



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO
FACULTAD DE INGENIERÍA



T E S I S

Estudio hidrológico de la cuenca del río Santo Domingo hasta la estación Santa María del Llano

Que para obtener el título de

INGENIERO CIVIL

Presenta:

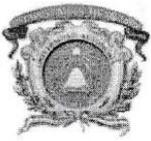
Gloria Vanessa Domínguez Sánchez

Asesor de tesis:

Dr. Khalidou Mamadou Bâ

Co-asesor de tesis:

Dr. Miguel Ángel Gómez Albores



DEPTO. DE EVALUACIÓN PROFESIONAL

No. Oficio: 37/2017

Ciudad Universitaria, Toluca, Méx. a 25 de agosto del 2017

C. GLORIA VANESSA DOMÍNGUEZ SÁNCHEZ
PASANTE DE INGENIERÍA CIVIL
PRESENTE

En respuesta a su solicitud, a continuación transcribo el tema aprobado por esta Dirección, que propuso el **KHALIDOU MAMADOU BÂ**, con el fin de que lo desarrolle en la modalidad de **TESIS**, le informo que se autoriza la **impresión de su trabajo** para presentar su Evaluación Profesional.

“ESTUDIO HIDROLÓGICO DE LA CUENCA DEL RÍO SANTO DOMINGO HASTA LA ESTACIÓN SANTA MARÍA DEL LLANO”.

	RESUMEN
CAPÍTULO 1.	INTRODUCCIÓN
CAPÍTULO 2.	MARCO TEÓRICO
CAPÍTULO 3.	ZONA DE ESTUDIO
CAPÍTULO 4.	CARACTERÍSTICAS FISIGRÁFICAS
CAPÍTULO 5.	ANÁLISIS DE LA PRECIPITACIÓN
CAPÍTULO 6.	EVAPOTRANSPIRACIÓN
CAPÍTULO 7.	ESCURRIMIENTO SUPERFICIAL
	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES
	ANEXOS
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Ruego a usted tomar nota de que en cumplimiento a lo especificado por la Ley de Profesiones, deberá prestar Servicio Social durante un tiempo mínimo de seis meses, como requisito indispensable para sustentar su Evaluación Profesional.

Asimismo, para la elaboración de la **TESIS**, y demás trámites, deberá sujetarse a la reglamentación respectiva de esta Universidad.

ATENTAMENTE
PATRIA, CIENCIA Y TRABAJO

“2017, Año Del Centenario de la Promulgación de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos”.



FACULTAD DE INGENIERÍA
U. A. E. M.

DRA. MARÍA DOLORES DURÁN GARCÍA
DIRECTORA DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA

**/Saha.

a Giovannie y Alejandra

Agradecimientos

Agradezco el apoyo económico otorgado para la realización de esta tesis para obtener mi título de Ingeniero Civil: al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) en el marco del proyecto 248553: *“Modelación de eventos hidrológicos extremos a partir de precipitación estimada por percepción remota”*.

Al Dr. Khalidou M. Bâ y al Dr. Miguel A. Gómez, por su paciencia y apoyo incondicional mostrado, además por su preocupación y conocimientos aportados para la culminación de esta tesis. Gracias.

Al Dr. Álvaro López García y al grupo de hidrología del CIRA, por su apoyo y conocimientos compartidos en la rehabilitación de la estación hidrométrica.

A los miembros integrantes del jurado, por sus acertadas recomendaciones y aportaciones, para el mejoramiento de esta tesis:

Dr. Carlos Díaz Delgado

M. en C. A. Boris Miguel López Rebollar

Dr. Guillermo Pedro Morales Reyes

A todo el personal docente y administrativo de la Facultad de Ingeniería y del Centro Interamericano de Recursos del Agua por todo el apoyo y conocimientos que me impartieron durante mis estudios.

Resumen

Al analizar el comportamiento de la cuenca del río Santo Domingo se proporcionan aportes para posteriores estudios detallados de simulación y prevención de inundaciones. Estos procesos incluyen la precipitación, la evapotranspiración y escurrimiento superficial. Por lo tanto, la presente investigación tuvo como objetivo describir, estimar y cuantificar las características de la cuenca experimental del río Santo Domingo utilizando como herramienta de análisis el Sistema de Información Geográfica (SIG) TerrSet.

La primera etapa del estudio consistió en delimitar la cuenca del río Santo Domingo considerando como punto exutorio la estación hidrométrica Santa María del Llano, así como en describir las características fisiográficas de la cuenca mediante la aplicación del módulo hidrogeomático desarrollado en el CIRA (Centro Interamericano de Recursos del Agua) (Franco, 2008).

Posteriormente se realizaron diferentes cálculos para obtener la precipitación media, la precipitación máxima diaria y el escurrimiento superficial de la cuenca con un enfoque probabilístico. También se estimó la evapotranspiración en la cuenca mediante diferentes métodos indirectos y se llevó a cabo el análisis estadístico utilizando el software HIDESTAD desarrollado en el CIRA.

La cuenca Santo Domingo es una cuenca intermedia-pequeña con forma distorsionada. Tiene un relieve moderadamente inclinado y accidentado, su río principal es corto y tiende a concentrar el escurrimiento de una lluvia intensa formando grandes crecidas. Presenta una temperatura media de 12.9° C y precipitación media de 800 mm/año. Tiene una evapotranspiración de referencia alrededor de 1400 mm/año y se han presentado años húmedos en su mayoría con base en datos históricos de caudal.

Contenido

	Pág.
Agradecimientos	I
Resumen	II
Índice de figuras	VII
Índice de tablas.....	IX
Acrónimos y símbolos.....	XI
Capítulo 1. Introducción	1
1.1 Planteamiento del problema.....	2
1.2 Justificación.....	3
1.3 Hipótesis	3
1.4 Objetivos	4
1.4.1 Objetivo general.....	4
1.4.2 Objetivos específicos.....	4
Capítulo 2. Marco teórico.....	5
2.1 Gestión del agua en el mundo.....	5
2.2 Ciclo hidrológico	5
2.3 Cuenca hidrográfica	6
2.4 Precipitación.....	6
2.5 Evapotranspiración.....	7
2.6 Escurrimiento	8

Capítulo 3. Zona de estudio	9
3.1 Descripción de la zona de estudio.....	9
3.1.1 Río Santo Domingo	9
3.1.2 Estación hidrométrica Santa María del Llano	10
3.1.3 Localización Geográfica de la cuenca	12
3.1.4 Características generales	12
Capítulo 4. Características fisiográficas	22
4.1 Características físicas de la cuenca	22
4.1.1 Área	26
4.1.2 Parteaguas	26
4.1.3 Perímetro	26
4.1.4 Pendiente media de la cuenca.....	27
4.1.5 Altura media de la cuenca	27
4.1.6 Longitud máxima de la cuenca	28
4.1.7 Forma de la cuenca	28
4.1.8 Rectángulo de Gravelius.....	30
4.1.9 Orden.....	31
4.1.10 Relación media de confluencia.....	32
4.1.11 Densidad de corrientes.....	33
4.1.12 Densidad de drenaje	34
4.2 Características físicas del río principal	34

4.2.1	Longitud.....	34
4.2.2	Pendiente.....	35
4.2.3	Perfil longitudinal	35
4.2.4	Coefficiente de sinuosidad hidráulico	35
4.2.5	Tiempo de concentración.....	36
	Capítulo 5. Análisis de la precipitación	38
5.1	Estaciones meteorológicas utilizadas en el estudio	38
5.1.1	Pruebas de calidad de información aplicables en hidrología	41
5.1.2	Valores singulares	47
5.1.3	Funciones de distribución de probabilidad.....	54
5.2	Precipitación media anual de la cuenca	56
5.2.1	Media aritmética	56
5.2.2	Polígonos de Thiessen	57
5.2.3	Método de Isoyetas	60
5.3	Precipitación máxima diaria.....	64
5.3.1	Funciones de distribución para valores extremos.....	64
5.3.2	Método de isoyetas.....	66
5.4	Temperatura.....	68
5.4.1	Media aritmética	69
5.4.2	Polígonos de Thiessen	70

Capítulo 6. Evapotranspiración	72
6.1 Evapotranspiración de referencia.....	72
6.2 Estimación de la evapotranspiración.....	72
6.2.1 Método de Hargreaves-Samani	73
6.2.2 Método de Thornthwaite	74
6.2.3 Método de Turc.....	76
6.3 Evapotranspiración media de la cuenca.....	76
6.3.1 Método aritmético	76
6.3.2 Polígonos de Thiessen	77
6.3.3 Comparación de la ET_0 con estaciones INIFAP	78
 Capítulo 7. Escurrimiento superficial.....	 83
7.1 Rehabilitación de la estación Santa María del Llano.....	83
7.2 Curva de frecuencias	87
7.3 Volumen anual escurrido.....	89
7.4 Caudales máximos anuales	90
7.5 Curva elevación-gasto.....	95
7.5.1 Aforos realizados por el grupo de hidrología del CIRA	95
 Conclusiones y recomendaciones.....	 101
Anexos	105
Referencias bibliográficas	142

Índice de figuras

	Pág.
Figura 3.1. Croquis del Río Santo Domingo (SRH, 1980)	10
Figura 3.2. Vista satelital de la estación hidrométrica Santa María del Llano	11
Figura 3.3. Localización de la zona de estudio.....	12
Figura 3.4. Subprovincias de la zona de estudio (INEGI, 2006)	13
Figura 3.5. Tipos de suelo en la cuenca.....	15
Figura 3.6. Tipo de vegetación en la cuenca.....	17
Figura 3.7. Clima de la cuenca (según Köppen modificado por Enriqueta García)	21
Figura 4.1. Ventana principal del software TerrSet.....	23
Figura 4.2. Ventana principal del USGS EarthExplorer	24
Figura 4.3. Ventana principal del módulo Hidrogeomático	25
Figura 4.4. Ventana para obtener los parámetros de la cuenca	25
Figura 4.5. Curva hipsométrica de la cuenca	28
Figura 4.6. Rectángulo de Gravelius.....	31
Figura 4.7. Orden de las corrientes.....	32
Figura 4.8. Perfil del río principal.....	35
Figura 5.1. Estaciones meteorológicas situadas cerca de la cuenca.....	39
Figura 5.2. Ventana principal del software HIDESTAD	41
Figura 5.3. Ajuste de funciones de distribución a la muestra de precipitación anual de la estación 15025.	47
Figura 5.4. Estaciones meteorológicas utilizadas en el estudio de la cuenca Santo Domingo.....	53
Figura 5.5. Función Pearson III.....	55
Figura 5.6. Ventanas de los módulos “DISTANCE” y “AREA”	58
Figura 5.7. Cálculo de la precipitación media por el método de polígonos de Thiessen.....	60
Figura 5.8. Ventana de los módulos “INTERPOL” y “CONTOUR”	61
Figura 5.9. Calculo de la precipitación media por el método de isoyetas.	63

Figura 5.10. Distribución espacial de las precipitaciones máximas diarias para T=2años.	67
Figura 5.11. Temperatura media interanual (Periodo de 1962 al 2011).....	68
Figura 5.12. Temperatura media de la cuenca (°C).....	71
Figura 6.1. Comparación de temperatura de la estación Tiacaque y la 15341 (periodo 2008-2014)	79
Figura 6.2. Comparación de temperatura de la estación Ocampo y la 15084 (periodo 2008-2014)	79
Figura 6.4. Comparación de la ET ₀ de estación Tiacaque y la 15341 (periodo 2008-2014)	80
Figura 6.5. Comparación de ET ₀ de la estación Ocampo y la 15084 (periodo 2008-2014).	81
Figura 7.1. Grupo de hidrología del CIRA.	84
Figura 7.2. Escala limnimétrica instalada de 0 a 2.50 metros.....	85
Figura 7.3. Escala limnimétrica instalada de 2.50 a 3.90 metros.....	86
Figura 7.4. Régimen del Río Santo Domingo en la estación Santa María del Llano.....	89
Figura 7.5. Caudales históricos máximos anuales	92
Figura 7.6. Caudales históricos máximos anuales instantáneos	92
Figura 7.7. Distribución de probabilidad del caudal máximo anual	94
Figura 7.8. Distribución de probabilidad del caudal máximo anual instantáneo	94
Figura 7.9. Vista de una sección transversal de un río para calcular el caudal por el método de velocidad-área (OMM, 2011).....	96
Figura 7.10. Molinete utilizado en los aforos.	97
Figura 7.11. Sección transversal del río Santo Domingo en la estación Santa María del Llano.....	98
Figura 7.12. Observación de la escala limnimétrica del río.	99
Figura 7.13. Vista del río alcanzando el puente.	99
Figura 7.14. Curva elevación-gasto del río Santo Domingo	100

Índice de tablas

	Pág.
Tabla 3.1. Localidades en la cuenca.....	19
Tabla 4.1. Clasificación de cuencas según Campos (1998).....	26
Tabla 4.2. Forma de la cuenca	30
Tabla 4.3. Relación de confluencia	33
Tabla 4.4. Características físicas del río principal	37
Tabla 5.1. Valores de $Q\alpha$ para la prueba de inversión (Llamas, 1993).....	44
Tabla 5.2. Resultados de las pruebas de calidad de la información	46
Tabla 5.3. Estaciones meteorológicas utilizadas en el estudio.....	50
Tabla 5.4. Precipitación media de anual de las estaciones dentro de la cuenca.....	57
Tabla 5.5. Precipitación media por Polígonos de Thiessen	59
Tabla 5.6. Cálculos del método de Isoyetas.....	62
Tabla 5.7. Comparación de la precipitación media de la cuenca.....	63
Tabla 5.8. Cuántiles de precipitación máxima diaria (mm) según Log-Pearson III.	66
Tabla 5.9. Temperatura media anual por estación (Periodo de 1962 al 2011).	69
Tabla 5.10. Temperatura media por método media aritmética.	70
Tabla 5.11. Temperatura media por el método de polígonos de Thiessen	70
Tabla 6.1. Radiación extraterrestre	74
Tabla 6.2. Número máximo de horas de Sol	75
Tabla 6.3. ET_0 media por método media aritmética.....	77
Tabla 6.4. ET_0 media por el método de polígonos de Thiessen	77
Tabla 6.5. Comparación de la ET_0 media de la cuenca.....	78
Tabla 6.6. Comparación de ET_0 de estación Tiacaque y la 15341 (periodo 2008-2014)	80
Tabla 6.7. Comparación de ET_0 de la estación Ocampo y la 15084 (periodo 2008-2014).....	81

Tabla 7.1. Caudales medios mensuales	88
Tabla 7.2. Comparación de volúmenes escurridos.....	90
Tabla 7.3. Caudales máximos registrados (mm).	91
Tabla 7.4. Parámetros estadísticos de caudales anuales.....	93
Tabla 7.5. Análisis estadístico de caudales máximos anuales	93
Tabla 7.6. Gastos y elevaciones registradas en los aforos.....	100

Acrónimos y símbolos

A	Área
BANDAS	Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales
CIRA	Centro Interamericano de Recursos del Agua
CLICOM	Clima Computarizado
CONACYT	Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología
CONAGUA	Comisión Nacional del Agua
D_d	Densidad de drenaje
D_s	Densidad de corrientes
ET	Evapotranspiración
ET_0	Evapotranspiración de referencia
INEGI	Instituto Nacional de Estadística y Geografía
INIFAP	Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias
K_c	Coefficiente de compacidad
km	Kilómetros
L1	Lado mayor del rectángulo
L2	Lado menor del rectángulo
L_a	Longitud directa del río
L_c	Longitud recta de la cuenca
L_m	Longitud máxima
L_s	Longitud de corrientes
m	Metros
m.s.n.m.	Metros sobre el nivel del mar
m^3	Volumen en metros cúbicos
mm	Milímetros
MNA	Modelo numérico de altitud
P	Perímetro
Q	Caudal
R_c	Relación de confluencia
R_e	Radio de elongación

R _f	Factor de forma
R _h	Relación hipsométrica
S	Segundos
SAGARPA	Secretaria de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación
SEMARNAT	Secretaria de medio ambiente y recursos naturales
SIG	Sistemas de Información Geográfica
S _m	Pendiente media
SMN	Servicio Meteorológico Nacional
T	Periodo de retorno

Capítulo 1. Introducción

El análisis de gran parte de los fenómenos hidrológicos que ocurren sobre un determinado espacio geográfico suele tener como referencia a la unidad fisiográfica conocida como cuenca.

Las características fisiográficas de una cuenca desempeñan un papel esencial en el estudio y comportamiento de los componentes del ciclo hidrológico, tales como la evaporación, flujo superficial, entre otros. Las principales características fisiográficas que se consideran en investigaciones hidrológicas son las concernientes a la cuenca, a la red de drenaje y al río principal (Díaz *et al.*, 1999).

Para estudiar una cuenca hidrológica se requieren métodos cuantitativos fundamentales para definir parámetros que representen características particulares de la cuenca, obteniendo información relevante acerca de las variables y los procesos hidrológicos (Breña y Jacobo, 2006).

Gracias a los avances en los desarrollos tecnológicos de geoinformática, se ha logrado que los parámetros se obtengan de forma automatizada por medio de Sistemas de Información Geográfica (SIG) facilitando la toma de decisiones bajo fenómenos extraordinarios como lo son las inundaciones (Díaz *et al.*, 1999).

Para contemplar los efectos derivados de los fenómenos extraordinarios se realizan estimaciones de los valores extremos de las variables hidrometeorológicas, caso de las precipitaciones de una región o de los caudales de una cuenca, por medio del análisis estadístico pertinente.

En este sentido se aborda dicho análisis bajo un punto de vista frecuencial, ya que, hasta el momento, constituye el único elemento científico de trabajo para la estimación de eventos que puedan producirse en un futuro y cuyo período de ocurrencia y magnitud no pueden en principio predecirse con exactitud (Llanos *et al.*, 2009).

El río Santo Domingo es una de las corrientes principales del río Lerma, nace cerca del cerro Las Palomas, al norte del Estado de México y corre en dirección Suroeste hasta unirse con el río Lerma.

Los parámetros físicos de la cuenca del río Santo Domingo definen el régimen hidrológico, por lo tanto, con base a las características fisiográficas se pretende encontrar mecanismos de predicción de respuesta hidrológica.

La precipitación y variaciones del caudal se analizan con base en datos históricos, realizando estadísticas de frecuencia para diferentes periodos de retorno y así calcular las probabilidades de ocurrencia y tener un panorama de predicción para eventos que se pudieran presentar en el futuro.

1.1 Planteamiento del problema

México cada año se ve afectado por fenómenos meteorológicos como huracanes, tormentas tropicales y frentes fríos, que generan grandes cantidades de precipitación, provocando frecuentes inundaciones con repercusiones sociales, económicas y ambientales.

La cuenca del río Lerma también conocida como el sistema Lerma-Chapala-Santiago que, por su extensión y caudal del río, es una de las más importantes en México. En el Estado de México se origina el río Lerma que después de salir de las Lagunas del mismo nombre, continúa hacia el Noroeste recibiendo algunos afluentes como son los ríos Tejalpa y Jaltepec por la margen izquierda y los ríos

Otzolotepec, Sila y Santo Domingo por la margen derecha, atravesando el municipio de Ixtlahuaca.

En la última década se han visto afectadas viviendas y cultivos de las comunidades del municipio de Ixtlahuaca por el desbordamiento de afluentes del río Lerma. Uno de estos es el río Santo Domingo que en septiembre del 2015 alcanzó su máxima capacidad y se desbordó, inundando cultivos y viviendas de la localidad de Santa María del Llano que habitan cerca de las márgenes del río.

1.2 Justificación

Para estar preparados ante posibles eventos extraordinarios como las inundaciones en el municipio de Ixtlahuaca es necesario conocer el comportamiento los ríos que atraviesan el municipio. El análisis del comportamiento de las cuencas se puede obtener de mediante el uso de herramientas computacionales para así obtener una mejor predicción de los eventos extremos de precipitación y caudal.

Al analizar el comportamiento de la cuenca del río Santo Domingo, recopilando sus datos hidrometeorológicos históricos y calculando las probabilidades de ocurrencia, se proporcionan aportes para posteriores estudios detallados de simulación y prevención de inundaciones.

1.3 Hipótesis

El uso de softwares como TerrSet e HIDESTAD permitirá la identificación de los parámetros fisiográficos de la cuenca y la estimación de valores extremos de los componentes del ciclo hidrológico, que servirá de apoyo para prevenir inundaciones.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Describir, evaluar y cuantificar las características fisiográficas e hidrológicas de la cuenca experimental del río Santo Domingo con la estación hidrométrica Santa María del Llano como punto exutorio, de forma automatizada con el uso del SIG TerrSet y el software HIDESTAD como apoyo para la prevención de inundaciones.

1.4.2 Objetivos específicos

1. Delimitar la cuenca del río Santo Domingo a partir de un modelo digital de elevación utilizando como punto exutorio de la cuenca la estación hidrométrica Santa María del Llano.
2. Obtener las características fisiográficas de área, pendiente y forma de la cuenca así como longitud, pendiente y tiempo de concentración del río Santo Domingo dentro del SIG TerrSet.
3. Calcular la frecuencia de la precipitación, evapotranspiración de referencia y escurrimiento superficial en la cuenca Santo Domingo con base en datos históricos para diferentes periodos de retorno mediante el uso software HIDESTAD.
4. Obtener la actual curva elevación-gasto del río Santo Domingo mediante aforos en la estación Santa María del Llano con apoyo de la CONAGUA.

Capítulo 2. Marco teórico

2.1 Gestión del agua en el mundo

El agua es fundamental para la vida, por tanto, la gestión eficiente de los recursos hídricos requiere un enfoque integrado que coordine el desarrollo económico, social y la protección de los ecosistemas naturales, estableciendo una relación entre el uso del suelo y el aprovechamiento del agua en la totalidad de una cuenca hidrológica (Franco, 2008).

De acuerdo con Dourojeanni (2002) la gestión integrada del agua implica tomar decisiones y manejar los recursos hídricos para distintos usos de forma que considere las necesidades de la sociedad. Integrando un sentido cualitativo, cuantitativo y ecológico.

Por tanto, para influir en la gestión integrada del agua son necesario estudios de evaluación y caracterización de las cuencas hidrográficas, impulsando el conocimiento de los recursos y problemáticas que pudieran surgir ante eventos extraordinarios como lo son las inundaciones o sequías.

2.2 Ciclo hidrológico

El ciclo del agua es un modelo conceptual de diferentes variables, las cuales se relacionan entre sí mediante procesos hidrológicos. Los estudios relacionados con el agua tienen que enmarcarse en el contexto del ciclo hidrológico, definiendo el

espacio geográfico en primera instancia. La cuenca hidrológica es un espacio natural que se considera como un sistema (Díaz *et al.*, 2006).

2.3 Cuenca hidrográfica

Una cuenca hidrográfica es una zona de la superficie terrestre en donde las gotas de lluvia que caen sobre ella tienden a ser drenadas por el sistema de corrientes hacia un mismo punto de salida (Aparicio, 2001).

Entre las características de la cuenca están aquellas que condicionan el volumen del escurrimiento, el área de la cuenca y el tipo de suelo; y las que condicionan la velocidad de respuesta, como son el orden de corrientes, pendiente de la cuenca y los cauces (Aparicio, 2001).

2.4 Precipitación

La precipitación se entiende como la caída del agua sobre la superficie terrestre en cualquiera de sus formas como lluvia, nieve, granizo, etc. Es uno de los componentes primarios del ciclo hidrológico que corresponden a las entradas del balance hídrico (Llanos *et al.*, 2009-2010).

La lluvia se mide por la altura que alcanzaría el agua sobre una superficie plana y horizontal ideal, antes de sufrir pérdidas. Los pluviómetros miden la cantidad de lluvia (en mm) recibida en el intervalo de tiempo comprendido entre dos lecturas consecutivas.

A los centros meteorológicos llega el conjunto de datos de cada estación meteorológica. Todo este conjunto de datos alcanza un volumen poco manejable, por lo que debe recurrirse a procedimientos estadísticos (Díaz *et al.*, 2006).

Existen tres métodos principales para estimar la precipitación promedio sobre un área determinada (cuenca hidrológica) que son promedio aritmético, polígonos de Thiessen e isoyetas para diferentes temporalidades (Franco, 2008).

2.5 Evapotranspiración

La evaporación es un componente significativo de la transferencia de masa y energía de la atmósfera. Es un proceso por el cual el agua líquida se convierte en vapor de agua (vaporización), el agua se evapora de superficies como lagos, ríos, caminos, suelos y vegetación (Franco, 2008).

El proceso de la transpiración consiste en la vaporización del agua líquida contenida en los tejidos de las plantas el agua absorbida por medio de las raíces, se transfiere a la atmósfera fundamentalmente a través de las estomas situadas en las hojas.

La transpiración, igual que la evaporación directa, depende del aporte de energía, del gradiente de presión del vapor y de la velocidad del viento. Por lo tanto, la radiación, la temperatura del aire, la humedad atmosférica y el viento también deben ser considerados en su determinación. El contenido de agua del suelo y la capacidad del suelo de conducir el agua a las raíces también determinan la tasa de transpiración, así como la salinidad del suelo y del agua de riego. La tasa de transpiración también es influenciada por las características del cultivo, el medio donde se produce y las prácticas de cultivo (FAO, 2006).

La evaporación y la transpiración ocurren simultáneamente y no hay forma sencilla de distinguir entre estos dos procesos. Por ello es necesario introducir el concepto de la evapotranspiración (ET) que será la combinación de los dos procesos anteriores por el cual el agua cambia de estado líquido a gaseoso y directamente a través de las plantas vuelve a la atmósfera en forma de vapor. La ET depende del aporte de energía, del gradiente de presión de vapor y de la velocidad del viento,

por esto la radiación, temperatura, humedad atmosférica y viento deben ser considerados en su determinación (Franco, 2008).

La evapotranspiración de referencia (ET_0) se le conoce a la tasa de ET de una superficie de referencia sin restricciones de agua. La superficie de referencia es un cultivo hipotético de pasto, con una altura asumida de 0.12 m, con una resistencia superficial fija de 70 s m^{-1} y un albedo de 0.23. La superficie de referencia es muy similar a una superficie extensa de pasto verde, bien regada, de altura uniforme, creciendo activamente y dando sombra totalmente al suelo (FAO, 2006).

2.6 Esgurrimiento

El escurrimiento es definido como el agua proveniente de la precipitación que circula sobre o bajo la superficie terrestre que llega a una corriente para finalmente ser drenada hasta la salida de la cuenca (Aparicio, 2001).

Llamas (1993) dice que los factores que afectan al escurrimiento son los referentes a la precipitación, el suelo, el clima y las características de la cuenca.

Una vez que la precipitación alcanza la superficie del suelo, se infiltra hasta que las capas superiores de este se saturan. Este escurrimiento se produce mientras el agua no llegue a los cauces bien definidos, llamados flujo de superficie del terreno.

El escurrimiento de corrientes se produce en la trayectoria hacia las corrientes más próximas hasta llegar a un cauce bien definido. El escurrimiento superficial engloba al flujo de la superficie de terreno y al escurrimiento de corrientes.

Capítulo 3. Zona de estudio

3.1 Descripción de la zona de estudio

3.1.1 Río Santo Domingo

El río Santo Domingo es una de las corrientes principales del río Lerma, nace cerca del cerro Las Palomas, al norte del Estado de México, corren en dirección Suroeste pasando por Santiago Yeché y Santa María del Llano, hasta unirse con el río Lerma, en las proximidades del poblado de Santo Domingo de Guzmán (Figura 3.1). Recibe aportaciones del río El Pescado, que baja del cerro Timilpan hasta Santiago Yeché, donde se une con el río Santo Domingo y del río Sila que nace cerca de Santa María Nativitas, pasando por San Bartolo del Llano y llega a Santo Domingo de Guzmán donde se une con el río Santo Domingo (SRH, 1980).

