
$$S = \frac{25400}{CN} - 254$$

Para la determinación del número de curva CN deben considerarse tipo de suelo y uso. Existen cuatro grupos principales de suelos según el punto de vista hidrológico según el potencial de escurrimiento, los que se pueden ver en la Tabla 3.11. (Hudson, 1997)

Tabla 3.11 Grupos hidrológicos de suelo.

Grupo hidrológico del suelo	Potencial de escurrimiento	Infiltración cuando la tierra está húmeda	Suelos típicos
A	Escaso	Alta	Arenas y grava excesivamente drenadas.
B	Moderado	Moderada	Texturas medias.
C	Medio	Lenta	Textura fina o suelos con una capa que impide el drenaje hacia abajo.
D	Elevado	Muy lenta	Suelos de arcillas hinchadas o compactas o suelos poco profundos sobre capas impermeables.

Fuente: Hudson, 1997

Las condiciones de humedad antecedente indican el estado de humedad del suelo en la cuenca dependiendo de la precipitación total en los cinco días previos a la tormenta y se resumen en 3 casos. (ver Tabla 3.12)

Tabla 3.12 Condiciones de humedad antecedente.

Condición	Tipo de suelo	Descripción
I	Suelo seco	Los suelos están secos pero no hasta el punto de marchitamiento.
II	Suelo con capacidad de campo	Condición promedio. Normalmente en la condición que se considera en el diseño como precedente a las crecientes.
III	Suelo en saturación	Cuando ha llovido mucho el suelo está con muy baja infiltración inicial (solo es posible la infiltración básica)

Fuente: Fattoreli y Fernández, 2011.



Hudson (1997) explica que dependiendo del uso que se le da al suelo la retención aumenta y disminuye la producción de escurrimiento, por lo que se han clasificado dichos usos en diferentes categorías. La Tabla 3.13 da el valor de CN para la condición II, si las condiciones en la cuenca de estudio difieren de las mencionadas deben hacerse la conversiones correspondientes.

El número de curva se determina en función de las condiciones antecedentes de humedad (I) para condiciones secas, (II) para condiciones normales, (III) para condiciones húmedas, los números de curva equivalentes pueden calcularse por:

Ecuación 3.11
$$CN(I) = \frac{4.2CN(II)}{10 - 0.058CN(II)}$$

Ecuación 3.12
$$CN(III) = \frac{423CN(II)}{10 + 0.13CN(II)}$$

Tabla 3.13 Estimación del número de curva de escorrentía para condiciones de humedad II.

Uso, cobertura de la tierra	Tratamiento	Estado hidrológico	Grupo hidrológico del suelo			
			A	B	C	D
Barbecho	En surcos rectos		77	86	91	94
Cultivos en surcos	En surcos rectos	Malo	72	81	88	91
		Bueno	67	78	85	89
	En curvas de nivel	Malo	70	79	81	88
		Bueno	65	75	82	86
	En terrazas	Malo	66	74	80	82
		Bueno	62	71	78	81
Cereales	En surcos rectos	Malo	65	76	84	88
		Bueno	63	75	83	87
	En curvas de nivel	Malo	63	74	82	85
		Bueno	61	73	81	84
	En terrazas	Malo	61	72	79	82
		Bueno	59	70	78	81
Leguminosas	En surcos rectos	Malo	66	77	85	89
		Bueno	58	72	81	85
	En curvas de nivel	Malo	64	75	83	85
		Bueno	55	69	78	83
	En terrazas	Malo	63	73	80	83
		Bueno	51	67	76	80
Pastos		Malo	68	79	86	89
		Regular	49	69	79	84
		Bueno	39	61	74	80
	En curvas de nivel	Malo	47	67	81	88
		Regular	25	59	75	83
		Bueno	6	35	70	79
Pradera (permanente)		Bueno	30	58	71	78
Bosque		Malo	45	66	77	83
		Regular	36	60	73	79
		Bueno	25	55	70	77
Granjas			59	74	82	86
Carreteras sin afirmar			72	82	87	89
Carreteras afirmadas			74	84	90	92

Fuente: Hudson, 1997.

3.8.3. Parámetros de diseño

Los parámetros de diseño a determinar son los usados por el método del Soil Conservation Service SCS, debido a que es el método que presenta mayor exactitud en sus cálculos y toma en cuenta factores que están en función de las características físicas de la cuenca en estudio y de la cantidad de lluvia.

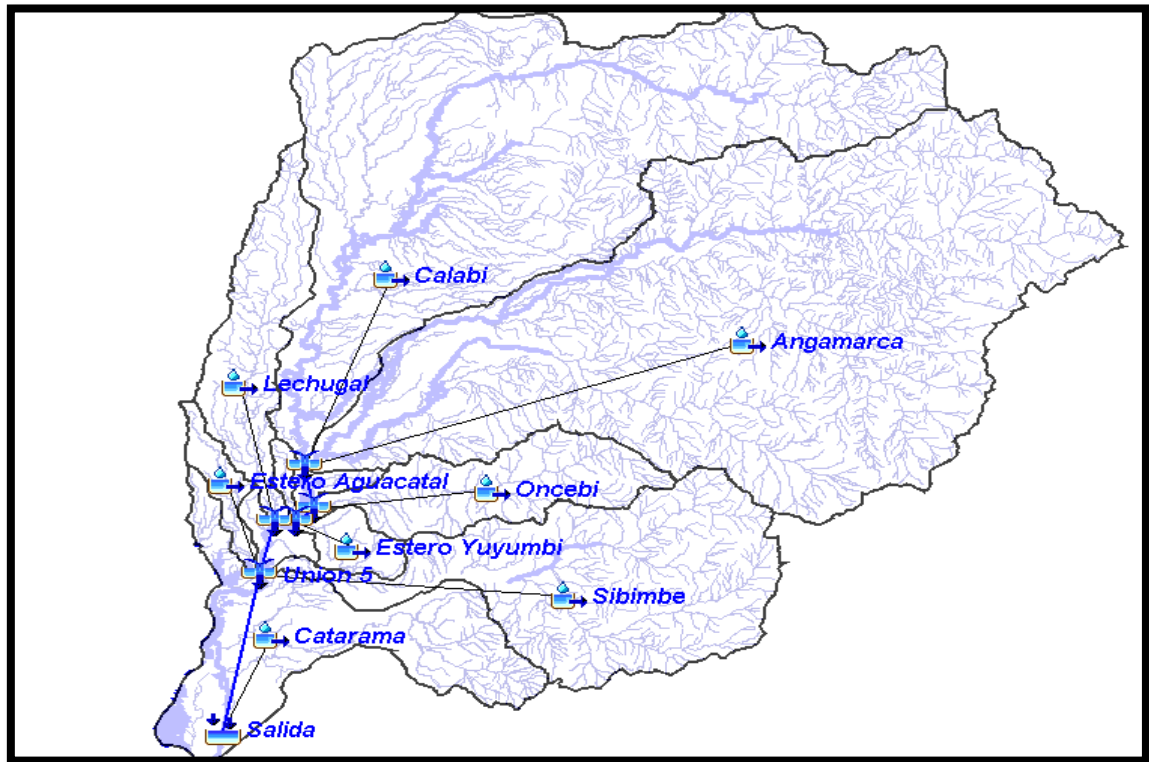
De acuerdo a la información disponible se optó en aplicar lo que sigue:

- Pérdidas: Número de curva SCS;
- Transformación lluvia – caudal: Hidrograma unitario SCS;
- Flujo base: Recesión.

Son requeridos datos de las áreas de todas las subcuencas y áreas de drenaje secundarias en km^2 , establecer tormenta por método SCS, número de curva CN (SCS), abstracciones iniciales, impervious igual a 0.5%; valor que está en función del tipo de cobertura y uso del suelo lo que regula la permeabilidad, y tiempo de retardo en minutos.

Se delimitaron en total ocho subcuencas y tres áreas de drenaje secundarias. Las subcuencas empleadas corresponden a los ríos Angamarca, Calabí, Lechugal, Oncebi, Sibimbe y Catarama y a los esteros Aguacatal y Yuyumbi, para las cuales se obtuvieron sus áreas en km^2 mediante el programa ArcGIS 10.1.

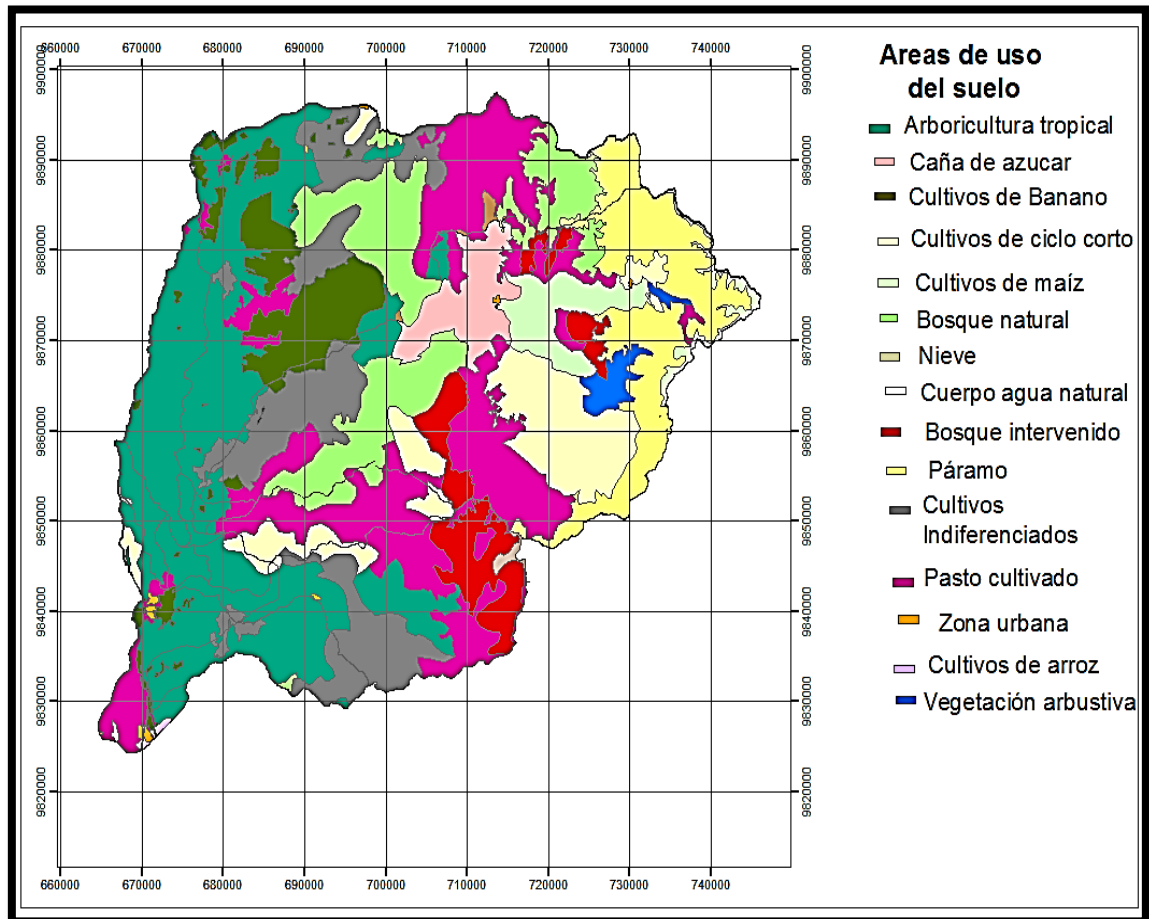
La distribución de las subcuencas y drenajes se puede ver Figura 3.10, en la que adicionalmente se incluye el esquema de ubicación y conexión de los elementos del modelo.

Figura 3.10 Distribución de subcuencas y elementos para modelación en HEC – HMS.

Elaboración: Vintimilla A., Zhungo J.

Luego, para determinar el número de curva se establece que el suelo presenta condiciones de humedad tipo II, es decir condiciones promedio de humedad del suelo. También se adopta un suelo B según el grupo hidrológico, el cual presenta una potencial de escurrimiento moderado y texturas medias.

El procedimiento de cálculo consiste en estimar las áreas según uso de suelo de cada una de las subcuencas a partir del mapa de uso del suelo de Ecuador que dispone el PROMAS-UNIVERSIDAD DE CUENCA a escala 1:250000 (ver Figura 3.11) y se selecciona el número de curva para cada una de ellas en base a la Tabla 3.13. El número de curva para cada subcuenca resulta de la sumatoria del producto entre el porcentaje del área que representa cada uso de suelo y el CN tomado de la Tabla.

Figura 3.11 Mapa de uso de suelo.

Elaboración: Vintimilla A., Zhungo J.

En la Tabla 3.14 se muestra el proceso de cálculo para la subcuenca del río Calabí, el cual sirve como ejemplo ya que para las demás subcuencas el procedimiento seguido es el mismo. El cálculo de CN para cada subcuenca se encuentra a detalle en el Anexo 9.

Tabla 3.14 Proceso de cálculo de CN para subcuenca del río Calabí.

Uso	Calabí			
	Área (km ²)	CN tabla	%	CN parcial
Arboricultura Tropical	281.7	55.0	26.2	14.4
Bosque Intervenido	0.5	66.0	0.0	0.0
Bosque Natural	216.9	60.0	20.2	12.1
Cultivos de Banano	201.0	78.0	18.7	14.6
Cultivos de Caña de Azúcar	6.1	79.0	0.6	0.5
Cultivos de Ciclo Corto	7.9	81.0	0.7	0.6
Cultivos de Palma Africana	0.3	78.0	0.0	0.0
Cultivos Indiferenciados	133.4	81.0	12.4	10.1
Paramo	37.2	60.0	3.5	2.1
Pasto Cultivado	188.7	67.0	17.6	11.8
Zona Urbana	0.3	90.0	0.1	0.1
Total	1074.0			66.3

Elaboración: Vintimilla A., Zhungo J.

El número de curva es el parámetro clave del análisis por método SCS, la Tabla 3.15 muestra los valores obtenidos para cada subcuenca luego de aplicar la metodología explicada anteriormente.

Tabla 3.15 Número de curva para cada subcuenca.

Subcuenca	CN
Angamarca	70.0
Calabí	66.2
Lechugal	55.4
Aguacatal	55.9
Catarama	63.1
Oncebi	69.7
Sibimbe	67.0
Yuyumbi	60.0

Elaboración: Vintimilla A., Zhungo J.

Para el cálculo de las abstracciones iniciales se emplearon las ecuaciones dadas en la sección 3.8.2.4 . Los valores de áreas y abstracciones iniciales son mostrados en la Tabla 3.16.

Tabla 3.16 Parámetros de diseño para el método SCS.

Parámetro	Unidad	Angamarca	Calabí	Lechugal	Aguacatal
Área	km ²	1437.32	1073.97	172.19	36.39
Abstracciones iniciales	mm	21.8	25.98	40.95	40.11

Tabla 3.16 (Continuación) Parámetros de diseño para el método SCS.

Parámetro	Unidad	Catarama	Oncebi	Sibimbe	Yuyumbi
Área	km ²	303.22	167.89	442.73	39.42
Abstracciones iniciales	mm	29.67	22.12	25	33.81

Elaboración: Vintimilla A., Zhungo J.

3.8.4. Hietograma de diseño

Fattorelli y Fernández (2011) explican que un hietograma “considera la distribución en el tiempo de la lluvia”. Este es un diagrama de barras de lámina o intensidad de lluvia que está en función del tiempo, donde cada intervalo es de igual duración y la intensidad es constante.

La construcción del hietograma se basa en el método del bloque alterno, el cual es una forma simple de desarrollar el hietograma de diseño utilizando las curvas Intensidad-Duración-Frecuencia.

3.8.4.1. Curvas Intensidad – Duración – Frecuencia

La intensidad es la tasa temporal de precipitación, es decir, la profundidad por unidad de tiempo (mm/h). La ecuación que se describe a continuación es la que representa la intensidad promedio.

Ecuación 3.13

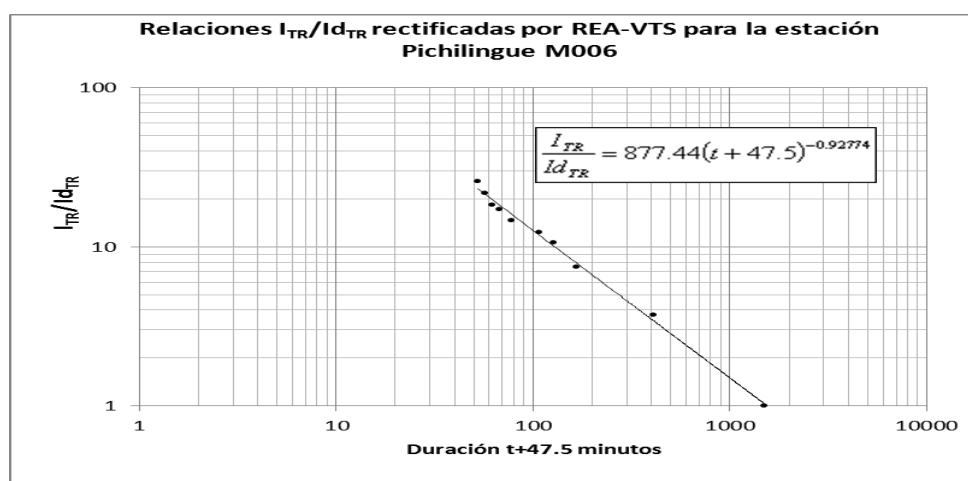
$$i = \frac{P}{T_d}$$

Donde P es la profundidad de la lluvia (mm) y T_d es la duración (min). La frecuencia se expresa en función del periodo de retorno, T , que es el intervalo de tiempo promedio entre eventos de precipitación que igualan o exceden la magnitud de diseño. (Chow, 1994)

El análisis de las curvas intensidad-duración-frecuencia se realiza con la información de la estación Pichilingue (M006), en esta estación no se dispone de información de precipitación diaria registradas para diferentes horas del día por lo que se recurre a las ecuaciones de intensidades máximas determinadas por el INAMHI en el “Estudio de Lluvias intensas” en el año 1999 (Quito, Ecuador). Las ecuaciones se encuentran disponibles de acuerdo a la zonificación establecida por la misma institución, la ecuación para la estación Pichilingue corresponde a la zona 30.

Las ecuaciones propuestas por el INAMHI fueron rectificadas dentro del estudio hidrológico en la etapa de prefactibilidad del Proyecto PACALORI por los especialistas a cargo del área de hidrología, puesto que mediante esta rectificación se unificó el rango de duraciones. En la Figura 3.12 se presentan las curvas rectificadas para la determinación de las intensidades, en donde se establece una sola ecuación para cualquier instante del día.

Figura 3.12 Relaciones I_{TR}/I_{dTR} para la estación Pichilingue M006. Rectificación.



Fuente: INAMHI-PROMAS Universidad de Cuenca

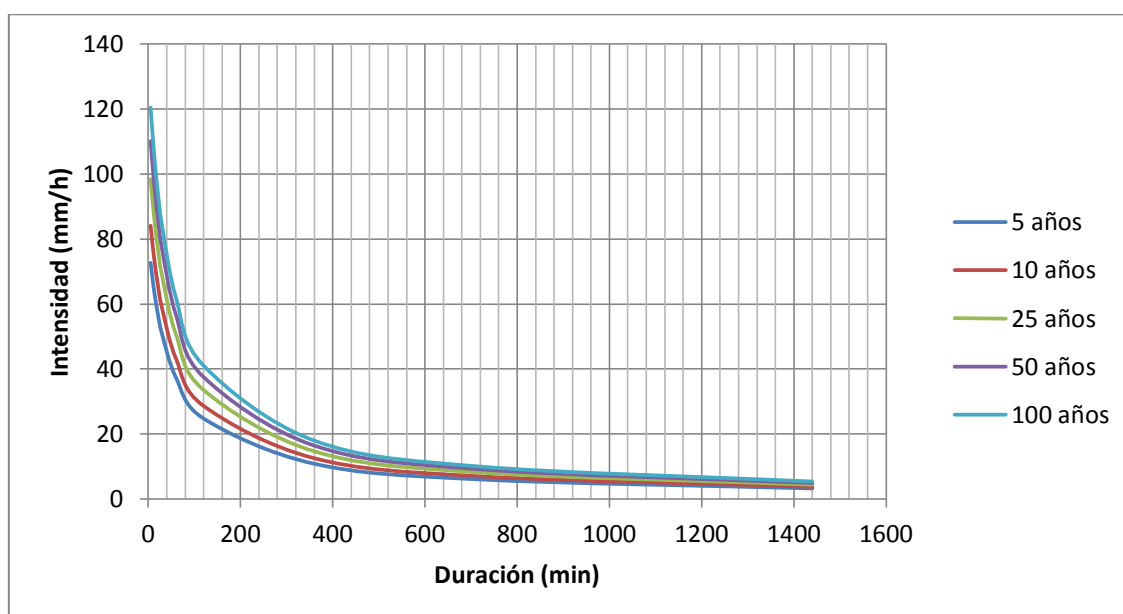
Mediante la aplicación de la relación rectificada ITR/IdTR para diferentes tiempos en minutos se obtuvieron los valores de la Tabla 3.17 y su gráfico se ve en la Figura 3.13.

Tabla 3.17 Relaciones Intensidad-Duración- Frecuencia para estación Pichilingue M006.

Períodos de retorno (años)	Intensidad (mm/h)									
	Duración (min)									
	5	10	15	20	30	60	120	360	720	1440
5	72.67	66.79	61.82	57.56	50.63	37.38	24.77	10.86	6.03	3.27
10	84.07	77.27	71.52	66.59	58.58	43.24	28.66	12.56	6.98	3.78
25	98.40	90.43	83.70	77.93	68.56	50.61	33.54	14.70	8.17	4.42
50	110.09	101.18	93.65	87.19	76.70	56.62	37.52	16.45	9.14	4.95
100	120.41	110.66	102.42	95.37	83.89	61.93	41.04	17.99	10.00	5.41

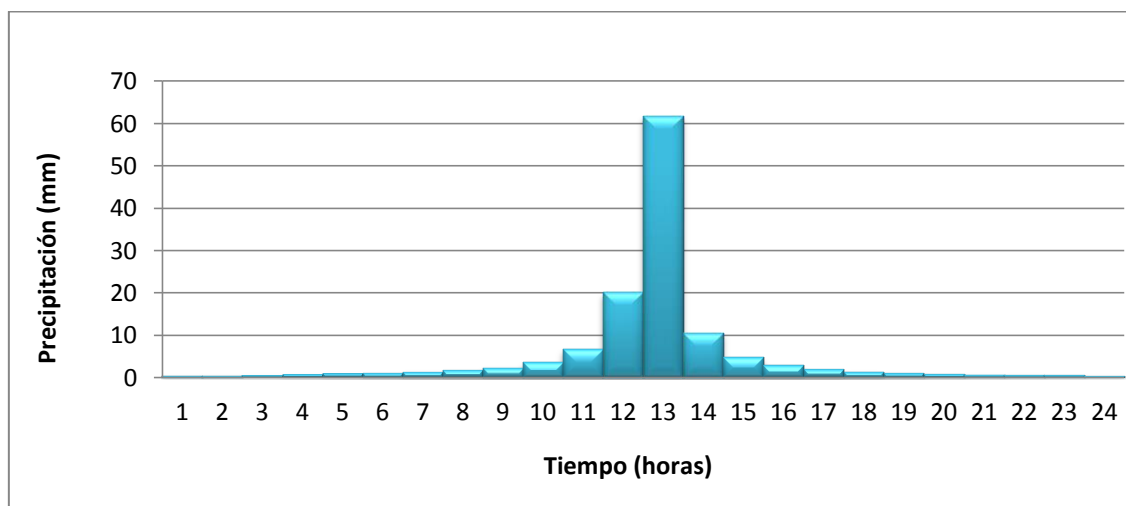
Elaboración: Vintimilla A., Zhungo J.

Figura 3.13 Curvas IDF para estación Pichilingue M006.



Elaboración: Vintimilla A., Zhungo J.

En la Figura 3.14 se indica el hietograma de diseño para un periodo de retorno de 50 años obtenido mediante curvas IDF y método de bloque alterno, en la Tabla 3.18 se presentan los valores para la construcción del mismo.

Figura 3.14 Hietograma de diseño (TR = 50 años).

Elaboración: Vintimilla A., Zhungo J.

Tabla 3.18 Valores calculados para la construcción del Hietograma (TR = 50 años).

Tiempo (min)	Tiempo (h)	Intensidad (mm/h)	Precipitación (mm)	Δ Precipitación (mm)	Δ Precipitación ordenado (mm)
60	1	61.93	61.93	61.93	0.58
120	2	41.04	82.08	20.15	0.60
180	3	30.89	92.67	10.59	0.67
240	4	24.86	99.44	6.77	0.88
300	5	20.85	104.25	4.81	1.02
360	6	17.99	107.94	3.69	1.20
420	7	15.84	110.88	2.94	1.42
480	8	14.16	113.28	2.40	1.81
540	9	12.81	115.29	2.01	2.40
600	10	11.71	117.10	1.81	3.69
660	11	10.78	118.58	1.48	6.77
720	12	10.00	120.00	1.42	20.15
780	13	9.32	121.16	1.16	61.93
840	14	8.74	122.36	1.20	10.59
900	15	8.22	123.30	0.94	4.81
960	16	7.77	124.32	1.02	2.94
1020	17	7.36	125.12	0.80	2.01
1080	18	7.00	126.00	0.88	1.48
1140	19	6.67	126.73	0.73	1.16
1200	20	6.37	127.40	0.67	0.94
1260	21	6.10	128.10	0.70	0.80
1320	22	5.85	128.70	0.60	0.73
1380	23	5.62	129.26	0.56	0.70
1440	24	5.41	129.84	0.58	0.56

Elaboración: Vintimilla A., Zhungo J.



En el hietograma obtenido para un periodo de retorno de 50 años se puede observar que la altura máxima de precipitación que se da es elevada y que no se encuentra repartida uniformemente para cada intervalo de tiempo. Esta situación se presenta debido a que la estación de Pichilingue se encuentra localizada en la zona plana de la cuenca del río Catarama, en la región costa las intensidades son muy altas, sin embargo no revela el comportamiento climático de toda la cuenca hidrográfica que nace en la Sierra ecuatoriana a altitudes mayores a los 4000 msnm

Siendo así, la situación de elaborar el hietograma de diseño es complejo; el modelo HEC - HMS en su modulo meteorológico, toma en consideración esta variabilidad espacial y proporciona recomendaciones especiales para este particular.

El método de tormenta SCS genera hietogramas para cuatro tipos de lluvia, tipo 1, tipo 1A, tipo II, tipo III, desarrollados para caracterizar el comportamiento de cuencas de Estados Unidos. Para la cuenca del río Zapotal se ha escogido la tormenta Tipo 1A ya que reparte más uniformemente la lluvia para los intervalos de tiempo, y se asume que es más representativa para una cuenca de gran extensión.

El volumen de precipitación de diseño se determinó a partir de los mapas de isoyetas generados para información de precipitación máxima en 24 horas para la cuenca y para periodos de retorno de 5, 10, 25, 50 y 100 años (ver Tabla 2.19). En la Tabla 3.19 se presentan los valores de precipitación promedio que serán empleados en el modelo HEC - HMS para obtener caudales máximos para los periodos de retorno señalados.

Tabla 3.19 Precipitación de diseño para la cuenca del río Catarama (mm).

Período de retorno	Precipitación máx. 24 horas
(años)	(mm)
5	78.38
10	90.68
25	106.13
50	118.74
100	129.87

Elaboración: Vintimilla A., Zhungo J.

3.8.5. Hidrograma de diseño

Según Chow (1994), se define al hidrograma unitario de una cuenca como el hidrograma de esorrentía directa resultante de 1mm de exceso de lluvia generado uniformemente sobre el área de drenaje a una tasa constante a lo largo de una duración efectiva.

Para la determinación del hidrograma unitario se utiliza el método del hidrograma unitario triangular SCS, este es un hidrograma sintético en el que el caudal y el tiempo se expresan en función del caudal punta, q_p , y del tiempo punta, T_p , respectivamente. La ecuación de la SCS que relaciona el caudal punta con el tiempo punta es la que se describe a continuación:

Ecuación 3.14

$$q_p = \frac{2.08A}{T_p}$$

Donde q_p es el caudal pico (m^3/s); A es el área de drenaje (Km^2); T_p es el tiempo pico o punta (h). El tiempo pico se puede determinar utilizando la siguiente relación:

Ecuación 3.15

$$T_p = \frac{\Delta_t}{2} + T_r$$

Donde Δ_t es la duración de la lluvia (h); T_r es el tiempo de retardo (h). El tiempo de retardo se calcula con la siguiente relación:

Ecuación 3.16

$$T_r = 0.6 T_c$$

Donde T_c es el tiempo de concentración (h), el mismo que se determinó utilizando la ecuación de Kirpich.

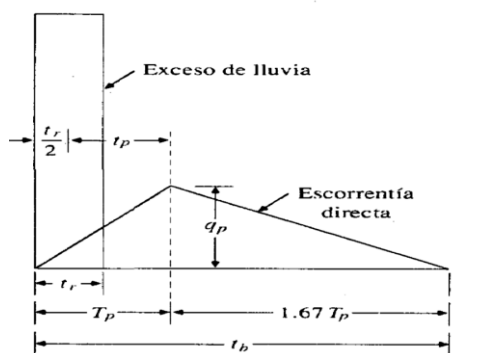
Ecuación 3.17

$$T_c = 3.989 L^{0.77} S^{-0.385}$$

Donde L es la longitud del cauce principal (m) y S es la pendiente del cauce principal.

En la Figura 3.15 se indica la forma del hidrograma triangular y la relación que existe de los parámetros antes descritos.

Figura 3.15 Forma del hidrograma unitario SCS



Fuente: Chow, 1994

Se calculan los valores de la Tabla 3.20 para los parámetros que construyen el hidrograma triangular unitario para cada subcuenca, los cuales se pueden ver en el Anexo 10.

Tabla 3.20 Parámetros del hidrograma triangular unitario SCS para cada subcuenca.

	Unidad	Angamarca	Calabi	Lechugal	Aguacatal
Pendiente	m/m	0.072	0.045	0.0002	0.007
Tiempo de concentración	horas	4.43	7.42	10.36	1.67
Tiempo de retardo	horas	2.66	4.45	6.22	1.00
Tiempo de punta	horas	3.16	4.95	6.72	1.50
Tiempo base	horas	8.44	13.22	17.94	4.01
Caudal punta	m ³ /s	94.6	45.13	5.33	5.05

Tabla 3.20 (Continuación) Parámetros del hidrograma triangular unitario SCS para cada subcuenca.

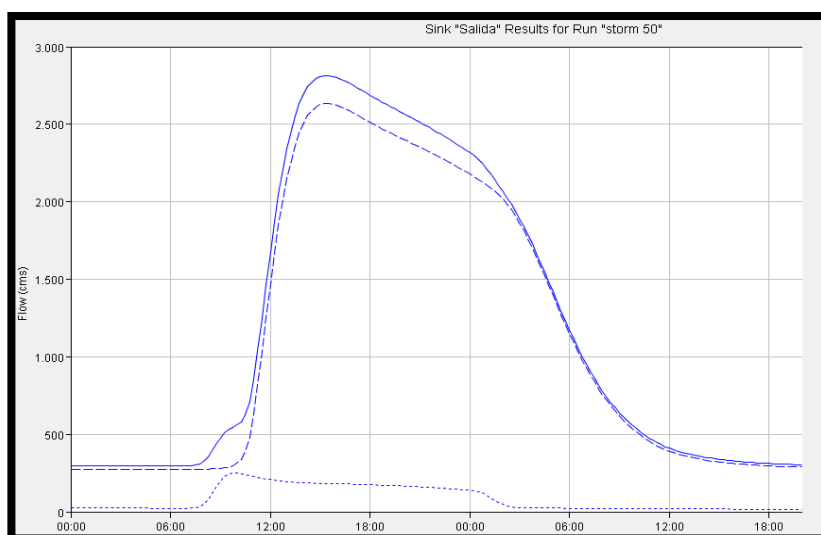
	Unidad	Catarama	Oncebi	Sibimbe	Yuyumbi
Pendiente	m/m	0.067	0.092	0.091	0.107
Tiempo de concentración	horas	2.95	2.27	2.95	0.93
Tiempo de retardo	horas	1.28	1.36	1.77	0.56
Tiempo de punta	horas	1.78	1.86	2.27	1.06
Tiempo base	horas	4.75	4.97	6.07	2.83
Caudal punta	m ³ /s	18.77	18.77	40.57	7.73

Elaboración: Vintimilla A., Zhungo J.

3.8.6. Caudales de diseño para 100 – 50 – 25 – 10 - 5 años de periodo de retorno

El hidrograma de máxima crecida resulta de la suma de los hidrogramas de crecida de cada subcuenca, considerando las pérdidas que se dan en el transcurso del paso del agua por todas estas áreas. La Figura 3.16 presenta el hidrograma de máxima crecida en la salida de la cuenca del río Zapotal, en el punto Zapotal en Lechugal, obtenido de la modelación en el programa HEC – HMS para un período de retorno de 50 años.

Figura 3.16 Hidrograma de máxima crecida en la salida de la cuenca del río Zapotal (en sitio Zapotal en Lechugal)



Elaboración: Vintimilla A., Zhungo J.

Los hidrogramas para los demás períodos de retorno se pueden ver en el Anexo 11.

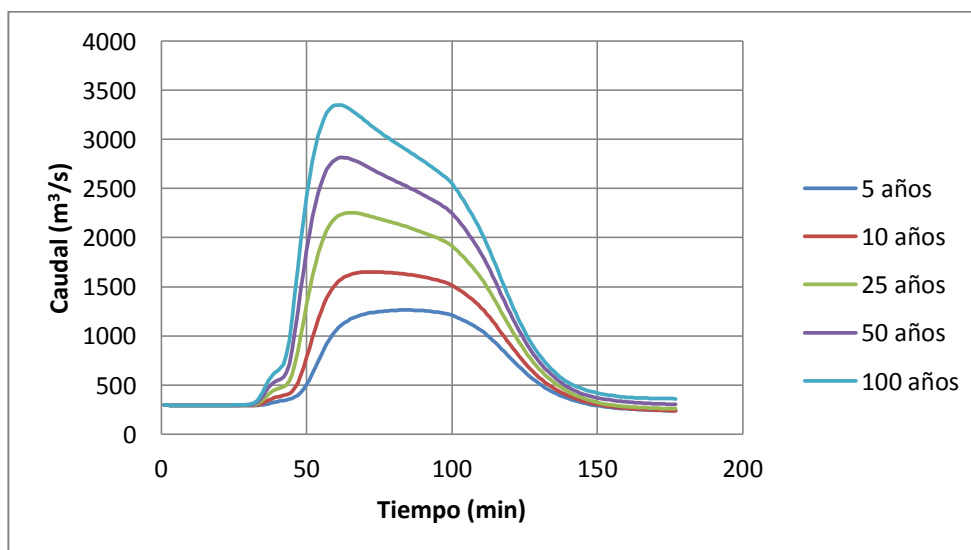
En la Tabla 3.21 se presentan los valores para caudales máximos en el punto de salida de la cuenca del río Zapotal (específicamente en el punto de Zapotal en Lechugal) y en la Figura 3.17 se indican los hidrogramas construídos a partir de los resultados obtenidos para los periodos de retorno en el programa HEC – HMS.

Tabla 3.21 Caudales máximos de crecida en la salida de la cuenca para varios períodos de retorno.

Periodo retorno (años)	Caudal máximo (m ³)	Volumen (1000m ³)
5	1268.4	102775.3
10	1659.8	127426.5
25	2264.8	162453.3
50	2828.0	194416.7
100	3367.5	22457.9

Elaboración: Vintimilla A., Zhungo J.

Figura 3.17 Hidrogramas de máxima crecida para diferentes periodos de retorno.



Elaboración: Vintimilla A., Zhungo J.

3.8.7. Caudales de diseño en sitios de obra

Dentro de la cuenca en estudio existen tres puntos en los que se implementarán obras para la captación de agua, en la Tabla 3.22 se indican tales puntos con sus respectivas coordenadas de ubicación.

Tabla 3.22 Puntos de captación.		
Punto	Coordenadas	
	UTM-X (m)	UTM-Y (m)
Presa Lechugal 2	673966	9850933
Presa Aguacatal	672148	9844496
Trasvase Calabí	676928	9864589

Fuente: PROMAS Universidad de Cuenca

Elaboración: Vintimilla A., Zhungo J.

En la Tabla 3.23 se indican los valores de los caudales de diseño para los sitios de captación para los diferentes periodos de retorno obtenidos por la modelación en HEC – HMS.

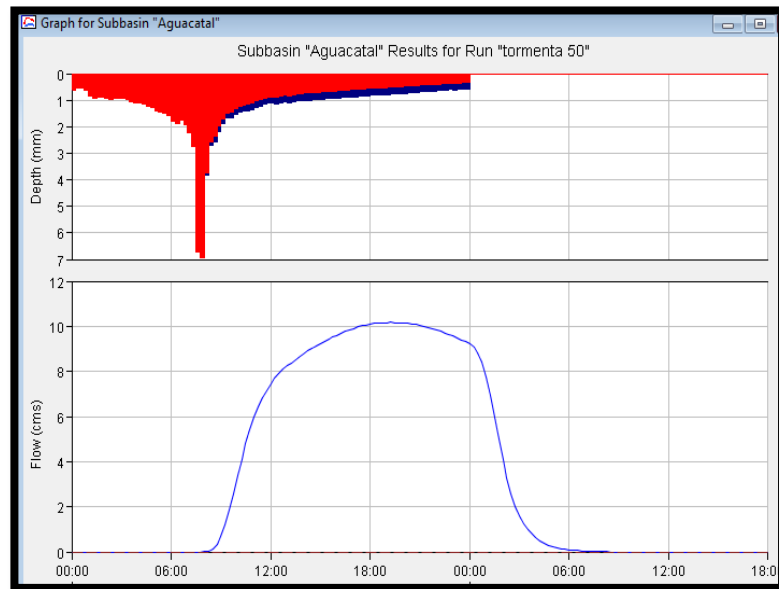
Tabla 3.23 Caudales de diseño en puntos de captación (m³/s).

Periodo retorno (años)	Presa Aguacatal	Presa Lechugal 2	Trasvase Calabí
5	3.0	13.0	188.1
10	4.9	22.3	267.6
25	7.6	36.0	381.5
50	10.2	48.6	487.7
100	12.6	60.6	601.1

Elaboración: Vintimilla A., Zhungo J.

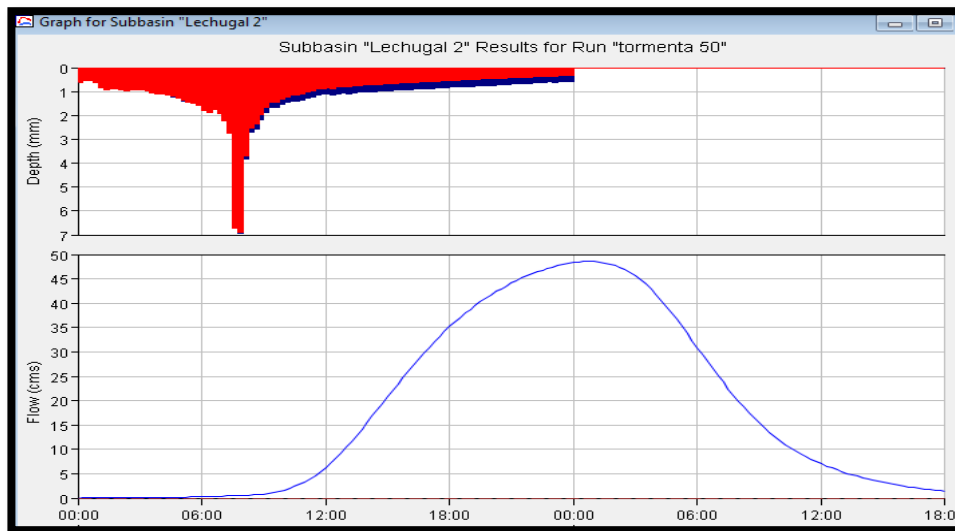
Las Figuras Figura 3.18, Figura 3.19 y Figura 3.20 muestran los hidrogramas y hietogramas generados en HEC – HMS para los puntos de obras.

Figura 3.18 Hidrograma y hietograma en el punto de presa Lechugal (TR = 50 años).



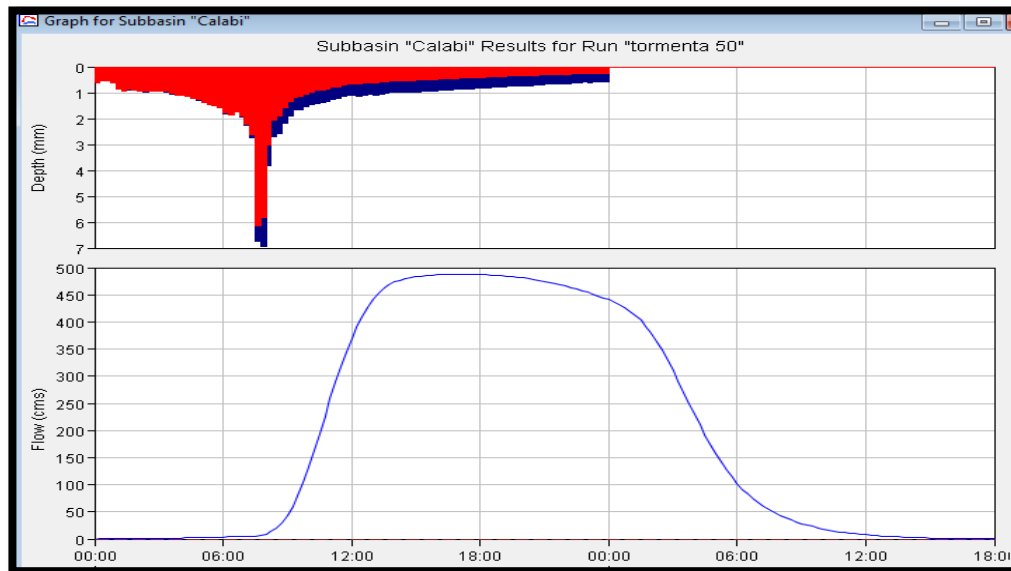
Elaboración: Vintimilla A., Zhungo J.

Figura 3.19 Hidrograma y hietograma en el punto de presa Aguacatal (TR = 50 años).



Elaboración: Vintimilla A., Zhungo J.

Figura 3.20 Hidrograma y hietograma en el punto de trasvase Calabí (TR = 50 años).



Elaboración: Vintimilla A., Zhungo J.

3.9. Estudio de sedimentos

3.9.1. Aforos líquidos y sólidos

Aforar una corriente significa determinar a través de mediciones el gasto que pasa por una sección dada. (Aparicio, 1989). El proyecto PACALORI tiene como uno de sus objetivos realizar un monitoreo continuo en los ríos para en lo posterior determinar la producción de sedimentos en los sitios previstos.

3.9.1.1. Estaciones de aforo

La estación de aforo seleccionada para la determinación de la producción de sedimentos es la estación de Zapotal en Lechugal (H346) que se encuentra ubicada dentro de la cuenca del río Zapotal, la cual cuenta con registros de caudal líquido y concentración media de sólidos desde el año 1978 hasta el 2007 dando un total de 27 datos de aforo, para el año 2013 se han agregado 8 datos de aforos realizados por el personal dentro del proyecto PACALORI que se encuentra a cargo del área del estudio de sedimentología.

3.9.1.2. Resultados de aforos líquidos y sólidos

En la Tabla 3.24 se presenta una tabla que incluye a los datos proporcionados por los anuarios del INAMHI hasta el 2007 más los aforos realizados para el año 2013. Se detalla la fecha en la que fue realizado el aforo con el caudal líquido en m^3/s y la concentración media de sólidos expresado en kg/m^3 , adicionalmente se calculó el gasto sólido en kg/s y $\text{ton}/\text{día}$ que resultan del producto entre el caudal líquido y la concentración media.

Tabla 3.24 Resultado de aforos líquidos y de sólidos en suspensión. Estación Zapotal en Lechugal (H346).