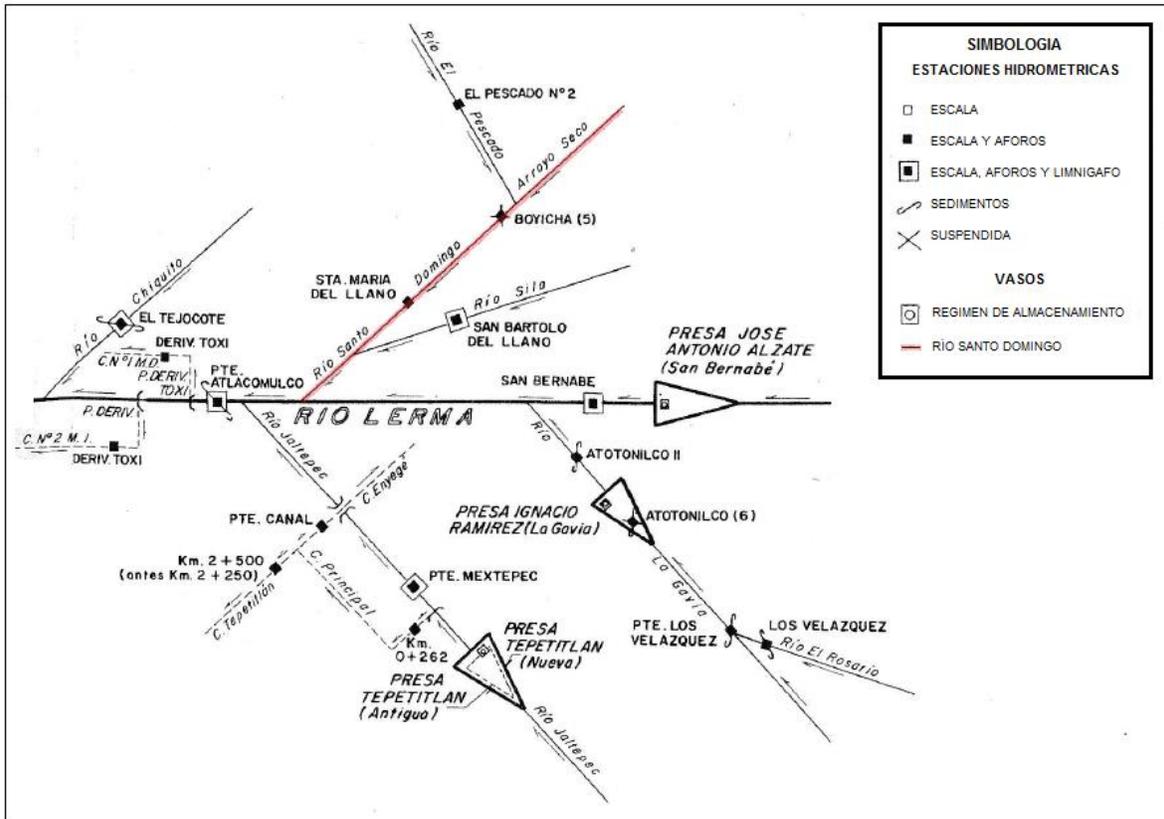


Figura 3.1. Croquis del Río Santo Domingo (SRH, 1980)

3.1.2 Estación hidrométrica Santa María del Llano

Localización

La estación hidrométrica Santa María del Llano se encuentra a 8.5 km al Noreste de Ixtlahuaca, sobre el río Santo Domingo, en el límite oriente del poblado Santa María del Llano con coordenadas de latitud $19^{\circ}38'1.47''$ N y longitud $99^{\circ}43'7.60''$ O, como se muestra en la Figura 3.2.



Figura 3.2. Vista satelital de la estación hidrométrica Santa María del Llano

Condiciones del Tramo

Se encuentra ubicada en un tramo recto de 130 m de longitud con márgenes formadas por tierra arcillosa.

Sección de aforos

La sección es irregular y variable constituida por arcilla y arena en dirección normal a la corriente. Para aforar se utiliza el puente para peatones y autos que cruza el río, de concreto reforzado con dos pilas intermedias con claro total de 20 m aproximadamente.

3.1.3 Localización Geográfica de la cuenca

La cuenca hidrográfica Santo Domingo (zona de estudio) es una subcuenca exorreica de la cuenca Alto Lerma, forma parte de nueve municipios al norte del Estado de México; Atlacomulco, Chapa de Mota, Ixtlahuaca, Jiquipilco, Jocotitlán, Morelos, San Lorenzo Malacota, Villa del Carbón y Timilpan.

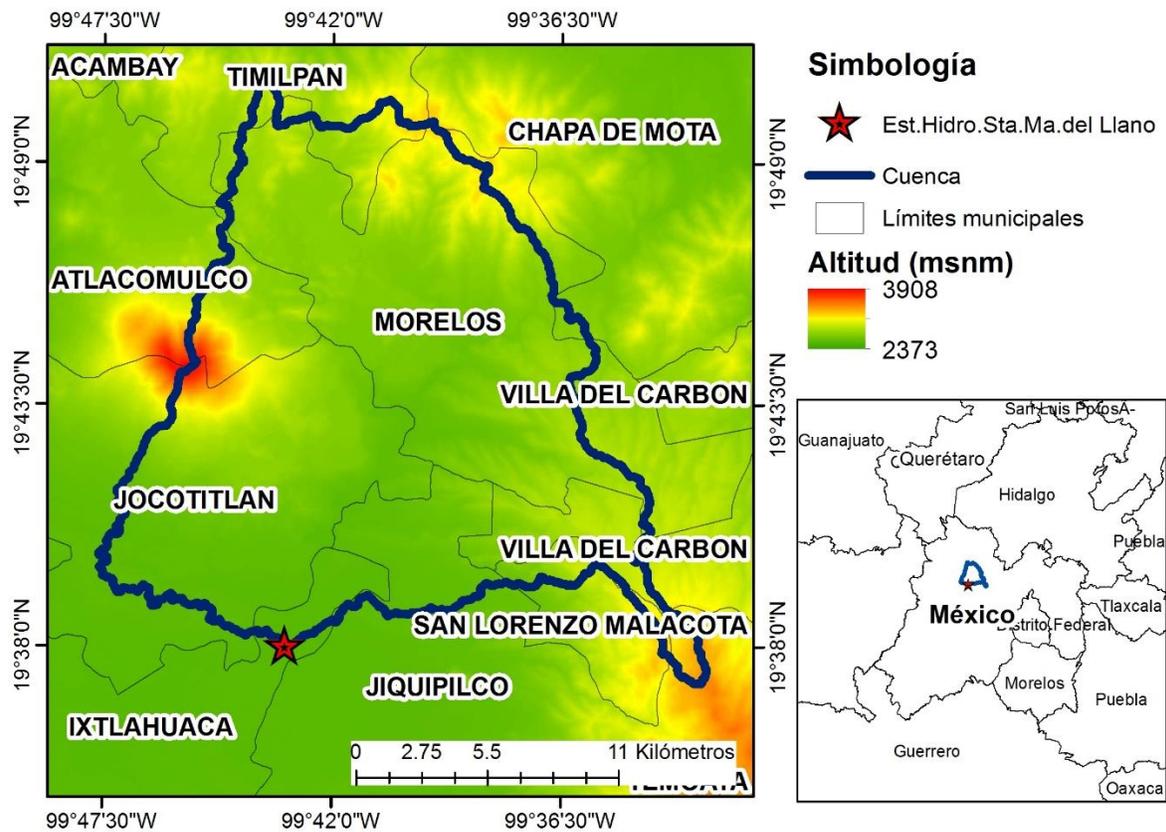


Figura 3.3. Localización de la zona de estudio

3.1.4 Características generales

3.1.4.1 Fisiografía

Las provincias fisiográficas son regiones en el que el relieve es el resultado del origen geológico del terreno con un semejante tipo de suelo y vegetación. El área

de estudio se encuentra en la región fisiográfica X; Eje Neovolcánico, en las subprovincias Lagos y Volcanes del Anáhuac en su mayoría y de las Llanuras y Sierras de Querétaro e Hidalgo en el norte (Figura 3.4), con formaciones topográficas de Sierras, Valles y Lomeríos (INEGI, 2006) .

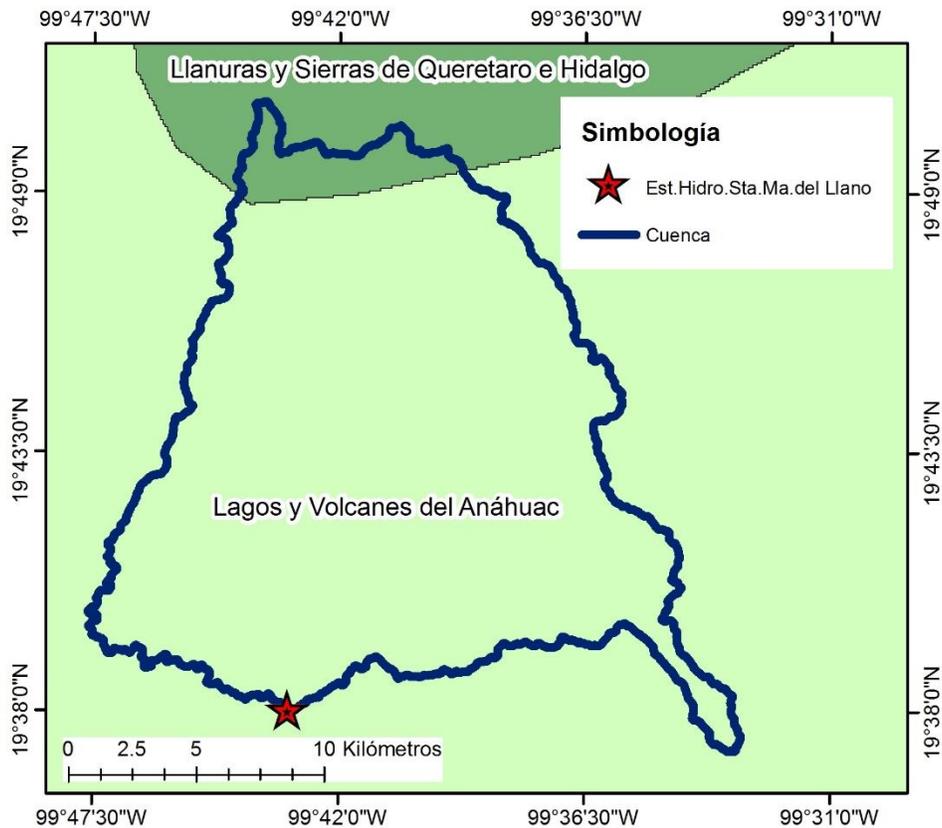


Figura 3.4. Subprovincias de la zona de estudio (INEGI, 2006)

Los tipos de suelo que se encuentran dentro de la zona de estudio se describen a continuación (INEGI, 2006) (Figura 3.5).

1. Andonsol (tierra negra). Suelos de origen volcánico constituido por ceniza con alto contenido de alófono. En condiciones naturales presentan vegetación de bosque y selva. Son muy susceptibles a la erosión eólica y su símbolo en la carta edafológica de México es (T).

2. Feozem (tierra parda). Suelos que se pueden presentar en casi cualquier tipo de clima, es uno de los más abundantes de México. Presenta una capa superficial oscura rica en materia orgánica. Su símbolo es (H).
3. Fluvisol (suelo de río). Suelo formado por materiales acarreados por agua. Su estructura es suelo, presentan capas alternadas de arena con piedras o gravas redondeadas. Su símbolo es (J).
4. Luvisol (Suelo con acumulación de arcilla). Suelo encontrados en zonas templadas de vegetación generalmente de bosque o selva de arcilla en el subsuelo. Se usan principalmente para agricultura. Su símbolo es (L).
5. Planosol (suelo plano). Suelos medianamente profundos encontrado en climas templados y semiáridos, su vegetación natural es pastizal. Se le conoce como suelo duplex por su contraste de textura. Su símbolo es (W).
6. Vertisol (suelo que se revuelve). Suelos de climas templados y cálidos, la vegetación natural es selva baja y pastizales, tiene un color negro o gris oscuro. Son muy fértiles pero difícil de labrar, su símbolo es (V).

Las subunidades de suelo que se encuentran dentro de la zona de estudio se describen a continuación (INEGI, 2006).

1. Crómico (c). Del griego kromos: color. Suelos de color pardo o rojizo, en algunas ocasiones amarillento. Son de fertilidad moderada y con alta capacidad para proporcionar nutrientes a las plantas. Unidades de suelo:
2. Eútrico (e). Del griego eu: bueno. Suelos ligeramente ácidos a alcalinos y más fértiles que los suelos dístricos.
3. Háptico (h). Del griego haplos: simple. Suelos que no presentan características de otras subunidades existentes en ciertos tipos de suelo.
4. Lúvico (l). Del latín luvi, luo: lavar. Suelos con acumulación de arcilla en el subsuelo. Son generalmente de color rojizo o pardo oscuro.

5. Mólico (m). Del latín mollis: suave. Suelos con una capa superficial suave, obscura, fértil y rica en materia orgánica.
6. Pélico (p). Del griego pellos: gnsaceo. Subunidad exclusiva de los Vertisoles. Indican un color negro o gris oscuro.

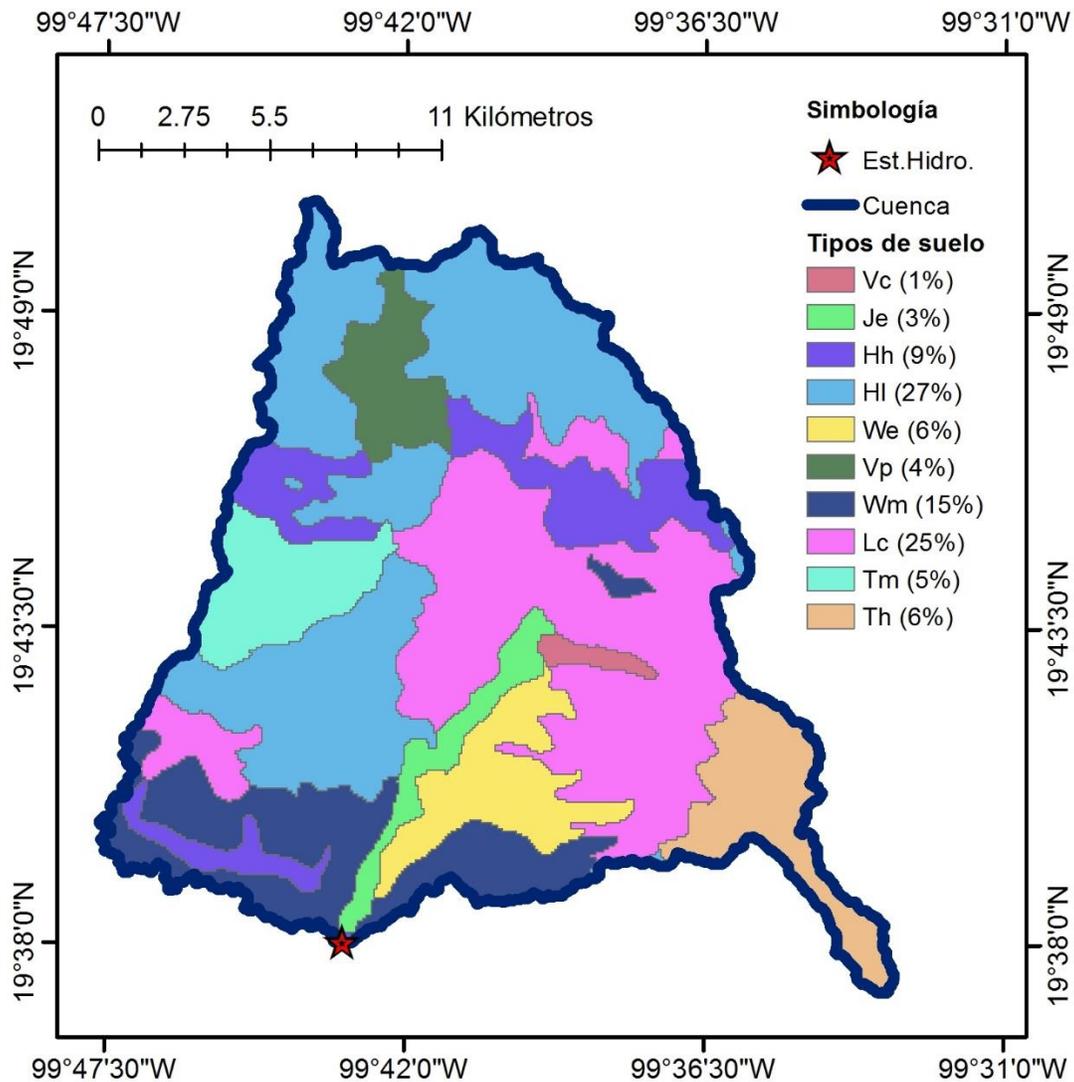


Figura 3.5. Tipos de suelo en la cuenca

3.1.4.2 Geología

El área de estudio pertenece a la provincia geológica Faja volcánica Transmexicana (IFOMEGEM, 2014), con rocas de tipo:

1. (Qal) Aluvion. Gravas arena y limos con interestratificación de ceniza volcánica.
2. (Qhv) Derrame de lava de composición andesítica, basáltica y dacítica con depósitos cineríticos y otras rocas piroclásticas.
3. (Tpvc) Principalmente rocas volcánicas epiclásticas: abanicos aluviales coalescentes, depósitos laháricos y de ceniza volcánica.
4. (Tmv) Incluye andesita y dacita.

3.1.4.3 Vegetación

Se presentan en los alrededores bosques de pino y encino localizados en las partes altas de las montañas; los pastizales inducidos tienen una distribución en el centro de la cuenca, pero la mayoría del territorio corresponde a la agricultura (INEGI, 2013).

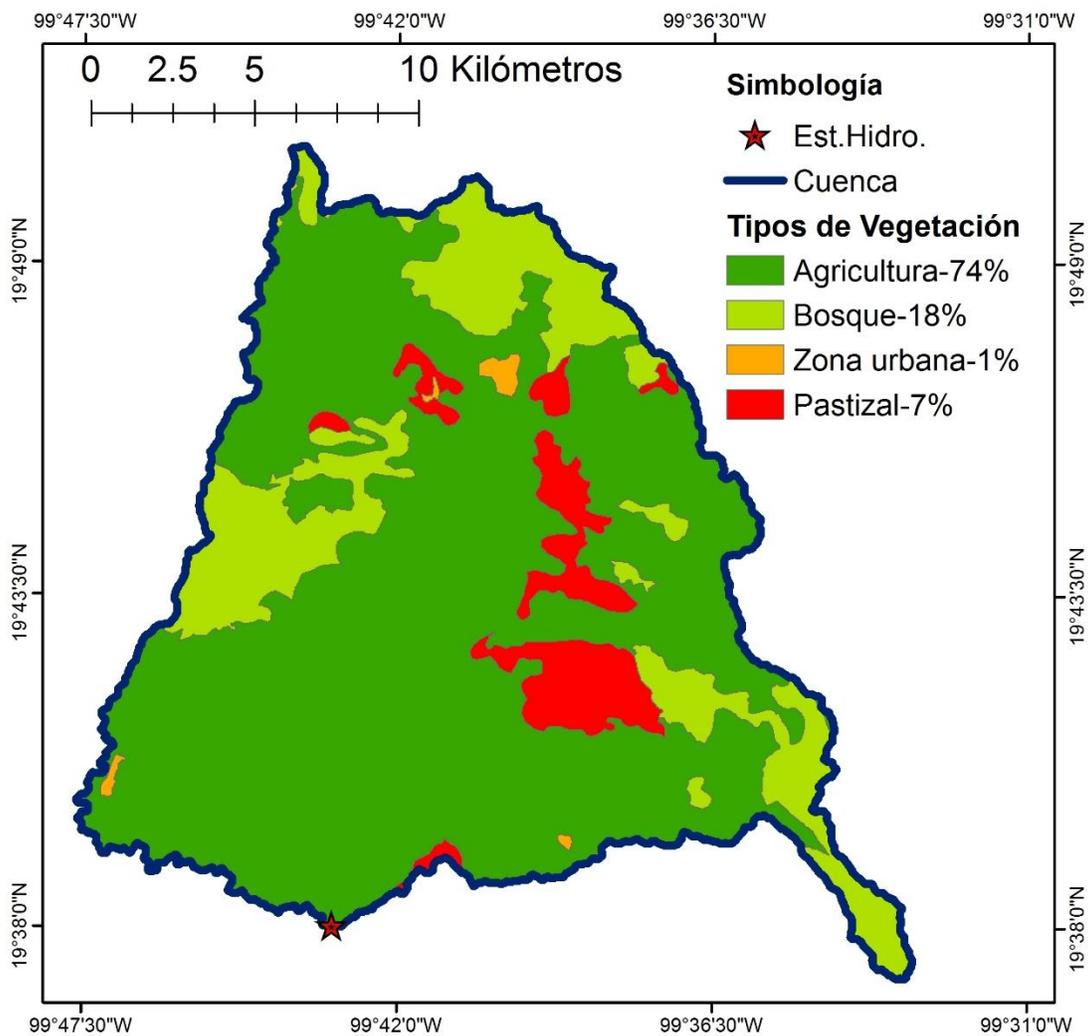


Figura 3.6. Tipo de vegetación en la cuenca

3.1.4.4 Fauna

La fauna silvestre es variada, destacando las especies como el conejo, la liebre, la zorra, la zorrillo, el tlacuache, la ardilla, la onza, el ratón y rata de campo, el hurón, el tuza, el coyote, el tejón, el cacomiztle, el gato montés, el armadillo, el cacomixtle, el murciélago, el alicante, el camaleón, el escorpión, la lagartija y la víbora de

cascabel. Algunas de estas especies están casi extintas gracias al uso agrícola del suelo.

Se encuentran aves del tipo águila común, cuervo, gavilán, ganso, gallina del monte, lechuza, pato, paloma, pavo común, tórtola, garzas, gallaretas, así como el picaflor canelo, la mascarita transvolcanica, el chipe rojo y la codorniz Moctezuma. Las variedades de peces más comunes son la trucha, la mojarra, el pescado blanco, la carpa de Israel y charales.

Dentro de la fauna doméstica o animales de corral, encontramos el burro, caballo, cerdo, gallinas, gato, mula, perro, cabra, vaca y becerro. (Gobierno del Estado de México, 2009).

3.1.4.5 Población

Las localidades que se encuentran dentro del área de estudio se presentan en la (Tabla 3.1) con su respectiva población dando un total de 47,818 habitantes (INEGI, 2010).

Tabla 3.1. Localidades en la cuenca

Municipio	Localidad	Población (hab.)
Ixtlahuaca	Colonia Francisco I. Madero	352
	Santa María de Guadalupe	412
Jiquipilco	Colonia Emiliano Zapata	527
	Hacienda Nixini	6
	Loma Malacota	2729
	Rancho el Rocío	9
	Rancho Santa Lucía	13
	San Antonio Nixini	1182
Jocotitlán	Barrio 15 de Agosto	237
	Barrio de Boyecha	1130
	Barrio de la Cruz	549
	Barrio de Tula	485
	Barrio la Soledad	120
	Ejido Cheje	405
	Ejido de la Providencia	144
	El Huerto	192
	El Progreso	579
	Enguindo San Isidro	318
	Huemetla	1205
	La Providencia	946
	La Venta Yeche	246
	Los Javieres	232
	Los Reyes	4012
	Meje	596
	San Dimas	153
	San Francisco Cheje	1909
	San José Boqui	1219
	Santiago Yeche	2111
Tiacaque	659	
Morelos	Barrio de Xicani	307
	Barrio el Lindero	888
	Barrio Tercero	797
	Colonia Beltrán	194
	Ejido de San Antonio	285
	Ejido Santa Clara	33

Tabla 3.1. Localidades en la cuenca (Continuación)

Municipio	Localidad	Población (hab.)
Morelos	Ejido Santa Cruz	65
	El Cerrillo	128
	Francisco I. Madero	839
	La Cañada	80
	La Calavera (barrio Primero)	737
	La Cofrada	147
	La Loma	3601
	La Trampa	234
	Laguna Seca	502
	Las Cenizas	7
	Las Fuentes Yече	357
	Las Tinajas	34
	los Corralitos	92
	Mojay	7
	Puentecillas	52
	Ranchera San Antonio	127
	Rancho la Malinche	29
	Rancho la Palma	16
	Rancho los Candados	5
	Rancho los Negritos	6
	Rancho San Antonio Trojes	2
	San Bartolo Morelos	1737
	San Gregorio Macapexco	435
	San Gregorio Macapexco Barrio Segundo	565
	San José la Epifanía	831
	San Marcos Tlaxalpan	2441
	Santa Clara Juárez	3878
Santa Cruz	71	
Tlalpujahuilla	672	
Xhinte de Lagos	1000	
Villa del Carbón	Pueblo nuevo	3940
Total		47818

3.1.4.6 Condiciones climatológicas en la cuenca

La clasificación de clima en la cuenca se obtuvo mediante el método de Köppen modificado por Enriqueta García, ya que es el mejor adaptado a las condiciones físico-geográficas de México (Figura 3.7).

Los dos tipos de clima que se presentan son (Casas, 1997):

C(E)(w2)(w)b(i)g: Clima semifrío, subhúmedo, con porcentaje de precipitación invernal menor a 5, el verano es largo, es isotermal y la temperatura más elevada se presenta antes del solsticio de verano.

C(w2)(w)b(i)g: Clima templado, subhúmedo con verano largo, lluvia invernal inferior al 5%, es isotermal y la temperatura más elevada se manifiesta antes del solsticio de verano.

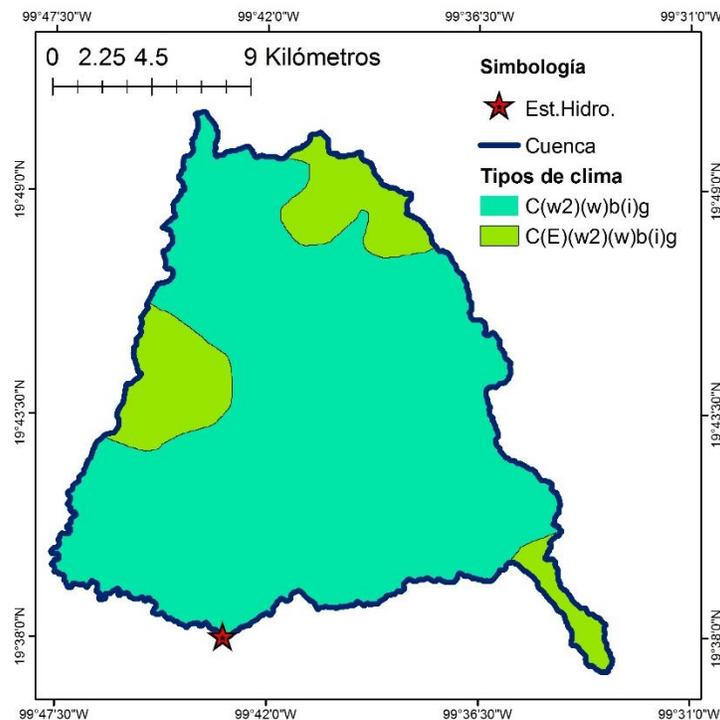


Figura 3.7. Clima de la cuenca (según Köppen modificado por Enriqueta García)

Capítulo 4. Características fisiográficas

Para estudiar una cuenca hidrográfica se requieren métodos cuantitativos fundamentales para definir parámetros que representen características particulares de la cuenca, obteniendo información relevante acerca de las variables y los procesos hidrológicos (Breña y Jacobo, 2006).

4.1 Características físicas de la cuenca

Los parámetros físicos de una cuenca influyen en el régimen hidrológico de la misma, por lo tanto, con base en las características fisiográficas se pretende encontrar mecanismos de predicción de respuesta hidrológica. Entre las características de la cuenca están aquellas que condicionan el volumen del escurrimiento, el área de la cuenca y el tipo de suelo; y las que condicionan la velocidad de respuesta, como son el orden de corrientes, pendiente de la cuenca y los cauces (Aparicio, 2001).

La cuenca hidrográfica se trazó mediante la aplicación del software TerrSet (Figura 4.1) que es un sistema integrado de información geográfica (SIG) desarrollado por Clark Labs en la Universidad Clark para el análisis y visualización de información geoespacial digital (Eastman, 2015).

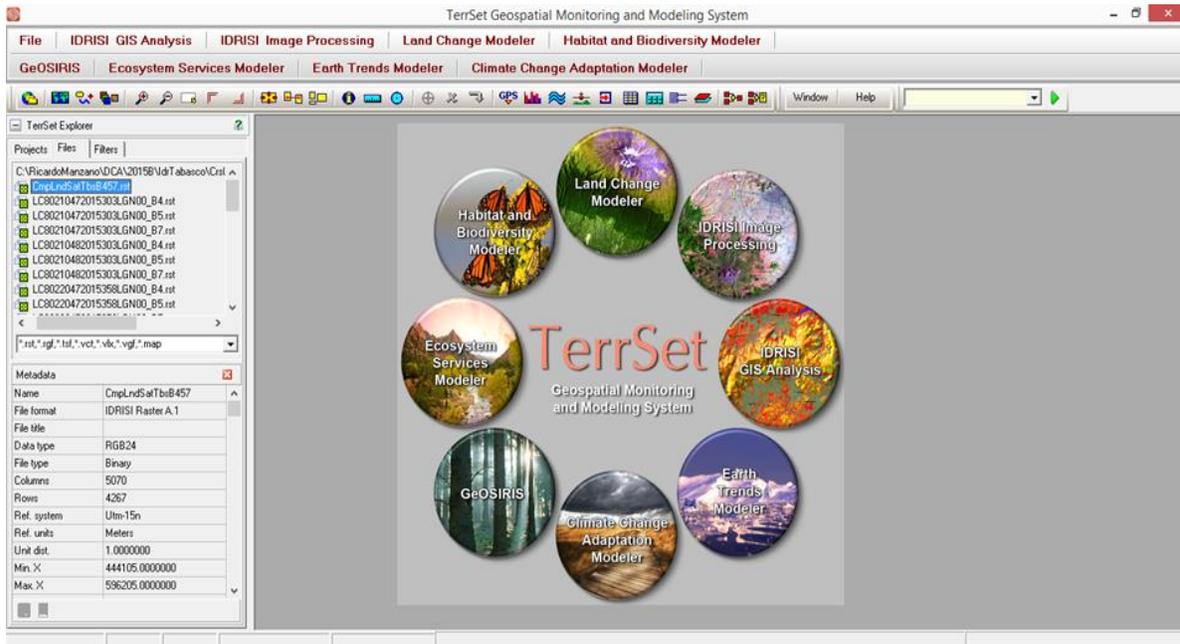


Figura 4.1. Ventana principal del software TerrSet

Como parte del software el módulo “WATERSHED” permite delimitar la cuenca hidrográfica, requiriendo un archivo matricial con la ubicación del punto exutorio, que para la zona de estudio se refiere a la estación hidrométrica Santa María del Llano así como también se requiere de un Modelo Numérico de Altitud (MNA); el cual se encuentra disponible a través del portal web de la USGS EarthExplorer (Figura 4.2) con una resolución espacial de 30 metros para mejor precisión.