#	Fecha	Caudal líquido	Concentración media	Gasto sólido	Gasto sólido
		(m^3/s)	(Kg/m^3)	Kg/s	$\text{Ton}/\text{día}$
1	27/02/1978	227.713	0.379	86.3	7456.32
2	06/06/1978	113.05	0.0152	1.72	148.61
3	30/10/1978	13.7	0.0051	0.07	6.05
4	22/11/1978	227.713	0.0525	11.95	1032.48
5	24/03/1979	310.26	0.085	26.37	2278.37
6	03/07/1979	44.52	0.0172	0.77	66.53
7	22/01/1980	41.932	0.0172	0.72	62.21
8	30/01/1980	92.404	0.0589	5.44	470.02
9	10/08/1980	28.817	0.0223	0.64	55.3
10	12/03/1981	423.546	0.1692	71.66	6191.42
11	19/06/1984	60.74	0.0465	2.82	243.65
12	15/11/1984	15.26	0.0427	0.65	56.16
13	21/06/1985	53.73	0.0122	0.66	57.02
14	22/11/1986	16.295	0.074	1.21	104.54
15	20/02/1988	237.156	0.0368	8.73	754.27
16	29/06/1990	43.962	0.0347	1.53	132.19
17	24/06/1995	52.77	0.0156	0.82	70.85
18	22/03/1996	620.248	1.0522	652.62	56386.37
19	29/09/2000	21.563	0.0802	1.73	149.47
20	16/06/2003	49.691	0.0517	2.57	222.05

**Tabla 3.24 (Continuación) Resultado de aforos líquidos y de sólidos en suspensión.
Estación Zapotal en LEchugal (H346)**

#	Fecha	Caudal líquido	Concentración media	Gasto sólido	Gasto sólido
		(m3/s)	(Kg/m3)	Kg/s	Ton/día
21	03/11/2003	15.669	0.0403	0.63	54.43
22	15/06/2004	89.151	0.02	1.78	153.79
23	10/02/2005	57.316	0.0371	2.13	184.03
24	28/08/2005	16.127	0.014	0.23	19.87
25	22/02/2007	250.145	0.1127	28.19	2435.62
26	27/05/2007	233.27	0.5557	129.63	11200.03
27	11/11/2007	23.428	0.0107	0.25	21.6
28	18/02/2013	373.82	0.0553	20.67	1785.89
29	18/03/2013	446.37	0.1833	81.82	7069.25
30	16/04/2013	402.57	0.1593	64.13	5540.83
31	13/05/2013	74.11	0.029	2.15	185.76
32	11/06/2013	59.36	0.071	4.21	363.74
33	09/07/2013	49.91	0.006	0.3	25.92
34	06/08/2013	26.79	0.015	0.4	34.56
35	03/09/2013	23.2	0.016	0.37	31.97

Fuente: INAMHI, PROMAS- UNIVERSIDAD DE CUENCA

Elaboración: Vintimilla A., Zhungo J.

3.9.2. Curva de Gasto sólido

Para obtener la producción de sedimentos con mediciones de caudales líquidos hechas en los puntos de aforo se basa en la aplicación de curvas de descarga de sedimentos suspendidos. La curva de descarga de sedimentos se elabora graficando los datos de los caudales sólidos en función de los caudales líquidos, a los que se ajusta una ecuación potencial de la forma siguiente:

Ecuación 3.18

$$Q_s = a Q_L^b$$

UNIVERSIDAD DE CUENCA

Donde,

Q_s = Caudal sólido instantáneo en toneladas por día (t/d);

a = Coeficiente considerado como indicador de la erodabilidad;

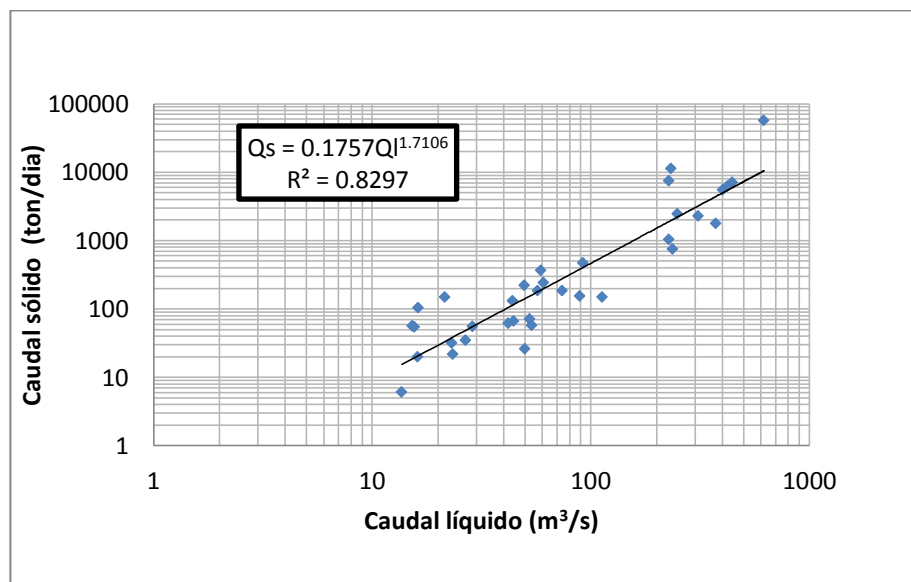
Q_L = Caudal líquido en metros cúbicos por segundo (m^3/s);

b = Exponente que representa la pendiente de la curva de descarga de sedimentos.

En la Figura 3.21 se presenta la curva de gasto sólido graficada con los datos de la Tabla 3.24, los ejes de la gráfica están en escala logarítmica y la ecuación obtenida es la siguiente:

Ecuación 3.19 $Q_s = 0.1757 Q_L^{1.7106}$

Figura 3.21 Curva de gasto sólido para la estación de Zapotal en Lechugal (H346).



Elaboración: Vintimilla A., Zhungo J.

3.4.4. Sólidos en suspensión en sitios de aforo

La determinación de sólidos en suspensión se realiza mediante la unión de dos procesos. Primero se deben extraer los caudales líquidos en m^3/s provenientes de la curva de duración para probabilidades de 1% hasta 95 %



(obtenidas de la Figura 3.6), y segundo, se introducen estos valores de caudal en la ecuación obtenida para la curva de descarga que genera un caudal sólido en ton/día cuya expresión es:

Ecuación 3.20
$$Q_s = 0.1757 Q_L^{1.7106}$$

Del proceso mencionado se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 3.25 Sólidos en suspensión.

Caudal líquido	Probabilidad	# de días	Caudal sólido
(m³/s)	(%)		(Ton/año)
9.13	95	20	154.4
13.64	90	20	307
17.12	85	20	452.8
17.81	80	20	484.4
19.78	75	20	579.6
22.92	70	20	745.8
26.87	65	20	978.8
32.93	60	20	1386
40.16	55	20	1946.4
50.92	50	17	2483.2
70.71	45	17	4354.6
93.57	40	17	7031.5
124.4	35	17	11445.1
168.45	30	17	27081.2
213.61	25	17	52182.9
262.4	20	17	85137.8
323.63	15	17	131618.6
398.08	10	17	203892.8
520.9	5	17	324265.3
728.827	1	15	479815.4
Suma		365	604296.3

Elaboración: Vintimilla A., Zhungo J.



Según los resultados de la Tabla 3.25 se puede evidenciar que la producción de sólidos en suspensión se da desde caudales bajos, semejantes a $10 \text{ m}^3/\text{s}$, y que esta producción crece considerablemente hacia la época invernal; llegando a ser de 605000 toneladas por año aproximadamente.

En época de invierno los caudales son mayores, por esta razón se produce mayor transporte de sólidos en suspensión causado por fenómenos como erosión del cauce o contribuciones de la cuenca. Debido a la disponibilidad de este material, los meses de invierno se caracterizan por elevadas concentraciones de sólidos en suspensión.

3.4.5. Transporte de sedimentos de fondo

El transporte de fondo de sedimentos consiste en el movimiento de las partículas erosionadas mediante su arrastre por el fondo, en la masa de agua o disolución.

Para determinar la cantidad de transporte de sedimentos de fondo se describen a continuación algunos métodos existentes, de los cuales se seleccionará el más adecuado de acuerdo a las características del diámetro de las partículas.

3.4.5.1. Fórmulas para el transporte de fondo

a) Fórmula de Meyer-Peter

Meyer-Peter (1934) desarrolló en Suiza la siguiente ecuación para calcular el transporte de fondo:

Ecuación 3.21

$$S_{bb} = (250q^{2/3}S - 42.5D_{35})^{3/2}$$

Donde,

S_{bb} = Transporte de fondo (kg/s-m);

q = Caudal unitario (m^2/s);



UNIVERSIDAD DE CUENCA

S = Pendiente;

D_{35} = Tamaño característico del sedimento (m).

La fórmula se desarrolló en base a experimentos con gravas uniformes de 5.1 y 28.6 mm y con los datos de Gilbert. (Garcia y Sala, 1998)

b) Fórmula de Meyer-Peter y Müller

Meyer – Peter y Müller (1948) enunciaron una nueva fórmula por modificaciones en la fórmula inicial ya que se hicieron más experimentos con material uniforme y también con material de tamaños diferentes. La relación obtenida de Garde y Ranga Raju (1977) se expresa como:

Ecuación 3.22

$$\left(\frac{K_B}{K_G}\right)^{3/2} \frac{RS}{\left(\frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma}\right)^D} = \left[0.047 + 0.25 \frac{q_s^{2/3}}{D \{(\gamma_s - \gamma)/\gamma\}^{1/3} g^{1/3}} \right]$$

Dónde,

γ_s = Peso específico del sedimento (kg/m^3);

γ = Peso específico del agua (kg/m^3);

R = Radio hidráulico (m);

S = Pendiente;

D = Tamaño medio de las partículas de la superficie (m);

q_s = Caudal sólido unitario (m^2/s).

Para obtener una tasa de transporte en peso seco (kg/m-s) el caudal sólido unitario se multiplica por el peso específico del sedimento.

En esta segunda fórmula interviene la rugosidad del lecho, expresada por la relación K_B/K_G (igual a 1 para lechos lisos). K_B representa la rugosidad del lecho y se define mediante la siguiente expresión:

**Ecuación 3.23**

$$K_B = \frac{u}{\gamma^{2/3}} S^{1/2}$$

Donde u es la velocidad del agua, γ es el calado y S la Pendiente:

El término K_G es la rugosidad de la partícula y se calcula con:

Ecuación 3.24

$$K_G = \frac{26}{D_{90}^{1/6}}$$

Donde D_{90} es el percentil característico de la superficie del lecho en metros.

c) Fórmula de Schoklitsch

Schoklitsch (1950) utilizó el caudal crítico para obtener su ecuación de transporte de fondo. Desarrolló una primera fórmula que posteriormente fue mejorada con más experimentos y datos de ríos. (García y Sala, 1998)

Para calcular el caudal crítico unitario se emplea la expresión

Ecuación 3.25

$$q_c = 0.26 \left\{ \left(\frac{\rho_s}{\rho_w} \right) - 1 \right\}^{\frac{5}{3}} D_{40}^{\frac{3}{2}} S^{-1.17}$$

Dónde, q_c es el caudal crítico unitario (m^2/s), D_{40} es el tamaño superficial del lecho en metros.

El transporte de fondo, tomado de Maza – Álvarez y García – Flores (1996), viene dado por:

Ecuación 3.26

$$S_{bb} = 2500 S^{3/2} (q - q_c)$$

Donde q es el caudal unitario en m^2/s .

3.4.5.2. Aplicación de métodos de arrastre de fondo

Para la aplicación de los métodos de arrastre de fondo es necesario conocer algunos parámetros como la velocidad, el calado y la pendiente de un tramo del río en donde se está realizando este análisis.

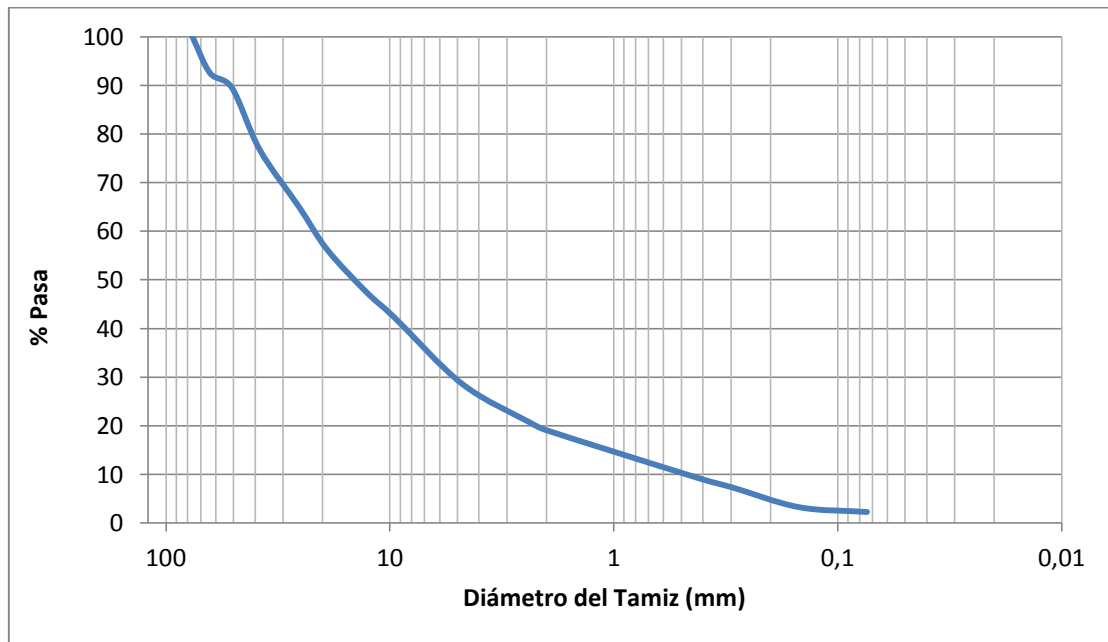
Mediante el programa HEC-RAS versión 4.1 se determinaron estos parámetros, para ello se ingresaron datos de caudales, los mismos que se emplearon para la determinación de los sólidos suspendidos y una sección transversal cuyos valores se pueden ver en la Tabla 3.26 con una cota de fondo de 25 msnm.

Tabla 3.26 Sección transversal para modelación en HEC – RAS.

Abscisa	Profundidad (m)
0	32.1
4	28.35
8.5	25.85
12.5	25.2
17	25
21	26.6
25.5	27.3
29.5	28.8
33.5	30.12
36.5	32.1

Fuente: PROMAS – UNIVERSIDAD DE CUENCA

Como datos generales para la aplicación de los métodos se emplearon $\gamma = 1000 \text{ kg/m}^3$, $\gamma_s = 2650 \text{ kg/m}^3$, $D_{35} = 7.7 \text{ mm}$, $D_{40} = 10 \text{ mm}$, $D_{50} = 15 \text{ mm}$ y $D_{90} = 48 \text{ mm}$. Los datos de diámetros característicos fueron proporcionados por el PROMAS - UNIVERSIDAD DE CUENCA y resultan de la media aritmética de los diámetros obtenidos de las curvas granulométricas para los meses de junio, julio, agosto y septiembre del 2013 para Zapotal. En la Figura 3.22 se muestra la curva granulométrica correspondiente al mes de Junio, la cual se ha adoptado como curva granulométrica general.

Figura 3.22 Granulometría Zapotal.

Fuente: PROMAS – UNIVERSIDAD DE CUENCA

Después de aplicar la fórmula de Meyer – Peter de arrastre de fondo y tomar los valores generados por HEC – RAS para los parámetros, se obtienen los resultados presentados en la Tabla 3.27. Dando como total un arrastre de fondo de 318000 toneladas por año.



Tabla 3.27 Arrastre de fondo según fórmula de Meyer – Peter para Zapotal en Lechugal.

Probabilidad	Caudal líquido	Ancho superficial	Caudal unitario	# días	Tasa transporte	Tasa transporte
(%)	(m ³ /s)	(m)	(m ² /s)		(kg/m.s)	(ton/año)
95	9.13	12.16	0.75	20	0	0
90	13.64	13.2	1.03	20	0	0
85	17.12	13.93	1.23	20	0	0
80	17.81	14.2	1.25	20	0	0
75	19.78	14.96	1.32	20	0	0
70	22.92	16.06	1.43	20	0	0
65	26.87	17.29	1.55	20	0	0
60	32.93	18.95	1.74	20	0.01	328.4
55	40.16	20.13	2	20	0.02	691.2
50	50.92	21.25	2.4	17	0.04	1248.5
45	70.71	23.03	3.07	17	0.09	3040.5
40	93.57	24.64	3.8	17	0.15	5434.6
35	124.4	26.12	4.76	17	0.23	8827.4
30	168.45	28.14	5.99	17	0.35	14467.7
25	213.61	29.97	7.13	17	0.46	20254.8
20	262.4	31.61	8.3	17	0.58	26923.1
15	323.63	32.86	9.85	17	0.74	35721.3
10	398.08	34.24	11.63	17	0.93	46766.7
5	520.9	36.25	14.37	17	1.23	65493.9
1	728.827	36.5	19.97	15	1.86	87985.5
					SUMA	317183.6

Elaboración: Vintimilla A., Zhungo J.

En la Tabla 3.28 se presenta la aplicación de la fórmula de Meyer Peter y Müller, donde se puede ver que la producción de sedimentos de arrastre de fondo es de 735000 ton/año.



Tabla 3.28 Arrastre de fondo según fórmula de Meyer – Peter y Müller para Zapotal en Lechugal.

Probabilidad	Caudal líquido	Calado	Velocidad del agua	Área	Radio hidráulico	KB	KG	Caudal unitario	# días	Tasa transporte
(%)	(m ³ /s)	(m)	(m/s)	(m ²)	(m)			(m ² /s)		(ton/año)
95	9.13	1.21	0.95	9.63	0.77	26.46	43.13	0	20	0
90	13.64	1.45	1.07	12.7	0.92	26.41	43.13	0	20	0
85	17.12	1.61	1.15	14.89	1.03	26.47	43.13	0	20	0
80	17.81	1.64	1.16	15.36	1.04	26.38	43.13	0	20	0
75	19.78	1.74	1.18	16.71	1.07	25.79	43.13	0	20	0
70	22.92	1.87	1.22	18.77	1.12	25.42	43.13	0	20	0
65	26.87	2.02	1.26	21.27	1.18	24.93	43.13	0	20	0
60	32.93	2.22	1.32	24.93	1.26	24.53	43.13	0	20	0
55	40.16	2.42	1.4	28.79	1.38	24.56	43.13	0	20	0
50	50.92	2.67	1.5	33.95	1.53	24.65	43.13	0	17	0
45	70.71	3.06	1.65	42.77	1.77	24.76	43.13	0	17	0
40	93.57	3.44	1.81	51.73	2.03	25.12	43.13	0	17	0
35	124.4	3.84	2.03	61.75	2.41	26.18	43.13	0	17	0
30	168.45	4.33	2.28	75.13	2.87	27.14	43.13	0.00007	17	7858.1
25	213.61	4.77	2.5	88.09	3.29	27.9	43.13	0.0002	17	23324.5
20	262.4	5.2	2.7	101.36	3.7	28.45	43.13	0.00036	17	44108
15	323.63	5.69	2.92	117	4.16	28.97	43.13	0.00057	17	72881.9
10	398.08	6.22	3.16	134.88	4.68	29.55	43.13	0.0009	17	120191.9
5	520.9	7	3.48	162.45	5.41	30.07	43.13	0.00136	17	191678.4
1	728.827	8.15	3.94	204.06	6.52	30.77	43.13	0.00217	15	272004.5
SUMA									365	732047.3

Elaboración: Vintimilla A., Zhungo J.

Mediante la aplicación de la fórmula de Schoklitsch se determina que la producción de sedimentos de arrastre de fondo es de 265000 toneladas por día, cálculo que se presenta en la Tabla 3.29.

Tabla 3.29 Arrastre de fondo según fórmula de Schoklitsch para Zapotal en Lechugal.

Probabilidad	Caudal líquido	Ancho superficial	Caudal unitario	Caudal crítico unitario	Tasa transporte	Tasa transporte
(%)	(m ³ /s)	(m)	(m ² /s)	(m ² /s)	(kg/m-s)	(ton/año)
95	9.13	12.16	0.75	1.938	0	0
90	13.64	13.2	1.03	1.938	0	0
85	17.12	13.93	1.23	1.938	0	0
80	17.81	14.2	1.25	1.938	0	0
75	19.78	14.96	1.32	1.938	0	0
70	22.92	16.06	1.43	1.938	0	0
65	26.87	17.29	1.55	1.938	0	0
60	32.93	18.95	1.74	1.938	0	0
55	40.16	20.13	2	1.938	0	0
50	50.92	21.25	2.4	1.938	0.04	1248.5
45	70.71	23.03	3.07	1.938	0.09	3040.5
40	93.57	24.64	3.8	1.938	0.15	5434.6
35	124.4	26.12	4.76	1.938	0.22	8445.6
30	168.45	28.14	5.99	1.938	0.32	13219.2
25	213.61	29.97	7.13	1.938	0.41	18051.6
20	262.4	31.61	8.3	1.938	0.5	23221.7
15	323.63	32.86	9.85	1.938	0.63	30404.2
10	398.08	34.24	11.63	1.938	0.77	38717.5
5	520.9	36.25	14.37	1.938	0.98	52186.4
1	728.827	36.5	19.97	1.938	1.43	67651.2
					Suma	261621

Elaboración: Vintimilla A., Zhungo J.

Se establece que la producción de sedimentos de arrastre de fondo está entre 265000 y 735000 toneladas por año y que el caudal mínimo para producir el transporte debe ser semejante a 35 m³/s.

Al tomar en cuenta la curva granulométrica se pudo determinar que el material es granular y que el arrastre de fondo en los meses de invierno, que son 5 aproximadamente, se produce debido al aumento de caudal.

3.4.6. Determinación de la producción de sedimentos en el río Zapotal

La producción de sedimentos en el río Zapotal se determinó sumando la cantidad de sólidos suspendidos determinados con la curva de descarga y duración más la cantidad de transporte de fondo calculado, de lo que se obtuvieron los resultados mostrados en Tabla 3.30 y donde los sedimentos totales en toneladas por año se representan por St.

Tabla 3.30 Producción de sedimentos en ton/ día en la cuenca del río Zapotal (en sitio Zapotal en Lechugal).