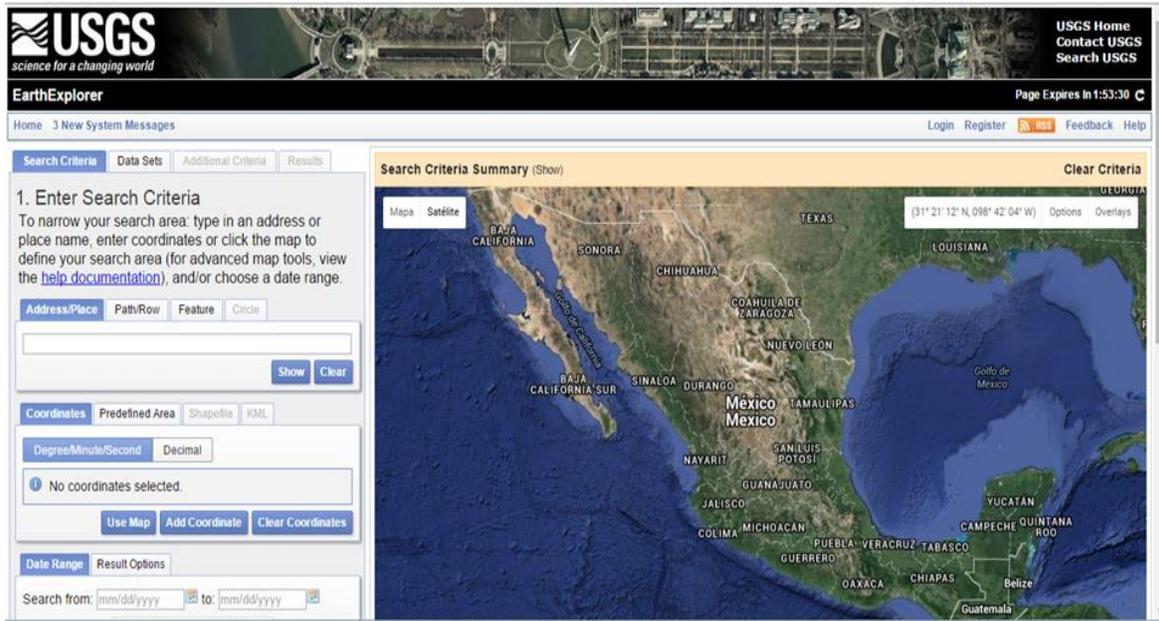


Figura 4.2. Ventana principal del USGS EarthExplorer

Posterior a la delimitación de la cuenca hidrográfica se caracterizó mediante el submódulo “parámetros de la cuenca” como parte del “módulo del ciclo hidrológico” (Figura 4.3), desarrollado en el Centro Interamericano de Recursos del Agua (CIRA) por Franco (2008), para la obtención de los parámetros físicos de la cuenca (Figura 4.4) que requiere como entrada el MNA y el límite de la cuenca.

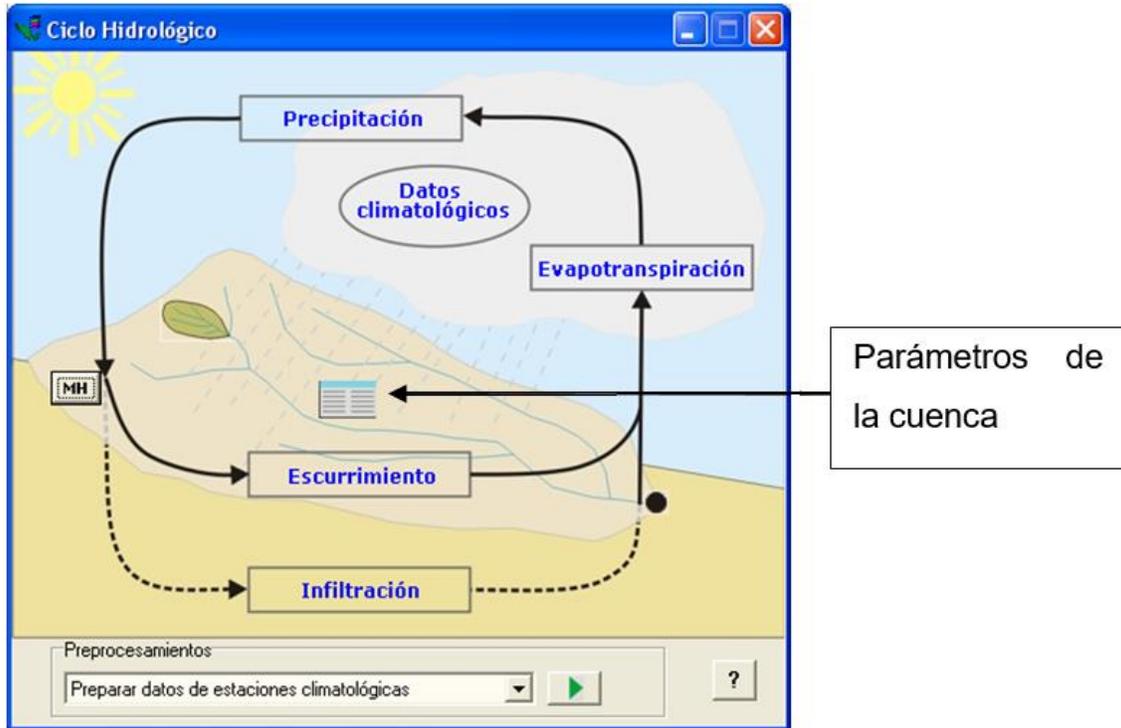


Figura 4.3. Ventana principal del módulo Hidrogeomático

Figura 4.4. Ventana para obtener los parámetros de la cuenca

4.1.1 Área

El área A es considerada como el parámetro físico básico que define a una cuenca, y es determinante para fenómenos hidrológicos como el volumen de agua que entra por precipitación, el caudal del río, entre otros (Franco, 2008). Según la clasificación de tamaños de cuencas propuesta por Campos (1998), la cuenca Santo Domingo que tiene un área de **341 km²** es intermedia-pequeña.

Tabla 4.1. Clasificación de cuencas según Campos (1998)

Tamaño de la cuenca (km ²)	Descripción
<25	muy pequeña
25 a 250	pequeña
250 a 500	intermedia - pequeña
500 a 2500	Intermedia - grande
2500 a 5000	grande
> 5000	muy grande

4.1.2 Parteaguas

Línea imaginaria divisoria del límite de una cuenca hidrográfica que la separa de las adyacentes. A cada lado de la divisoria, las aguas de lluvia acaban siendo recogidas por los ríos principales de las cuencas respectivas.

En las regiones montañosas, la divisoria pasa por las crestas y elevaciones donde se unen las últimas vertientes de cada cuenca.

4.1.3 Perímetro

El perímetro P es la longitud del parteaguas de la cuenca dependiendo de la superficie y forma de la cuenca. El perímetro que se obtuvo fue de **143 km**.

4.1.4 Pendiente media de la cuenca

La pendiente media S_m es uno de los parámetros más importantes del grado de respuesta de una cuenca en una tormenta que toma en cuenta la diferencia de altitudes del punto más alto de la cuenca y su desembocadura o exutorio. El módulo arroja una pendiente media en grados de **9.29°** y en porcentaje de **16.74%**.

Respecto a la pendiente obtenida la cuenca tiene relieve moderadamente inclinada y accidentada, con erosión ligera.

4.1.5 Altura media de la cuenca

Las variaciones de elevación y elevación media de la cuenca son datos esenciales para estudiar la temperatura y precipitación (Llamas, 1993).

La altura media o elevación media se estima utilizando una malla de cuadros, de manera que 100 intersecciones queden comprendidas dentro de la cuenca; la elevación media será el promedio aritmético de las elevaciones de las intersecciones de la malla (Franco, 2008). De este modo la elevación media es de **2751.5 msnm**.

4.1.5.1 Curva hipsométrica

La curva hipsométrica de una cuenca es la representación de su elevación. Según Strahler (Llamas, 1993), la curva hipsométrica es un reflejo del estado de equilibrio dinámico potencial de la cuenca.

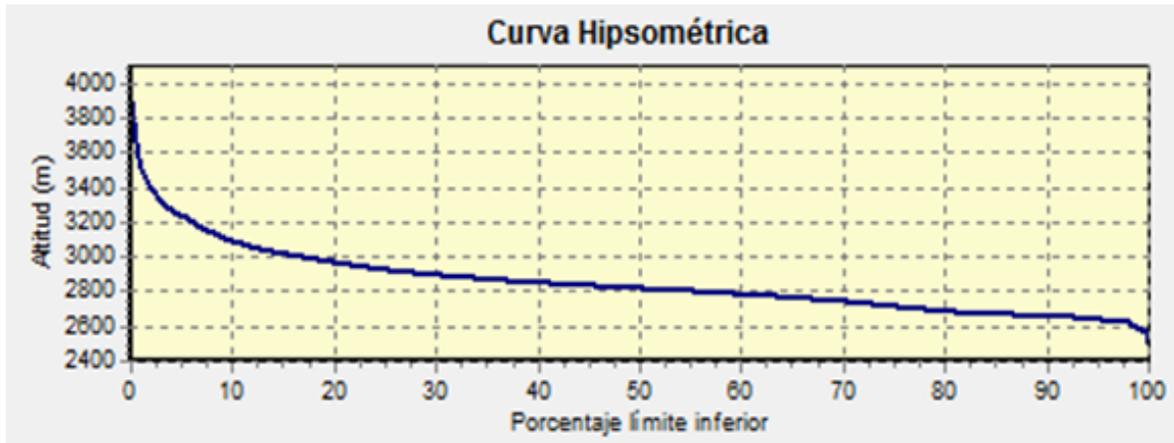


Figura 4.5. Curva hipsométrica de la cuenca

La relación hipsométrica (R_h) es el cociente de las áreas sobre y bajo la curva hipsométrica siendo 1 para una cuenca en equilibrio morfológico. De este modo la relación hipsométrica en la cuenca es de **4.6**. Según Strahler, si $R_h > 1$, la cuenca es sedimentaria o vieja.

4.1.6 Longitud máxima de la cuenca

La longitud máxima L_m es la distancia entre el exutorio y el punto más alejado de la cuenca siguiendo la dirección del río principal siendo de **22.72 km**.

4.1.7 Forma de la cuenca

La forma de la cuenca es la configuración geométrica tal como está proyectada sobre el plano horizontal, afecta su tiempo de respuesta o tiempo de recorrido de las aguas a través de la red de drenaje (Llamas, 1993).

4.1.7.1 Coeficiente de compacidad

El coeficiente de compacidad K_c encontrado por Gravelius expresa que tanto la cuenca tiende a parecerse a un círculo, es la relación entre el perímetro de la cuenca y el perímetro de un círculo de igual área que la cuenca.

$$K_c = 0.28 \frac{P}{\sqrt{A}} \dots \dots \dots [4.1]$$

donde P y A es el perímetro y área de la cuenca respectivamente. El valor del coeficiente será 1 si la cuenca es circular, 1.128 si la cuenca es cuadrada y 3 para cuencas muy alargadas.

4.1.7.2 Factor de forma

El factor de forma R_f definido por Horton, es el cociente entre el área de la cuenca y el cuadrado de su longitud máxima (L_m).

$$R_f = \frac{A}{L_m^2} \dots \dots \dots [4.2]$$

4.1.7.3 Radio de elongación

El radio de elongación R_e definido por Schumm, es la relación entre el diámetro de un círculo de misma área que la cuenca y la longitud recta de la cuenca (L_c) medido desde el punto exutorio hasta el punto más alejado de la misma.

$$R_e = 1.128 \frac{\sqrt{A}}{L_c} \dots \dots \dots [4.3]$$

El coeficiente será 1 para las cuencas llanas y 0.6 para las que tengan un relieve marcado.

4.1.7.4 Radio de circularidad

El radio de circularidad R_{ci} es el cociente entre al área de la cuenca y la del círculo cuya circunferencia es el perímetro de la cuenca.

$$R_{ci} = \frac{4\pi A}{P^2} \dots \dots \dots [4.4]$$

El coeficiente será 1 para una cuenca circular y 0.785 para una cuenca cuadrada.

Una vez aplicados los criterios antes mencionados, se obtuvieron los siguientes valores para la cuenca en estudio (Tabla 4.2).

Tabla 4.2. Forma de la cuenca

Dato	Valor
Coeficiente de compacidad (K_c)	2.17
Factor de forma (R_f)	0.66
Radio de elongación (R_e)	0.92
Radio de circularidad (R_{ci})	0.21

Con base en lo anterior se tiene una cuenca con forma distorsionada y asimétrica, con relieve bajo o llano. De acuerdo con la forma de la cuenca, presenta, un río principal corto y por consecuencia, tendencia a concentrar el escurrimiento de una lluvia intensa formando fácilmente grandes crecidas.

4.1.8 Rectángulo de Gravelius

Para comparar el comportamiento hidrológico de dos cuencas, se utiliza el rectángulo equivalente o rectángulo de Gravelius, que es una transformación geométrica la cual se asimila a un rectángulo que tenga el mismo perímetro y superficie. Se obtiene a partir de las curvas de nivel convirtiéndolas en rectas de nivel paralelas.

De este modo los lados del rectángulo serán L_1 y L_2 , mayor y menor lado del rectángulo, P y A el perímetro y la superficie de la cuenca, respectivamente.

Sean:

$$P = 2(L_1 + L_2) = \frac{K_c \sqrt{A}}{0.28} \text{ y } L_1 L_2 = A \dots \dots \dots [4.5]$$

Los lados del rectángulo se calculan con la siguiente expresión:

$$L_2, L_1 = \frac{K_c \sqrt{A}}{1.12} \left[1 \pm \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{K_c} \right)^2} \right] \text{ con } K_c \geq 1.12 \dots \dots [4.6]$$

Las curvas de nivel se trazan con ayuda de la curva hipsométrica considerando el porcentaje correspondiente a la curva multiplicado por L_1 .

Para el caso de la cuenca en estudio $K_c = 2.17$ y los lados del rectángulo son:

$$L_1 = 35.94 (1 + 0.86) = \mathbf{66.78 \text{ km.}}$$

$$L_2 = 35.94 (1 - 0.86) = \mathbf{5.11 \text{ km.}}$$

A continuación se muestra el rectángulo de Gravelius para la Cuenca Santo Domingo (Figura 4.6), con cotas en msnm.

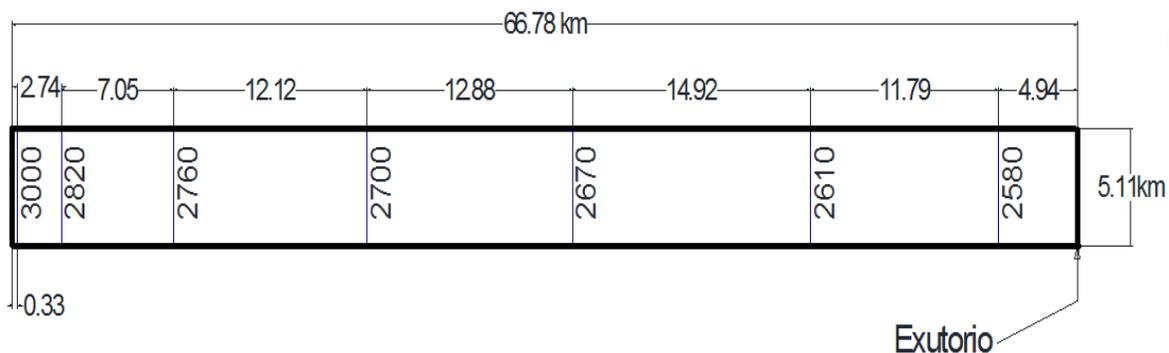


Figura 4.6. Rectángulo de Gravelius

4.1.9 Orden

El orden de corrientes es una clasificación que refleja el grado o magnitud de ramificación o bifurcación dentro de una cuenca. Siguiendo el criterio de Horton las corrientes se clasifican de orden 1 a las más pequeñas (corrientes sin ramificaciones), de orden 2 a las que solo tienen ramificaciones de orden 1, de orden 3 a las que tienen ramificaciones 2 y 1, etc. En este sentido el cauce o río principal

será el de más alto orden (Campos, 1998). Para el caso del río Santo Domingo el orden máximo es de 5 (Figura 4.7).

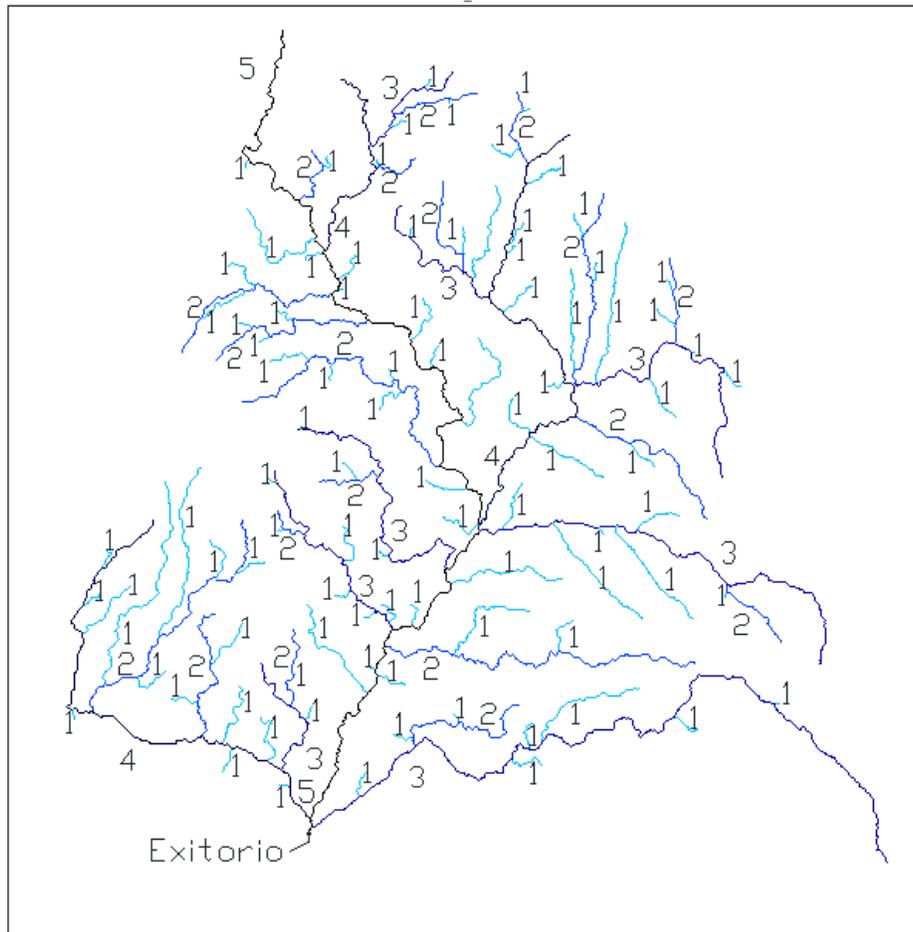


Figura 4.7. Orden de las corrientes

4.1.10 Relación media de confluencia

La relación de confluencia o bifurcación definida por Horton es el cociente entre el número de cauces de cualquier orden entre el número de corrientes del siguiente nivel. En este sentido la relación media de confluencia se calcula con la siguiente expresión:

$$R_c = \frac{\sum_{i=2}^u R_{ci} (N_i + N_{i-1})}{\sum_{i=2}^u (N_i + N_{i-1})} \dots \dots \dots [4.7]$$

dónde $R_{ci} = N_{i-1}/N_i$, N_i es el número de vectores de i orden, N_{i-1} número de vectores de orden inferior y u es el orden de la red hidrográfica (Llamas, 1993).

Se tienen los siguientes vectores por orden (Tabla 4.3) obteniendo así la relación de confluencia o bifurcación.

Tabla 4.3. Relación de confluencia

Orden	N_i	R_{ci}	N_i+N_{i-1}	$R_{ci}(N_i+N_{i-1})$
1	90	---	---	---
2	19	4.74	109	516.32
3	7	2.71	26	70.57
4	3	2.33	10	23.33
5	1	3.00	4	12.00
Suma	120		149	622.22

$$R_c = \frac{\sum_{i=2}^u R_{ci} (N_i + N_{i-1})}{\sum_{i=2}^u (N_i + N_{i-1})} = \frac{622.22}{149} = 4.18$$

La relación de bifurcación varía entre 3.0 y 5.0 para cuencas en las cuales las estructuras geológicas no distorsionan el modelo de drenaje.

4.1.11 Densidad de corrientes

Es el número de corrientes por unidad de área. Predice el tipo de relieve que se encuentra dentro de la cuenca, las densidades de drenaje bajas se encuentran en regiones de rocas resistentes o de suelos muy permeables con vegetación densa y relieve débil. Y se tienen densidades altas en áreas de roca débil o suelos impermeables, vegetación escasa y relieve montañoso (Campos, 1998).

La densidad de corrientes (D_s) es el cociente entre el número de corrientes (N_s) y la superficie total de la cuenca (A) (Aparicio, 1996). En el caso de estudio es:

$$D_s = \frac{N_s}{A} = \frac{120}{341} = 0.35$$

Por tanto, la cuenca cuenta con regiones de rocas resistentes o de suelos muy permeables con vegetación densa y relieve débil.

4.1.12 Densidad de drenaje

La densidad de drenaje (D_d) se considera un reflejo de la dinámica de la cuenca, de la estabilidad de la red hidrográfica y el tipo de escorrentía de superficie, así como de la repuesta de la cuenca ante una tormenta, se obtienen valores entre 0.5 km/km², para cuencas con drenaje pobre, hasta 3.5 km/km² para cuencas bien drenadas (Monsalve, 1999).

Se obtiene según Horton como el cociente entre la longitud total de las corrientes (L_s) y la superficie total de la cuenca (A). Para este caso será:

$$D_d = \frac{L_s}{A} = \frac{374}{341} = 1.1 \text{ km}^{-1}$$

Por tanto, se tiene una cuenca con drenaje medianamente pobre.

4.2 Características físicas del río principal

4.2.1 Longitud

La longitud del cauce o río principal es una magnitud importante en la respuesta hidrológica, ya que si el río es corto los efectos de la precipitación en la cuenca se manifiestan más rápidamente que en un río largo. El módulo hidrogeomático calcula la longitud del eje del río principal (L_c) y la longitud directa (L_a) entre el exutorio o desembocadura y el nacimiento del río (Franco, 2008).

4.2.2 Pendiente

La pendiente del río principal influye en el grado de repuesta que la cuenca tiene ante una tormenta, ya que la topografía no es constante en toda la cuenca, es necesario obtener la pendiente media del cauce.

4.2.3 Perfil longitudinal

El perfil longitudinal (Figura 4.8) es la representación gráfica de las distintas elevaciones del fondo del río desde el nacimiento hasta la desembocadura del río principal.

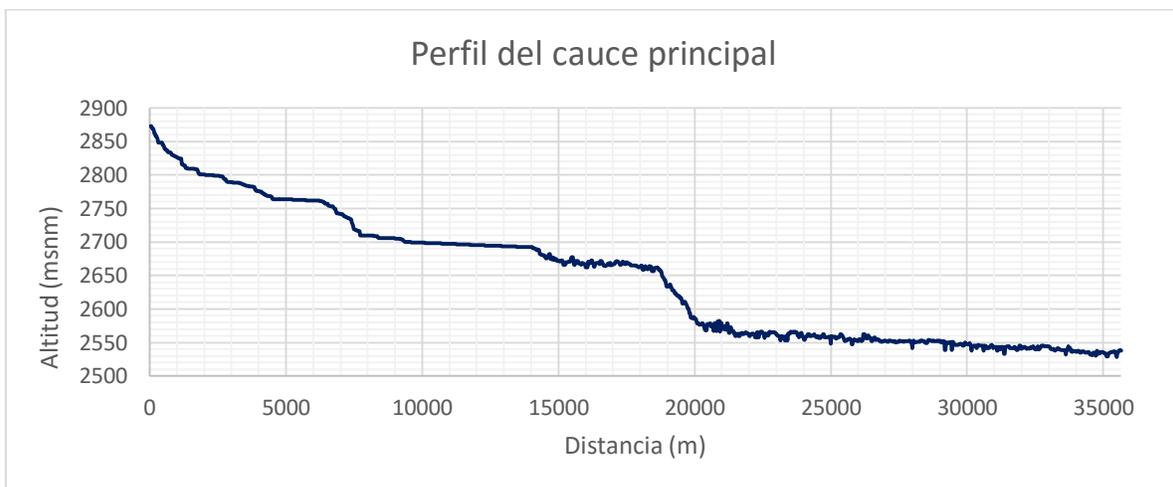


Figura 4.8. Perfil del río principal

4.2.4 Coeficiente de sinuosidad hidráulico

El coeficiente de sinuosidad es el cociente entre la longitud directa y la del eje del río (Llamas, 1993). Utilizado para entender la forma o desarrollo que adopta el cauce principal donde se predicen las características del lugar donde se encuentra. Su valor fluctúa entre 1.0 y 1.5 para cauces rectos y con meandros respectivamente.

Si el cauce es trezado se encuentra en lugares donde las orillas son erosionables y en cauces con meandros ocurren donde los materiales son finos y las orillas

cohesivas. Dichas características son una forma de disipar energía, evitando el aumento de velocidad y erosión (Campos, 1998).

4.2.5 Tiempo de concentración

El tiempo de concentración se define como el tiempo que tarda el escurrimiento en una tormenta en viajar desde el punto hidráulicamente más alejado del exutorio hasta dicho exutorio o punto de interés (Franco, 2008).

En módulo hidrogeomático estima los valores de tiempo de concentración de acuerdo con dos fórmulas empíricas:

1. Kirpich (Williams, 1950)

$$T_c = 0.066 \left[\frac{L_c}{\sqrt{\frac{H}{L_c}}} \right]^{0.77} \dots \dots \dots [4.8]$$

dónde: T_c es el tiempo de concentración en horas, L_c es la longitud de la corriente principal y H el desnivel total del río principal.

2. California Highways and Public Works (Millar *et al.*, 1977; Témez, 1975).

$$T_c = \left[\frac{0.8708 L_c^3}{H} \right]^{0.385} \dots \dots \dots [4.9]$$

dónde T_c es el tiempo de concentración en horas, L_c es la longitud de la corriente principal y H el desnivel total del río principal.

Los valores de las características del río principal se muestran en la Tabla 4.4.

Tabla 4.4. Características físicas del río principal

Característica	Valor
Longitud del eje del río (km)	36.4
Longitud directa del río (km)	22.7
Pendiente media (m/m)	1.4
Coefficiente de sinuosidad hidráulico	1.6
Tiempo de concentración Kirpich (horas)	6.3
Tiempo de concentración C.H. and P.W. (horas)	6.3

Con base en las características físicas del río principal, el proceso de ensanchamiento de la planicie de inundación es más importante que el de la profundización.