Probabilidad (%)	Caudal líquido (m ³ /s)	St (ton/día) Meyer - Peter	St (ton/día) Meyer – Peter y Müller	St (ton/día) Schoklitsch
95	9.13	154.4	154.4	154.4
90	13.64	307	307	307
85	17.12	452.8	452.8	452.8
80	17.81	484.4	484.4	484.4
75	19.78	579.6	579.6	579.6
70	22.92	745.8	745.8	745.8
65	26.87	978.8	978.8	978.8
60	32.93	1714.4	1386	1386
55	40.16	2637.6	1946.4	1946.4
50	50.92	3731.7	2483.2	3731.7
45	70.71	7395.1	4354.6	7395.1
40	93.57	12466.1	7031.5	12466.1
35	124.4	20272.5	11445.1	19890.7
30	168.45	33690.8	27081.2	32442.3
25	213.61	49113.2	52182.9	46910
20	262.4	67952.9	85137.8	64251.5
15	323.63	94458	131618.6	89140.9
10	398.08	130467.6	203892.8	122418.4
5	520.9	198080.8	324265.3	184773.3
1	728.827	295796.4	479815.4	275462.1
Suma		921479.9	1336343.6	865917.3

Elaboración: Vintimilla A., Zhungo J.



Se espera que la producción total de sedimentos para el río Zapotal, en sitio Zapotal en Lechugal, esté entre 865000 y 1350000 toneladas por año. Valores que podrían alcanzarse ya que en la zona del punto de análisis es frecuente la producción agrícola.

3.4.7. Análisis y discusión de resultados

Los sedimentos totales que se producen corresponden a la suma de sólidos suspendidos más arrastre de fondo. Para los primeros, a partir de las curvas de duración se definieron los caudales según probabilidad de ocurrencia, y estos valores se ingresaron en la ecuación de descarga.

En invierno la producción de sólidos suspendidos aumenta debido a que la mayor parte del tiempo las superficies se encuentran húmedas, además de que el tamaño de las partículas en suspensión generalmente son pequeños y por lo tanto los caudales necesarios para su transporte no son muy elevados. En el proceso de cálculo se pudo verificar que se producen sólidos suspendidos desde caudales aproximados de $10 \text{ m}^3/\text{s}$.

Las fórmulas empleadas para cálculo de sedimentos de arrastre de fondo fueron Meyer – Peter, Meyer – Peter y Müller y Schoklitsch. Los tamaños de las partículas son relativamente grandes, razón por la que se puede suponer que el caudal necesario para producir el arrastre debe ser considerable.

Los meses de invierno en el año son 5 aproximadamente, en los cuales se produce el arrastre de fondo gracias al aumento de caudal. En la época de verano, debido a que el material es granular los métodos no evalúan un arrastre real; siendo necesario un caudal mínimo de $35 \text{ m}^3/\text{s}$ para que el arrastre se produzca.



CAPITULO 4

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES GENERALES

4.4. Conclusiones

- Este estudio permitió conformar una base de datos normalizada de precipitación mensual y precipitación máxima en 24 horas, a la cual se le efectuó análisis de consistencia, relleno de meses sin registro y estimación de períodos faltantes, logrando una mejor estimación de lluvia media mensual y anual para la cuenca.
- Dentro del capítulo hidrológico se recopiló información de caudales medios diarios y máximos instantáneos, conformando así una base de datos normalizada, a los cuales se efectuó un proceso de revisión de la calidad de la información mediante un análisis de doble masa para luego establecer ecuaciones para emplear en el relleno de datos de caudales sin registros en algunos casos de días, otros de meses y también para periodos completos sin registro. Información que se empleó para caracterizar el comportamiento de la cuenca.
- La determinación de parámetros climatológicos de la cuenca del río Catarama complementan a la caracterización de la misma y sirven como datos para la determinación de la evapotranspiración de referencia, lo que sería útil en la realización del balance hídrico. Además de que influyen en el comportamiento de la cuenca en lo que se refiere a cantidad de precipitación que puede darse en toda la cuenca del río Catarama.
- Los parámetros morfométricos determinados para la cuenca en estudio mediante ArcGIS 10.1 reflejan las características físicas de la misma, y su conocimiento es de especial interés ya que fueron utilizados para los cálculos de caudales específicos, curvas de duración e hidrogramas de diseño.



- Para determinar la precipitación media de la cuenca se estableció trabajar con el método de las isoyetas debido a que la media a obtenerse es para una cuenca de gran extensión, por tanto no existirá una diferencia notable en el caso de que se hubiese optado por realizar por Polígonos de Thiessen o el Promedio Aritmético. La precipitación promedio que puede esperarse en toda la cuenca en un año es de 2060 mm valor aproximado que corresponde a la suma de precipitaciones medias de cada uno de los meses del año.
- La precipitación máxima para varios periodos de retorno se analizó con las distribuciones de Gumbel y Log- Normal, cabe recalcar que la información empleada es precipitación máxima en 24 horas, estableciendo así para cada estación la distribución de probabilidad que mejor se ajuste a la serie de datos; tomando en cuenta que la distribución Gumbel tiende a ajustarse mejor para series mayores a 10 años y que la distribución Log normal, en series cortas, no sobreestima los valores.
- La aplicación del programa HEC – HMS 3.4 para la determinación de caudales máximos se debe a que este considera las pérdidas que existen en el tránsito de avenidas y no solamente se genera el hidrograma como la sumatoria de los hidrogramas para cada una de las subcuencas en las que se dividió el área de estudio.
- El método escogido para la modelación fue el SCS (Soil Conservation Service), con lo que se definieron caudales de diseño para diferentes periodos de retorno obtenidos a la salida de la cuenca, los cuales son:, 2850 m³/s (TR = 50 años), 3400 m³/s (TR = 100 años).
- Se definieron caudales de diseño para los siguientes sitios de obras: presa Aguacatal, trasvase Calabí y presa Lechugal 2. Obteniendo así para la presa Aguacatal, 10 m³/s (TR = 50 años), 13 m³/s (TR = 100



años). Para el trasvase Calabí, 490 m³/s (TR = 50 años), 605 m³/s (TR = 100 años). Para la presa Lechugal 2, 50 m³/s (TR = 50 años), 60 m³/s (TR = 100 años).

- En base a los caudales de diseño se proyectarán diseños de obras hidráulicas, los cuales deben ser adecuados para generar un aprovechamiento de agua en dicha cuenca.
- La cantidad de sólidos en suspensión obtenida para el punto Zapotal en Lechugal es semejante a 605000 Ton/año, cuyo valor se determinó en base a las curvas de gasto sólido y curvas de duración de caudales, elaboradas en la presente tesis. Adicionalmente se determinó la cantidad de material generado por arrastre de fondo en un rango entre 265000 y 735000 Ton/año para un diámetro de partícula de 15mm. Finalmente la producción total de sedimento para el río Zapotal, en sitio Zapotal en Lechugal, oscila entre 865000 y 1350000 Ton/año, resultado que se obtiene de sumar sólidos en suspensión y sedimentos de arrastre de fondo.
- La producción total de sólidos obtenida en esta tesis es netamente teórica debido a que resulta de la aplicación de las fórmulas Meyer – Peter, Meyer – Peter y Müller y Schoklitsch (método analítico), valor que no ha sido comparado con resultados de la aplicación de métodos directos como trampas de sedimentos o aparatos normalizados.

4.5. Recomendaciones

- Dentro del comportamiento de la cuenca no se ha realizado un análisis que relacione la cantidad de lluvia y escorrentía que se presenta en toda la cuenca, por lo que se podría realizar un estudio para establecer un balance hídrico mensual y anual.
- Se puede ampliar el estudio para la cuenca del río Zapotal con la determinación de márgenes, bordes en el río, para así conocer las



características y condiciones que presentan y determinar posibles áreas de inundación.

- Es recomendable para realizar cualquier análisis, ya sea con datos de estaciones meteorológicas o datos de estaciones hidrológicas, que se disponga de una cantidad de datos amplios para no subestimar el comportamiento real que se presente en una cuenca.
- La producción de sedimentos puede originarse por erosión del cauce como también por contribuciones de la cuenca, por lo que se recomienda minimizar el efecto que producen estos sedimentos mediante capacitación a los agricultores de la zona, cuidado de las zonas de bosque y de los márgenes de los ríos, etc.
- Se recomienda aplicar métodos directos para la determinación del transporte de sedimentos de fondo en un río.



CAPITULO 5

5. BIBLIOGRAFIA

- APARICIO, F. (1989). Fundamentos de hidrología de superficies.
- CHOW, V. T. (1994) Hidrología aplicada.
- FAO (2006). Evapotranspiración del cultivo: guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Volumen 56 de Estudio FAO Riego y Drenaje
- FATTORELLY, S. Y FERNÁNDEZ, P. (2011). Diseño hidrológico.
- GARCÍA, C. Y SALA, M. (1998). Aplicación de fórmulas de transporte de fondo a un río de gravas: Comparación con las tasas reales de transporte obtenidas en el río Tordera.
- GARDE, R. J. Y RANGA RAJU, K.G. (1977). Mechanics of sediment transportation and alluvial stream problems. John Wiley, New York.
- GUMBEL E.J. (1958). Statistics of extreme value, Colum, Univ, Press, N,Y,375.
- HARGREAVES, G.H., SAMANI, Z.A., (1985). Reference crop evapotranspiration from temperature. Applied Eng. in Agric., 1(2): 96-99
- HUDSON, (1997). Fiel measurement of soil erosion and runoff. Depósito de documentos de la FAO.
- INAMHI, Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología. Anuarios meteorológicos e hidrológicos. Quito, Ecuador.



- JAMES, K. Y CLAYTON, H. (1960). Manual of hydrology: Part1. Genreal surface – water techniques. Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS).
- MAZA-ALVAREZ, J. A. Y GARCÍA-FLORES, M. (1996). Transporte de Sedimentos. Capítulo 10 Manual de Ingeniería de Ríos. Series del Instituto de Ingeniería 584, UNAM, 531 pp
- MEYER – PETER, E. Y MÜLLER, R. (1948). Formulas for bed – load transport. Repository Hydraulic Engineering Reports Delft University of Technology.
- PENMAN, H.L. (1948). Natural evaporation from open water, bare soil, and grass. Proceedings, Royal Society. London 193, pp. 120-146.
- Programa computacional HEC – HMS versión 3.4. User's Manual. US Army Corps of Engineers.
- Programa computacional HEC – HMS versión 3.4. Technical Reference Manual. US Army Corps of Engineers.
- PROMAS – UNIVERSIDAD DE CUENCA (2013). Estudio de prefactibilidad proyecto PACALORI Tomo 3 Climatología, Hidrología, Sedimentología. Cuenca, Ecuador.
- SCHOKLITSCH, A. (1950). Handbuch des Wasserbaues. Springer Verlag, New York.
- SCS (1972) - (Soil Conservation Service). National Engineering Handbook, Section 4. US, Department of Agriculture. Washington, DC.



ANEXOS

Anexo 1

Precipitación máxima en 24 horas en mm.

Código	M006	M122	M123	M124	M129	M154	M172	M368	M369	M385	M470	MA1Y
Año/ Estación	Pichilingue	Pilalo	El Corazón	San Juan La Maná	Cayapas	Caluma	Pueblo Viejo	Moraspungo Cotopaxi	Osubamba	Salinas Bolívar	Mocache	Calamaca
1959	157.5											
1960												
1961	109.2											
1962	144.3											
1963	102.5							49.3				
1964	101.0							82.9				
1965	101.9							158.3				
1966	109.2							122.5				
1967	122.0							132				
1968	139.0							71				
1969	135.2							100.2				
1970	149.5							99				
1971	151.0							61.8				
1972	106.4		74.5	102.8				81.4				
1973	66.6		206.3	149.5				95.8				
1974	100.7		227.8	71.7				72				
1975	123.6		117.8	57.4				101.1				
1976	134.2		162.8	75				74.8				
1977	118.4		119.3	72				70.3				
1978	70.9		86.7	112.6				62.2				
1979	70.6		65	146.3								
1980	133.3		94	109.8			92					
1981	66.7		109.7	94			60					
1982	121.8		148	131								
1983	131.7		87.3	224								
1984	80.3		50.9	116								
1985	107.0		74	92			114.9					
1986	98.6		100	128.3			125.5					
1987	140.9		62.9	184.6			82					
1988	117.3		35.5	80			153					
1989	153.0		78.1	75.7								
1990	150.2	18.5	65.6	110.4	89.1	94.2	99.6		33.2		96.5	16.5
1991	84.8		59.9			90.9	77.6	32.7		27.6	97.7	15.4
1992	158.0	40	38.8		200.5	120.8	128.2	68.2	42		158.6	22
1993	74.4	22.4	78.4	75.2	94.2		129.5	114	14.4	35.8	155	
1994	98.6	60.6	37.5	126	120.2	200.7	124.7	85				
1995	131.7	39.4	81.2	160	110.6	101.6	137		23.2		101.9	
1996	86.3	45	65	85		100.2	121.2		30.2			
1997	173.1	48.7	59.7			101.1	117		27.7	31	170.8	61.4
1998	146.1		103	152		150.5	240		34.8		188.6	
1999	136.7		139.8	111.8		100.9	98.4		37.2	38		29.9
2000	170.8	54.3	92.7	92.3		90.7	110.4		37.9	20.9	105.8	
2001	147.4	40.2	61.5	165.8		121.7	69.4		33	35.5	118.8	14.6
2002	125.6		121.3	148.8		100.6	99.7	99		33.3		23.2
2003	137.5		70.8	124		104.1	116.7	91.6		20.1	119.4	16
2004	90.3			180.6		180.8	99.5	97.5				23.2
2005	115.2	30.6	46.8	98.6		110	130.6	76.7	34.6			36.8
2006	96.6	30.6	58.7	144.6	111.5	161.2	177.6	117.2	35.5			25.2
2007	116.4		85.7	91.5		137.8	101.5	86.4	28.1	15.5		
2008	116.0	39.9	77.4	75.5	92	114.2	135.2	108.4	33.7	18.2	97	
2009	129.70		88.2					94.6	30		88.7	
2010	197.6		101.3	187.5		160	128	104.8	33.5	53		26.8

Fuente: Anuarios meteorológicos NAMHL



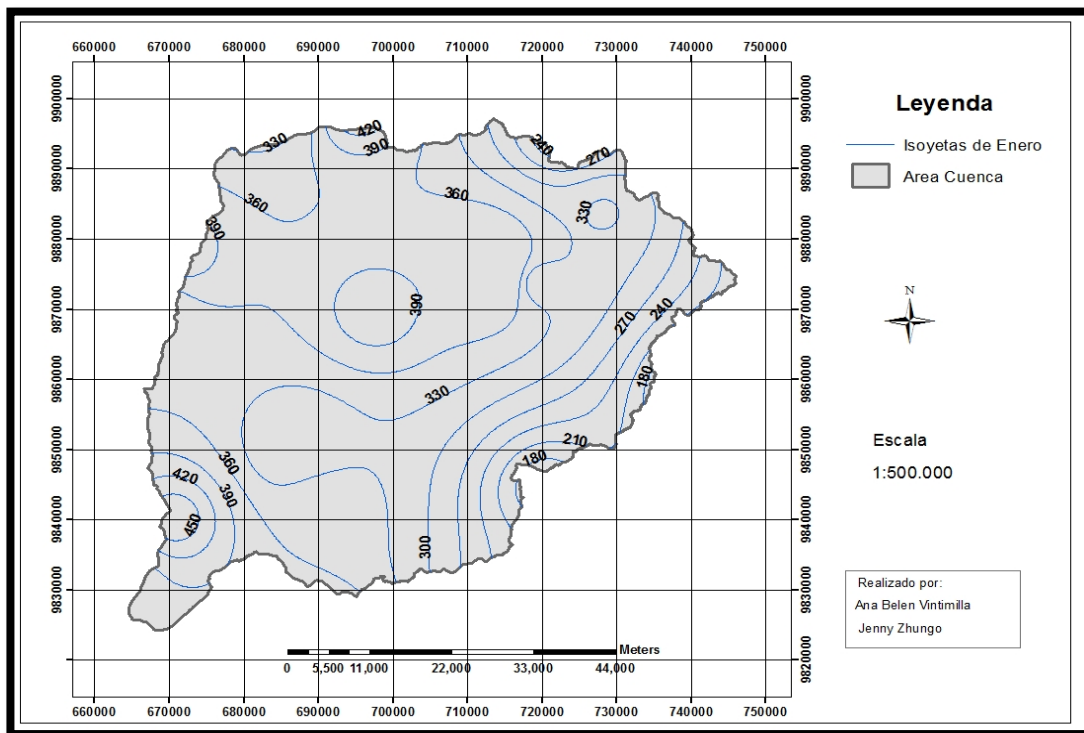
Anexo 2

Mapas de isoyetas mensuales de precipitación media mensual para la cuenca del río Zapotal.

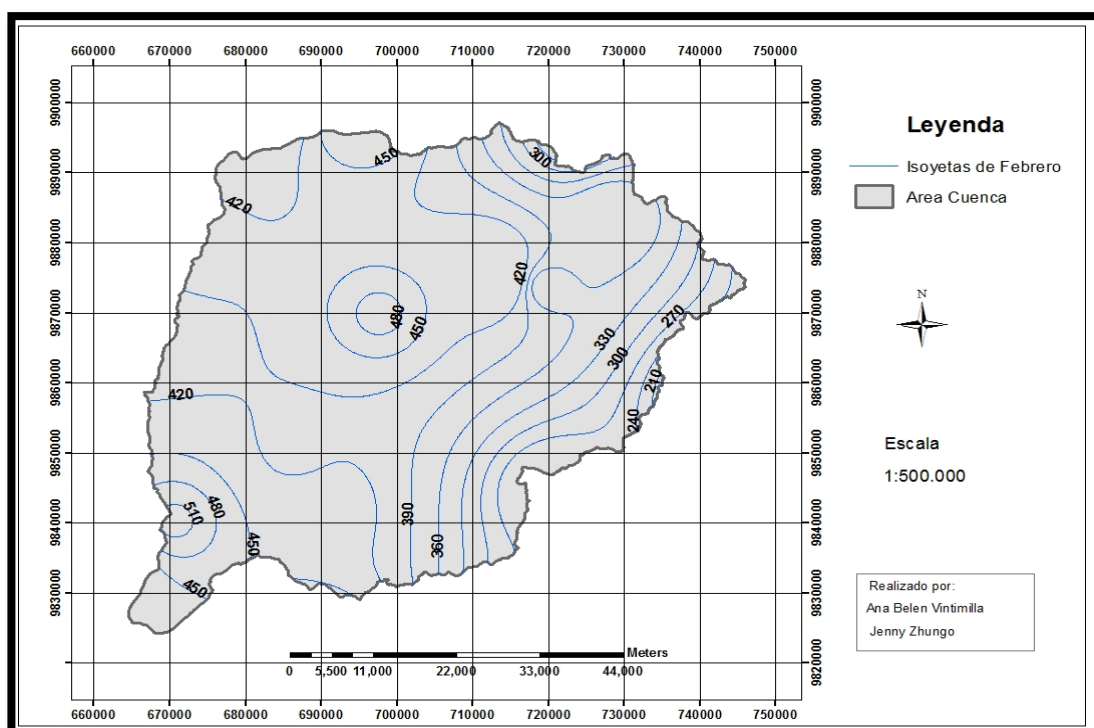
Anexo 2.1

Mapas de isoyetas para Enero y Febrero para la cuenca del río Zapotal.

Mapa de isoyetas para Enero.



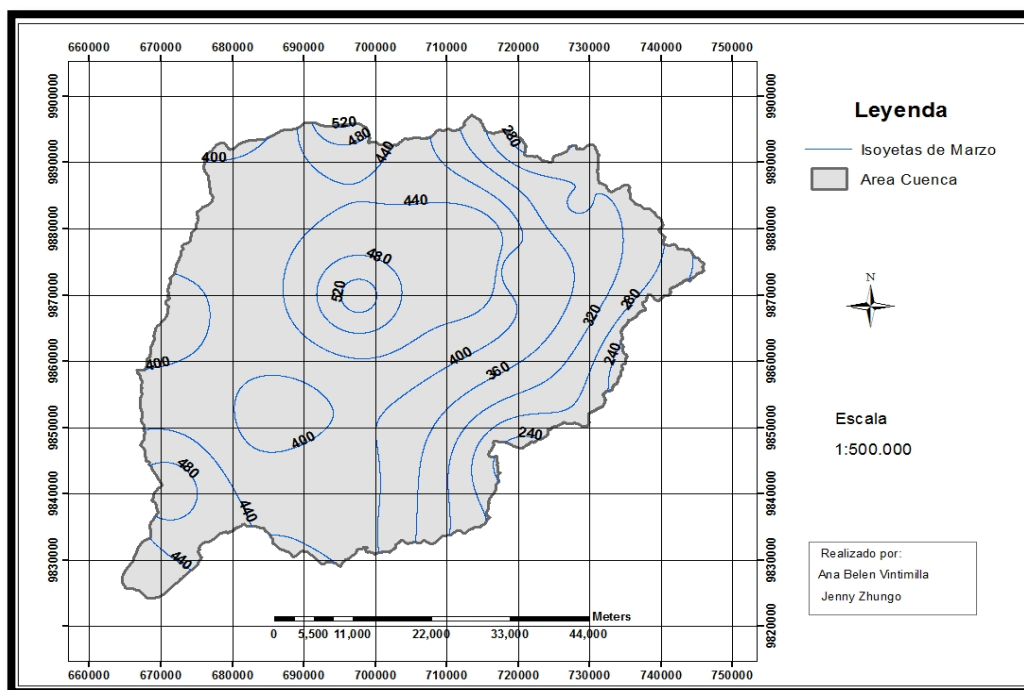
Mapa de isoyetas para Febrero.