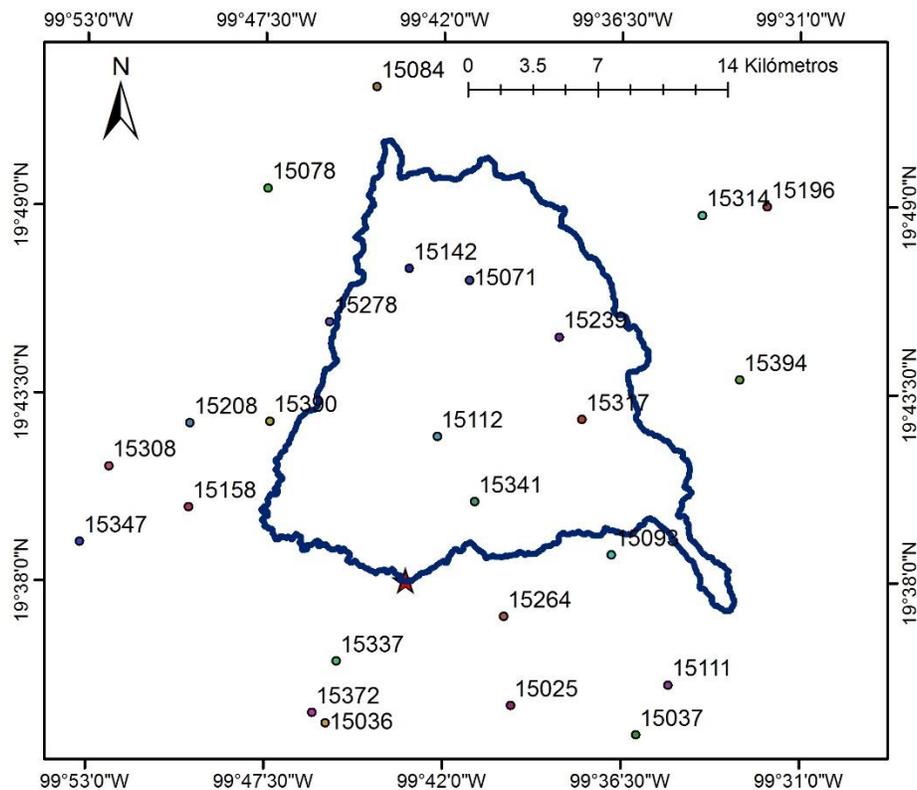
Capítulo 5. Análisis de la precipitación

La precipitación se entiende como la caída del agua sobre la superficie terrestre en cualquiera de sus formas como lluvia, nieve, granizo, etc. Es uno de los componentes primarios del ciclo hidrológico que corresponden a las entradas del balance hídrico (Llanos *et al.*, 2009).

5.1 Estaciones meteorológicas utilizadas en el estudio

En el Estado de México hay dependencias encargadas de instalar y operar estaciones meteorológicas como la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) a través del Servicio Meteorológico Nacional (SMN).

El estudio de las precipitaciones anuales se abordó con la recopilación de los datos pluviométricos de 26 estaciones situadas tanto en interior como en las inmediaciones de la cuenca, considerando una zona de influencia de 10 kilómetros del parteaguas (Figura 5.1). Las coordenadas geográficas de las estaciones meteorológicas y los datos pluviométricos anuales se dispusieron de la base de datos de CONAGUA y de Clima Computarizado (CLICOM) respectivamente.



Simbología

- Cuenca Santo Domingo
 - ★ Estación Hidrométrica Sta.Ma.del Llano
- Estaciones meteorológicas**
- | | |
|--------------------------------|------------------------------------|
| ● 15025-Ejido Llano Grande | ● 15208-Pozo Cuatro |
| ● 15036-Ixtlahuaca | ● 15239-San Antonio Trojes |
| ● 15037-Jiquipilco | ● 15264-Buenos Aires |
| ● 15071-Presa el Tigre | ● 15278-Santiago Acutzilapan |
| ● 15078-Psa.FcoTrinidad Fabela | ● 15308-San Cristóbal de los Baños |
| ● 15084-San Andres Timilpan | ● 15314-La Almendra |
| ● 15093-San Lorenzo Malacota | ● 15317-San José Epifanía |
| ● 15111-Santa María Nativitas | ● 15333-El Palmito |
| ● 15112-Santiago Yече | ● 15337-Pozo Uno |
| ● 15142-San Marcos Tlazalpan | ● 15341-San Antonio Nigini |
| ● 15158-San Pedro de los Baños | ● 15347-Tepetitlan |
| ● 15196-Chapa de Mota | ● 15372-Ixtlahuaca |
| | ● 15390-E.T.A.013 Jocotitlán |
| | ● 15394-Monte de Peña |

Figura 5.1. Estaciones meteorológicas situadas cerca de la cuenca

Sin embargo, el conjunto de información se caracteriza por una desigual calidad y longitud de sus registros, originado por diversas circunstancias durante los periodos de muestreo, como interrupciones temporales durante el periodo de observación, modificaciones de las condiciones climáticas en el entorno de una estación, etc. (Llanos *et al.*, 2009).

En este sentido, se ha prestado atención al análisis de los datos de partida, ya que la veracidad de las conclusiones depende de la calidad de información disponible; derivadas de datos aleatorios, independientes, homogéneos y estacionarios (Trujillo, 1999).

Por este motivo se procedió a un procesamiento de la información primario de la calidad de los registros que consistió en evidenciar los errores cometidos durante la obtención de los datos (errores de lectura, escritura, etc.).

Posteriormente para continuar con la depuración de información se comprobó la consistencia y adecuación de las muestras mediante la aplicación del software HIDESTAD, que es un sistema para análisis de frecuencias creado en el CIRA por Bâ *et al.*, (2015) (Figura 5.2), que utilizando pruebas estadísticas para analizar variables, arroja una gráfica de ajuste con base en distribuciones de probabilidad.

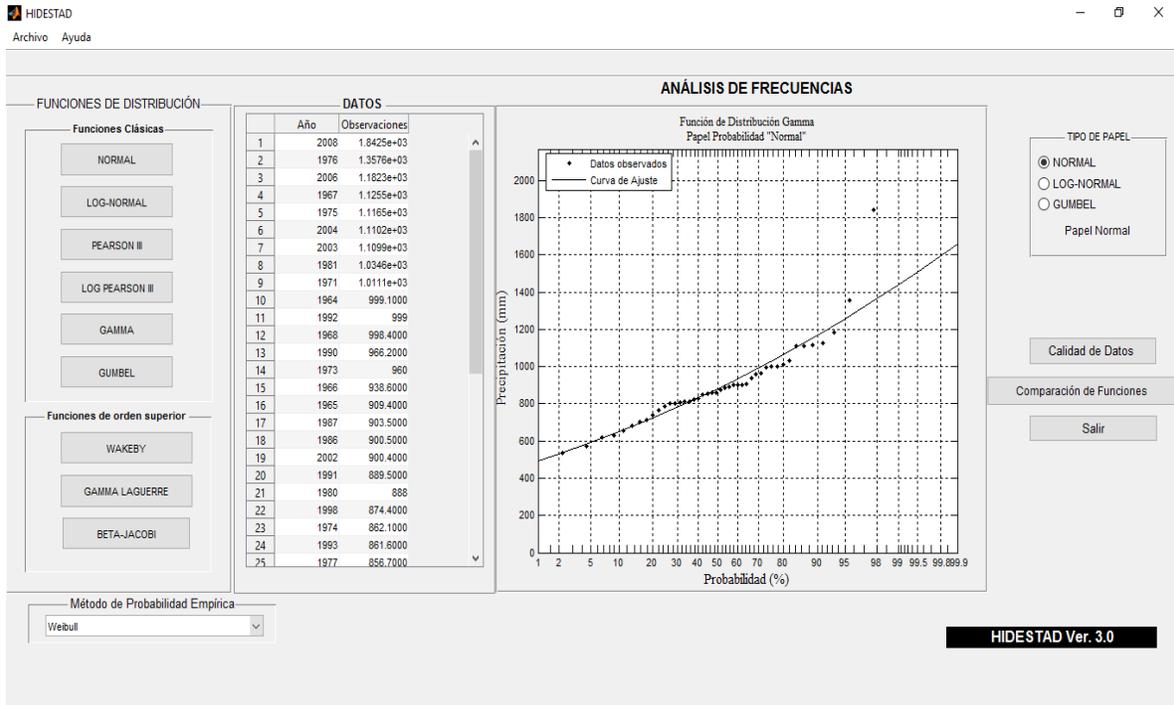


Figura 5.2. Ventana principal del software HIDESTAD

5.1.1 Pruebas de calidad de información aplicables en hidrología

El software HIDESTAD aplica una serie de pruebas de calidad de datos para así validar los datos que se utilizan en esta investigación. Las pruebas utilizadas en este estudio son las siguientes:

Prueba de Hatanaca

Llamas (1993) sugiere el uso de la prueba de Hatanaca para verificar la aleatoriedad y tendencia en la muestra bajo las siguientes hipótesis:

$$H_0: \text{la serie es aleatoria}$$

$$H_1: \text{Existe tendencia en la serie}$$

Sean (x_1, x_2, \dots, x_n) los elementos de una muestra de tamaño n , y x_j una observación cualquiera donde $j = 1, 2, \dots, n$.

La muestra se transforma de la siguiente manera:

$$x_j = s, \quad \text{si } x_j > x_k \quad \forall k < j$$

$$x_j = i, \quad \text{si } x_j > x_k \quad \forall k < j$$

De la muestra transformada se calcula

$$\omega = N_s - N_i$$

dónde N_s es el número de s 's observadas y N_i el número de i 's observadas.

En el caso de H_0 , el estadístico ε de la prueba de Hatanaca, sigue una distribución normal estandarizada y es:

$$\varepsilon = \frac{\omega}{2 \ln n - 0.845} \dots \dots \dots [5.1]$$

Para una prueba a un nivel de significancia α la cantidad ε se compara con la correspondiente desviación normal estandarizada $Z_{\alpha/2}$ aceptándose la hipótesis H_0 siempre y cuando $-Z_{\alpha/2} \leq \varepsilon \leq Z_{\alpha/2}$.

Prueba de correlación ordenada

Esta prueba permite la detección de tendencias o ciclos en muestras aparentemente independientes, bajo las siguientes hipótesis (Llamas, 1993):

H_0 : la serie es independiente

H_1 : existe tendencia o ciclos en la serie

Sean (x_1, x_2, \dots, x_n) los elementos de una muestra de tamaño n . Si se reemplaza x_i por ω_i , donde ω_i es la posición de x_i con respecto a la muestra ordenada, se tiene una tendencia perfecta,

$$\omega_1 = 1, \quad \omega_2 = 2, \dots \quad \omega_n = n$$

Cuyo coeficiente de correlación está definido como:

$$r_0 = 1 - \frac{6}{n(n^2 - 1)} \sum_{i=1}^n (\omega_i - i)^2 \dots \dots \dots [5.2]$$

Si $\omega_i - i = 0$, entonces $r_0 = 1$ lo que significa una pendiente perfecta.

El estadístico de prueba se obtiene de:

$$\varepsilon = \left[\frac{r_0^2(n - 2)}{1 - r_0^2} \right]^{1/2} \dots \dots \dots [5.3]$$

el cual sigue la distribución t-Student con $n-2$ grados de libertad, por lo tanto, H_0 se acepta si $\varepsilon < t_{n-2}$.

Prueba de inversión

La prueba de inversión permite detectar tendencia en muestras aparentemente independientes, bajo las siguientes hipótesis (Llamas, 1993):

$$H_0: \text{la serie es independiente}$$

$$H_1: \text{existe tendencia lineal}$$

Sean (x_1, x_2, \dots, x_n) los elementos de una muestra de tamaño n .

Si $x_1 < x_2 < \dots < x_n$, entonces no hay inversión.

Si $x_1 > x_2$; $x_2 < x_3$; $x_1 < x_3 < x_4 \dots$ entonces se presenta una inversión.

En esta prueba se asigna:

$$\omega_{ij} = 1 \text{ si } x_i > x_j$$

$$\omega_{ij} = 0 \text{ si } x_i < x_j$$

dónde: $i = 1, 2, \dots, n$ y $j = i+1, i+2, \dots, n$

El estadístico de prueba es:

$$\varepsilon = \sum_{i=1}^{n-1} \left(\sum_{j=i+1}^n \omega_{ij} \right) \dots \dots \dots [5.4]$$

dónde: $\sum_{j=i+1}^n \omega_{ij}$ es el número de inversiones del elemento i .

Para un determinado nivel de significancia α aceptamos H_0 si $Q_\alpha > \varepsilon$ con base en la distribución de Q_α .

Tabla 5.1. Valores de Q_α para la prueba de inversión (Llamas, 1993)

Nivel de significancia : α						
n	0.990	0.975	0.950	0.050	0.025	0.010
10	9	11	13	31	33	35
12	16	18	21	44	47	49
14	24	27	30	60	63	66
16	34	38	41	78	81	85
18	45	50	54	98	102	107
20	59	64	69	120	125	130
30	152	162	171	263	271	282
40	290	305	319	460	474	489
50	473	495	514	710	729	751
60	702	731	756	1013	1038	1067
70	977	1014	1045	1369	1400	1437
80	1299	1244	1382	1777	1815	1860
90	1668	1721	1766	2238	2283	2336
100	2083	2145	2198	2751	2804	2866

Prueba de iteración

La prueba de iteración permite detectar tendencias de muestras aparentemente homogéneas, bajo las siguientes hipótesis (Llamas, 1993):

H_0 : la serie es homogénea

H_1 : existen tendencias o ciclos

Sean (x_1, x_2, \dots, x_n) los elementos de una muestra de tamaño n , y \tilde{x} la mediana de la muestra.

La muestra se transforma de la siguiente manera:

$$x_0 = 0 \text{ si } x_i < \tilde{x}$$

$$x_1 = 1 \text{ si } x_i > \tilde{x}$$

Entonces, de la muestra transformada se obtiene:

N_{10} = número total de iteraciones de 0's

N_{11} = número total de iteraciones de 1's

N_0 = número total de 0's

N_1 = número total de 1's

El número total de iteraciones de 0's y 1's es:

$$\omega = N_{10} + N_{11}$$

El estadístico de prueba es:

$$\varepsilon = \frac{\omega - \bar{x}_\omega}{(S_\omega^2)^{1/2}} \dots \dots \dots [5.5]$$

El cual sigue una distribución normal estandarizada, y donde:

$$\bar{x}_\omega = \frac{2N_0N_1}{n} + 1 \dots \dots \dots [5.6]$$

$$S_\omega^2 = \frac{2N_0N_1(2N_0N_1 - n)}{n^2(n - 1)} \dots \dots \dots [5.7]$$

Para una prueba con un nivel de significancia α , la cantidad $|\varepsilon|$ se compara con la distribución Normal estandarizada $Z_{\alpha/2}$ correspondiente.

La calidad de información se analizó por estación encontrando que los datos recopilados de acuerdo con las pruebas del software HIDESTAD tenían las siguientes características:

Tabla 5.2. Resultados de las pruebas de calidad de la información

Prueba de calidad	Resultados
Prueba de Hatanaca	La serie es aleatoria al 95% de confianza
Prueba de correlación ordenada	La serie es lineal
Prueba de inversión	La serie es independiente
Prueba de iteración	La serie es homogénea a 95%

Una vez validados los datos recopilados se procede a detectar valores singulares mediante la aplicación de distribuciones de probabilidad. Las gráficas de probabilidad permiten el análisis visual a partir de la representación simultánea de las distribuciones correspondientes a las diferentes funciones ensayadas (Llanos *et al.*, 2009) y se puede considerar para estimar la magnitud y probabilidad de ocurrencia de algunos eventos teóricos, así como detectar valores singulares.

5.1.2 Valores singulares

El software HIDESTAD no cuenta con la función de evidenciar los valores singulares al analizar los datos, así que se procedió a evidenciarlos mediante la visualización de las gráficas arrojadas por el software (Figura 5.3), considerando los datos que se alejaban de las distribuciones de probabilidad seleccionadas, valores que se consideraron como datos sospechosos o con posibles errores y que, por lo tanto requerían de un análisis particular.

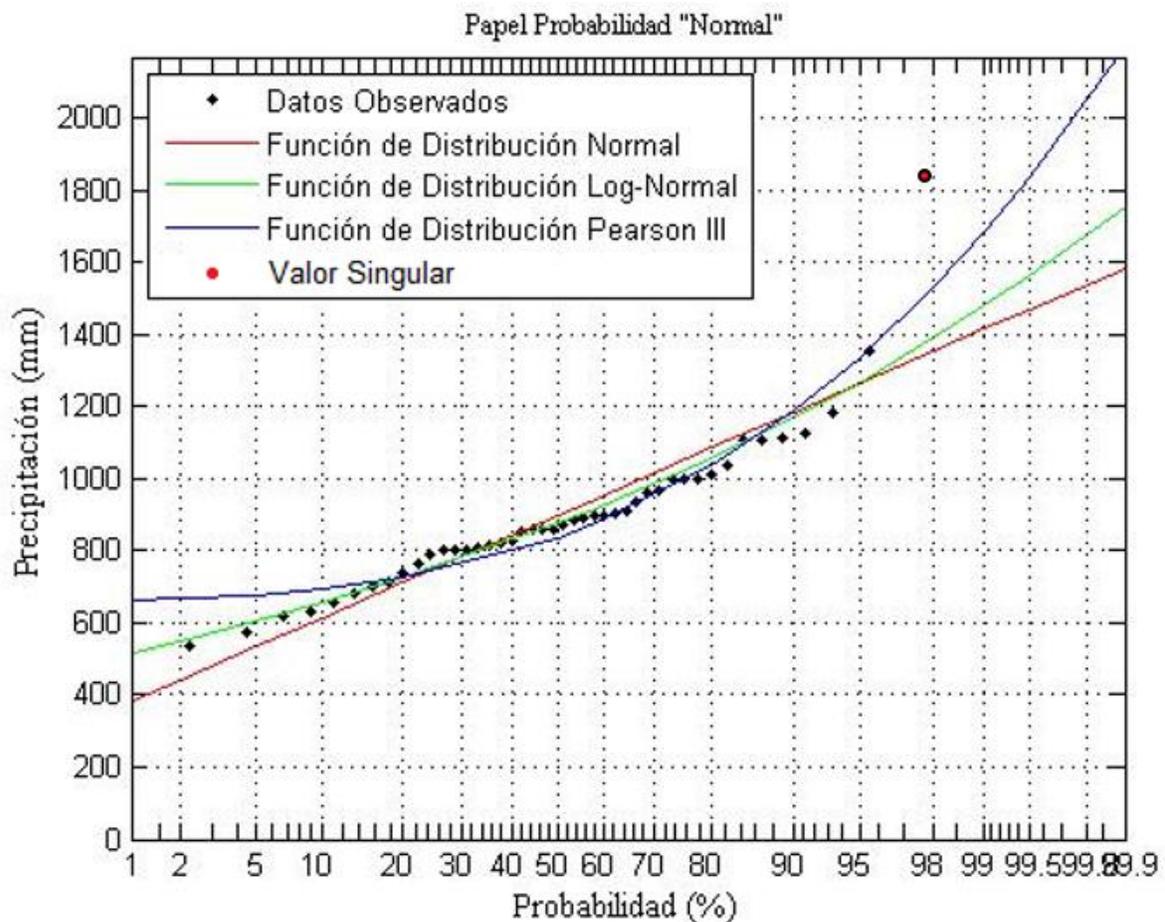


Figura 5.3. Ajuste de funciones de distribución a la muestra de precipitación anual de la estación 15025.

Para incluir o descartar los datos sospechosos en el análisis de la precipitación se procedió a analizar cada dato sospechoso pluviométrico anual. Se recopiló la precipitación diaria del año de la estación en estudio, se corroboró que todos los días tuvieran un dato contable y si en algún caso faltaban datos importantes como precipitaciones de los meses de junio a septiembre, en donde se presentan mayores lluvias en el año, este dato se consideró erróneo y se descarta del estudio.

En caso de que el dato anual sospechoso tuviera todos los datos diarios se localizaron las dos estaciones más cercanas (distancia menor a 10 km) a la estación del dato anual sospechoso y se recopilan los datos diarios del año en estudio de estas estaciones cercanas. Se compararon los valores diarios de las precipitaciones de la estación del dato sospechoso con los respectivos valores diarios correspondientes a las dos estaciones cercanas, que por la distancia se infiere que los valores son homogéneos.

En la comparación de valores se encontraron datos extraordinarios como lluvias mensuales de 749 mm en el mes de julio en el año 2008 para la estación 15025, o lluvias anuales de 2577 mm para la estación 15037 en el mismo año. Así como lluvias mínimas de 0 mm o 0.1 mm para la estación 15037 en los años 2001 y 2002 respectivamente. Estos valores no tienen ninguna similitud con los valores de las estaciones vecinas.

En este sentido los valores encontrados son irreales, ya que los valores máximos son similares a las lluvias que ocurren en estados como Chiapas o Tabasco con lluvias anuales alrededor de 2000 a 2500 mm y en caso contrario, los valores mínimos son similares a los que ocurren en los estados de Baja California y Baja California Sur con lluvias anuales alrededor de los 200 mm (SEMARNAT, 2007) y por tanto los datos sospechosos que no tuvieron justificación se descartaron del análisis. Así mismo las estaciones que infirieran en más de 10 datos sospechosos

también fueron descartadas. Los datos sospechosos se muestran en la Tabla 1 del Anexo A.

Finalmente de las 26 estaciones pluviométricas disponibles se excluyeron 5, por carecer de datos durante un periodo de tiempo mínimo de 10 años, y 1 estación, por inferir en más de 10 datos sospechosos, por tanto se consideraron de utilidad 20 estaciones utilizadas para el estudio de precipitación, temperatura y evapotranspiración de la cuenca, éstas se presentan en la Tabla 5.3 con la relación de datos, además de su localización geográfica y altitud, en la Figura 5.4 se muestra su localización alrededor de la cuenca.

Tabla 5.3. Estaciones meteorológicas utilizadas en el estudio

No.	Estación	Nombre	Longitud (°)	Latitud (°)	Altitud (msnm)	1961	1962	1963	1964	1965	1966	1967	1968	1969	1970	1971
1	15025	Ejido Llano Grande	-99.6650	19.5728	2538											
2	15036	Ixtlahuaca	-99.7600	19.5642	2535											
3	15037	Jiquipilco	-99.6000	19.5592	2772											
4	15071	Presa el Tigre	-99.6864	19.7803	2710											
5	15078	Psa. Fco. Trinidad Fabela	-99.7908	19.8250	2718											
6	15084	San Andrés Timilpan	-99.7350	19.8750	2658											
7	15093	San Lorenzo Malacota	-99.6133	19.6469	2658											
8	15111	Santa María Nativitas	-99.5833	19.5833	2986											
9	15112	Santiago Yeche	-99.7031	19.7044	2696											
10	15158	San Pedro de los Baños	-99.8308	19.6692	2552											
11	15196	Chapa de Mota	-99.5333	19.8167	2264											
12	15239	San Antonio Trojes	-99.6400	19.7531	2831											
13	15264	Buenos Aires	-99.6683	19.6164	2576											
14	15308	San Cristóbal de los Baños	-99.8717	19.6894	2570											
15	15317	San José la Epifanía	-99.6286	19.7131	2631											
16	15333	El Palmito	-99.6800	19.9172	2641											
17	15341	San Antonio Nigini	-99.6833	19.6725	2545											
18	15372	Ixtlahuaca (DGE)	-99.7669	19.5689	2540											
19	15390	E. T. A. 013 Jocotitlán	-99.7889	19.7111	2650											
20	15394	Monte de Peña	-99.5475	19.7319	2890											



Existen datos



No existen datos

Tabla 5.3. Estaciones meteorológicas utilizadas en el estudio. (Continuación)

No.	Estación	1972	1973	1974	1975	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991
1	15025	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
2	15036	■	■	■	■	■	■	■	■	□	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
3	15037	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
4	15071	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
5	15078	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
6	15084	□	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
7	15093	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
8	15111	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
9	15112	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
10	15158	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
11	15196	□	□	□	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
12	15239	□	□	□	□	□	□	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
13	15264	□	□	□	□	□	□	□	□	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
14	15308	□	□	□	□	□	□	□	□	□	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
15	15317	□	□	□	□	□	□	□	□	□	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
16	15333	□	□	□	□	□	□	□	□	□	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
17	15341	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
18	15372	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	■	■	■	■	■	■	■
19	15390	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	■	■	■	■	■	■	■
20	15394	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	■	■	■	■	■	■	■



Existen datos



No existen datos

Tabla 5.3. Estaciones meteorológicas utilizadas en el estudio. (Continuación)

No.	Estación	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
1	15025	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■				
2	15036	■						■												
3	15037	■		■	■	■	■	■	■							■	■			
4	15071	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■							
5	15078	■	■	■	■	■	■	■	■	■		■	■					■	■	
6	15084	■	■	■	■	■	■	■		■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
7	15093			■		■	■	■	■	■	■	■								
8	15111																			
9	15112			■			■	■	■	■	■	■	■	■	■	■		■	■	
10	15158				■	■	■	■	■	■	■	■		■	■	■				
11	15196																			
12	15239			■	■	■	■	■	■		■			■		■				
13	15264	■	■	■				■		■	■	■	■		■	■	■	■	■	■
14	15308	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■		■	■	■		
15	15317	■	■	■	■	■	■			■										
16	15333	■	■	■	■	■	■	■	■	■		■		■		■		■		
17	15341	■			■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■		■		
18	15372	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■				
19	15390	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■				■	■	■	■
20	15394	■	■	■	■	■	■	■	■		■	■					■			



Existen datos



No existen datos

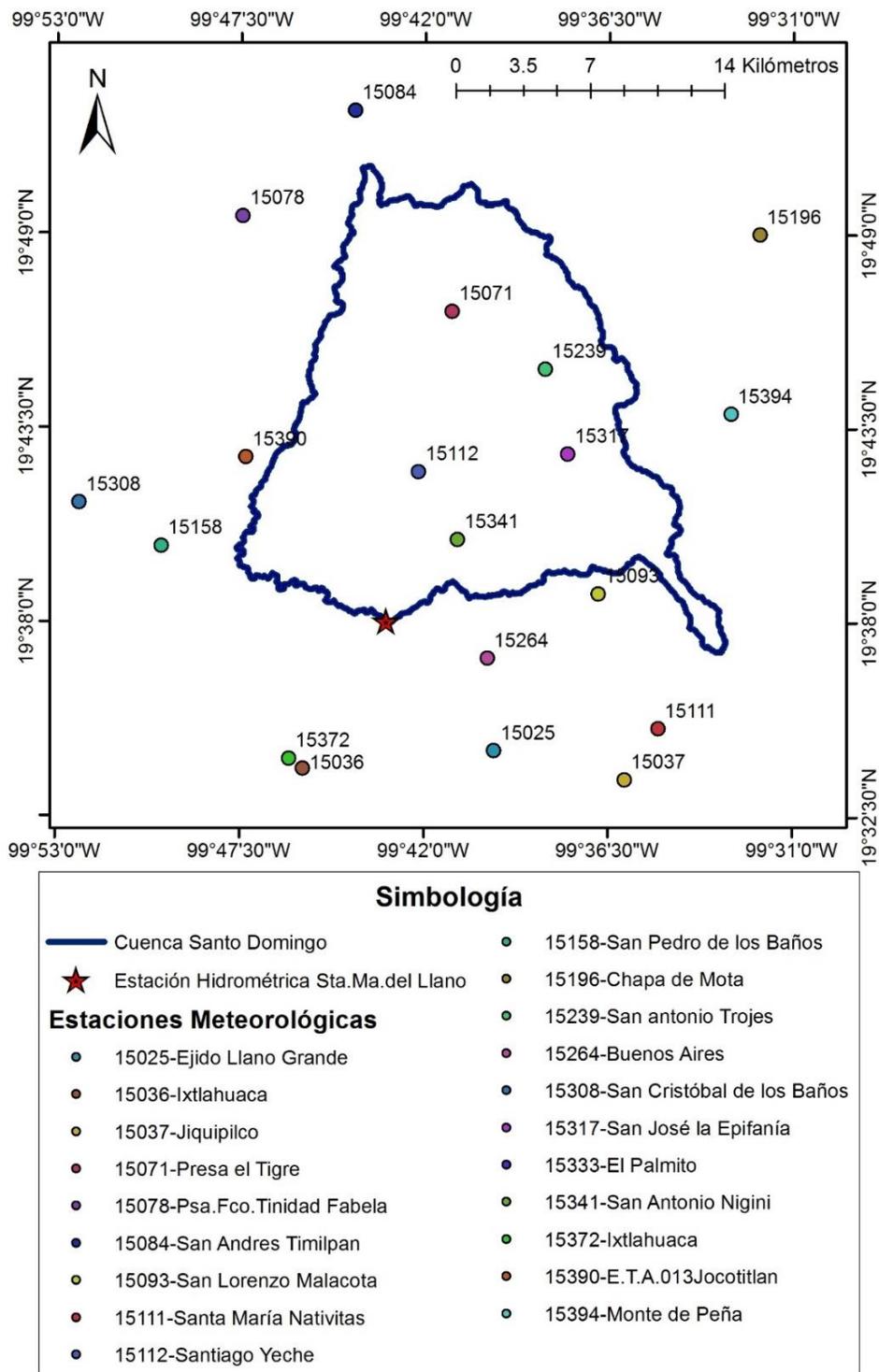


Figura 5.4. Estaciones meteorológicas utilizadas en el estudio de la cuenca Santo Domingo

5.1.3 Funciones de distribución de probabilidad

En el análisis de la precipitación anual se utilizaron las siguientes funciones:

Distribución Normal

La distribución normal es una distribución directa de los valores media (μ) y la desviación estándar (σ), característico de la muestra de datos disponibles. Una variable aleatoria pertenece a la función normal, si función de distribución estadística es de la forma:

$$f(x) = (\sigma\sqrt{2\pi})^{-1} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad -\infty \leq x \leq \infty \dots\dots\dots [5.8]$$

La función de distribución de probabilidad será:

$$F(x) = \int_{-\infty}^x (\sigma\sqrt{2\pi})^{-1} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2} dt \quad -\infty \leq x \leq \infty \dots\dots\dots [5.9]$$

La media y desviación estándar son: μ y σ respectivamente.

Con base al teorema central límite la función normal es utilizada para representar frecuencias de fenómenos hidrológicos. Este teorema dice:

“Si una variable ha sido formada por adición de un gran número de elementos independientes, siendo equivalente la contribución de cada uno, la frecuencia de esta variable tiende asintóticamente a la distribución normal” (Llamas, 1993).

Haciendo la transformación de $z = (x - \mu)\sigma^{-1}$, las funciones anteriores se convierte en:

$$f(z) = (\sqrt{2\pi})^{-1} e^{-\frac{z^2}{2}} \quad \text{para } -\infty \leq z \leq \infty \dots\dots\dots [5.10]$$

$$F(z) = \int_{-\infty}^z (\sqrt{2\pi})^{-1} e^{-\frac{z^2}{2}} dz \quad \text{para } -\infty \leq z \leq \infty \dots\dots\dots [5.12]$$

Siendo z la variable estandarizada.

Distribución Log-Normal

La distribución Log-Normal está expresada por la siguiente función de densidad de probabilidad (Llanos *et al.*, 2009):

$$f(x) = \frac{1}{xb\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(y-a)^2}{2b^2}} \quad y = \ln x \quad x > 0 \dots \dots [5.13]$$

Donde sus parámetros estimados son:

$$a = \mu_y \quad b = \sigma_y$$

Distribución Pearson III

Karl Pearson dedujo una serie de distribuciones para representar fenómenos físicos basados en la solución de la siguiente ecuación diferencial:

$$\frac{dy}{dx} = \frac{y(x+a)}{b_0 + b_1x + b_2x^2} \dots \dots \dots [5.14]$$

siendo, a, b₀, b₁ y b₂ los parámetros de ajuste. La función Pearson III así como sus características estadísticas se ilustran en la Figura 5.5 (Llanos *et al.*, 2009).

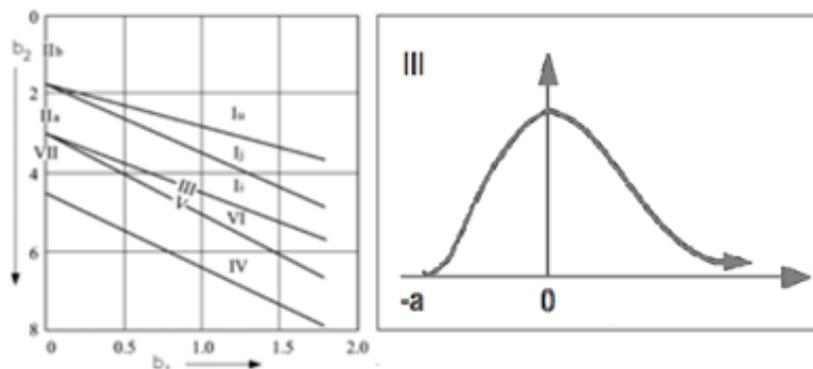


Figura 5.5. Función Pearson III

Distribución experimental Weibull

Para representar la función de distribución experimental existen distintas fórmulas empíricas o de posicionamiento gráfico que son indicativas de la probabilidad asignada a cada uno de los datos observados.

El cálculo de la probabilidad experimental o empírica para las precipitaciones anuales y máximas se obtuvo considerando la fórmula de probabilidad empírica de Weibull que es:

$$Pe = \frac{i}{n + 1} \dots \dots \dots [5.15]$$

La fórmula se aplica a una muestra de n datos ordenados, cuya posición queda definida por la variable i , y pueden expresarse como la probabilidad de 0 a 1 (Llanos *et al.*, 2009).

5.2 Precipitación media anual de la cuenca

En general, la altura de la lluvia que se presenta en un determinado lugar suele ser diferente a sitios aledaños, por ello es necesario calcular la lluvia promedio en la cuenca o región (Martínez, 1999). La precipitación media en general se calcula por los métodos: media aritmética, polígonos de Thiessen y método de isoyetas.

5.2.1 Media aritmética

La media aritmética consiste en tomar como lluvia media de la zona a la media aritmética de las alturas de las precipitaciones anuales durante un periodo fijo de tiempo de las estaciones que se encuentran dentro de la cuenca.

$$h_p = \frac{\sum_{i=1}^n h_{pi}}{n}$$

dónde

h_p : altura de la precipitación media de la cuenca

h_{pi} : altura de la precipitación de la estación i

n : número de las estaciones dentro de la cuenca

Este método puede ser válido cuando no se requiera mucha precisión y la zona sea homogénea climática y físicamente.

En la Tabla 5.4, se muestran las precipitaciones medias de las estaciones climatológicas que se encuentran dentro de la cuenca Santo Domingo.

Tabla 5.4. Precipitación media de anual de las estaciones dentro de la cuenca

No.	Estación	Nombre	Precipitación media anual (mm)
4	15071	PRESA EL TIGRE	810
9	15112	SANTIAGO YECHE	892
12	15239	SAN ANTONIO TROJES	701
15	15317	SAN JOSÉ LA EPIFANÍA	902
17	15341	SAN ANTONIO NIGINI	805

La precipitación media de la cuenca será:

$$h_p = \frac{4111}{5} = 822 \text{ mm}$$

5.2.2 Polígonos de Thiessen

El método de los polígonos de Thiessen considera las zonas de influencia de cada estación en la cuenca según la media ponderada de las precipitaciones registradas en las estaciones ubicadas dentro de la cuenca y en su periferia. El factor de ponderación de una estación es la superficie del polígono formado por las mediatrices de los segmentos que une estas estaciones y las estaciones próximas.

Los polígonos de Thiessen se obtuvieron con el software TerrSet utilizando el módulo “DISTANCE” para posteriormente calcular el área en km² de cada polígono (módulo AREA) (Figura 5.6).

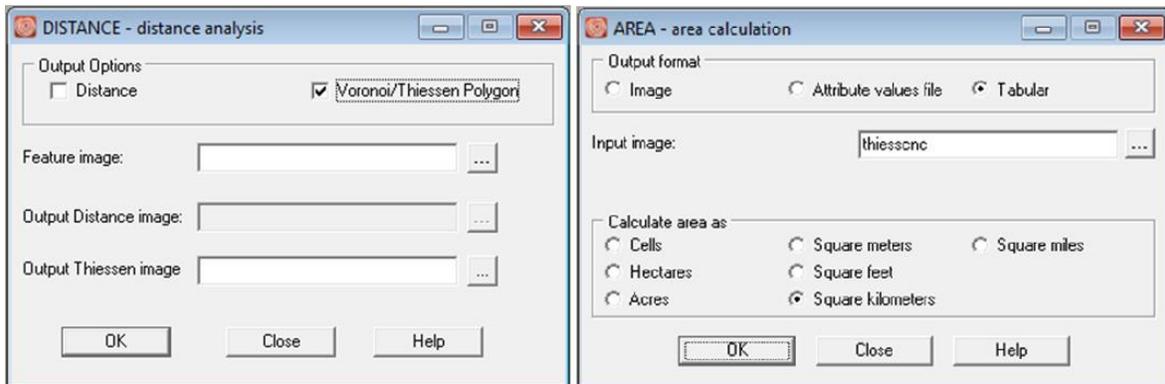


Figura 5.6. Ventanas de los módulos “DISTANCE” y “AREA”

La precipitación media se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$P_m = \frac{\sum_{i=1}^n P_i S_i}{S}$$

dónde

P_m: precipitación media

P_i: precipitación media de la estación i.

S_i: superficie de la estación i.

n : número de polígonos

S : superficie de la cuenca

Este método se basa en una transformación geométrica, es útil cuando la distribución de las estaciones no es uniforme y existe una variación entre estaciones relativamente grande. Los resultados son válidos en zonas llanas con pluviometría de distribución homogénea.

En la Tabla 5.5 se muestra el cálculo de las precipitaciones por polígonos de Thiessen (Figura 5.7).

Tabla 5.5. Precipitación media por Polígonos de Thiessen

No.	Estación	Superficie del polígono (km ²)	Precipitación Anual (mm)	P _i S _i
4	15071	85.1	810	68918
5	15078	1.6	778	1212
6	15084	4.7	981	4589
7	15093	23.7	1006	23878
8	15111	1.4	912	1258
9	15112	57.5	892	51308
10	15158	2.4	709	1697
12	15239	42.0	701	29450
13	15264	0.4	714	284
15	15317	41.9	902	37782
17	15341	47.1	805	37923
19	15390	32.6	754	24591
20	15394	0.7	1010	689
		Σ =341.0		Σ =283578

Por lo tanto, la precipitación media será:

$$P_m = \frac{283578}{341} = 832 \text{ mm}$$

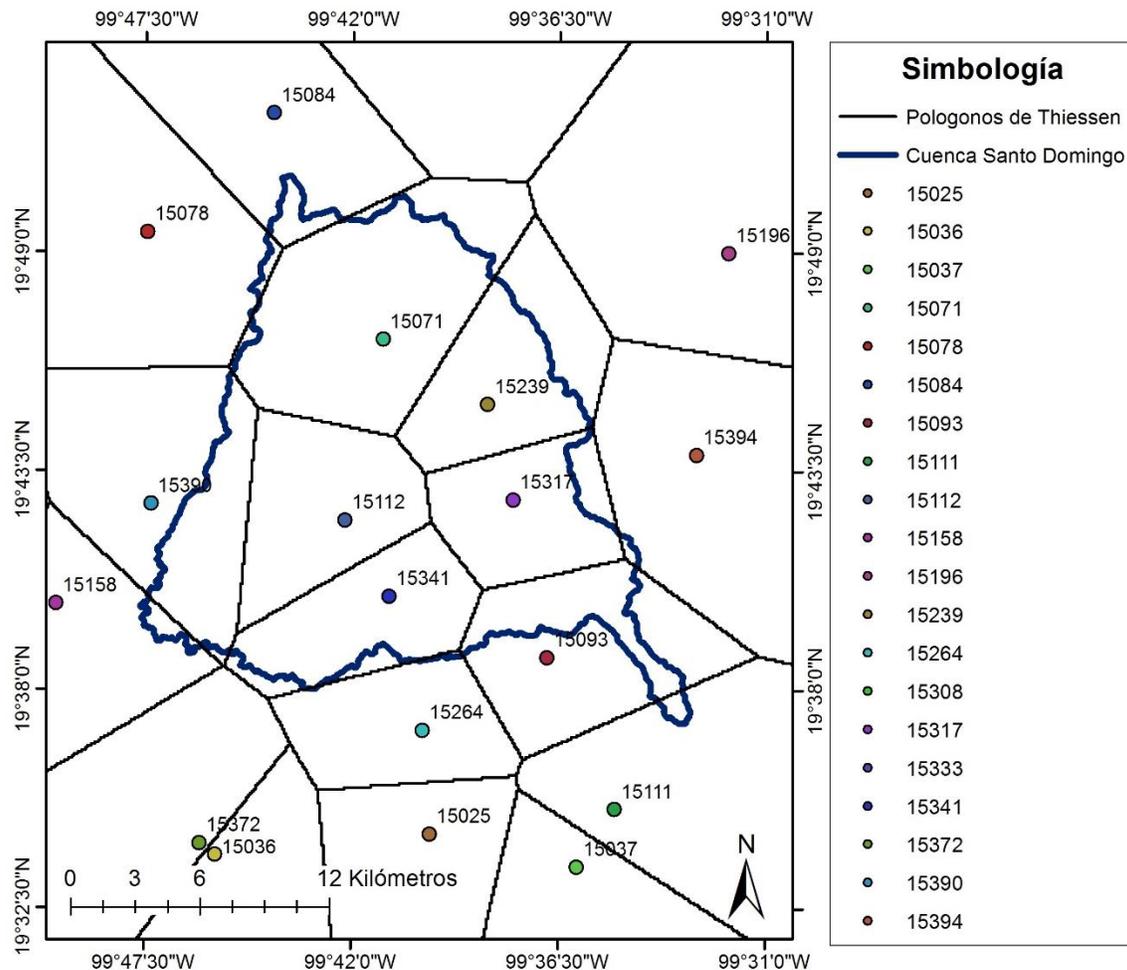


Figura 5.7. Cálculo de la precipitación media por el método de polígonos de Thiessen

5.2.3 Método de Isoyetas

El método consiste en trazar líneas de igual precipitación llamadas isoyetas a partir de los datos puntuales reportados por las estaciones meteorológicas. Al trazar las isoyetas para lluvias anuales, podemos incorporar los efectos topográficos sobre la distribución espacial de la precipitación, tomando en cuenta factores como la altura y la exposición de la estación. También se recomienda este método para calcular promedios espaciales en el caso de eventos individuales localizados.

Las isoyetas se obtuvieron mediante el software Terrset, mediante el módulo “INTERPOL” que interpola una superficie completa basada en datos puntuales (precipitación media de las estaciones), creando una imagen de valores con trama continua y el módulo “CONTOUR” que crea líneas de contorno o líneas de igual valor de atributo (isoyetas) a partir de una imagen con trama continua (Figura 5.8).

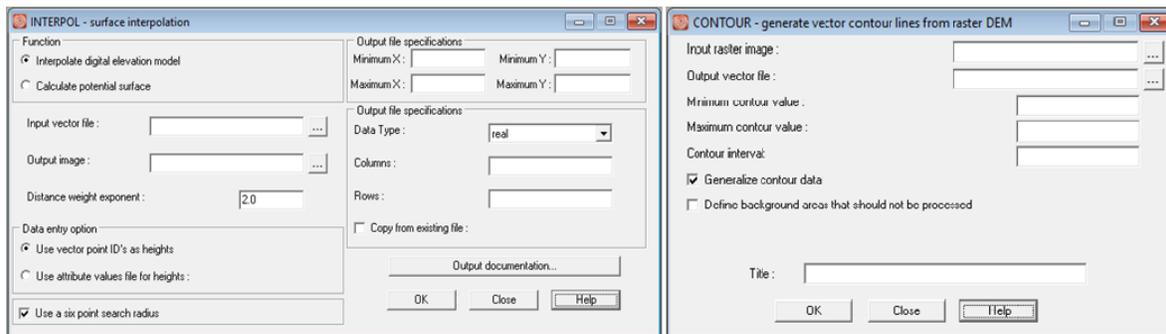


Figura 5.8. Ventana de los módulos “INTERPOL” y “CONTOUR”

Entonces, la precipitación media por isoyetas se calcula bajo la siguiente ecuación:

$$P_m = \frac{\sum_1^n (p_{mi} A_i)}{A_T}$$

dónde

P_m : Precipitación media de la cuenca

p_{mi} : precipitación media entre la isoyeta i y $i+1$

A_i : área entre isoyeta i y $i+1$

A_T : área total dela cuenca

n : número se isoyetas dentro de la cuenca

En la Tabla 5.6 se muestran los cálculos realizados por el método de isoyetas, así como su distribución espacial (Figura 5.9) de la precipitación media en el interior de la cuenca.

Tabla 5.6. Cálculos del método de Isoyetas

No.	Isoyeta i	Isoyeta i+1	Precipitación media (mm)	Superficie (km ²)	P _{mi} S _i
1	924	874	899	0.8	674
2	874	824	849	18.0	15265
3	824	774	799	165.7	132354
4	774	724	749	12.9	9640
5	774	724	749	8.7	6516
6	824	874	849	78.8	66918
7	874	924	899	43.3	38899
8	924	974	949	4.7	4460
9	724	724	724	3.2	2331
10	874	874	874	5.1	4440
Suma				341.0	281499

La precipitación media será:

$$Pm = \frac{281499}{341} = 825 \text{ mm}$$

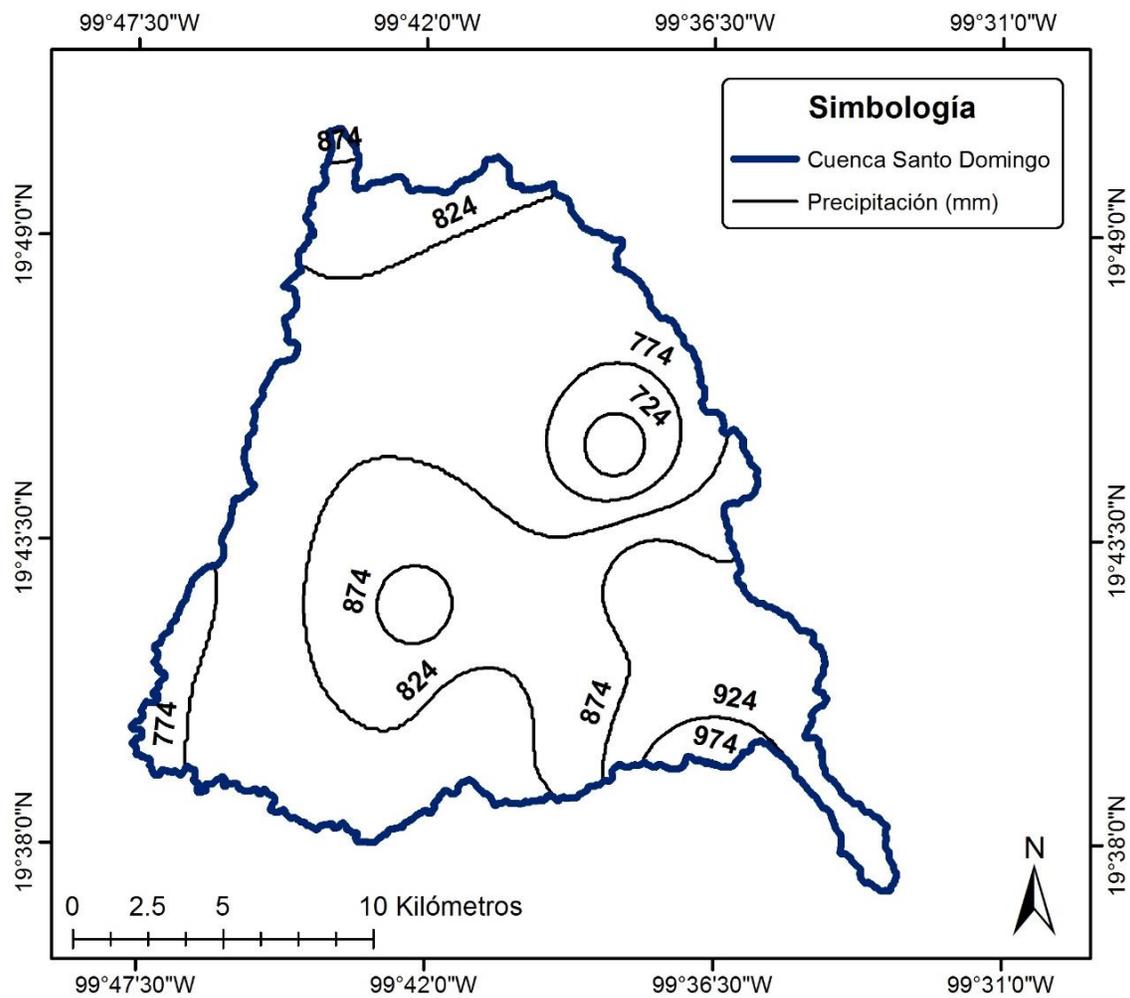


Figura 5.9. Calculo de la precipitación media por el método de isoyetas.

En la Tabla 5.7 se compara la precipitación media obtenida por los diferentes métodos.

Tabla 5.7. Comparación de la precipitación media de la cuenca.

Método	Precipitación media (mm)
Media aritmética	822
Polígonos de Thiessen	832
Método de isoyetas	825

5.3 Precipitación máxima diaria

Para combatir los efectos derivados de fenómenos extremos, se diseñan estructuras de control, en base a la estimación de valores extremos de variables hidrometeorológicas como; las precipitaciones de una región. La estimación de los valores se obtiene por medio de análisis estadístico, bajo un punto de vista frecuencial, para estimar eventos que puedan producirse en un futuro.

En el análisis de valores máximos diarios se utilizó el software HIDESTAD, considerando las funciones de distribución clásicas de Log-Pearson III, Gumbel y Log-Normal, utilizadas ampliamente en hidrología para analizar la frecuencia de valores extremos (Llanos *et al.*, 2009).

5.3.1 Funciones de distribución para valores extremos

Distribución Log-Pearson III

La función de distribución Log-Pearson se obtiene aplicando una transformación logarítmica, $\ln X$, a una variable X distribuida según una ley Pearson III. La variable X , por tanto, seguirá una distribución Log-Pearson III con una función de densidad de probabilidad tal que:

$$P(x) = \frac{1}{\alpha \cdot \beta \left(\frac{\ln x - \gamma}{\alpha}\right)^{\beta-1}} e^{-\left\{\frac{\ln x - \gamma}{\alpha}\right\}}$$

donde α , β y γ son parámetros de escala, forma y posición, respectivamente. Para estimar los valores característicos de la distribución en la muestra se efectúa la transformación de cada dato en base a su logaritmo natural ($y = \ln x$).

Esta distribución justifica su empleo ya que constituye una distribución muy versátil gracias a la transformación logarítmica y a la circunstancia de que cuando su

coeficiente de asimetría es igual a cero se obtiene la distribución log-normal (Llanos *et al.*, 2009).

Distribución Gumbel

Gumbel dedujo una función conocida bajo el nombre de Ley de Gumbel que tiene como principal ventaja la facilidad de su aplicación, aunque es muy rígida ya que depende de dos parámetros únicamente. Ha sido objeto de numerosas aplicaciones principalmente en el análisis de precipitaciones extremas e igualmente en el estudio de caudales de crecidas máximas (Martínez, 1999).

La función de distribución de Gumbel para valores máximos es:

$$f(x) = 1 - e^{-e^{-y}}$$

donde, $f(x)$ es la probabilidad de que un determinado evento sea igualado o excedido, e es la base de los logaritmos neperianos, y es la variable reducida, que a su vez es función de la probabilidad.

Distribución Log-Normal

La distribución Log-Normal esta expresada por la siguiente función de densidad de probabilidad (Llanos *et al.*, 2009):

$$f(x) = \frac{1}{xb\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(y-a)^2}{2b^2}} \quad y = \ln x \quad x > 0$$

Donde sus parámetros estimados son:

$$a = \mu_y \quad b = \sigma_y$$

Para elegir que función es la más adecuada a las precipitaciones máximas diarias registradas se consideró el coeficiente de correlación máxima entre las diferentes

funciones elegidas para realizar el análisis obtenido en los resultados que arroja el software HIDESTAD. En la Figura 2.1 a la 2.20 del Anexo A se muestra la comparación de las distintas funciones para cada estación.

5.3.2 Método de isoyetas

La función que obtuvo el mayor coeficiente de correlación fue la función de distribución de Log-Pearson III. En la Tabla 5.8 se presentan los diferentes cuántiles para periodo de retorno (T) de 2, 10, 20, 50 y 100 años con un nivel de confianza del 95% de acuerdo con los resultados arrojados por el software HIDESTAD.

Tabla 5.8. Cuántiles de precipitación máxima diaria (mm) según Log-Pearson III.

Estación	Periodo de retorno (años)				
	2	10	20	50	100
15025	45.2	62.9	69.5	78.0	84.5
15036	35.4	51.9	59.1	69.2	77.4
15037	40.0	60.0	67.3	76.7	83.7
15071	40.6	57.5	64.3	73.3	80.4
15078	46.3	62.7	67.6	73.1	76.7
15084	57.2	83.5	92.9	104.6	113.2
15093	53.4	77.9	87.3	99.7	109.2
15111	37.1	53.0	61.3	74.1	85.6
15112	41.2	53.9	56.1	57.9	58.8
15158	40.9	62.7	73.2	88.7	102.1
15239	39.0	54.2	60.8	69.9	77.3
15264	34.5	61.8	75.0	94.8	112.0
15308	23.0	32.0	36.2	42.2	47.4
15317	42.5	62.7	71.5	83.9	94.0
15333	44.1	57.7	62.3	68.1	72.3
15341	38.2	68.5	83.2	105.2	124.2
15372	43.1	52.8	55.2	57.8	59.4
15390	44.9	73.4	85.7	102.9	117.0

Al igual que en la precipitación media se trazaron la isoyetas para cada periodo de retorno, en la Figura 5.10 se muestran la distribución espacial de las precipitaciones máximas diarias para T=2 años y en las Figuras 2, 3, 4 y 5 del Anexo A, T= 10, 20, 50 y 100 años respectivamente.

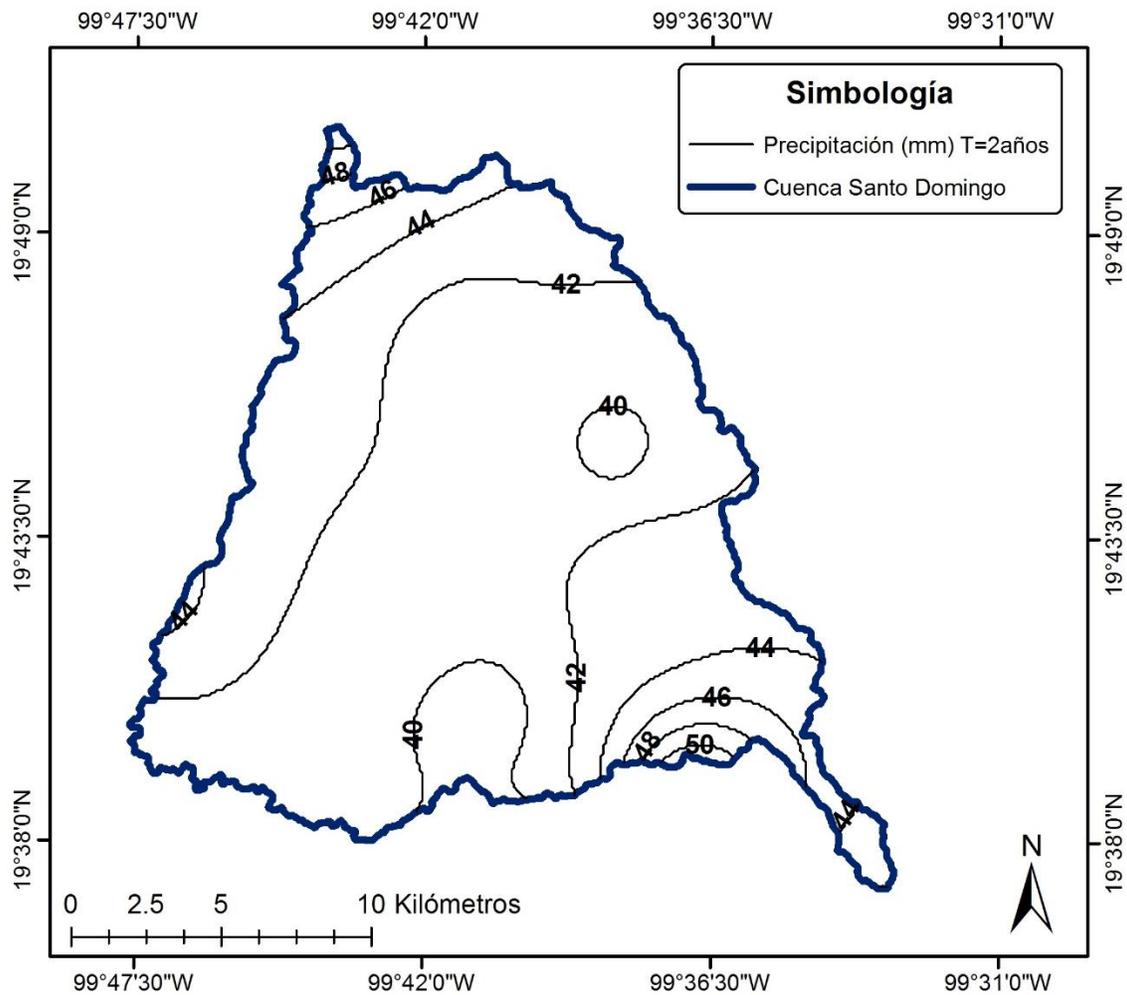


Figura 5.10. Distribución espacial de las precipitaciones máximas diarias para T=2 años.

5.4 Temperatura

En la cuenca Santo Domingo se consideró la información de temperatura de las 20 estaciones consideradas para la precipitación. Se obtuvo la temperatura media mensual para cada estación (Tabla 2 del Anexo A) y se analizó la temperatura media interanual (Figura 5.11) así como la temperatura media anual por estación (Tabla 5.9), ambas necesarias para estudios posteriores.