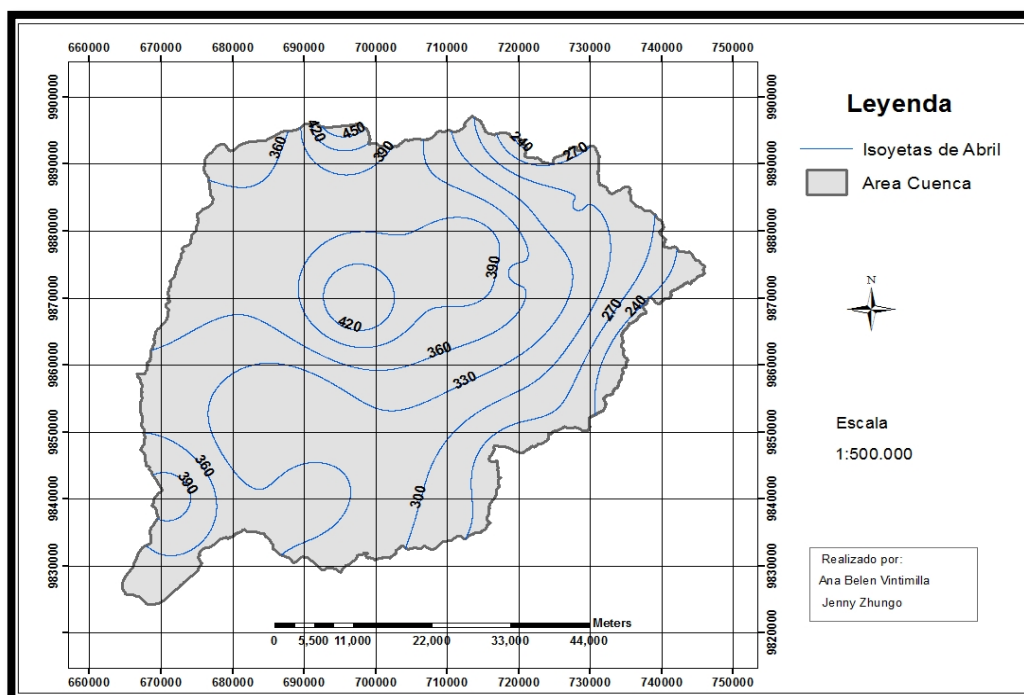
Anexo 2.2

Mapas de isoyetas para Marzo y Abril para la cuenca del río Zapotal.

Mapa de isoyetas para Marzo.



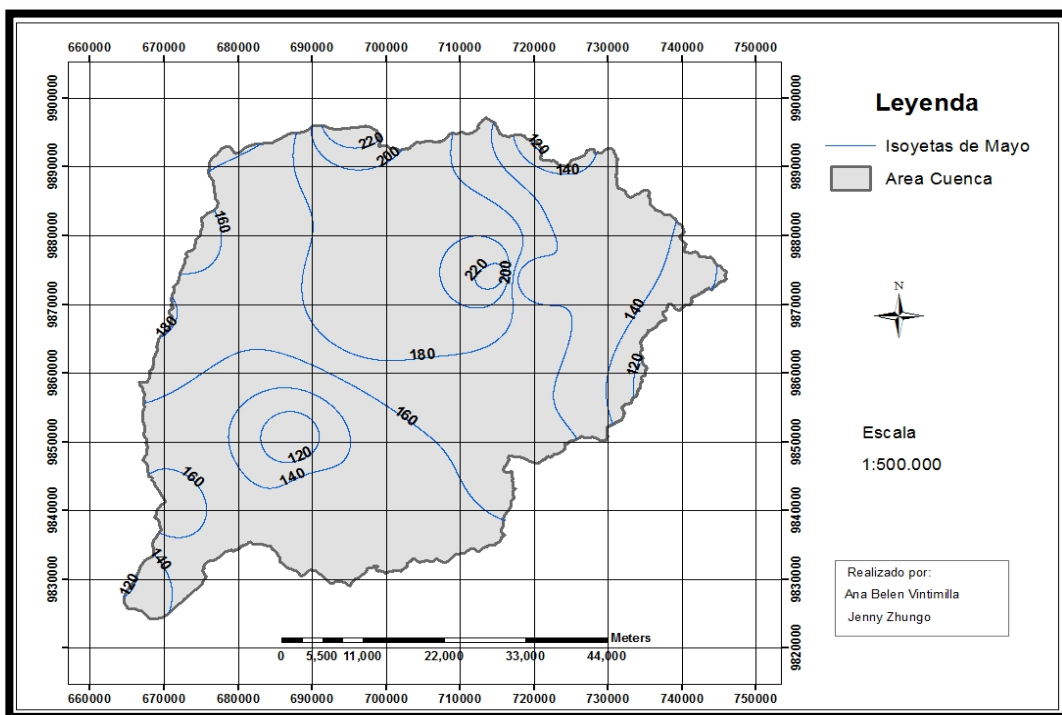
Mapa de isoyetas para Abril.



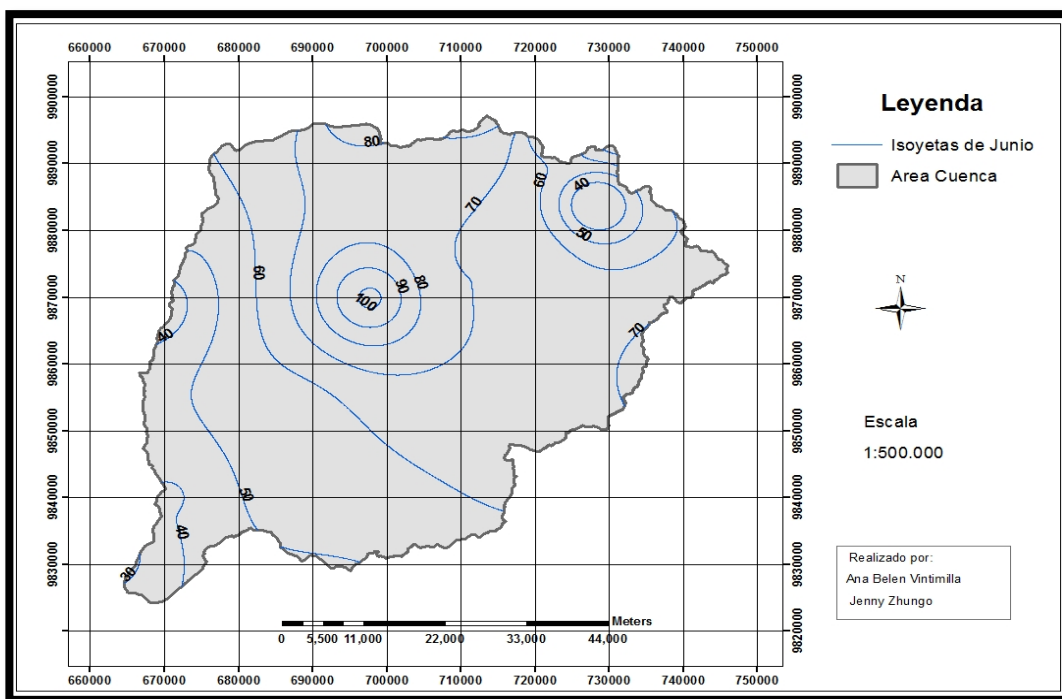
Anexo 2.3

Mapas de isoyetas para Mayo y Junio para la cuenca del río Zapotal.

Mapa de isoyetas para Mayo.



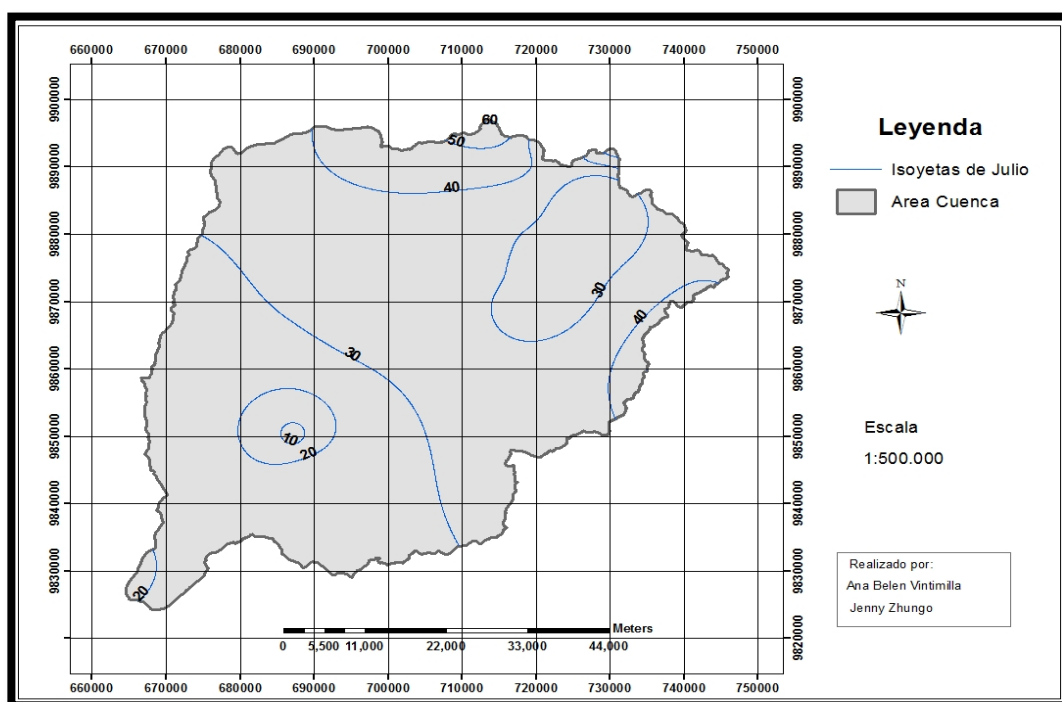
Mapa de isoyetas para Junio.



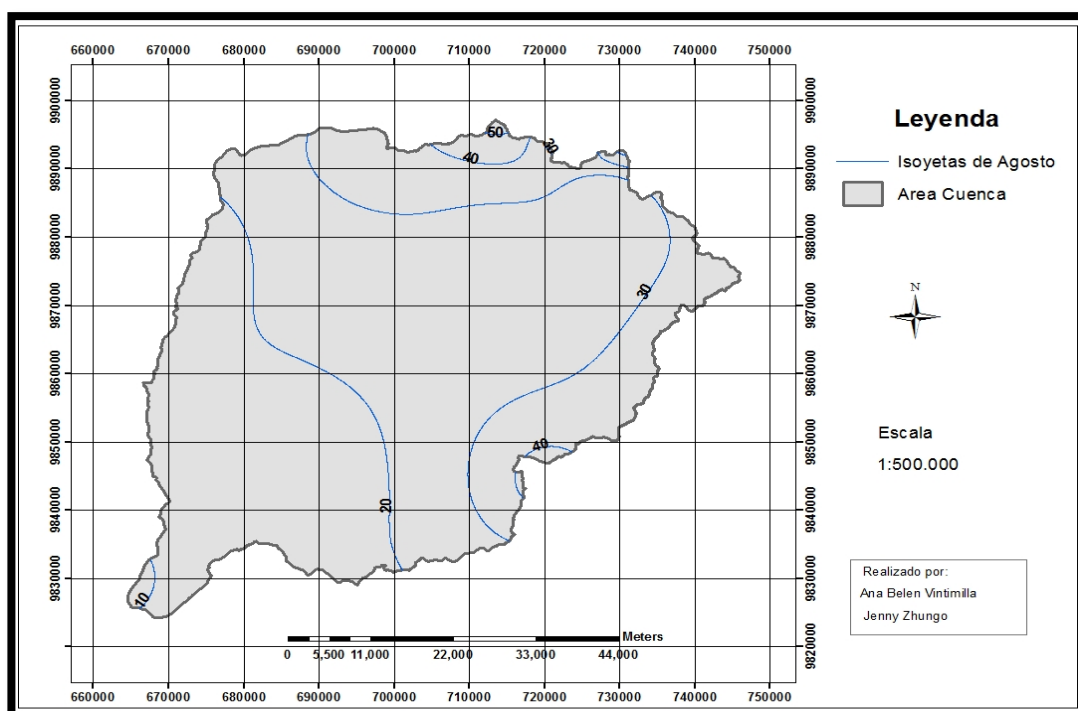
Anexo 2.4

Mapas de isoyetas para Julio y Agosto para la cuenca del río Zapotal.

Mapa de isoyetas para Julio.



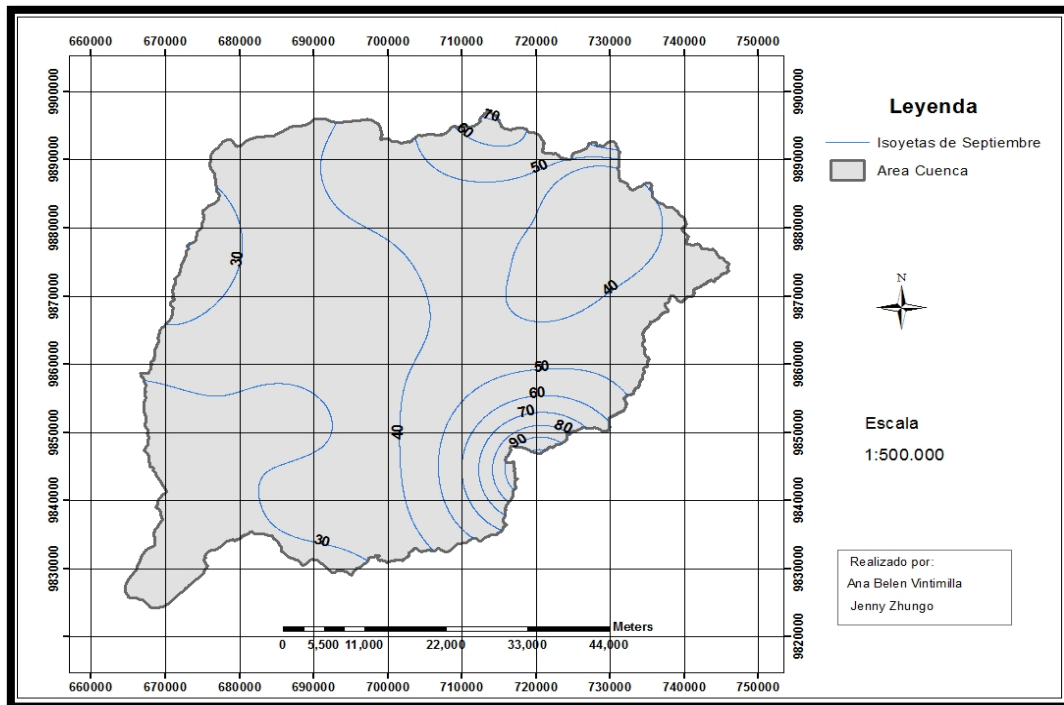
Mapa de isoyetas para Agosto.



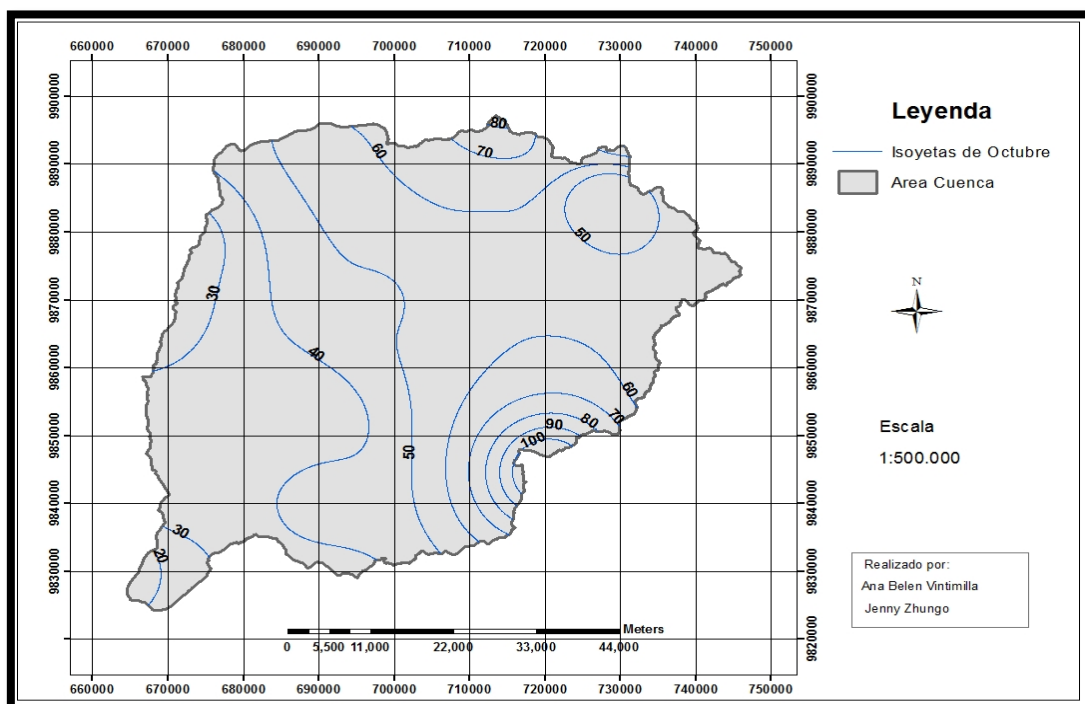
Anexo 2.5

Mapas de isoyetas para Septiembre y Octubre para la cuenca del río Zapotal.

Mapa de isoyetas para Septiembre.



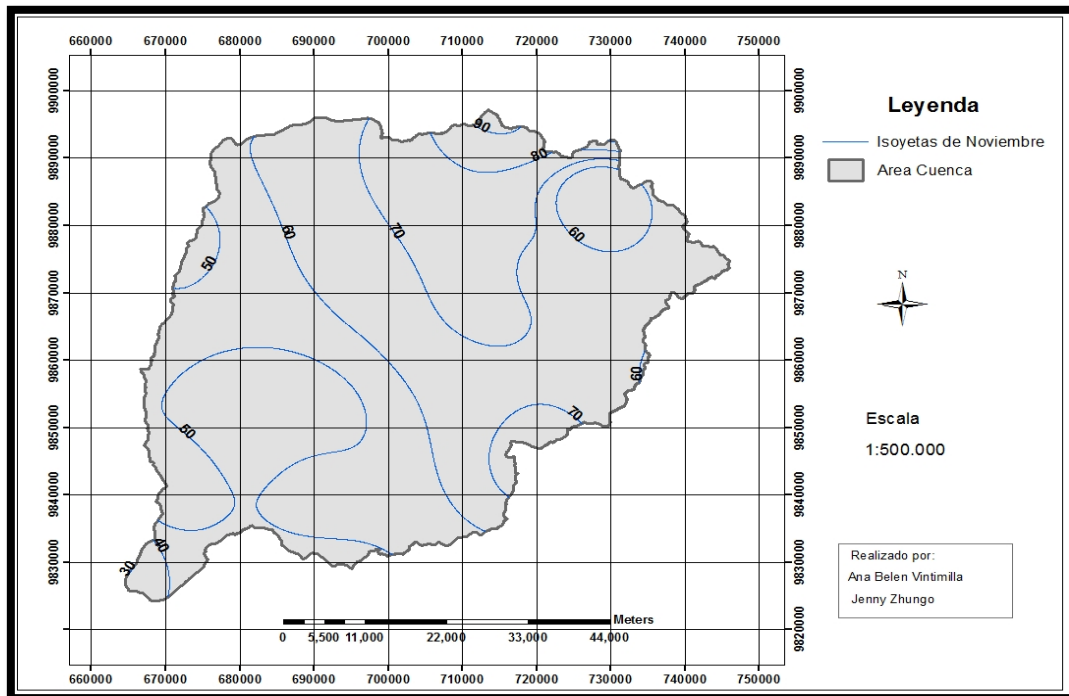
Mapa de isoyetas para Octubre.



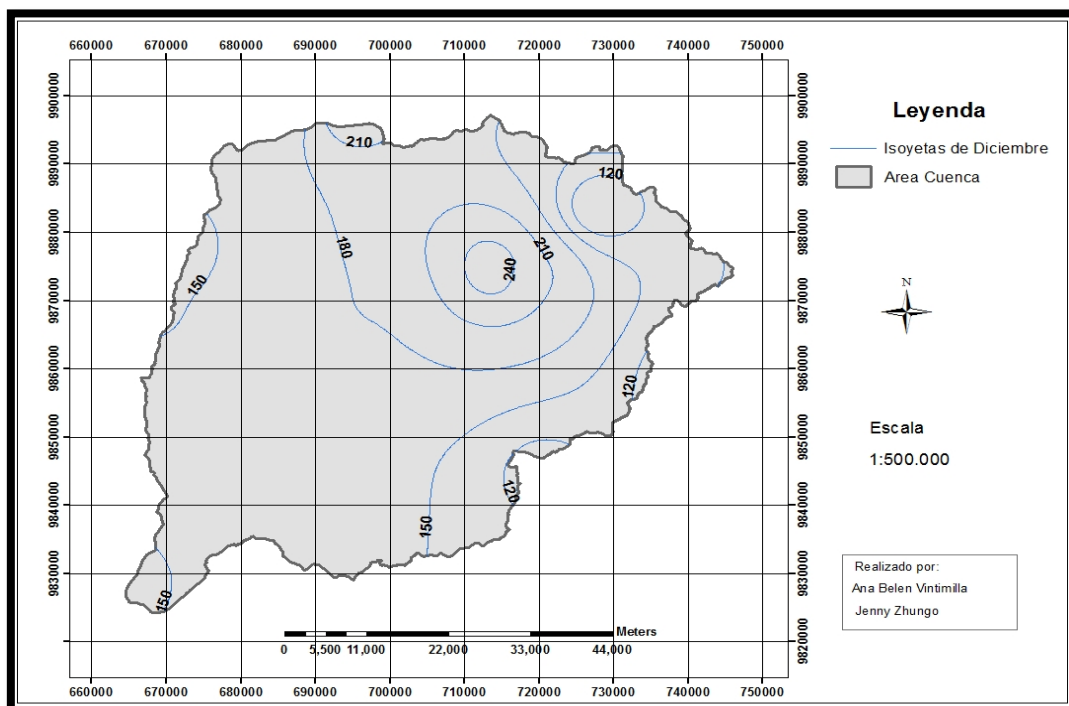
Anexo 2.6

Mapas de isoyetas para Noviembre y Diciembre para la cuenca del río Zapotal.

Mapa de isoyetas para Noviembre.



Mapa de isoyetas para Diciembre.



Anexo 3

Tabla de aplicación del test de Kolmogorov - Smirnov.