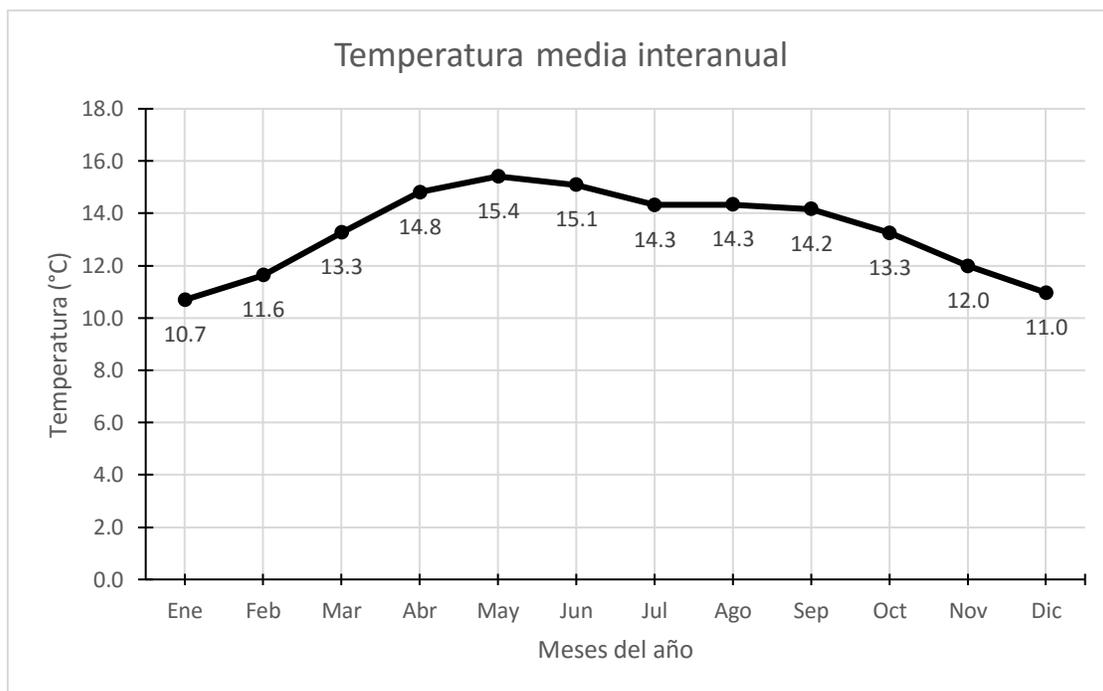


Figura 5.11. Temperatura media interanual (Periodo de 1962 al 2011)

Tabla 5.9. Temperatura media anual por estación (Periodo de 1962 al 2011).

No.	Estación	Nombre	Temperatura media anual		
			Mínima °C	Media °C	Máxima °C
1	15025	Ejido Llano Grande	10.9	13.0	14.7
2	15036	Ixtlahuaca	12.8	14.5	16.5
3	15037	Jiquipilco	8.9	12.7	15.8
4	15071	Presa el Tigre	11.7	12.3	13.6
5	15078	Psa. Fco. Trinidad Fabela	11.1	12.6	13.5
6	15084	San Andrés Timilpan	11.8	13.3	15.3
7	15093	San Lorenzo Malacota	12.3	13.7	16.7
8	15111	Santa María Nativitas	11.6	13.4	14.2
9	15112	Santiago Yeche	10.6	12.5	13.9
10	15158	San Pedro de los Baños	11.9	13.1	14.6
11	15196	Chapa de Mota	12.0	13.4	14.4
12	15239	San Antonio Trojes	11.7	12.6	14.0
13	15264	Buenos Aires	12.6	13.9	17.0
14	15308	San Cristóbal de los Baños	12.7	13.3	14.5
15	15317	San José la Epifanía	11.5	13.3	14.4
16	15333	El Palmito	11.5	13.3	16.2
17	15341	San Antonio Nigini	10.0	14.0	15.9
18	15372	Ixtlahuaca (DGE)	13.2	14.7	16.5
19	15390	E. T. A. 013 Jocotitlán	12.2	13.2	14.9
20	15394	Monte de Peña	13.0	14.3	15.4

5.4.1 Media aritmética

Al igual que en la precipitación media se obtuvo la temperatura media de la cuenca por el método aritmético. En la Tabla 5.10, se muestran las temperaturas medias de las estaciones climatológicas de las estaciones que se encuentran dentro de la cuenca Santo Domingo.

Tabla 5.10. Temperatura media por método media aritmética.

No.	Estación	Nombre	Temperatura media anual °C
4	15071	Presa el Tigre	12.3
9	15112	Santiago Yeche	12.5
12	15239	San Antonio Trojes	12.6
15	15317	San José la Epifanía	13.3
17	15341	San Antonio Nigini	14.0
Temperatura media			12.9

5.4.2 Polígonos de Thiessen

Se utilizaron las áreas de los polígonos (Figura 5.7) de la Tabla 5.5, para calcular la temperatura media de la cuenca, en la Tabla 5.11 se muestra el cálculo por este método, donde la temperatura media de la cuenca resulta ser de 12.9 °C.

Tabla 5.11. Temperatura media por el método de polígonos de Thiessen

No.	Estación	Superficie del polígono (km ²)	Temperatura media °C	T _i S _i
4	15071	85.1	12.3	1045.0
5	15078	1.6	12.6	19.7
6	15084	4.7	13.3	62.2
7	15093	23.7	13.7	326.1
8	15111	1.4	13.4	18.5
9	15112	57.5	12.5	720.3
10	15158	2.4	13.1	31.5
12	15239	42.0	12.6	528.1
13	15264	0.4	13.9	5.5
15	15317	41.9	13.3	555.9
17	15341	47.1	14.0	656.9
19	15390	32.6	13.2	429.3
20	15394	0.7	14.3	9.7
Sumas		341.0		4408.6

Debido a que el gradiente de variación espacial de la temperatura es menor comparado con la precipitación se puede utilizar cualquiera de los métodos se considera la temperatura media de la cuenca igual a 12.9°C. En la Figura 5.12 se presenta la distribución espacial de la temperatura media por medio de las isoyetas.

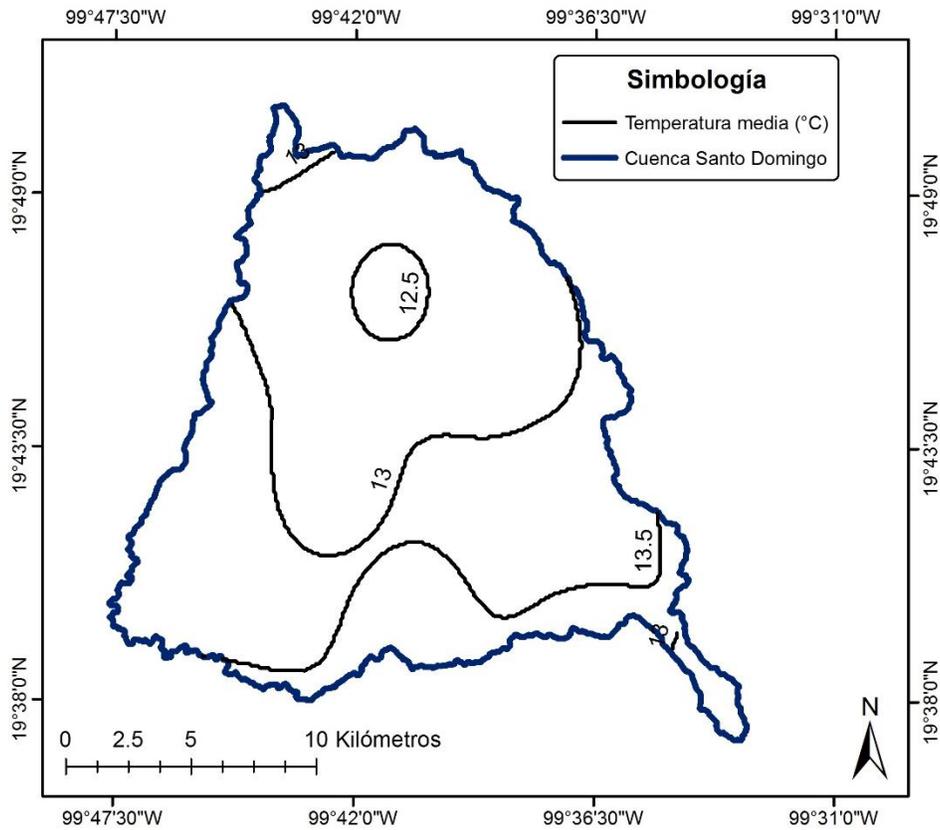


Figura 5.12. Temperatura media de la cuenca (°C)

Capítulo 6. Evapotranspiración

La evapotranspiración depende del aporte de energía, del gradiente de presión de vapor y de la velocidad del viento, por esto la radiación, temperatura, humedad atmosférica y viento deben ser considerados en su determinación (Franco, 2008).

6.1 Evapotranspiración de referencia

La ET_0 se verá afectada solo por parámetros climáticos y será calculada a partir de datos meteorológicos, expresando la cantidad de agua que se transfiere a la atmosfera en una localidad y época del año específicas. Esto para estudiar la demanda de ET de la atmósfera sin considerar el tipo y desarrollo del cultivo. El relacionar la ET a una superficie específica permite tener una referencia a la cual se puede relacionar la ET de otras superficies, así como la ET para cada tipo de cultivo y periodo de crecimiento (Franco, 2008).

6.2 Estimación de la evapotranspiración

En la actualidad existen varios métodos para indicar la evapotranspiración, los cuales se han clasificado en métodos directos e indirectos. Los directos proporcionan información directa del total de agua requerida por los cultivos, se requieren aparatos específicos y mediciones precisas para su determinación. Los métodos indirectos calculan la ET por medio de datos meteorológicos y se han desarrollado una gran cantidad de ecuaciones empíricas para determinar la ET_0 (FAO, 2006).

El método de Penman-Monteith ha sido aceptado por la FAO, (2006) como el criterio más confiable para las estimaciones de la ET_0 y requiere datos de radiación, temperatura del aire, humedad atmosférica y velocidad del viento. Aunque algunos observatorios meteorológicos no cuentan con el total de datos requeridos como es el caso de las estaciones de la cuenca Santo Domingo. Sin embargo, en la zona de la cuenca existen estaciones del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) que calculan la ET_0 automáticamente, ésta será comparada con la ET_0 obtenida por los métodos indirectos que se utilizan a continuación.

6.2.1 Método de Hargreaves-Samani

Campos Aranda (2005) comparó tres fórmulas empíricas con el método de Penman, recomendando ampliamente la fórmula de Hargreaves-Samani donde el método de Penman no es aplicable por falta de datos meteorológicos. El método de Hargreaves-Samani es muy simple y requiere únicamente datos de temperatura y radiación extraterrestre.

La fórmula de Hargreaves-Samani es la siguiente:

$$ET_0 = 0.0023 \times RA / 2.45 \times TD^{0.50} (T + 17.8)$$

dónde:

ET_0 : Evapotranspiración de referencia(mm/día)

RA : Radiación extraterrestre(MJ/(m² día))

TD : Diferencia de temperatura máxima y mínima en °C

T: Temperatura media en °C

La RA se obtiene de la Tabla 6.1 a partir del mes de estudio, considerando la latitud de cada estación de la cuenca.

Tabla 6.1. Radiación extraterrestre

Lat ° Norte	Hemisferio norte RA en MJ/(m ² -día)											
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
0	36.1	37.6	38.0	36.8	34.8	33.4	33.8	35.5	37.1	37.4	36.5	35.7
2	35.3	37.1	37.9	37.1	35.4	34.2	34.5	36.0	37.2	37.1	35.8	34.8
4	34.5	36.6	37.7	37.4	36.0	34.9	35.2	36.4	37.3	36.8	35.1	33.9
6	33.6	36.0	37.5	37.6	36.6	35.6	35.8	36.8	37.3	36.4	34.3	33.0
8	32.7	35.4	37.3	37.8	37.1	36.3	36.4	37.2	37.2	35.9	33.5	32.1
10	31.8	34.7	37.0	38.0	37.5	36.9	37.0	37.5	37.1	35.4	32.7	31.1
12	30.9	34.0	36.7	38.0	38.0	37.5	37.6	37.8	37.0	34.9	31.8	30.1
14	29.9	33.3	36.3	38.1	38.4	38.1	38.0	38.0	36.8	34.3	30.9	29.0
16	28.9	32.5	35.8	38.1	38.7	38.6	38.5	38.2	36.6	33.7	30.0	27.9
18	27.8	31.7	35.4	38.1	39.0	39.1	38.9	38.3	36.4	33.0	29.1	26.9
20	26.7	30.8	34.8	38.0	39.3	39.5	39.3	38.4	36.0	32.3	28.1	25.7
22	25.6	29.9	34.3	37.8	39.5	39.9	39.6	38.4	35.7	31.6	27.0	24.6
24	24.5	29.0	33.7	37.7	39.7	40.3	39.9	38.5	35.3	30.8	26.0	23.4
26	23.4	28.1	33.0	37.4	39.8	40.6	40.2	38.4	34.9	30.0	24.9	22.3
28	22.2	27.1	32.4	37.2	39.9	40.9	40.4	38.3	34.4	29.2	23.8	21.1
30	21.1	26.1	31.6	36.9	40.0	41.1	40.6	38.2	33.9	28.3	22.7	19.8

En la Tabla 1 del Anexo B se muestran los resultados correspondientes.

6.2.2 Método de Thornthwaite

El método de Thornthwaite calcula la ET_0 a intervalos mensuales basándose en la temperatura considerando el número máximo de horas de Sol según la latitud del lugar en estudio siendo aplicable al caso de estudio por la disponibilidad de datos de temperatura en la cuenca.

La fórmula de Thornthwaite (1948) es la siguiente:

$$ET_0 = 16 \times \left(\frac{10 \times Tm}{I} \right)^a \times \left(\frac{N}{12} \times \frac{d}{30} \right)$$

dónde:

ET_0 : evaporación de referencia mensual, en mm.

Tm: temperatura media mensual del aire en °C.

I: índice de calor anual, igual a la suma de los doce índices mensuales del año:

$$I = \sum_1^{12} i \quad \text{siendo } i = \left(\frac{Tm}{5}\right)^{1.514}$$

a: exponente, cuya expresión es:

$$a = (6.75 \times 10^{-7} \times I^3) - (7.71 \times 10^{-5} \times I^2) + (0.01792 \times I) + 0.49239$$

N: número máximo de horas de Sol

d: número de días del mes

La variable N se obtiene de la Tabla 6.2 dependiendo del mes de estudio y latitud de la estación.

Tabla 6.2. Número máximo de horas de Sol

Lat ° norte	Número de horas de Sol máximas (h/día)											
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
2	12	12.1	12.1	12.2	12.2	12.2	12.2	12.2	12.1	12.1	12	12
4	11.9	12	12.1	12.2	12.3	12.4	12.3	12.3	12.1	12	11.9	11.9
6	11.8	11.9	12.1	12.2	12.4	12.5	12.4	12.3	12.2	12	11.9	11.8
8	11.7	11.9	12.1	12.3	12.5	12.6	12.5	12.4	12.2	12	11.8	11.7
10	11.6	11.8	12.1	12.3	12.6	12.7	12.7	12.5	12.2	11.9	11.7	11.5
12	11.5	11.7	12	12.4	12.7	12.8	12.8	12.5	12.2	11.9	11.6	11.4
14	11.4	11.7	12	12.4	12.8	12.9	12.9	12.6	12.2	11.8	11.5	11.3
16	11.3	11.6	12	12.5	12.9	13.1	13	12.7	12.2	11.8	11.4	11.2
18	11.2	11.5	12	12.5	13	13.2	13.1	12.8	12.3	11.8	11.3	11.1
19	11.1	11.5	12	12.6	13	13.3	13.2	12.8	12.3	11.7	11.3	11
20	11	11.5	12	12.6	13.1	13.3	13.2	12.8	12.3	11.7	11.2	10.9
22	10.9	11.4	12	12.6	13.2	13.5	13.4	12.9	12.3	11.7	11.1	10.8
24	10.8	11.3	12	12.7	13.3	13.6	13.5	13	12.3	11.6	11	10.7
26	10.7	11.3	12	12.7	13.4	13.8	13.6	13.1	12.3	11.6	10.9	10.5
28	10.5	11.2	12	12.8	13.5	13.9	13.8	13.2	12.4	11.5	10.8	10.4
30	10.4	11.1	11.9	12.9	13.6	14.1	13.9	13.3	12.4	11.5	10.7	10.2

En la Tabla 2 del Anexo B se muestran los resultados correspondientes.

6.2.3 Método de Turc

El método de Turc es muy sencillo se basa en la correlación entre la temperatura y precipitación como única recarga de la cuenca obteniendo la evapotranspiración de referencia media anual en mm y se obtiene a partir de la siguiente fórmula:

$$ET_0 = \frac{P}{\sqrt{0.9 + \frac{P^2}{L^2}}} \quad \text{siendo} \quad L = 300 + 25t + 0.05t^3$$

dónde:

ET_0 : Evapotranspiración de referencia media anual en mm

P: precipitación media anual en mm

t: temperatura media anual en °C

En la Tabla 3 del Anexo B se muestran los resultados correspondientes.

6.3 Evapotranspiración media de la cuenca

Con base en los resultados obtenidos por los diferentes métodos, se calcula la ET_0 media de la cuenca mediante los siguientes métodos:

6.3.1 Método aritmético

Al igual que en la precipitación media se obtuvo la ET_0 media por el método aritmético. En la Tabla 6.3, se muestran las temperaturas medias de las estaciones climatológicas de las estaciones que se encuentran dentro de la cuenca Santo Domingo.

Tabla 6.3. ET₀ media por método media aritmética

No.	Estación	Nombre	Heargraves-Samani	Thornthwaite	Turc
4	15071	Presa el tigre	1418	654	540
9	15112	Santiago Yeché	1485	661	568
12	15239	San Antonio Trojes	1390	658	511
15	15317	San José la Epifanía	1475	676	588
17	15341	San Antonio Nigini	1606	691	576
ET₀ media (mm/año)			1475	668	557

6.3.2 Polígonos de Thiessen

Se utilizaron las áreas de los polígonos (Figura 5.7) de la Tabla 5.5, para calcular la ET₀ media de la cuenca, en la Tabla 6.4 se muestran los cálculos correspondientes.

Tabla 6.4. ET₀ media por el método de polígonos de Thiessen

No.	Estación	Superficie del polígono (km ²)	Heargraves-Samani	H-SxS _i	Thornthwaite	ThxS _i	Turc	TcxS _i
4	15071	85.1	1418	120563	654	55641	540	45937
5	15078	1.6	1373	2139	662	1031	539	840
6	15084	4.7	1478	6912	677	3167	607	2836
7	15093	23.7	1521	36082	688	16325	624	14813
8	15111	1.4	1538	2122	676	933	594	819
9	15112	57.5	1485	85367	661	38004	568	32678
10	15158	2.4	1511	3618	673	1612	526	1259
12	15239	42.0	1390	58430	658	27674	511	21473
13	15264	0.4	1501	597	693	276	543	216
15	15317	41.9	1475	61793	676	28314	588	24634
17	15341	47.1	1606	75592	691	32546	576	27119
19	15390	32.6	1491	48596	675	22012	542	17666
20	15394	0.7	1503	1025	702	479	642	438
Sumas		341.0		502838		228015		190727
ET₀ (mm/año)				1475		669		559

En la Tabla 6.5 se compara la ET_0 media obtenida por los diferentes métodos:

Tabla 6.5 Comparación de la ET_0 media de la cuenca

Método	Heargraves-Samani (mm)	Thornthwaite (mm)	Turc (mm)
Media aritmética	1475	668	557
Polígonos de Thiessen	1475	669	559

6.3.3 Comparación de la ET_0 con estaciones INIFAP

Ante la recurrencia de eventos climáticos adversos que afectan las actividades primarias para la producción de alimentos en México, la SAGARPA, con apoyo del INIFAP y de las Fundaciones Produce A. C., implementaron la Red Nacional de Estaciones Agroclimatológicas (INIFAP, 2012).

En el interior de la cuenca Santo Domingo se encuentra la estación agroclimatológica Tiacaque en el municipio de Jocotitlán y en la periferia se localiza la estación agroclimatológica Ocampo en el municipio de Timilpan. El INIFAP calcula la ET_0 por el método de FAO Penman-Monteith que requiere datos de radiación, temperatura del aire, humedad atmosférica y velocidad del viento, mismos que son registrados automáticamente por las estaciones.

Se seleccionaron dos estaciones operadas por CONAGUA cercanas a las del INIFAP, la estación San Antonio Nigini con clave 15341 cercana a la estación Tiacaque y la estación San Andres Timilpan con clave 15084 cercana a la estación Ocampo, y se compararon sus temperaturas medias mensuales (Figura 6.1 y 6.2) para garantizar que los resultados fueran congruentes.

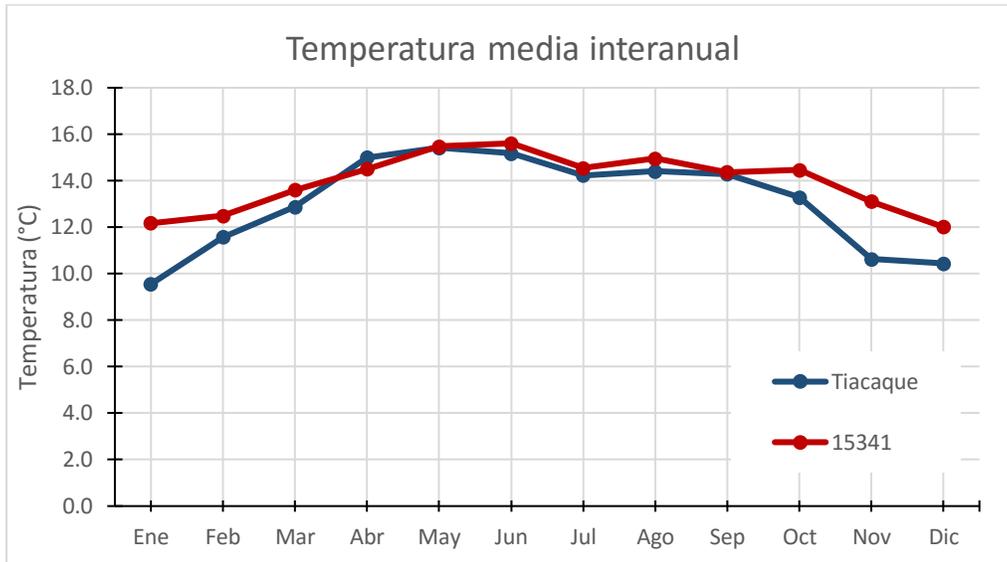


Figura 6.1. Comparación de temperatura de la estación Tiacaque y la 15341 (periodo 2008-2014)

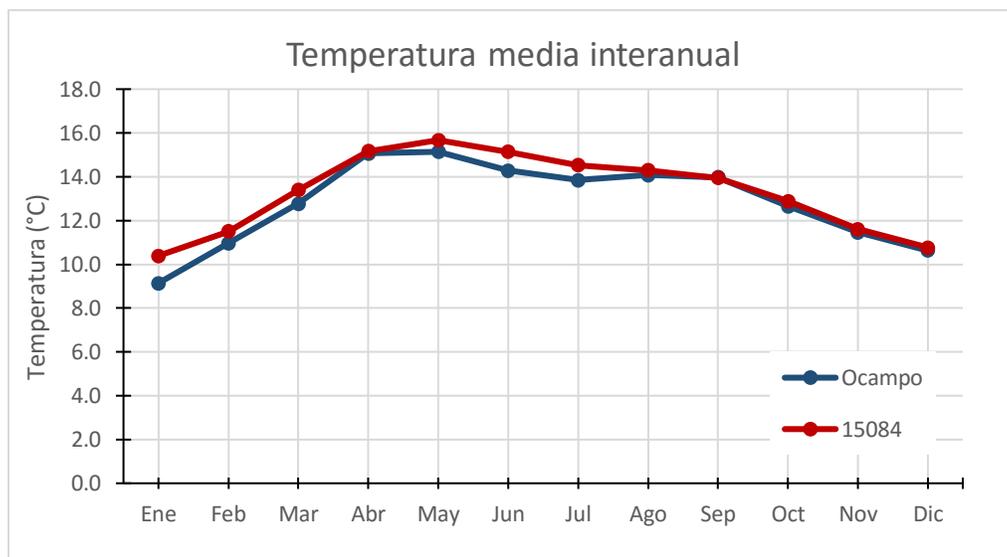


Figura 6.2. Comparación de temperatura de la estación Ocampo y la 15084 (periodo 2008-2014)

Se calculó la ET_0 por los métodos Heargraves-Samani, Thornthwaite y Turc, también se dispuso de la ET_0 calculada por INIFAP (método FAO Penman-Monteith) y se compararon los resultados (Tabla 6.6 y 6.7, Figura 6.3 y 6.4).

Tabla 6.6. Comparación de ET₀ de estación Tiacaque y la 15341 (periodo 2008-2014)

Mes	ET ₀ (mm/mes)			
	FAO Penman-Monteith	Heargraves-Samani	Thornthwaite	Turc
Ene	105	111	44	-
Feb	128	128	47	-
Mar	157	147	55	-
Abr	160	161	64	-
May	150	171	72	-
Jun	128	161	74	-
Jul	123	140	67	-
Ago	127	143	67	-
Sep	106	130	61	-
Oct	108	122	59	-
Nov	103	108	49	-
Dic	83	84	42	-
	ET₀ (mm/año)			
TOTAL	1478	1606	702	576

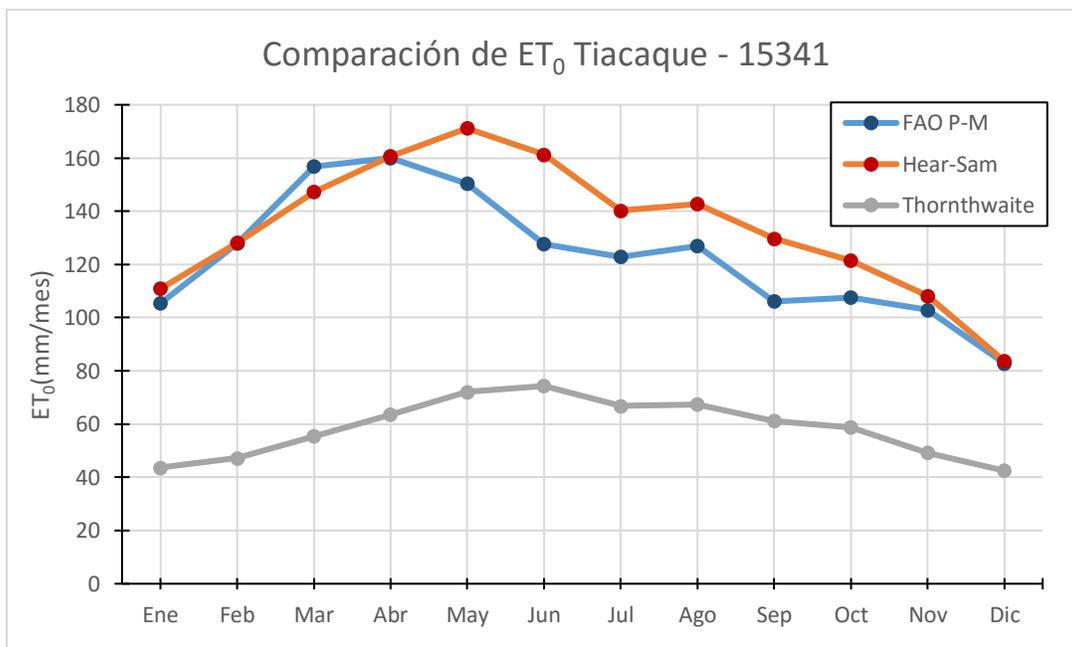


Figura 6.3. Comparación de la ET₀ de estación Tiacaque y la 15341 (periodo 2008-2014)

Tabla 6.7. Comparación de ET_0 de la estación Ocampo y la 15084 (periodo 2008-2014).

Mes	ET_0 (mm/mes)			
	FAO Penman-Monteith	Heargraves-Samani	Thornthwaite	Turc
Ene	89.2	94.7	37.1	-
Feb	110.1	115.2	44.3	-
Mar	127.5	140.1	56.6	-
Abr	142.3	157.7	70.0	-
May	127.7	160.7	75.9	-
Jun	102.5	144.3	73.7	-
Jul	106.2	132.4	69.2	-
Ago	112.0	126.7	65.7	-
Sep	90.4	116.4	61.2	-
Oct	90.6	106.7	52.4	-
Nov	80.8	98.2	43.7	-
Dic	81.3	85.0	38.5	-
	ET_0 (mm/año)			
TOTAL	1260	1478	688	607

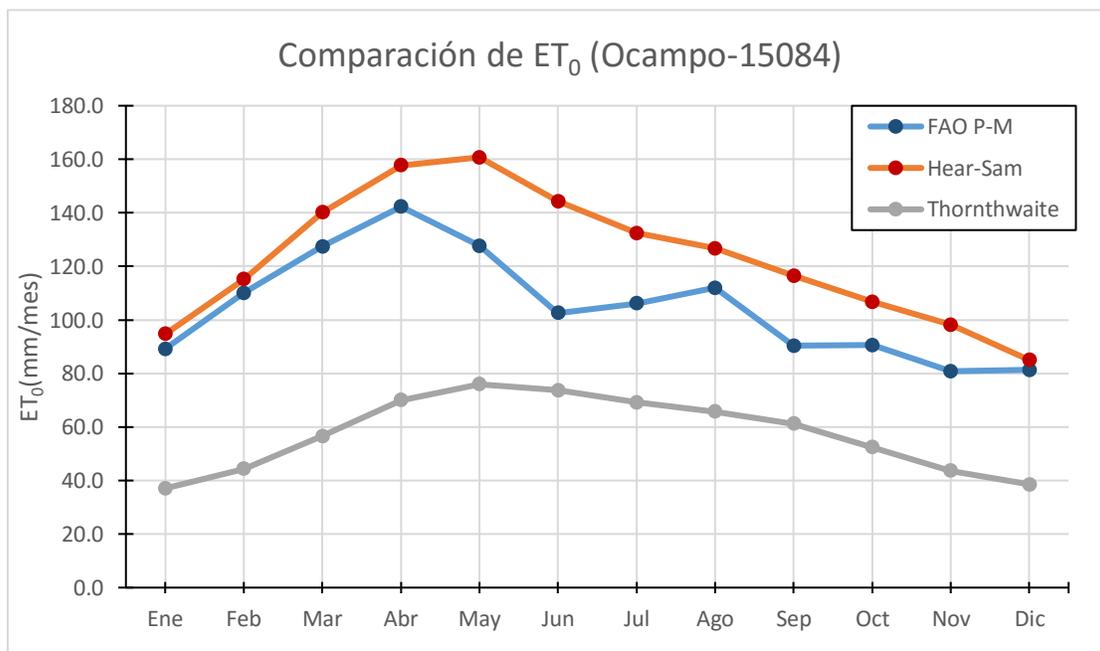


Figura 6.4. Comparación de ET_0 de la estación Ocampo y la 15084 (periodo 2008-2014).

Con base en los resultados obtenidos se verifica que el método de Heargraves-Samani proporciona la mejor aproximación al método aceptado mundialmente FAO Penman-Monteith comprobando la recomendación de Campos Aranda (2005). Los métodos de Thornthwaite y Turc no son aplicables para esta zona de estudio, ya que sus resultados están muy alejados de los esperados.

Capítulo 7. Escurrimiento superficial

En este trabajo se abordará únicamente el escurrimiento superficial que se entiende como el escurrimiento sobre el terreno que llega a una corriente definida y llega al río principal (Aparicio, 2001).

7.1 Rehabilitación de la estación Santa María del Llano

Datos registrados

Los caudales medios diarios han sido recopilados del Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS), base de datos de CONAGUA, que cuenta con observaciones desde 1964 año en que se habilitó la estación hidrométrica hasta el 2008. La estación contaba con una escala limnimétrica y un limnógrafo.

Aforos realizados por CONAGUA

Actualmente CONAGUA tiene asignado un aforador a la estación Santa María del Llano que realiza un aforo diario por la mañana en los meses de noviembre a mayo y dos aforos diarios, por la mañana y por la tarde en los meses de junio a octubre, para calcular los caudales medios diarios.

Los aforos que realiza CONAGUA no son suficientes y no representan los caudales medios diarios ya que el caudal en un río cambia constantemente. Por otro lado, para esta cuenca en particular, los escurrimientos importantes se presentan en la noche debido a que las precipitaciones ocurren por lo general en la tarde.

Limnómetro

Los residentes que habitan cerca de las márgenes del río narran que el río Santo Domingo se desbordó por las fuertes lluvias ocurridas en años pasados; llevándose consigo la escala limnimétrica que se encontraba en una de las pilas del puente que cruza el río.

El grupo de hidrología del CIRA (Figura 7.1) adquirió una nueva escala limnimétrica a finales del 2015 en el marco del proyecto CONACYT “*Modelación de eventos hidrológicos extremos a partir de precipitación estimada por percepción remota*”, la escala limnimétrica se instaló (Figura 7.2) para habilitar la estación hidrométrica y continuar con los aforos del río y referenciarlos a la escala.



Figura 7.1. Grupo de hidrología del CIRA.



Figura 7.2. Escala limnimétrica instalada de 0 a 2.50 metros.



Figura 7.3. Escala limnimétrica instalada de 2.50 a 3.90 metros.

A partir de la instalación de la escala limnimétrica se continuó con los aforos realizados por la CONAGUA y se hicieron cuatro aforos por el grupo de hidrología del CIRA.

7.2 Curva de frecuencias

Las variaciones de caudal definen el régimen hidrológico de un río. Para analizar el comportamiento del régimen hidrológico en una estación, se puede realizar un análisis estadístico de caudales mensuales utilizando la curva de frecuencia.

La curva de frecuencias es la gráfica que relaciona los valores posibles del caudal, con la frecuencia de su ocurrencia, permite examinar la tendencia de los valores recopilados y así determinar su probabilidad de excedencia y para algún año en particular; determinar si fue húmedo o seco.

Para calcular la curva de frecuencias se recopilaron los caudales diarios registrados en los años 1964 a 2008 y se calcularon los caudales medios mensuales para cada año. Sin embargo de los 44 años registrados solo se tiene 27 años con registros completos los cuales se utilizaron para el análisis (Tabla 7.1).

En el software HIDESTAD se determinan las probabilidades de ocurrencia de 10, 20, 50, 80 y 90% para cada mes del año utilizando las funciones de probabilidad Normal, Log-Normal, Pearson III y Gamma, siendo la distribución Log-Normal la curva de probabilidad que mejor se ajusta a los datos recopilados (Figura 1.1 a la Figura 1.12 del Anexos C).

En términos de periodo de retorno ($T=1/(1-P)$), si la probabilidad de ocurrencia es $P=0.5$ entonces $T=2$ años, si $P=0.95$ entonces $T=20$ años. El período de retorno de un evento dado, es el número promedio de años dentro del cual se espera que el evento sea igualado o excedido sólo una vez.

Tabla 7.1. Caudales medios mensuales

Año	Caudal medio (m ³ /s)												
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
1965	0.416	0.242	0.134	0.478	0.601	0.565	1.964	8.506	4.916	2.368	0.953	0.651	1.830
1966	0.477	0.312	0.389	0.572	0.415	1.558	2.340	7.201	2.153	1.583	0.729	0.576	1.538
1968	0.345	0.356	0.272	0.371	0.686	2.334	5.816	3.128	3.778	0.998	0.512	0.534	1.599
1969	0.436	0.204	0.189	0.205	0.192	0.901	4.128	9.883	5.158	0.915	0.620	0.461	1.958
1970	0.322	0.288	0.232	0.146	0.453	1.889	3.824	6.709	6.175	1.759	0.651	0.466	1.920
1971	0.361	0.105	0.052	0.229	0.238	2.960	2.344	5.537	4.702	4.565	1.177	0.712	1.926
1973	0.300	0.099	0.027	0.120	0.430	0.522	3.349	6.671	3.617	1.880	0.848	0.593	1.553
1974	0.470	0.223	0.112	0.206	0.297	0.994	5.737	1.472	4.763	2.447	0.830	0.482	1.511
1975	0.454	0.312	0.147	0.219	0.694	3.079	5.371	6.379	6.014	0.965	0.404	0.251	2.034
1976	0.236	0.139	0.187	0.397	0.458	0.604	3.929	7.280	5.143	7.118	1.395	0.781	2.322
1977	0.436	0.204	0.101	0.387	0.424	2.567	1.817	3.006	3.178	0.975	0.480	0.358	1.164
1979	0.269	0.136	0.157	0.252	0.302	0.604	0.630	1.175	1.928	0.375	0.287	0.358	0.540
1980	0.921	0.346	0.157	0.295	0.409	0.493	1.090	2.927	3.164	1.169	0.634	0.364	0.999
1981	0.356	0.230	0.181	0.400	0.535	1.099	4.156	3.549	1.606	1.531	0.785	0.430	1.249
1982	0.278	0.130	0.031	0.182	0.440	0.319	1.340	0.930	0.480	0.662	0.282	0.213	0.444
1983	0.208	0.086	0.050	0.129	0.196	0.459	4.113	4.263	5.963	0.554	0.424	0.297	1.402
1984	0.241	0.161	0.059	0.038	0.203	0.768	2.388	4.411	6.583	1.114	0.419	0.284	1.390
1985	0.218	0.080	0.026	0.236	0.289	1.711	4.832	5.437	4.116	0.687	0.369	0.321	1.538
1986	0.246	0.129	0.025	0.281	0.703	5.846	3.338	1.714	2.316	1.792	0.369	0.240	1.419
1993	0.465	0.123	0.020	0.170	0.137	1.210	7.434	2.888	5.434	1.554	0.595	0.414	1.715
1995	0.267	0.245	0.073	0.072	0.259	0.476	1.954	3.603	3.170	0.634	0.450	0.388	0.971
1996	0.328	0.046	0.063	0.094	0.089	0.492	1.096	4.441	4.997	2.903	0.532	0.519	1.304
1997	0.409	0.171	0.138	0.429	0.364	0.549	1.324	0.972	0.650	0.413	0.318	0.221	0.499
1998	0.229	0.077	0.043	0.026	0.028	0.414	1.902	1.758	10.722	5.764	1.477	0.651	1.926
1999	0.372	0.183	0.098	0.207	0.191	0.481	2.134	5.301	6.448	1.184	0.469	0.302	1.453
2001	0.360	0.166	0.098	0.222	0.774	1.734	5.996	2.744	4.106	1.427	0.700	0.624	1.590
2002	0.507	0.306	0.170	0.351	0.200	0.740	3.905	1.670	8.931	2.563	1.508	1.000	1.822

En la Figura 7.4 se muestra las curvas de frecuencias del caudal promedio mensual de los años 1964 a 2008 con probabilidades de excedencia de 10, 20, 50, 80 y 90%.

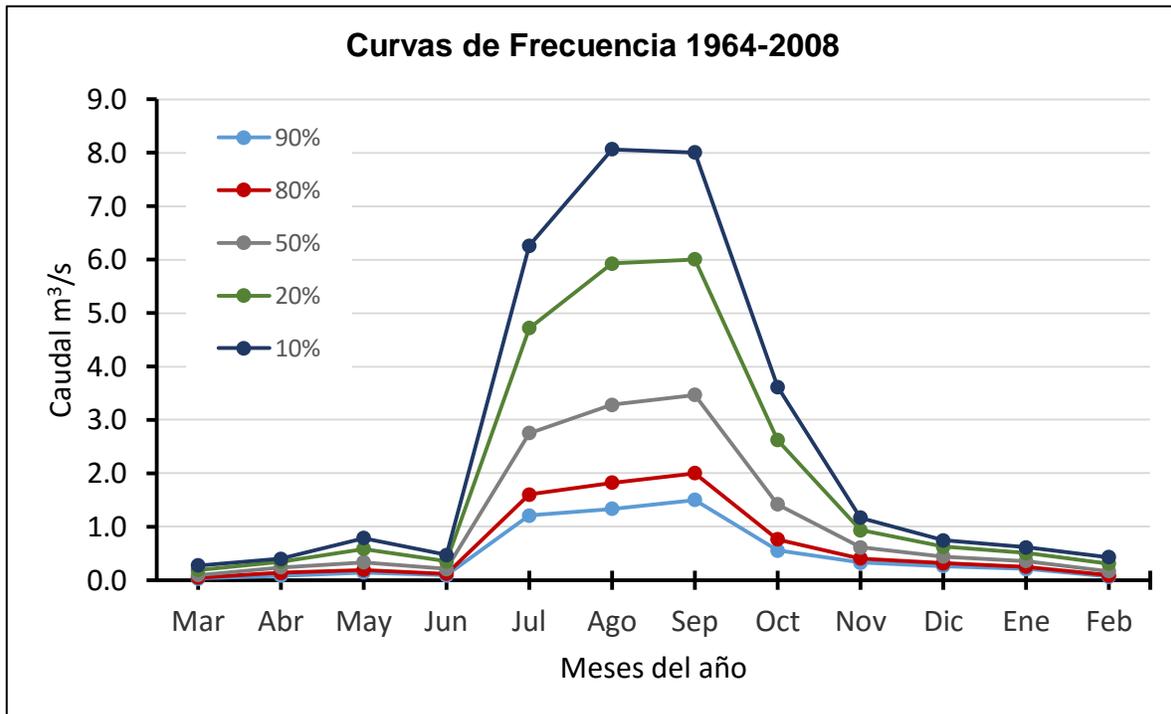


Figura 7.4. Régimen del Río Santo Domingo en la estación Santa María del Llano

Efectuando el análisis del régimen hidrológico para los 27 años de registros completos en la estación, se presentaron 5 años secos, 3 años normales y 19 años húmedos (Figura 2.1 a la Figura 2.27 del Anexo C).

7.3 Volumen anual escurrido

El volumen escurrido se entenderá como el volumen (m^3) de agua que pasa por la estación en determinado tiempo, para este estudio se calculará el volumen anual escurrido, obtenido mediante el caudal medio anual en la estación Santa María del Llano.

En la base de datos BANDAS se encuentra un análisis de escurrimiento, el cual se comparara con el obtenido mediante los caudales medios diarios, utilizados para calcular la curva de frecuencias. En la Tabla 7.2 se muestra los volúmenes escurridos y su respectiva comparación.

Se puede apreciar que sólo en algunos años difieren, lo que pudo ocurrir por algún error de procesamiento al transcribir datos por parte de CONAGUA.

Tabla 7.2. Comparación de volúmenes escurridos

Volumen anual escurrido (miles de m ³)							
Año	BANDAS	Caudales medios diarios	Error %	Año	BANDAS	Caudales medios diarios	Error %
1965	57744	57712	0.1%	1982	14044	14014	0.2%
1966	48548	48516	0.1%	1983	44251	44219	0.1%
1968	50604	50433	0.3%	1984	43971	43821	0.3%
1969	61774	61742	0.1%	1985	48526	48496	0.1%
1970	60568	60536	0.1%	1986	44736	44736	0.0%
1971	60773	60742	0.1%	1993	54083	54083	0.0%
1973	49000	48968	0.1%	1995	30627	30627	0.0%
1974	47685	47652	0.1%	1996	41246	41133	0.3%
1975	64164	64131	0.1%	1997	15748	15748	0.0%
1976	73461	73227	0.3%	1998	60736	60736	0.0%
1977	36727	36694	0.1%	1999	45821	45821	0.0%
1979	17066	17035	0.2%	2001	50131	50131	0.0%
1980	31628	31511	0.4%	2002	57448	57448	0.0%
1981	39431	39399	0.1%				

7.4 Caudales máximos anuales

El estudio de la distribución estadística de los caudales máximos anuales muestra un panorama de los caudales excepcionales relacionando la magnitud de una crecida a su frecuencia o probabilidad de ocurrencia futura.

La serie anual de máximos puede componerse de máximos diarios o de puntas instantáneas de crecidas. El caudal máximo instantáneo es el ocurrido en un lapso determinado de tiempo, generalmente durante el transcurso de una avenida. Es un parámetro que determina la capacidad de escurrimiento del río, debe ser considerado para la construcción de obras hidráulicas que no deben ser sobrepasadas y evitar daños importantes (OMM, 1994).

Con base en lo anterior, de los caudales medios diarios, se obtuvieron los caudales máximos anuales y los caudales máximos instantáneos registrados en BANDAS que se presentan en la Tabla 7.3 (Figura 7.5 y Figura 7.6), analizándolos en el software HIDESTAD y considerando lo mencionado en el capítulo 4 las funciones de distribución utilizadas son Log-Normal, Log-Pearson III y Gumbel.

Tabla 7.3. Caudales máximos registrados (mm).

Año	Caudal máximo	Caudal máximo instantáneo	Año	Caudal máximo	Caudal máximo instantáneo
1965	17.9	23.2	1982	5.0	11.5
1966	14.0	16.0	1983	27.5	31.9
1968	17.3	20.1	1984	21.4	23.7
1969	25.6	27.2	1985	17.3	23.2
1970	19.2	20.9	1986	27.8	30.1
1971	16.0	16.6	1993	24.8	26.6
1973	17.3	22.4	1995	14.7	20.2
1974	18.5	20.3	1996	18.5	19.6
1975	14.0	23.2	1997	4.2	6.3
1976	31.9	42.7	1998	25.3	26.7
1977	14.4	17.5	1999	20.9	21.7
1979	5.8	9.3	2001	20.4	24.9
1980	9.8	13.9	2002	22.3	23.4
1981	14.3	17.8	2008	15.0	-

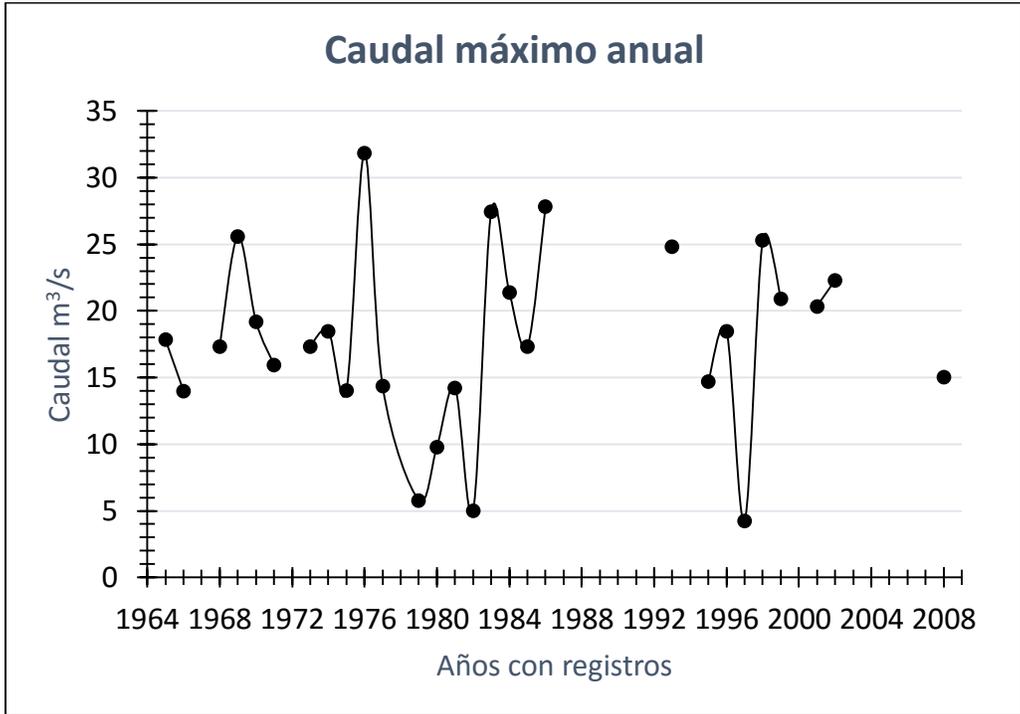


Figura 7.5. Caudales históricos máximos anuales

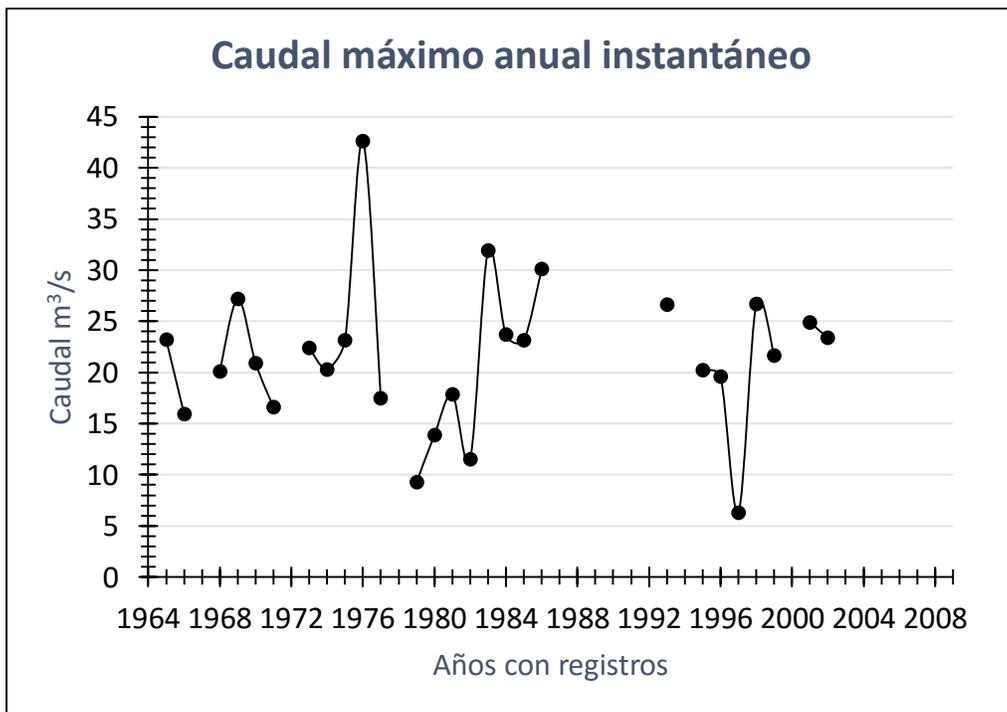


Figura 7.6. Caudales históricos máximos anuales instantáneos

Una vez aplicadas las funciones mencionadas se obtuvieron los parámetros estadísticos (Tabla 7.4): rango, media aritmética, desviación estándar, coeficiente de asimetría. Los resultados del análisis estadístico de los caudales máximos anuales y máximos instantáneos se muestran en la Tabla 7.5.

Tabla 7.4. Parámetros estadísticos de caudales anuales

Parámetro estadístico	Caudales máximos anuales	Caudales máximos instantáneos
Rango	27.6	36.4
Media	17.9	21.5
Desviación estándar	6.8	7.3
Coeficiente de asimetría	-0.2	0.5

Tabla 7.5. Análisis estadístico de caudales máximos anuales

Periodo de retorno (años)	Caudales máximos anuales			Caudales máximos instantáneos		
	Log-Normal (m ³ /s)	Log-Pearson III (m ³ /s)	Gumbel (m ³ /s)	Log-Normal m ³ /s	Log-Pearson III m ³ /s	Gumbel m ³ /s
2	16.3	18.2	16.8	20.2	21.7	20.3
5	24.7	24.4	22.8	28.0	27.9	26.8
10	30.6	27.1	26.8	33.1	30.8	31.0
20	36.6	28.8	30.6	38.1	32.8	35.1
50	44.8	30.3	35.5	44.7	34.8	40.4

La representación gráfica del ajuste de las funciones de distribución a los datos de caudales máximos anuales y caudales máximos instantáneos se muestran en la Figura 7.7 y 7.8 respectivamente.

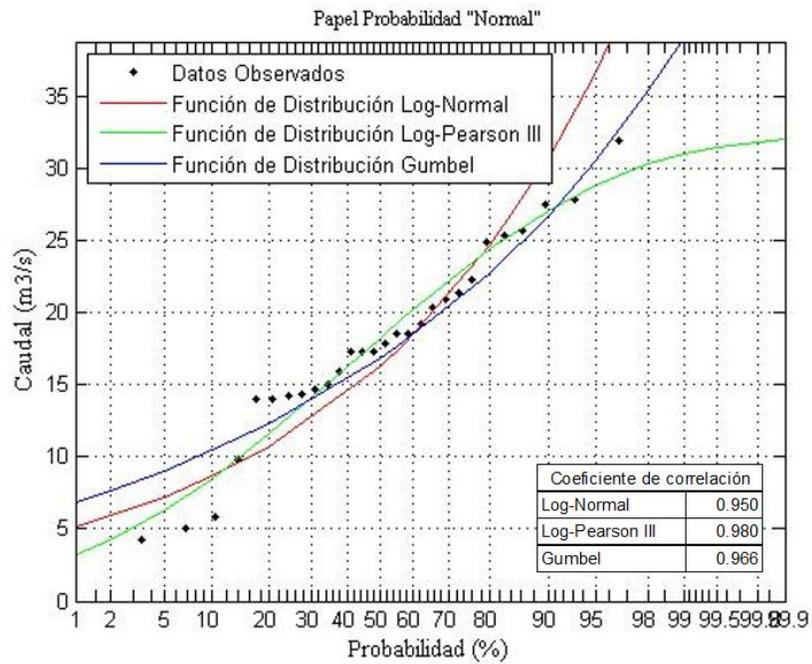


Figura 7.7. Distribución de probabilidad del caudal máximo anual

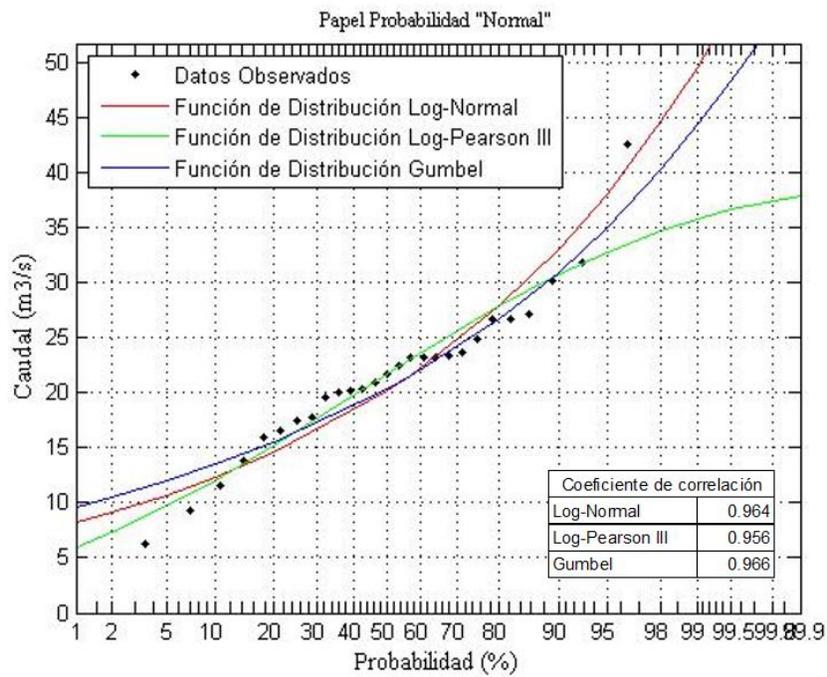


Figura 7.8. Distribución de probabilidad del caudal máximo anual instantáneo

7.5 Curva elevación-gasto

Una curva elevación-gasto relaciona la elevación de la superficie libre del agua con el gasto que pasa por la sección, y se construye con datos obtenidos de varios aforos (Aparicio, 2001). Las curvas elevación-gasto son de gran utilidad ya que permiten inferir el gasto conociendo el tirante del río.

En los ríos, la forma de las secciones transversales cambia continuamente debido a los procesos de erosión y sedimentación, por lo que se recomienda realizar aforos frecuentemente. Por ello en la estación Santa María del Llano se realizaron cuatro aforos entre el año 2015 y 2016 por parte del grupo de hidrología del CIRA.

Desafortunadamente existieron obstáculos administrativos por parte de CONAGUA ya que no se contó con el apoyo técnico y el equipo necesario para realizar los aforos. El grupo de hidrología ocupó sus propios recursos para llegar a la estación y equipo del CIRA para aforar el río de manera particular, lo que imposibilitó realizar aforos con frecuencia.

A partir de la instalación de la escala limnimétrica el aforador de CONAGUA realizó aforos diarios registrando el nivel del río en la escala limnimétrica, sin embargo estos registros proporcionados por CONAGUA no son consistentes a los obtenidos por el grupo de hidrología ni a la escala instalada, lo que orilló a inferir algunos datos del nivel del río.

7.5.1 Aforos realizados por el grupo de hidrología del CIRA

Se realizaron cuatro aforos a partir de la instalación de la escala limnimétrica los primeros tres en el mes de octubre de 2015 y el cuarto el 30 de junio de 2016.

La medición del caudal se realizó por el método de velocidad-área (Figura 7.9) que consiste en medir la profundidad del flujo en la sección transversal en cada una de

las verticales designadas con b_i a la anchura del eje transversal de río, mediante una varilla o hilo de sondeo. Al tiempo que se mide la profundidad, se efectúan observaciones de la velocidad mediante un molinete (Figura 7.10) en uno o más puntos de la vertical.

Las anchuras, profundidades y velocidades medidas permiten calcular el caudal para cada segmento de la sección transversal y la suma de estos caudales parciales será el caudal total (ISO, 1979b).