Distribución del estadístico de Kolmogorov-Smirnov (D_n).Se tabula d tal que $P(D_n > d) = \alpha$.

n	α					n	α				
	0'2	0'1	0'05	0'02	0'01		0'2	0'1	0'05	0'02	0'01
1	0'900	0'950	0'975	0'990	0'995	21	0'226	0'259	0'287	0'321	0'344
2	0'684	0'776	0'842	0'900	0'929	22	0'221	0'253	0'281	0'314	0'337
3	0'565	0'636	0'780	0'785	0'829	23	0'216	0'247	0'275	0'307	0'330
4	0'493	0'565	0'624	0'689	0'734	24	0'212	0'242	0'269	0'301	0'323
5	0'447	0'509	0'563	0'627	0'669	25	0'208	0'238	0'264	0'295	0'317
6	0'410	0'468	0'519	0'577	0'617	26	0'204	0'233	0'259	0'290	0'311
7	0'381	0'436	0'483	0'538	0'576	27	0'200	0'229	0'254	0'284	0'305
8	0'358	0'410	0'454	0'507	0'542	28	0'197	0'225	0'250	0'279	0'300
9	0'339	0'387	0'430	0'480	0'513	29	0'193	0'221	0'246	0'275	0'295
10	0'323	0'369	0'409	0'457	0'489	30	0'190	0'218	0'242	0'270	0'290
11	0'308	0'352	0'391	0'437	0'468	31	0'187	0'214	0'238	0'266	0'285
12	0'296	0'338	0'375	0'419	0'449	32	0'184	0'211	0'234	0'262	0'281
13	0'285	0'325	0'361	0'404	0'432	33	0'182	0'208	0'231	0'258	0'277
14	0'275	0'314	0'349	0'390	0'418	34	0'179	0'205	0'227	0'254	0'273
15	0'266	0'304	0'338	0'377	0'404	35	0'177	0'202	0'224	0'251	0'269
16	0'258	0'295	0'327	0'366	0'392	36	0'174	0'199	0'221	0'247	0'265
17	0'250	0'286	0'318	0'355	0'381	37	0'172	0'196	0'218	0'244	0'262
18	0'244	0'279	0'309	0'346	0'371	38	0'170	0'194	0'215	0'241	0'258
19	0'237	0'271	0'301	0'337	0'361	39	0'168	0'191	0'213	0'238	0'255
20	0'232	0'265	0'294	0'329	0'352	40	0'165	0'189	0'21	0'235	0'252
						> 40	$\frac{1'07}{\sqrt{n}}$	$\frac{1'22}{\sqrt{n}}$	$\frac{1'36}{\sqrt{n}}$	$\frac{1'52}{\sqrt{n}}$	$\frac{1'63}{\sqrt{n}}$

Fuente: Tablas-estadística.



Anexo 4

Pruebas de bondad de ajuste.

**Distribución de probabilidad de diseño en datos de precipitación máxima
en 24 horas.**

Anexo 4.1

Distribución Gumbel, precipitación máxima en 24 horas para Estación Pichilingue (M006).

#	P _{máx. 24 horas} (mm) ORDENADO	F _n (x) Frecuencia Relativa	y=(x _i -u)/α	F(x) Frecuencia Teórica	F _n (x) - F(x)
1	66.6	0.019	-1.769	0.003	0.016
2	66.7	0.038	-1.765	0.003	0.035
3	70.6	0.058	-1.595	0.007	0.051
4	70.9	0.077	-1.582	0.008	0.069
5	74.4	0.096	-1.43	0.015	0.081
6	80.3	0.115	-1.173	0.039	0.076
7	84.8	0.135	-0.977	0.07	0.065
8	86.3	0.154	-0.912	0.083	0.071
9	90.3	0.173	-0.738	0.123	0.05
10	96.6	0.192	-0.464	0.204	0.012
11	98.6	0.212	-0.377	0.233	0.021
12	98.6	0.231	-0.377	0.233	0.002
13	100.7	0.25	-0.286	0.264	0.014
14	101	0.269	-0.273	0.269	0
15	101.9	0.288	-0.234	0.283	0.005
16	102.5	0.308	-0.207	0.292	0.016
17	106.4	0.327	-0.038	0.354	0.027
18	107	0.346	-0.012	0.363	0.017
19	109.2	0.365	0.084	0.399	0.034
20	109.2	0.385	0.084	0.399	0.014
21	115.2	0.404	0.345	0.493	0.089
22	116	0.423	0.38	0.505	0.082
23	116.4	0.442	0.397	0.511	0.069
24	117.3	0.462	0.436	0.524	0.062
25	118.4	0.481	0.484	0.54	0.059
26	121.8	0.5	0.632	0.588	0.088
27	122	0.519	0.641	0.591	0.072
28	123.6	0.538	0.71	0.612	0.074
29	125.6	0.558	0.797	0.637	0.079
30	129.70	0.577	0.976	0.686	0.109
31	131.7	0.596	1.063	0.708	0.112
32	131.7	0.615	1.063	0.708	0.093
33	133.3	0.635	1.132	0.724	0.089
34	134.2	0.654	1.171	0.733	0.079
35	135.2	0.673	1.215	0.743	0.07
36	136.7	0.692	1.28	0.757	0.065
37	137.5	0.712	1.315	0.765	0.053
38	139	0.731	1.38	0.778	0.047
39	140.9	0.75	1.463	0.793	0.043
40	144.3	0.769	1.611	0.819	0.05
41	146.1	0.788	1.689	0.831	0.043
42	147.4	0.808	1.746	0.84	0.032
43	149.5	0.827	1.837	0.853	0.026
44	150.2	0.846	1.867	0.857	0.011
45	151	0.865	1.902	0.861	0.004
46	153	0.885	1.989	0.872	0.013
47	157.5	0.904	2.185	0.894	0.01
48	158	0.923	2.207	0.896	0.027
49	170.8	0.942	2.763	0.939	0.003
50	173.1	0.962	2.863	0.945	0.017
51	197.6	0.981	3.929	0.981	0



Anexo 4.2

Distribución Gumbel, precipitación máxima en 24 horas para Estación Pilalo (M122).

#	P máx. 24 horas (mm) ORDENADO	Fn (x) Frecuencia Relativa	$y = (x_i - u)/\alpha$	F (x) Frecuencia Teórica	Fn (x) - F (x)
1	18.50	0.077	-1.574	0.008	0.069
2	22.40	0.154	-1.169	0.04	0.114
3	30.60	0.231	-0.315	0.254	0.023
4	30.60	0.308	-0.315	0.254	0.054
5	39.40	0.385	0.6	0.578	0.193
6	39.90	0.462	0.652	0.594	0.132
7	40.00	0.538	0.663	0.597	0.059
8	40.20	0.615	0.684	0.604	0.011
9	45.00	0.692	1.183	0.736	0.044
10	48.70	0.769	1.568	0.812	0.043
11	54.30	0.846	2.151	0.89	0.044
12	60.60	0.923	2.806	0.941	0.018

Anexo 4.3

**Distribución Log normal, precipitación máxima en 24 horas para Estación
El Corazón (M123).**

#	P máx. 24 horas (mm) ORDENADO	Fn (x) Frecuencia Relativa	Yi = ln Xi	F (x) Frecuencia Teórica	Fn (x) - F (x)
1	35.5	0.03	3.5695	0.032	0.006
2	37.5	0.05	3.6243	0.042	0.009
3	38.8	0.08	3.6584	0.05	0.027
4	46.8	0.10	3.8459	0.109	0.006
5	50.9	0.13	3.9299	0.148	0.02
6	58.7	0.15	4.0724	0.233	0.079
7	59.7	0.18	4.0893	0.245	0.066
8	59.9	0.21	4.0927	0.247	0.042
9	61.5	0.23	4.119	0.266	0.035
10	62.9	0.26	4.1415	0.283	0.027
11	65	0.28	4.1744	0.308	0.026
12	65	0.31	4.1744	0.308	0
13	65.6	0.333	4.1836	0.315	0.018
14	70.8	0.359	4.2599	0.378	0.019
15	74	0.385	4.3041	0.416	0.031
16	74.5	0.41	4.3108	0.421	0.011
17	77.4	0.436	4.349	0.455	0.019
18	78.1	0.462	4.358	0.463	0.001
19	78.4	0.487	4.3618	0.466	0.021
20	81.2	0.513	4.3969	0.497	0.016
21	85.7	0.538	4.4509	0.545	0.007
22	86.7	0.564	4.4625	0.555	0.009
23	87.3	0.59	4.4694	0.561	0.029
24	88.2	0.615	4.4796	0.57	0.045
25	92.7	0.641	4.5294	0.613	0.028
26	94	0.667	4.5433	0.625	0.042
27	100	0.692	4.6052	0.676	0.016
28	101.3	0.718	4.6181	0.686	0.032
29	103	0.744	4.6347	0.699	0.045
30	109.7	0.77	4.6977	0.746	0.023
31	117.8	0.795	4.769	0.794	0.001
32	119.3	0.821	4.7816	0.802	0.019
33	121.3	0.846	4.7983	0.812	0.034
34	139.8	0.872	4.9402	0.885	0.013
35	148	0.897	4.9972	0.908	0.011
36	162.8	0.923	5.0925	0.938	0.015
37	206.3	0.949	5.3293	0.981	0.032
38	227.8	0.974	5.4285	0.989	0.015

Anexo 4.4

Distribución Log normal, precipitación máxima en 24 horas para Estación San Juan La Maná (M124).

#	P máx. 24 horas (mm) ORDENADO	Fn (x) Frecuencia Relativa	Yi = ln Xi	F (x) Frecuencia Teórica	Fn (x) - F (x)
1	57.4	0.03	4.05	0.021	0.007
2	71.7	0.06	4.272	0.088	0.031
3	72	0.08	4.277	0.09	0.007
4	75	0.11	4.317	0.111	0
5	75.2	0.14	4.32	0.113	0.026
6	75.5	0.17	4.324	0.115	0.052
7	75.7	0.19	4.327	0.117	0.077
8	80	0.22	4.382	0.153	0.069
9	85	0.25	4.443	0.2	0.049
10	91.5	0.28	4.516	0.269	0.01
11	92	0.31	4.522	0.274	0.032
12	92.3	0.33	4.525	0.277	0.056
13	94	0.36	4.543	0.296	0.065
14	98.6	0.39	4.591	0.348	0.041
15	102.8	0.42	4.633	0.396	0.021
16	109.8	0.44	4.699	0.474	0.031
17	110.4	0.47	4.704	0.481	0.009
18	111.8	0.50	4.717	0.496	0.004
19	112.6	0.53	4.724	0.505	0.023
20	116	0.56	4.754	0.541	0.015
21	124	0.58	4.82	0.619	0.036
22	126	0.61	4.836	0.638	0.026
23	128.3	0.64	4.854	0.658	0.019
24	131	0.67	4.875	0.681	0.014
25	144.6	0.69	4.974	0.779	0.085
26	146.3	0.72	4.986	0.79	0.068
27	148.8	0.75	5.003	0.804	0.054
28	149.5	0.78	5.007	0.808	0.03
29	152	0.81	5.024	0.821	0.016
30	160	0.83	5.075	0.859	0.026
31	165.8	0.86	5.111	0.882	0.021
32	180.6	0.89	5.196	0.926	0.036
33	184.6	0.92	5.218	0.934	0.017
34	187.5	0.94	5.234	0.94	0.004
35	224	0.97	5.412	0.982	0.01



Anexo 4.5

Distribución Log normal, precipitación máxima en 24 horas para Estación Caluma (M129).

#	P máx. 24 horas (mm) ORDENADO	Fn (x) Frecuencia Relativa	Yi = ln Xi	F (x) Frecuencia Teórica	Fn (x) - F (x)
1	89.1	0.13	4.49	0.246	0.121
2	92	0.25	4.522	0.278	0.028
3	94.2	0.38	4.545	0.304	0.072
4	110.6	0.50	4.706	0.495	0.005
5	111.5	0.63	4.714	0.505	0.12
6	120.2	0.75	4.789	0.598	0.153
7	200.5	0.88	5.301	0.968	0.093

Anexo 4.6

Distribución Log normal, precipitación máxima en 24 horas para Estación Cayapas (M154).

#	P máx. 24 horas (mm) ORDENADO	$F_n(x)$ Frecuencia Relativa	$Y_i = \ln X_i$	$F(x)$ Frecuencia Teórica	$ F_n(x) - F(x) $
1	90.7	0.05	4.508	0.147	0.098
2	90.9	0.10	4.51	0.149	0.05
3	94.2	0.15	4.545	0.183	0.033
4	100.2	0.20	4.607	0.253	0.053
5	100.6	0.25	4.611	0.258	0.008
6	100.9	0.30	4.614	0.262	0.038
7	101.1	0.35	4.616	0.264	0.086
8	101.6	0.40	4.621	0.27	0.13
9	104.1	0.45	4.645	0.302	0.148
10	110	0.50	4.7	0.38	0.121
11	114.2	0.55	4.738	0.436	0.114
12	120.8	0.60	4.794	0.522	0.079
13	121.7	0.65	4.802	0.533	0.116
14	137.8	0.70	4.926	0.713	0.013
15	150.5	0.75	5.014	0.816	0.066
16	160	0.80	5.075	0.872	0.072
17	161.2	0.85	5.083	0.878	0.028
18	180.8	0.90	5.197	0.946	0.046
19	200.7	0.95	5.302	0.978	0.028

Anexo 4.7

**Distribución Gumbel, precipitación máxima en 24 horas para Estación
Pueblo Viejo (M172).**

#	P máx. 24 horas (mm) ORDENADO	Fn (x) Frecuencia Relativa	$y = (x_i - u)/\alpha$	F (x) Frecuencia Teórica	Fn (x) - F (x)
1	60	0.038	-2.022	0.001	0.037
2	69.4	0.077	-1.562	0.008	0.069
3	77.6	0.115	-1.161	0.041	0.074
4	82	0.154	-0.946	0.076	0.078
5	92	0.192	-0.457	0.206	0.014
6	98.4	0.231	-0.145	0.315	0.084
7	99.5	0.269	-0.091	0.334	0.065
8	99.6	0.308	-0.086	0.336	0.028
9	99.7	0.346	-0.081	0.338	0.008
10	101.5	0.385	0.007	0.37	0.015
11	110.4	0.423	0.442	0.526	0.103
12	114.9	0.462	0.662	0.597	0.135
13	116.7	0.5	0.75	0.624	0.124
14	117	0.538	0.764	0.628	0.09
15	121.2	0.577	0.97	0.684	0.107
16	124.7	0.615	1.141	0.727	0.112
17	125.5	0.654	1.18	0.735	0.081
18	128	0.692	1.302	0.762	0.07
19	128.2	0.731	1.312	0.764	0.033
20	129.5	0.769	1.375	0.777	0.008
21	130.6	0.808	1.429	0.787	0.021
22	135.2	0.846	1.654	0.826	0.02
23	137	0.885	1.742	0.839	0.046
24	153	0.923	2.524	0.923	0
25	177.6	0.962	3.726	0.976	0.014

Anexo 4.8

Distribución Gumbel, precipitación máxima en 24 horas para Estación Moraspungo (M368).

#	P máx. 24 horas (mm) ORDENADO	Fn (x) Frecuencia Relativa	$y = (x_i - u)/\alpha$	F (x) Frecuencia Teórica	Fn (x) - F (x)
1	32.7	0.033	-2.283	0	0.033
2	49.3	0.067	-1.455	0.014	0.053
3	61.8	0.1	-0.831	0.101	0.001
4	62.2	0.133	-0.811	0.105	0.028
5	68.2	0.167	-0.511	0.189	0.022
6	70.3	0.2	-0.407	0.223	0.023
7	71	0.233	-0.372	0.234	0.001
8	72	0.267	-0.322	0.252	0.015
9	74.8	0.3	-0.182	0.301	0.001
10	76.7	0.333	-0.087	0.336	0.003
11	81.4	0.367	0.147	0.422	0.055
12	82.9	0.4	0.222	0.449	0.049
13	85	0.433	0.327	0.486	0.053
14	86.4	0.467	0.397	0.511	0.044
15	91.6	0.5	0.656	0.595	0.095
16	94.6	0.533	0.806	0.64	0.107
17	95.8	0.567	0.866	0.657	0.09
18	97.5	0.6	0.951	0.68	0.08
19	99	0.633	1.025	0.699	0.066
20	99	0.667	1.025	0.699	0.032
21	100.2	0.7	1.085	0.713	0.013
22	101.1	0.733	1.13	0.724	0.009
23	104.8	0.767	1.315	0.765	0.002
24	108.4	0.8	1.495	0.799	0.001
25	114	0.833	1.774	0.844	0.011
26	117.2	0.867	1.934	0.865	0.002
27	122.5	0.9	2.198	0.895	0.005
28	132	0.933	2.672	0.933	0
29	158.3	0.967	3.985	0.982	0.015

Anexo 4.9

Distribución Gumbel, precipitación máxima en 24 horas para Estación Cusubamba (M369).

#	P máx. 24 horas (mm) ORDENADO	Fn (x) Frecuencia Relativa	$y = (x_i - u)/\alpha$	F (x) Frecuencia Teórica	Fn (x) - F (x)
1	14.4	0.059	-2.885	0	0.059
2	23.2	0.118	-1.135	0.045	0.073
3	27.7	0.176	-0.241	0.28	0.104
4	28.1	0.235	-0.161	0.309	0.074
5	30	0.294	0.217	0.447	0.153
6	30.2	0.353	0.256	0.461	0.108
7	33	0.412	0.813	0.642	0.23
8	33.2	0.471	0.853	0.653	0.182
9	33.5	0.529	0.913	0.669	0.14
10	33.7	0.588	0.952	0.68	0.092
11	34.6	0.647	1.131	0.724	0.077
12	34.8	0.706	1.171	0.733	0.027
13	35.5	0.765	1.31	0.764	0.001
14	37.2	0.824	1.648	0.825	0.001
15	37.9	0.882	1.787	0.846	0.036
16	42	0.941	2.602	0.929	0.012



Anexo 4.10

Distribución Log normal, precipitación máxima en 24 horas para Estación Salinas Bolívar (M385).

#	P máx. 24 horas (mm) ORDENADO	Fn (x) Frecuencia Relativa	Yi = ln Xi	F (x) Frecuencia Teórica	Fn (x) - F (x)
1	15.5	0.083	2.741	0.051	0.032
2	18.2	0.167	2.901	0.117	0.05
3	20.1	0.25	3.001	0.18	0.07
4	20.9	0.333	3.04	0.21	0.123
5	27.6	0.417	3.318	0.487	0.07
6	31	0.5	3.434	0.614	0.114
7	33.3	0.583	3.506	0.687	0.105
8	35.5	0.667	3.57	0.747	0.081
9	35.8	0.75	3.578	0.755	0.005
10	38	0.833	3.638	0.804	0.029
11	53	0.917	3.97	0.962	0.045

Anexo 4.11

Distribución Log normal, precipitación máxima en 24 horas para Estación Mocache (M470).

#	P máx. 24 horas (mm) ORDENADO	$F_n(x)$ Frecuencia Relativa	$Y_i = \ln X_i$	$F(x)$ Frecuencia Teórica	$ F_n(x) - F(x) $
1	78.5	0.071	4.363	0.078	0.007
2	88.7	0.143	4.485	0.163	0.02
3	96.5	0.214	4.57	0.248	0.035
4	97	0.286	4.575	0.254	0.032
5	97.7	0.357	4.582	0.262	0.095
6	101.9	0.429	4.624	0.314	0.115
7	105.8	0.5	4.662	0.363	0.137
8	118.8	0.571	4.777	0.525	0.047
9	119.4	0.643	4.782	0.532	0.112
10	155	0.714	5.043	0.844	0.13
11	158.6	0.786	5.066	0.863	0.077
12	170.8	0.857	5.14	0.913	0.056
13	188.6	0.929	5.24	0.957	0.028

Anexo 4.12

Distribución Log normal, precipitación máxima en 24 horas para Estación Calamaca (MA1Y).

#	P máx. 24 horas (mm) ORDENADO	$F_n(x)$ Frecuencia Relativa	$Y_i = \ln X_i$	$F(x)$ Frecuencia Teórica	$ F_n(x) - F(x) $
1	14.6	0.077	2.681	0.164	0.087
2	15.4	0.154	2.734	0.194	0.04
3	16	0.231	2.773	0.217	0.014
4	16.5	0.308	2.803	0.237	0.071
5	22	0.385	3.091	0.459	0.073
6	23.2	0.462	3.144	0.504	0.041
7	23.2	0.538	3.144	0.504	0.035
8	25.2	0.615	3.227	0.573	0.042
9	26.8	0.692	3.288	0.624	0.068
10	29.9	0.769	3.398	0.708	0.061
11	36.8	0.846	3.605	0.839	0.007
12	61.4	0.923	4.117	0.981	0.058



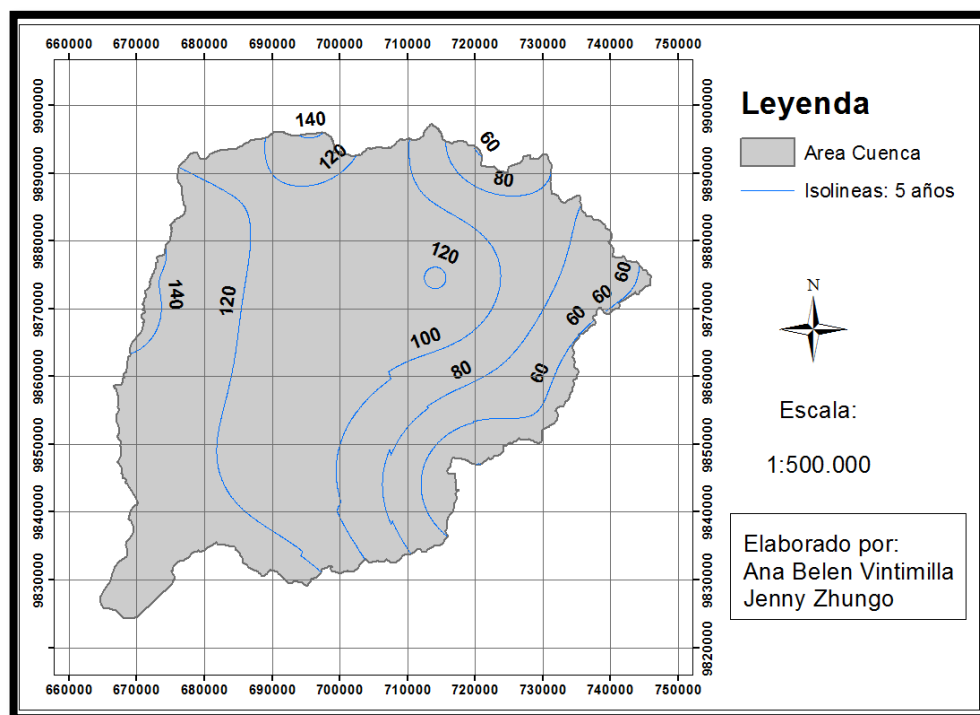
Anexo 5

Mapas de isoyetas de precipitación máxima en 24 horas para la cuenca del río Zapotal en diferentes períodos de retorno.

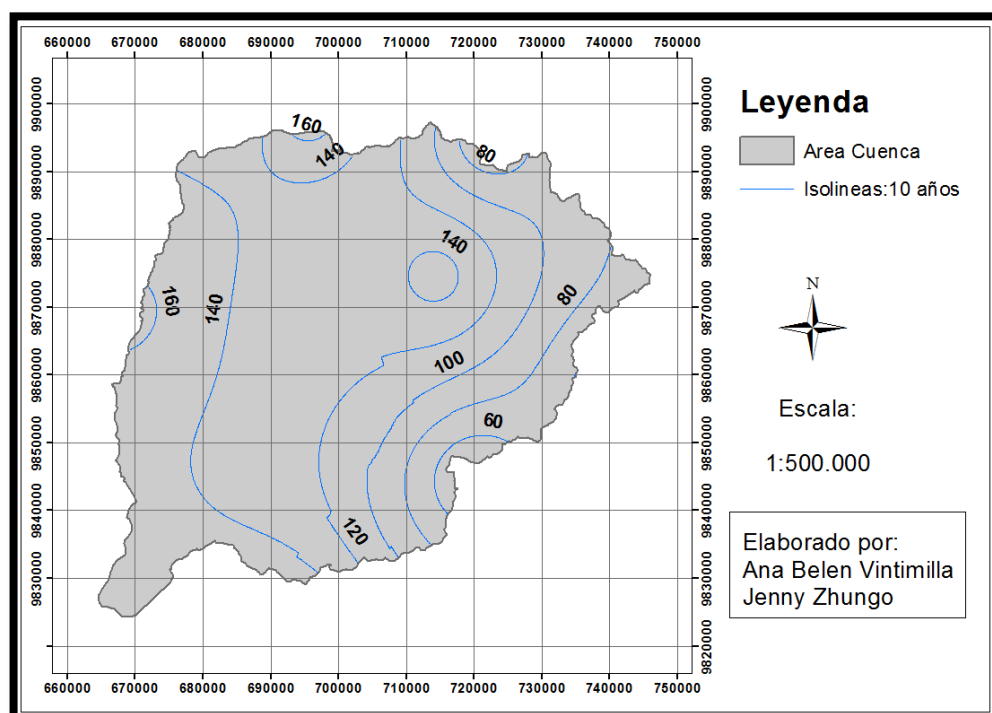
Anexo 5.1

Mapa de isoyetas de precipitación máxima en 24 horas para la cuenca del río Zapotal (TR = 5 años, TR = 10 años).

Mapa de isoyetas (TR = 5 años)



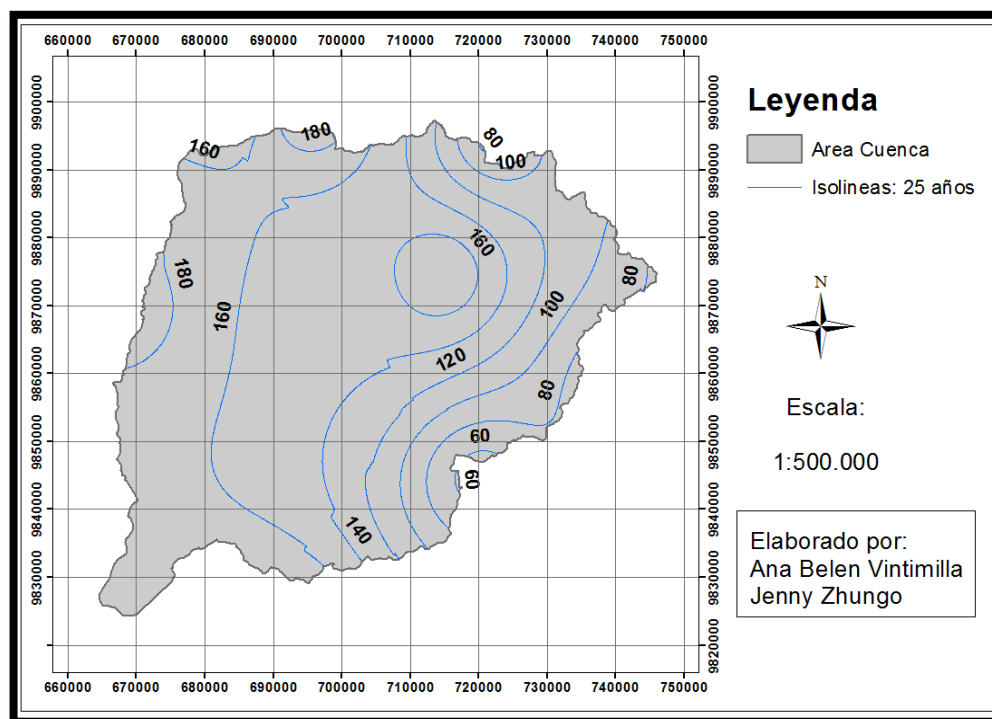
Mapa de isoyetas (TR = 10 años)



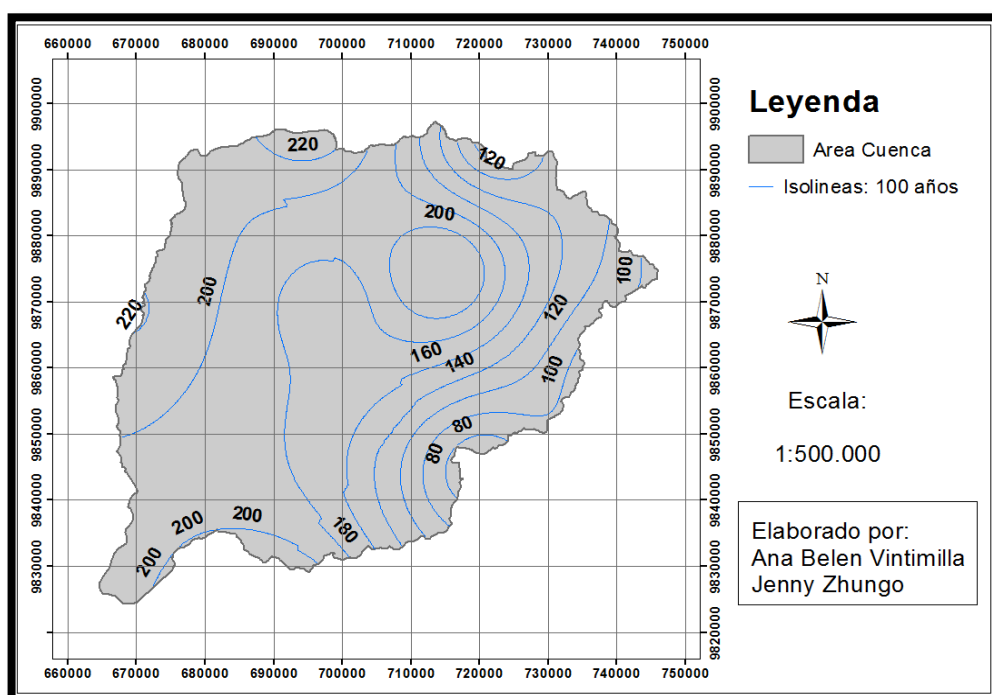
Anexo 5.2

Mapa de isoyetas de precipitación máxima en 24 horas para la cuenca del río Zapotal (TR = 25 años, TR = 100 años).

Mapa de isoyetas (TR = 25 años)



Mapa de isoyetas (TR = 100 años)





Anexo 6

Caudales medios diarios (m^3/s).

Anexo 6.1

Caudales medios mensuales (m³/s). Estación Zapotal en Catarama (H345).

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1982	111.192	317.48	236.449	261.428	150.449	72.341	43.781	30.971	23.838	33.999	254.993	538.928
1983	737.757	616.649	502.815	571.156	416.261	392.804	280.028	157.97	138.278	87.68	71.566	136.256
1984	133.768	469.148	601.099	357.522	140.714	85.602	56.879	41.5	35.714	32.69	28.021	41.313
1985	139.226	204.705	419.885	161.933	125.989	76.23	48.769	35.149	27.56	25.477	21.327	37.346
1986	378.716	440.961	291.224	452.942	181.674	74.085	48.168	34.464	27.749	25.278	25.139	27.745
1987	229.552	536.603	500.105	473.81	368.937	114.688	54.159	39.037	29.776	26.151	24.798	26.069
1988	140.456	402.601	293.806	216.17	214.989	81.453	51.32	35.871	29.337	24.261	24.638	28.052
1989	218.784	616.898	627.639	450.383	244.526	102.976	68.06	47.106	37.153	32.841	23.717	25.091
1990	52.694	312.979	209.271	237.087	122.734	70.386	40.474	30.114	23.053	20.261	17.466	23.145
1991	58.228	420.355	406.289	250.619	150.864	73.461	44.793	31.084	22.671	18.284	30.685	35.532
1992	226.671	514.223	627.877	561.903	419.859	213.198	68.226	43.842	30.979	24.435	21.008	20.832
1993	115.246	651.078	622.865	530.071	223.587	80.615	64.855	44.479	33.84	29.888	16.757	22.471
1994	165.967	541.934	418.402	465.69	219.839	90.398	54.133	37.24	28.399	23.483	13.489	53.801
1995	317.906	365.438	258.05	318.741	131.16	74.977	52.148	37.463	27.929	23.453	24.19	23.738
1996	69.687	367.965	513.015	313.571	121.03	59.346	39.547	26.887	20.754	10.988	8.959	10.869
1997	106.479	356.367	580.694	478.213	304.655	190.334	149.633	118.487	165.082	170.226	673.222	810.5
1998	538.397	549.249	622.383	544.679	520.372	230.315	135.299	66.315	48.123	34.141	28.258	22.35
1999	110.838	495.459	619.274	505.856	431.501	123.755	76.706	54.618	42.537	30.534	40.636	133.777
2000	188.796	439.584	530.587	503.809	352.477	103.736	61.878	42.648	33.047	30.534	30.748	78.248
2001	188.796	383.709	441.9	501.762	273.452	83.716	47.049	30.677	23.556	20.914	20.86	22.718
2002	46.123	394.907	732.946	602.172	349.108	98.448	46.491	28.178	21.566	21.135	21.413	31.636
2003	251.552	385.233	380.419	556.882	300.677	81.112	41.096	18.885	10.699	9.338	21.137	33.416
2004	112.293	215.52	351.985	511.592	252.245	114.373	47.576	27.22	22.035	20.86	20.86	22.122
2005	40.528	183.644	238.309	417.561	132.294	43.218	20.86	20.86	20.86	20.86	20.86	25.684
2006	56.414	666.868	584.79	448.099	176.287	60.118	32.396	22.175	21.701	12.404	10.919	28.604
2007	124.918	330.398	359.76	294.187	222.587	132.926	55.832	37.982	31.05	24.082	23.328	24.582
2008	240.353	492.29	353.649	241.404	182.673	76.708	33.067	23.149	19.53	14.946	12.789	43.407
2009	184.944	424.945	461.034	188.62	142.759	20.49	10.302	8.315	8.01	5.809	2.249	62.231

*Valores en azul son calculados con la media de todo el registro.

**Valores en rojo son calculados con la media de dos años consecutivos.

Anexo 6.2

Caudales medios diarios (m³/s). Estación Zapotal en Lechugal (H346).

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1982	94.098	253.037	200.89	221.011	124.576	56.417	30.018	24.662	20.883	28.119	199.162	405.997
1983	576.41	481.788	392.849	378.638	248.001	213.994	140.142	67.268	66.944	52.836	24.762	106.457
1984	118.46	407.908	493.015	299.481	120.309	79.17	45.028	32.424	27.904	25.54	21.893	32.278
1985	105.853	159.887	325.621	126.512	104.353	61.535	38.103	27.462	21.533	19.905	16.663	29.373
1986	310.279	351.611	227.298	358.831	131.105	54.419	37.854	26.926	21.681	20.032	19.641	20.39
1987	185.087	430.064	379.025	359.507	281.512	77.108	37.804	27.823	23.51	22.519	21.96	22.981
1988	114.865	314.42	218.292	150.326	148.126	55.151	35.984	25.878	22.183	18.732	18.722	20.935
1989	168.978	495.393	509.442	336.26	174.657	49.827	30.846	21.529	18.437	18.175	15.777	17.794
1990	37.943	239.827	147.68	182.057	92.559	43.725	26.665	19.088	13.85	13.655	13.646	17.947
1991	41.324	307.93	295.321	194.213	117.082	56.017	30.252	21.112	15.563	13.481	25.781	30.212
1992	177.16	389.144	467.917	389.626	321.56	145.485	41.475	24.985	15.931	12.293	10.074	10.442
1993	88.424	527.253	470.957	376.341	132.667	59.211	25.383	15.785	13.977	10.673	9.812	18.443
1994	113.841	417.187	298.029	348.927	138.236	47.682	23.349	14.945	10.305	10.102	9.182	44.157
1995	253.745	293.535	209.431	243.033	92.462	52.288	35.177	23.508	17.48	14.051	15.379	14.323
1996	55.849	299.927	423.096	271.91	92.315	41.298	29.544	16.344	10.026	9.018	7.353	8.921
1997	87.392	292.488	476.604	392.492	250.045	156.216	122.811	97.248	135.491	139.713	552.546	665.216
1998	441.888	450.795	510.82	447.045	427.094	189.031	111.046	54.428	39.497	28.022	23.193	18.344
1999	90.97	406.647	508.268	415.18	354.154	101.572	62.956	44.828	34.913	22.318	33.352	109.797
2000	151.162	360.788	435.479	413.5	289.295	85.141	50.786	35.003	27.124	22.318	25.237	64.222
2001	151.162	314.929	362.689	411.82	224.436	68.709	38.616	25.178	19.334	17.166	17.121	18.646
2002	37.855	324.119	601.564	494.232	286.53	80.801	38.158	23.127	17.701	17.347	17.574	25.966
2003	206.461	316.179	312.229	457.06	246.78	66.573	33.73	15.499	8.781	7.664	17.348	27.426
2004	92.164	176.888	288.891	419.888	207.03	93.872	39.048	22.341	18.085	17.121	17.121	18.157
2005	33.263	150.725	195.592	342.713	108.58	35.471	17.121	17.121	17.121	17.121	17.121	21.08
2006	46.302	547.331	479.965	367.777	144.687	49.342	26.589	18.2	17.811	10.18	8.962	23.477
2007	102.526	271.173	295.272	241.453	182.688	109.099	45.824	31.174	25.485	19.765	19.146	42.67
2008	197.269	404.046	290.257	198.132	149.929	62.958	27.14	18.999	16.03	12.267	10.496	65.673
2009	151.793	348.773	378.393	154.81	117.169	16.817	8.456	6.824	6.574	4.768	1.846	51.076

*Valores en azul son calculados con la media de todo el registro.

**Valores en rojo son calculados con la media de dos años consecutivos.



Anexo 7

Caudales específicos (Lt/m²).

Anexo 7.1

Caudales específicos (L/km²). Estación Zapotal en Calarama (I-345).Área=3729 km²

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1982	29.890	85.344	63.562	70.276	40.443	19.447	11.769	8.326	6.408	9.14	68.547	144.873
1983	198.322	165.766	135.165	153.537	111.898	105.592	75.276	42.465	37.172	23.57	19.238	36.628
1984	35.959	126.115	161.586	96.108	37.826	23.011	15.29	11.156	9.601	8.788	7.533	11.106
1985	37.426	55.028	112.872	43.53	33.868	20.492	13.11	9.449	7.409	6.849	5.733	10.039
1986	101.805	118.538	78.286	121.759	48.837	19.915	12.948	9.265	7.459	6.795	6.758	7.458
1987	61.708	144.248	134.437	127.368	99.177	30.83	14.559	10.494	8.004	7.03	6.666	7.008
1988	37.757	108.226	78.98	58.11	57.793	21.896	13.796	9.643	7.886	6.522	6.623	7.541
1989	58.813	165.833	168.72	121.071	65.733	27.682	18.296	12.663	9.987	8.828	6.376	6.745
1990	14.165	84.134	56.256	63.733	32.993	18.921	10.88	8.095	6.197	5.447	4.695	6.222
1991	15.653	112.999	109.217	67.371	40.555	19.748	12.041	8.356	6.094	4.915	8.249	9.552
1992	60.933	138.232	168.784	151.049	112.865	57.311	18.34	11.785	8.328	6.569	5.647	5.6
1993	30.980	175.021	167.437	142.492	60.104	21.671	17.434	11.957	9.097	8.034	4.505	6.041
1994	44.615	145.681	112.474	125.185	59.097	24.301	14.552	10.011	7.634	6.313	3.626	14.463
1995	85.459	98.236	69.368	85.683	35.258	20.155	14.018	10.071	7.508	6.305	6.503	6.381
1996	18.733	98.915	137.907	84.293	32.535	15.953	10.631	7.228	5.579	2.954	2.408	2.922
1997	28.623	95.798	156.101	128.552	81.897	51.165	40.224	31.851	44.377	45.76	180.974	217.876
1998	144.73	147.648	167.307	146.419	139.885	61.913	36.371	17.827	12.936	9.178	7.596	6.008
1999	29.795	133.188	166.472	135.983	115.995	33.267	20.62	14.682	11.435	8.208	10.924	35.962
2000	50.752	118.168	142.631	135.433	94.752	27.886	16.634	11.465	8.884	8.208	8.266	21.034
2001	0.051	103.148	118.79	134.882	73.509	22.504	12.648	8.247	6.332	5.622	5.608	6.107
2002	0.012	106.158	197.028	161.874	93.846	26.465	12.498	7.575	5.797	5.681	5.756	8.504
2003	0.068	103.557	102.263	149.699	80.827	21.804	11.047	5.077	2.876	2.51	5.682	0.009
2004	30.186	57.935	94.62	137.525	67.808	30.745	12.789	7.317	5.923	5.608	5.608	5.947
2005	10.895	49.367	64.062	112.248	35.563	11.618	5.608	5.608	5.608	5.608	5.608	6.904
2006	15.165	179.266	157.202	120.457	47.389	16.161	8.709	5.961	5.834	3.334	2.935	7.689
2007	33.58	88.817	96.71	79.083	59.835	35.733	15.009	10.21	8.347	6.474	6.271	6.608
2008	64.611	132.336	95.067	64.894	49.106	20.62	8.889	6.223	5.25	4.018	3.438	11.669
2009	49.716	114.233	123.934	50.704	38.376	5.508	2.769	2.235	2.153	1.562	0.605	16.729

*Valores rellenados en color rojo.

Anexo 7.2

Caudales específicos (L/km²). Estación Zapotal en Lechugal (H346).

Área=2910 km²

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1982	31.577	84.912	67.413	74.165	41.804	18.932	10.073	8.276	7.008	9.436	66.833	136.241
1983	193.426	161.674	131.829	127.060	83.222	71.810	47.028	22.573	22.464	17.730	8.309	35.724
1984	39.752	136.882	165.441	100.497	40.372	26.567	15.110	10.881	9.364	8.570	7.347	10.832
1985	35.521	53.653	109.269	42.454	35.018	20.649	12.786	9.215	7.226	6.680	5.592	9.857
1986	104.120	117.990	76.274	120.413	43.995	18.261	12.703	9.036	7.276	6.722	6.591	6.842
1987	62.110	144.317	127.190	120.640	94.467	25.875	12.686	9.337	7.889	7.557	7.369	7.712
1988	38.545	105.510	73.252	50.445	49.707	18.507	12.075	8.684	7.444	6.286	6.283	7.025
1989	56.704	166.239	170.954	112.839	58.610	16.720	10.351	7.224	6.187	6.099	5.294	5.971
1990	12.733	80.479	49.557	61.096	31.060	14.673	8.948	6.405	4.648	4.582	4.579	6.022
1991	13.867	103.332	99.101	65.172	39.289	18.798	10.152	7.085	5.222	4.524	8.651	10.138
1992	59.450	130.585	157.019	130.747	107.906	48.820	13.918	8.384	5.346	4.125	3.381	3.504
1993	29.672	176.931	158.039	126.289	44.519	19.869	8.518	5.297	4.690	3.582	3.293	6.189
1994	38.202	139.996	100.010	117.090	46.388	16.001	7.835	5.015	3.458	3.390	3.081	14.818
1995	85.149	98.502	70.279	81.555	31.028	17.546	11.804	7.889	5.866	4.715	5.161	4.806
1996	18.741	100.647	141.979	91.245	30.978	13.858	9.914	5.485	3.364	3.026	2.467	2.994
1997	29.326	98.150	159.934	131.709	83.908	52.421	41.212	32.634	45.467	46.884	185.418	223.227
1998	148.285	151.273	171.416	150.015	143.320	63.433	37.264	18.264	13.254	9.403	7.783	6.156
1999	0.031	136.459	170.560	139.322	118.844	34.085	21.126	15.043	11.716	7.489	11.192	36.845
2000	50.726	121.070	146.134	138.758	97.079	28.571	17.042	11.746	9.102	7.489	8.469	21.551
2001	50.726	105.681	121.708	138.195	75.314	23.057	12.958	8.449	6.488	5.760	5.745	6.257
2002	12.703	108.765	201.867	165.850	96.151	27.114	12.805	7.761	5.940	5.821	5.897	8.713
2003	69.282	106.100	104.775	153.376	82.812	22.340	11.319	5.201	2.947	2.572	5.821	9.203
2004	30.928	59.368	96.943	140.902	69.473	31.501	13.103	7.497	6.069	5.745	5.745	6.093
2005	11.162	50.579	65.635	115.004	36.436	11.903	5.745	5.745	5.745	5.745	5.745	7.074
2006	15.538	183.668	161.062	123.415	48.553	16.558	8.922	6.107	5.977	3.416	3.007	7.878
2007	34.405	90.998	99.085	81.024	61.305	36.610	15.377	10.461	8.552	6.633	6.425	14.319
2008	66.198	135.586	97.402	66.487	50.312	21.127	9.107	6.376	5.379	4.116	3.522	22.038
2009	50.937	117.038	126.978	51.950	39.318	5.643	2.838	2.290	2.206	1.600	0.619	17.140

*Valores rellenados en color rojo.

**Anexo 8****Bondad de Ajuste****Distribución Log normal, caudales máximos instantáneos para Estación Zapotal en Lechugal (H346).**

#	Q máx. Instantáneo (m ³ /s)	Fn (x) Frecuencia Relativa	Yi = ln Xi	F (x) Frecuencia Teórica	Fn (x) - F (x)
1	363	0.026	5.894	0	0.026
2	459.26	0.051	6.13	0.002	0.049
3	543	0.077	6.297	0.01	0.067
4	682.04	0.103	6.525	0.067	0.036
5	712.09	0.128	6.568	0.09	0.038
6	729.74	0.154	6.593	0.106	0.048
7	749.96	0.179	6.62	0.125	0.054
8	773	0.205	6.65	0.15	0.055
9	832.75	0.231	6.725	0.224	0.007
10	860.44	0.256	6.757	0.261	0.005
11	874	0.282	6.773	0.281	0.001
12	923.9	0.308	6.829	0.354	0.046
13	949	0.333	6.855	0.391	0.058
14	976	0.359	6.883	0.432	0.072
15	997	0.385	6.905	0.463	0.078
16	1001.93	0.41	6.91	0.47	0.061
17	1049.41	0.436	6.956	0.538	0.102
18	1066.8	0.462	6.972	0.562	0.1
19	1071.21	0.487	6.977	0.568	0.082
20	1095.01	0.513	6.999	0.6	0.088
21	1111.11	0.538	7.013	0.621	0.083
22	1151.87	0.564	7.049	0.67	0.106
23	1152.99	0.59	7.05	0.672	0.081
24	1173.68	0.615	7.068	0.695	0.08
25	1189.57	0.641	7.081	0.712	0.071
26	1255.35	0.667	7.135	0.776	0.109
27	1268.6	0.692	7.146	0.788	0.096
28	1272.87	0.718	7.149	0.791	0.073
29	1290	0.744	7.162	0.805	0.061
30	1311	0.769	7.179	0.821	0.053
31	1321.5	0.795	7.187	0.829	0.034
32	1327.64	0.821	7.191	0.833	0.012
33	1335.95	0.846	7.197	0.839	0.007
34	1362.73	0.872	7.217	0.856	0.016
35	1433.44	0.897	7.268	0.895	0.002
36	1444.65	0.923	7.276	0.9	0.023
37	1495.97	0.949	7.311	0.921	0.028
38	1567.6	0.974	7.357	0.943	0.031



Anexo 9

Determinación del número de curva para cada subcuenca.



Anexo 9.1

Determinación del número de curva para las subcuencas Sibimbe, Catarama, Oncebi, Angamarca.

USO	SIBIMBE				CATARAMA				ONCEBI				ANGAMARCA			
	AREA (km2)	CN tabla	%	CN parcial	AREA (km2)	CN tabla	%	CN parcial	AREA (km2)	CN tabla	%	CN parcial	AREA (km2)	CN tabla	%	CN parcial
Arboricultura Tropical	120.2	55.0	27.2	14.9	206.3	55.0	62.8	34.5	1.7	55.0	1.0	0.6	37.0	55.0	2.6	1.4
Bosque Intervenido	94.7	66.0	21.4	14.1					0.0	66.0	0.0	0.0	79.1	66.0	5.5	3.6
Bosque Natural					1.9	60.0	0.6	0.3	19.6	60.0	11.7	7.0	163.6	60.0	11.4	6.8
Cuerpo de Agua Natural					0.1	100.0	0.0	0.0					0.4	100.0	0.0	0.0
Cultivos de Arroz					3.2	76.0	1.0	0.7								
Cultivos de Banano	0.1	78.0	0.0	0.0	16.8	78.0	5.1	4.0					10.7	78.0	0.8	0.6
Cultivos de Caña de Azúcar													114.9	79.0	8.0	6.3
Cultivos de Ciclo Corto	15.6	81.0	3.5	2.8	10.8	81.0	3.3	2.7	41.9	81.0	25.0	20.2	227.8	81.0	15.9	12.8
Cultivos de Maíz													99.5	76.0	6.9	5.3
Cultivos Indiferenciados	97.3	81.0	17.08	17.8	41.0	81.0	12.5	10.1	1.2	81.0	0.7	0.6	119.7	81.0	8.3	6.8
Nieve													26.0	100.0	1.8	1.8
Paramo	5.7	60.0	1.3	0.8									282.7	60.0	11.8	11.8
Pasto Cultivado	108.6	67.0	16.4	16.4	44.0	67.0	13.4	9.0	103.5	67.0	61.6	41.3	239.6	67.0	11.2	11.2
Vegetación Arbustiva													35.4	60.0	2.5	1.5
Zona Urbana	0.5	90.0	0.1	0.1	4.6	90.0	1.4	1.3					0.9	90.0	0.1	0.1
TOTAL	442.7			67.0	328.6			63.1	167.9			69.7	1437.3			70.0



Anexo 9.2

Determinación del número de curva para las subcuencas Lechugal, Calabí, Yuyumbi, Aguacatal.

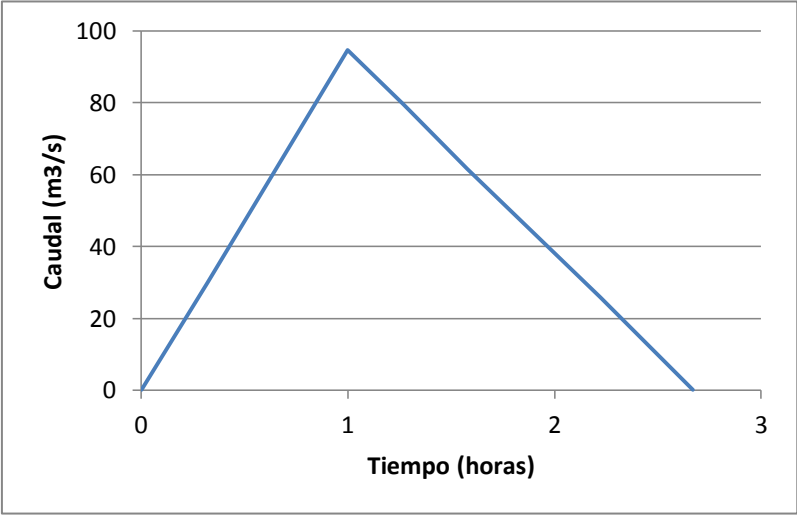
USO	LECHUGAL				CALABI				YUYUMBI				AGUACATAL			
	AREA (km2)	CN tabla	%	CN parcial	AREA (km2)	CN tabla	%	CN parcial	AREA (km2)	CN tabla	%	CN parcial	AREA (km2)	CN tabla	%	CN parcial
Arboricultura Tropical	169.0	55.0	98.1	54.0	281.7	55.0	26.2	14.4	31.1	55.0	79.0	43.5	34.4	55.0	94.6	52.0
Bosque Intervenido				0.0	0.5	66.0	0.0	0.0								
Bosque Natural					216.9	60.0	20.2	12.1								
Cultivos de Banano	2.4	78.0	1.4	1.1	201.0	78.0	18.7	14.6					0.0	78.0	0.0	0.0
Cultivos de Caña de Azúcar					6.1	79.0	0.6									
Cultivos de Ciclo Corto					7.9	81.0	0.7	0.6	7.1	79.0	18.1	14.3	0.6	81.0	1.7	1.4
Cultivos de Palma Africana					0.3	78.0	0.0	0.0								
Cultivos Indiferenciados					133.4	81.0	12.4	10.1								
Paramo					37.2	60.0	3.5	2.1								
Pasto Cultivado	0.8	67.0	0.5	0.3	188.7	67.0	17.6	11.8	1.1	67.0	2.9	1.9	1.3	67.0	3.7	2.5
Zona Urbana					0.3	90.0	0.0	0.0								
TOTAL	172.2			55.4	1074.0			66.2	39.4			66.0	36.4			55.9



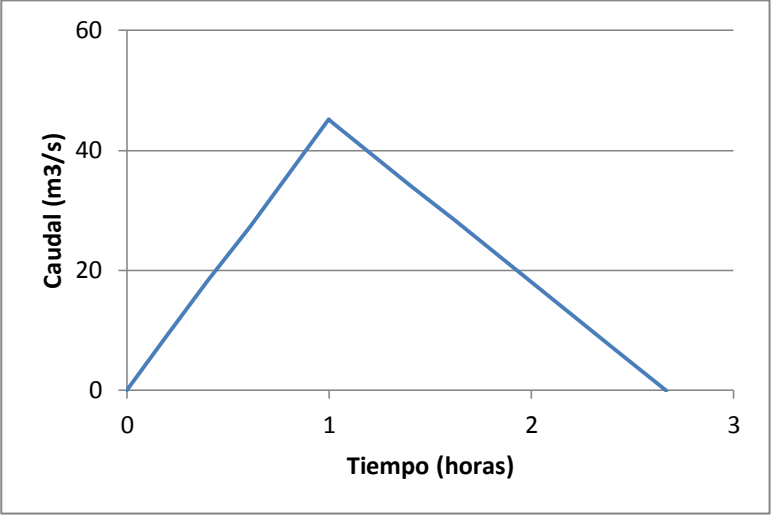
Anexo 10

Hidrograma triangular unitario, método SCS para cada subcuenca.

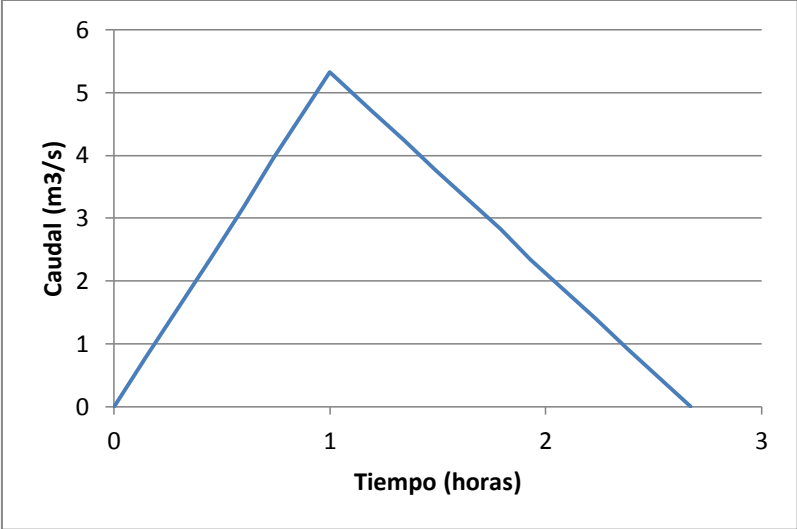
Hidrograma triangular unitario, río Angamarca.



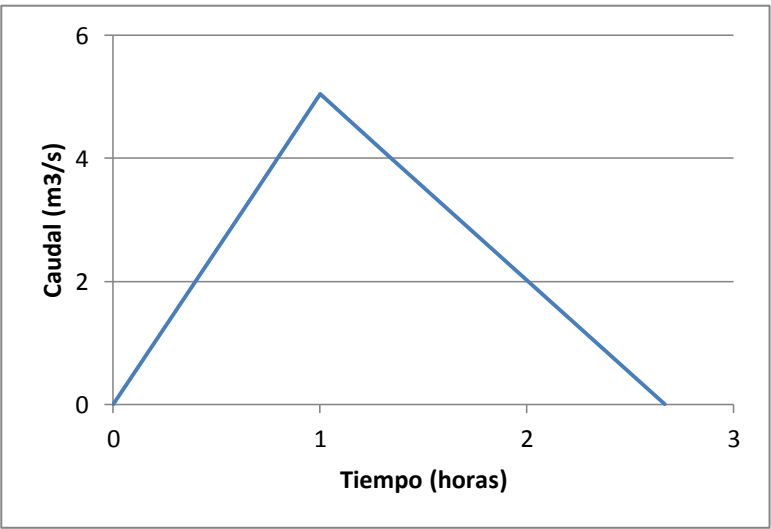
Hidrograma triangular unitario, río Calabí.



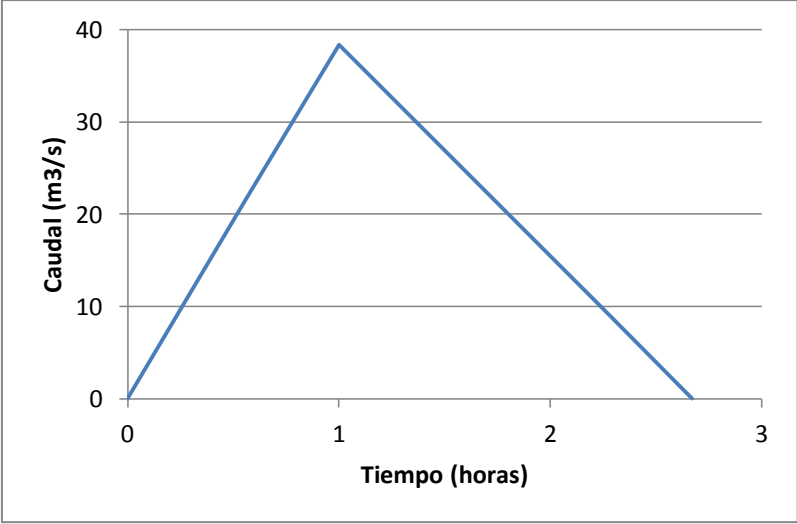
Hidrograma triangular unitario, río Lechugal.



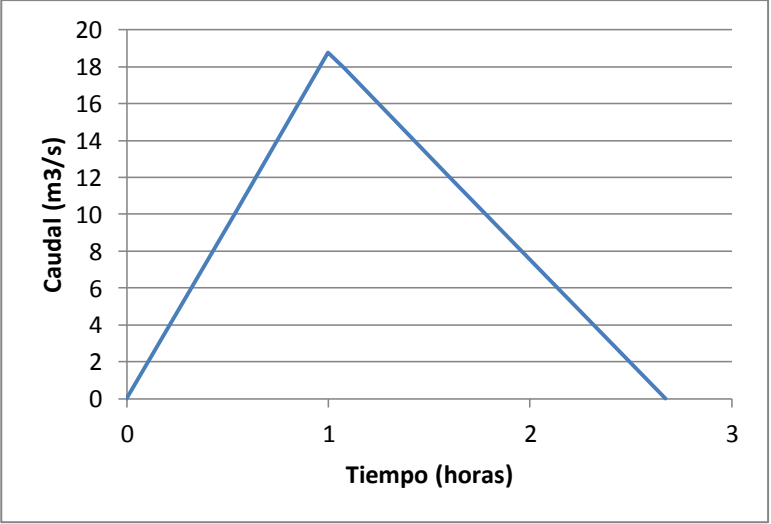
Hidrograma triangular unitario, estero Aguacatal.



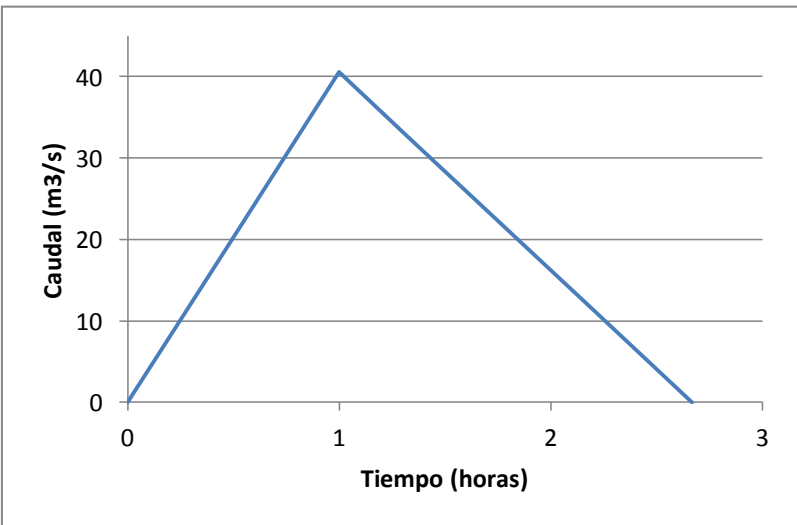
Hidrograma triangular unitario, río Catarama.



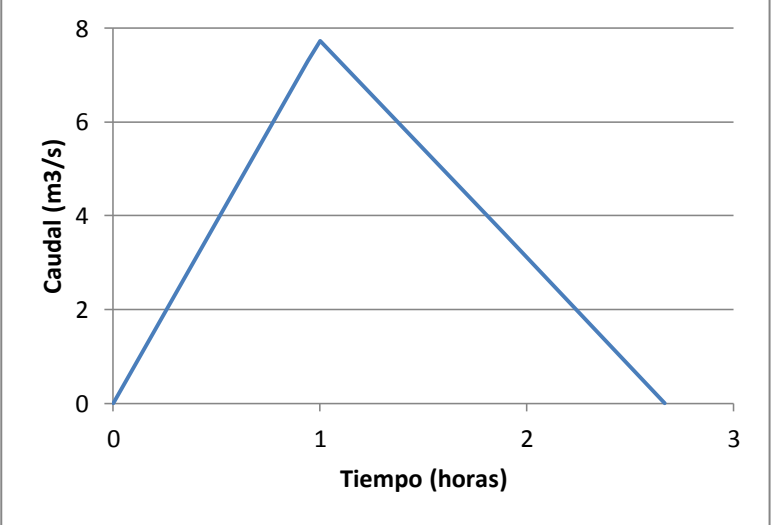
Hidrograma triangular unitario, río Oncebi.



Hidrograma triangular unitario, río Sibimbe.



Hidrograma triangular unitario, estero Yuyumbi.





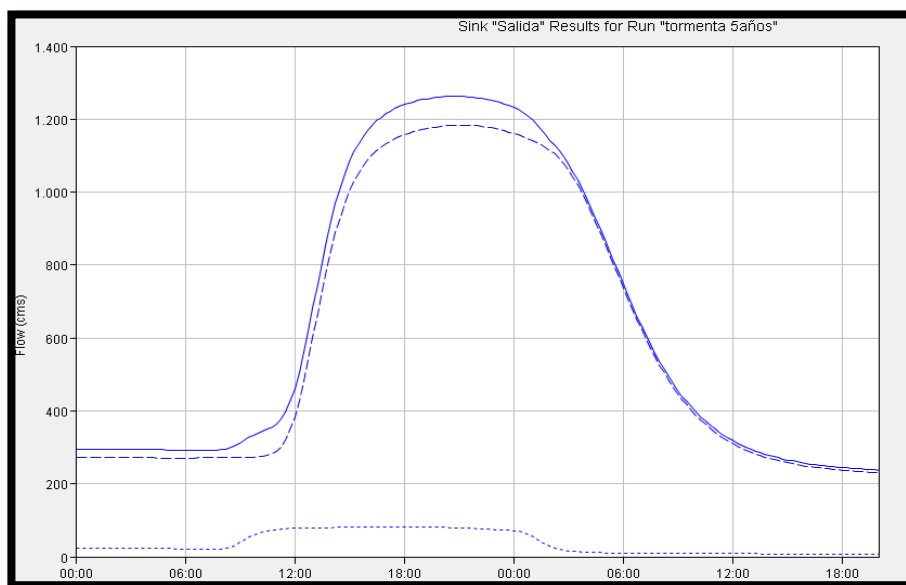
Anexo 11

Hidrogramas de máxima crecida para diferentes periodos de retorno en el punto de salida de la cuenca y caudales pico para cada subcuenca.

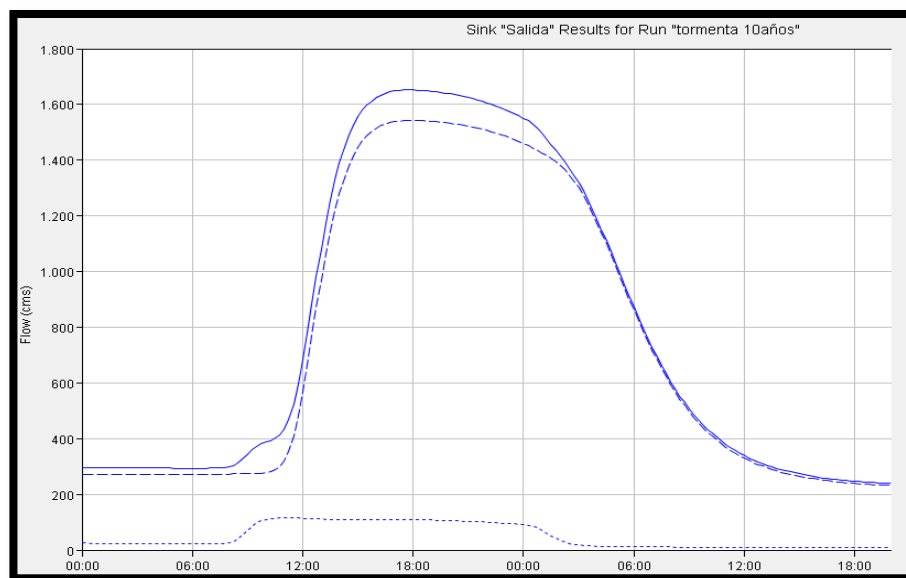
Anexo 11.1

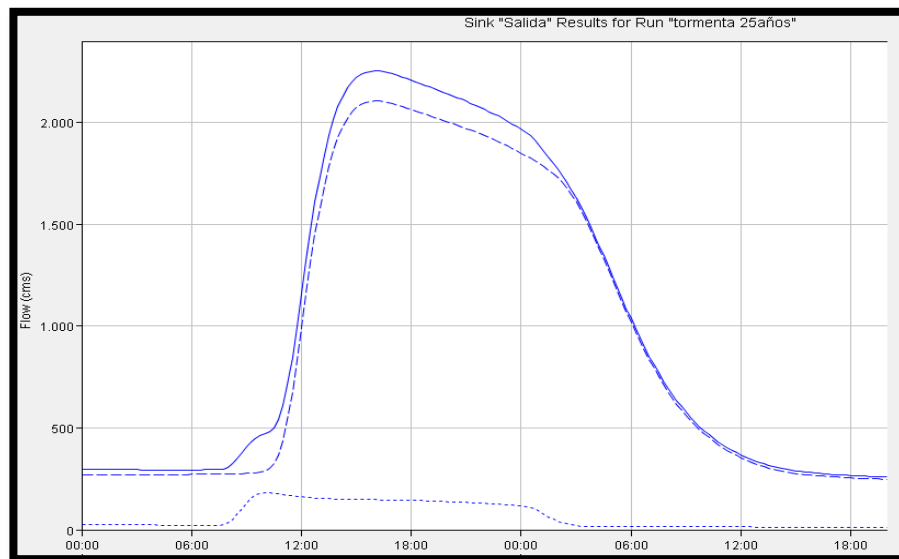
Hidrograma de máxima crecida y caudales máximos para TR = 5 y 10 años.

Hidrograma de máxima crecida y caudales máximos para TR = 5 años



Hidrograma de máxima crecida y caudales máximos para TR = 10 años



Anexo 11.2**Hidrograma de máxima crecida y caudales máximos para TR = 25 y 100 años.****Hidrograma de máxima crecida y caudales máximos para TR = 25 años****Hidrograma de máxima crecida y caudales máximos para TR = 100 años**