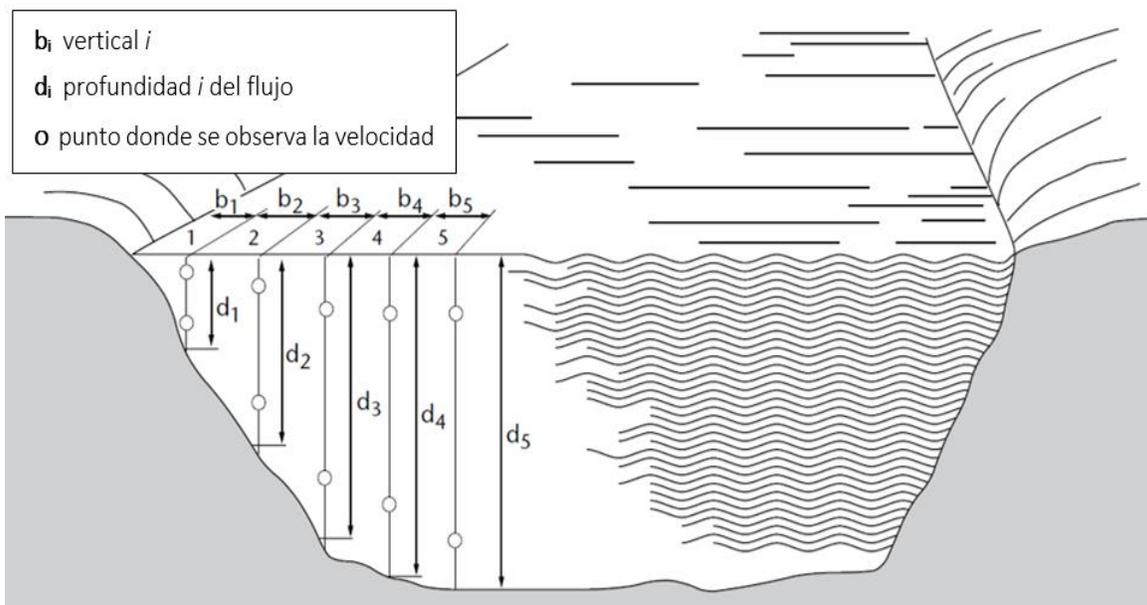


Figura 7.9. Vista de una sección transversal de un río para calcular el caudal por el método de velocidad-área (OMM, 2011).



Figura 7.10. Molinete utilizado en los aforos.

El grupo de hidrología realizó el registro de los aforos que incluye la cantidad de pulsos registrados por el molinete (n) en determinado tiempo (t), en cada vertical se realizaron mediciones de velocidad en uno, dos o tres puntos (p_i) dependiendo de la profundidad de cada vertical.

La velocidad en cada punto se calculó como:

$$V = 0.014 + 0.3233n$$

dónde:

V = velocidad en m/s

n = pulsos por segundo

El cálculo de la velocidad media en cada vertical se realizó por el método de un número discreto de puntos (OMM, 2011). En el caso de dos puntos en la vertical, la velocidad media se calculó como el promedio de las dos mediciones, para tres puntos en la vertical la velocidad media se calculó con la siguiente ecuación:

$$\bar{V} = 0.25(V_2 + 2V_6 + V_8)$$

dónde:

\bar{V} : Velocidad media en m/s

V_2, V_6, V_8 : Velocidades medidas a 0.2, 0.6 y 0.8 de la profundidad total de la vertical en m/s respectivamente.

Los datos recopilados en los aforos y los cálculos correspondientes se presentan en la Tabla 1.1 a la 1.4 del Anexo C, de acuerdo con los aforos realizados se trazó una aproximación de la sección transversal del río (Figura 7.11).

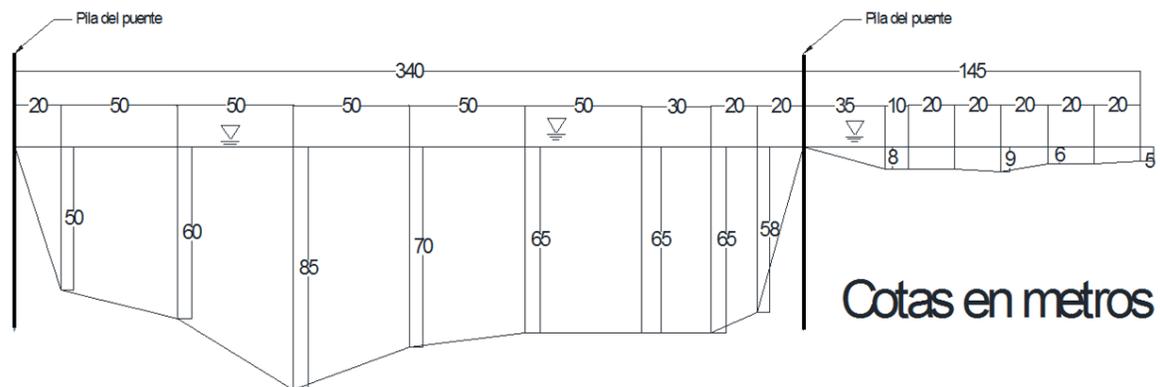


Figura 7.11. Sección transversal del río Santo Domingo en la estación Santa María del Llano

La curva de elevación-gasto se trazó considerando los cuatro aforos que realizó el grupo de hidrología y una observación de la escala limnimétrica (Figura 7.12) del río el día 10 de agosto de 2016 en donde el río alcanzó a cubrir el puente donde se encuentra la estación hidrométrica (Figura 7.13), y el gasto medido por parte del

aforador de CONAGUA el mismo día. En la Tabla 7.7 se presentan los gastos y elevaciones registrados en los aforos.



Figura 7.12. Observación de la escala limnimétrica del río.



Figura 7.13. Vista del río alcanzando el puente.

Tabla 7.6. Gastos y elevaciones registradas en los aforos

Fecha del aforo	Gasto (m ³ /s)	Elevación (m)
08/10/2015	0.813	0.72
22/10/2015	0.611	0.69
29/10/2015	1.182	0.72
30/06/2016	0.811	0.72
10/08/2016	13.285	2.30

En la Figura 7.14 se muestra la curva obtenida por los aforos realizados mostrados en un papel logarítmico para mejor visualización de los puntos obtenidos.

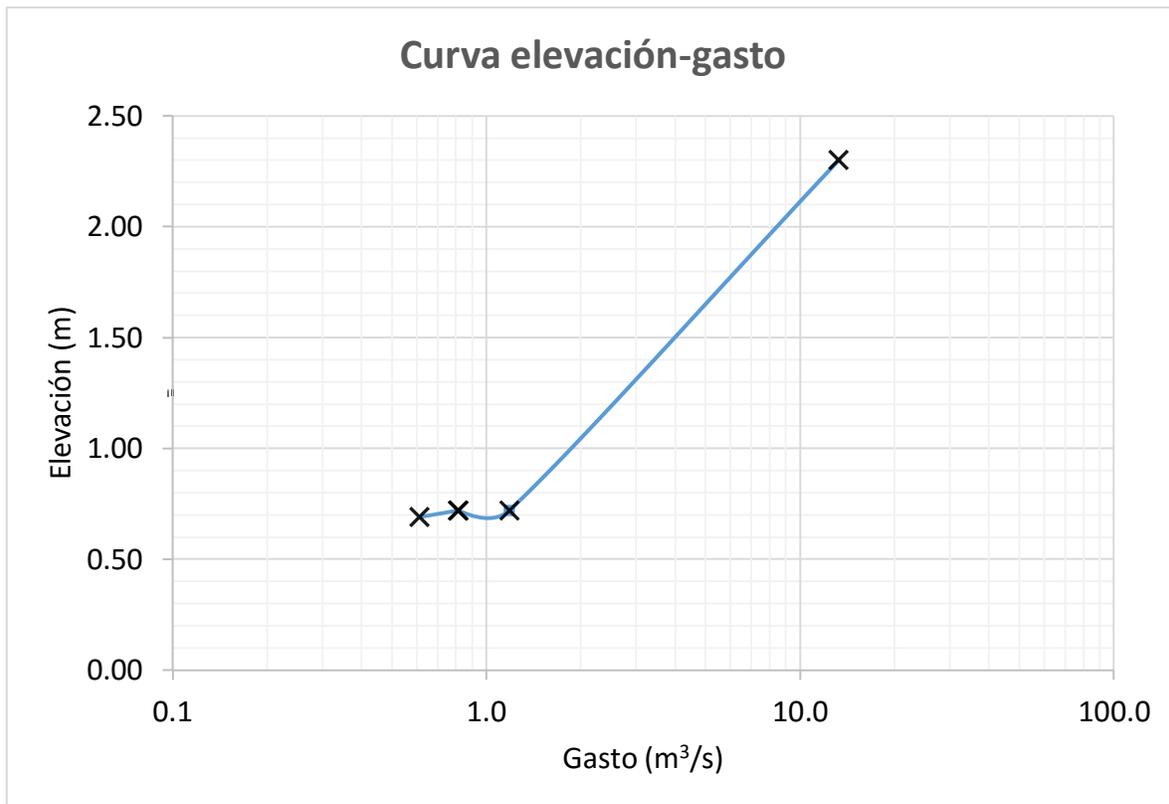


Figura 7.14. Curva elevación-gasto del río Santo Domingo

Conclusiones y recomendaciones

En la presente investigación mediante el uso del SIG TerrSet se logró delimitar y caracterizar la cuenca del río Santo Domingo. También se analizó información espacial y temporal de los componentes del ciclo hidrológico en la cuenca con el software HIDESTAD.

La hipótesis planteada fue verificada ya que gracias al uso del SIG TerrSet, mediante el módulo hidrogeomático, se identificaron parámetros fisiográficos de la cuenca y del río Santo Domingo y se estimaron los valores extremos de las variables hidrometeorológicas con el software HIDESTAD, herramientas que servirán de apoyo para prevenir inundaciones.

El objetivo principal, que consistió en describir, evaluar y cuantificar las características fisiográficas de la cuenca, así como sus componentes hidrológicos utilizando como punto exutorio la estación Santa María del Llano, fue cumplido; ya que el uso de paquetes computacionales agiliza la obtención de información pues se obtiene de forma automatizada.

Los objetivos específicos planteados también fueron cumplidos, en primera instancia utilizando el SIG TerrSet, que con un modelo digital de elevación y conociendo el vector de posición del punto exutorio, se delimitó la cuenca y con la implementación del módulo hidrogeomático fue posible la obtención de sus características fisiográficas y las del río principal.

Con base a las características fisiográficas se tiene una cuenca intermedia-pequeña, cuenta con relieve moderadamente inclinado y accidentado, de acuerdo al estado de equilibrio morfológico es una cuenca sedimentaria o vieja. Se tiene regiones de rocas resistentes y con vegetación densa con drenaje medianamente pobre. Su río principal es corto con tendencia a concentrar el escurrimiento de una lluvia intensa, formando grandes crecidas.

Implementando el uso del software HIDESTAD, se ha realizado un estudio de precipitación media y máximas diarias en la cuenca, mediante la obtención de información histórica de la base de datos de CONAGUA. En este sentido, para la precipitación máxima diaria se presenta el análisis comparativo entre las funciones teóricas de Log-Pearson III, Gumbel y Log-Normal que generan resultados parecidos, sin embargo la función Log-Pearson III muestra el mejor ajuste.

La falta de información en las estaciones meteorológicas de datos de radiación, humedad atmosférica y velocidad del viento; dificultan la obtención de la evapotranspiración en la cuenca Santo Domingo por el método FAO Penman-Monteith, a pesar de esto, el método de Heargraves-Samani tiene una buena aproximación comparada con la ET_0 calculada por red de estaciones del INIFAP.

Los resultados obtenidos al analizar el escurrimiento superficial de la cuenca, mediante la aplicación de la curva de frecuencias basada en datos históricos de los caudales medios diarios entre 1965 a 2002, determinando las probabilidades de ocurrencia al utilizar las funciones Normal, Log-Normal, Pearson III y Gamma, donde la función Log-Normal tiene el mayor coeficiente de correlación; muestran que se han presentado con mayor frecuencia años húmedos.

Se consiguió comparar los caudales máximos anuales y los caudales máximos instantáneos, mostrando el análisis estadístico de las funciones Log-Normal, Log-Pearson III y Gumbel, analizando los cuántiles para periodos de retorno de 2 a 50

años. Además se constata que las funciones generan resultados parecidos con diferencias máximas de 12% para periodos de retorno de 50 años.

La rehabilitación de la estación hidrométrica Santa María del Llano es necesaria para tener registros del caudal que se presenta en el río Santo Domingo, la instalación de la escala limnimétrica permitió el cálculo del gasto del río referenciado al nivel del mismo mediante los aforos que realizó el grupo de hidrología.

Se trazó la curva de elevación-gasto con los pocos datos de aforos que se realizaron. Debido a que la parte experimental estuvo limitada por que no se tuvo apoyo suficiente por parte de la universidad (vehículo, entrega de material del proyecto: molinete, escandallo). Es necesario hacer suficientes aforos con variación en el nivel para hacer una verdadera curva de elevación-gasto que se debe de validar de vez en cuando.

El aforador y el personal de CONAGUA Estado de México no cuentan con una capacitación adecuada para realizar los aforos y estos no se realizan conforme a los estándares.

Finalmente, las principales recomendaciones son:

- Implementar el uso paquetes computacionales que agilicen la obtención de información y proporcionen resultados más precisos.
- Continuar con la rehabilitación de la estación hidrométrica Santa María del Llano incluyendo la instalación del limnógrafo para acceder a las mediciones de nivel de forma remota.
- Propiciar la capacitación del personal administrativo y aforadores por parte de CONAGUA, para así obtener información de calidad y que estén dispuestos a trabajar en conjunto con instituciones educativas como el CIRA.

- Continuar con los aforos en la estación Santa María del Llano para trazar una curva elevación-gasto confiable.

ANEXO A.

Tabla 1. Valores erróneos de las precipitaciones anuales

Año		1961	1962	1963	1964	1965	1966	1967	1968	1969	1970	1971	1972	1973	1974	1975
Estación	Altitud															
15025	2538	N.A.	N.A.	N.A.	999.1	909.4	938.6	1125.5	998.4	655.3	702.7	1011.1	533.8	960	862.1	1116.5
15036	2535	653.6	807.1	844	790.3	936.2	897.9	973.4	707.2	741	794.4	774.2	635.3	998.8	730.1	746.1
15037	2772	N.A.	N.A.	1051.6	951.9	1011.1	916	1234.6	866.5	927.6	845.3	N.A.	619.3	1048.6	660.2	1150.8
15071	2710	592	737.5	810.2	951.1	860.2	862	1040.4	742.8	797.2	868.7	1014.4	761	873	806.5	842.9
15078	2718	796.8	661.9	891.5	839.6	774	715.5	1084	884.7	607.2	897.7	906.1	717.8	961.5	754.5	846.1
15084	2658	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	924.6	995.5	1295.4	877.9	879.4	1040.2	1122.9	493.2	1151.6	1095.6	974
15093	2658	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	1403.3	1162	1031.2	1230.5	1064.6	1124.6	1183.5	1170.5
15111	2986	925.5	969	1046	933.5	1038.5	930	848.5	1201	936.5	971.3	1127.7	755	1158	925	1103
15112	2696	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	1087.8	922.2	1259	901	843	986	1309	853	979.6	994	997
15142	2711	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	958.7	551.8	698	673.4	748.5	913.6	673.4	680	675.8	684.6
15158	2552	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	694.9	957.8	703.2	659	677.5	752.4	743.7	877.8	753.5	830.3
15196	2264	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	895.1
15239	2831	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
15264	2576	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
15308	2570	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
15317	2631	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
15333	2641	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
15341	2545	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
15372	2540	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
15390	2650	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
15394	2890	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
		Valores incorrectos				Valores incompletos				Valores con errores de escritura						

Tabla 1. Valores erróneos de las precipitaciones anuales. (Continuación)

Año		1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	
Estación	Altitud																
15025	2538	1357.6	856.7	850.5	631.9	888	1034.6	805.6	800.4	822.2	802.5	900.5	903.5	684.8	811	966.2	
15036	2535	871.9	722.2	817.7	594.3	471.9	809.3	544.5	652.5	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	627	N.A.	
15037	2772	1298.5	739.4	897	690.6	724.4	1003.5	682.3	1041.1	748.3	844.1	1110.4	881.5	457.8	952.5	1025	
15071	2710	1110.7	772.7	778.6	602	861	831.5	594.7	779.1	644.1	773.1	909.1	783.1	653.8	744.8	982.4	
15078	2718	1016.1	741.4	813	593.8	925.6	730.7	587.6	762	650.9	803.1	935.1	717	715.8	624.4	N.A.	
15084	2658	1123.7	940.5	1155.3	797	N.A.	N.A.	553.7	N.A.	694.7	1006.7	817.8	N.A.	N.A.	919.8	1156.2	
15093	2658	1252.2	940.8	1311	688.4	1054.4	1281.7	829	1016.4	1041.5	1043.4	1235.5	N.A.	924.1	470.5	779.05	
15111	2986	1242	854	858	725.5	906.1	850.6	643.3	474.6	717.4	705.9	954.8	982.7	508.8	709.9	N.A.	
15112	2696	1136.3	924.1	1022	612	843.5	807	497.6	725	739.3	553	437.4	834.2	795	381.5	N.A.	
15142	2711	889.5	634.2	658.1	324.5	487.6	364.4	175.4	164.2	140.8	301.5	349.1	152.6	268.2	288.4	249.2	
15158	2552	973	766.5	569.8	543.5	681	581.4	571.4	673.5	601.6	788	851	647.7	650	673.7	N.A.	
15196	2264	1098	548.9	633.2	N.A.	1031.9	957.6	378.7	N.A.	N.A.	865.9	842.6	768.8	N.A.	N.A.	N.A.	
15239	2831	N.A.	N.A.	N.A.	568.9	826.5	820.9	575.5	779.5	697	835.4	819.1	688	627.4	502.7	821.9	
15264	2576	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	953.8	391.9	495.4	652.6	414.0	630.5	465.9	352.6	339.7	505.4	
15308	2570	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	463.8	558.1	438.0	573.1	601.1	649.5	647	596.8	502.3	518.5	735	
15317	2631	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	541.9	N.A.	989.9	1036.5	997.3	909	835.5	726.5	1198.5	
15333	2641	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	521.4	927.8	677.8	915	450.6	585	529.5	453.8	702.7	
15341	2545	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	556.4	345.8	N.A.	563	411.0	525.8	323.3	396.5	821.8	
15372	2540	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	864.5	710.1	740.1	600.6	959.6	
15390	2650	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	808.65	711.6	546.2	498.8	645	
15394	2890	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	840.29	908.3	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	
		Valores incorrectos				Valores incompletos				Valores con errores de escritura							

Tabla 1. Valores erróneos de las precipitaciones anuales. (Continuación)

Año		1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	
Estación	Altitud															
15025	2538	889.5	999	861.6	787.5	739.1	827.9	620.6	874.4	574.2	714.7	812.8	900.4	1109.9	1110.2	
15036	2535	680.6	665.2	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	710.45	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	
15037	2772	736	967.5	409	651.5	578.5	911.7	584	966.5	808.2	455.1	0	0.1	314	N.A.	
15071	2710	819.1	972	659.9	744.8	747	747.6	714.4	779.4	690.9	968.4	964.5	751.2	904.1	N.A.	
15078	2718	N.A.	963	617	671	685	862	683	793	612	812	283	701.9	N.A.	N.A.	
15084	2658	1086.4	N.A.	715	1067	844	635.5	871.1	931.2	458.4	901	1099.72	1315.77	1212.7	1085.05	
15093	2658	N.A.	N.A.	343	711	N.A.	721.2	733	970.6	839	986.8	873.2	580.5	N.A.	N.A.	
15111	2986	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	
15112	2696	N.A.	N.A.	473.7	610	N.A.	475.5	833.4	990.4	724.1	852.8	880.9	765.7	956.8	1067.6	
15142	2711	308.7	450.3	359.1	367.5	376.5	268.1	184.3	456.8	393.4	459	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	
15158	2552	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	776.7	701.7	605	825.9	588	658.5	1010.8	304.4	512	673	
15196	2264	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	
15239	2831	N.A.	N.A.	N.A.	615.41	755.3	692.4	675.7	797.3	603.9	413.6	713.64	N.A.	N.A.	631.3	
15264	2576	682.5	528.8	657.1	569.8	N.A.	106.0	N.A.	633.3	305.5	553.5	509.5	813.5	714	N.A.	
15308	2570	684.5	702.2	597.5	558.9	730.7	608.4	532	674	517	568.5	752.5	624.5	712.79	569.07	
15317	2631	865	1046.2	735.2	844.8	746.8	766	972.6	421	247	1217	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	
15333	2641	1164	1119.5	659.5	682.9	794	712	687.5	727.5	564	709.5	N.A.	839.9	N.A.	634	
15341	2545	529.8	881.9	N.A.	N.A.	744.7	792.9	532.7	822.6	520.6	1448.3	703.3	1254.7	1188.9	919	
15372	2540	669.6	1147.6	734.4	610.8	657.2	789.5	652.7	729.3	691.9	819.9	747.8	667.3	1061.5	669	
15390	2650	649.72	751.92	730.23	685.9	806.52	676.35	820.01	891.4	607.9	695.5	995.21	804.4	873.5	N.A.	
15394	2890	703.07	1556.8	967.3	1135.5	1020.73	825.92	900.01	952.54	1124.13	N.A.	1055.28	1024.81	N.A.	N.A.	
		Valores incorrectos			Valores incompletos				Valores con errores de escritura							

Tabla 1. Valores erróneos de las precipitaciones anuales. (Continuación)

Año		2005	2006	2007	2008	2009	2010
Estación	Altitud						
15025	2538	767.4	1182.3	N.A.	1842.5	N.A.	N.A.
15036	2535	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
15037	2772	472.5	565.8	980.3	2577.2	N.A.	N.A.
15071	2710	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
15078	2718	N.A.	N.A.	N.A.	805	724	N.A.
15084	2658	773.54	862.38	1168.1	1256.4	964.98	N.A.
15093	2658	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
15111	2986	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
15112	2696	865.6	1043.1	N.A.	1007.5	905.7	N.A.
15142	2711	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
15158	2552	519.1	714.9	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
15196	2264	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
15239	2831	393.7	668.29	N.A.	436.6	N.A.	N.A.
15264	2576	1013.8	710.6	823.9	785.3	767.3	1061.1
15308	2570	387	691	665	655	N.A.	N.A.
15317	2631	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
15333	2641	422	791.1	N.A.	918.5	N.A.	N.A.
15341	2545	739.1	971.5	N.A.	786.3	N.A.	N.A.
15372	2540	578.7	590.5	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
15390	2650	N.A.	N.A.	845.2	710.7	812.6	771.5
15394	2890	N.A.	N.A.	1123.4	N.A.	N.A.	N.A.
		Valores incorrectos			Valores incompletos		

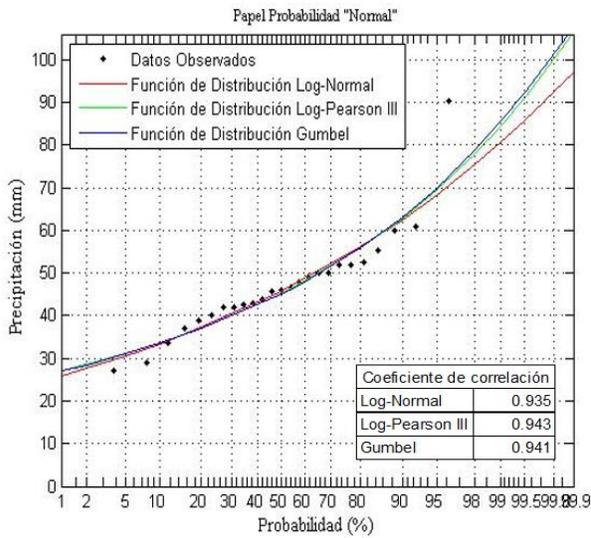


Figura 1.1. Precipitación máxima diaria, estación 15025.

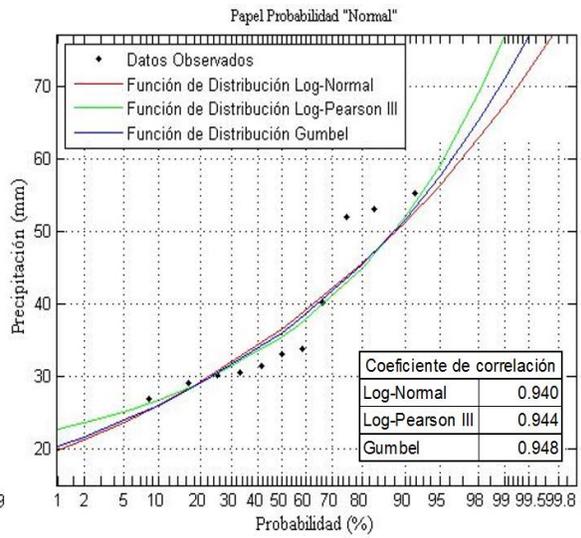


Figura 1.2. Precipitación máxima diaria, estación 15036.

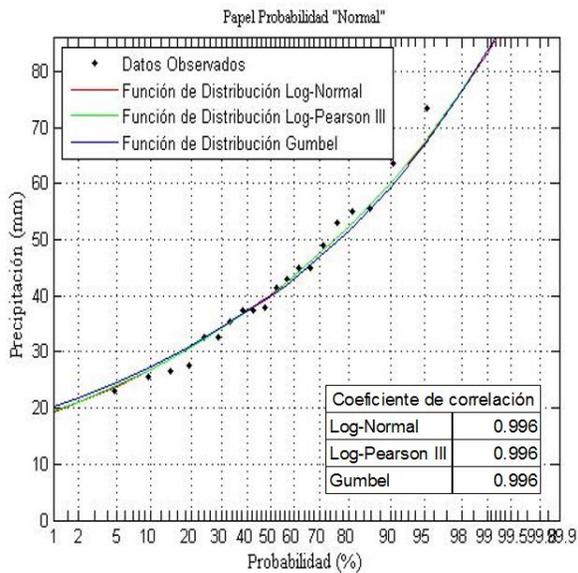


Figura 1.3. Precipitación máxima diaria, estación 15037.

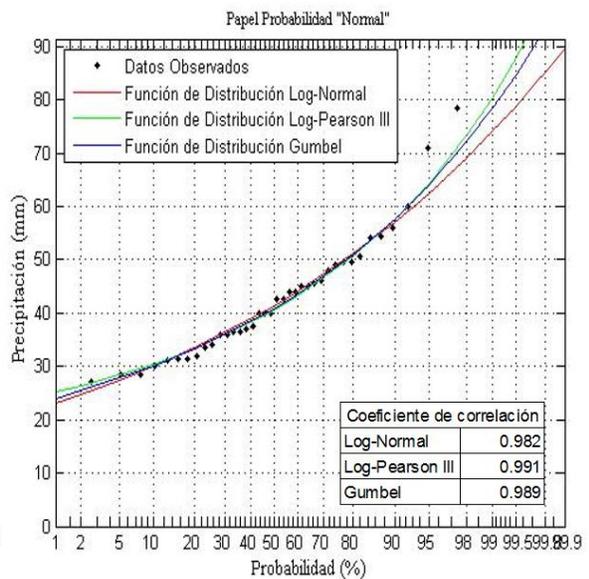


Figura 1.4. Precipitación máxima diaria, estación 15071.

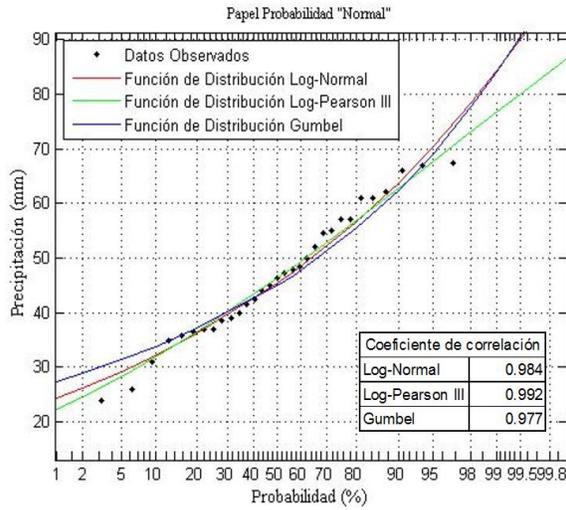


Figura 1.5. Precipitación máxima diaria, estación 15078.

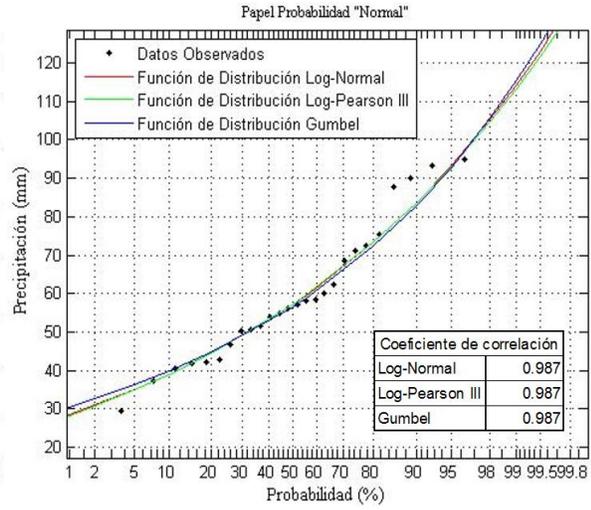


Figura 1.6. Precipitación máxima diaria, estación 15084.

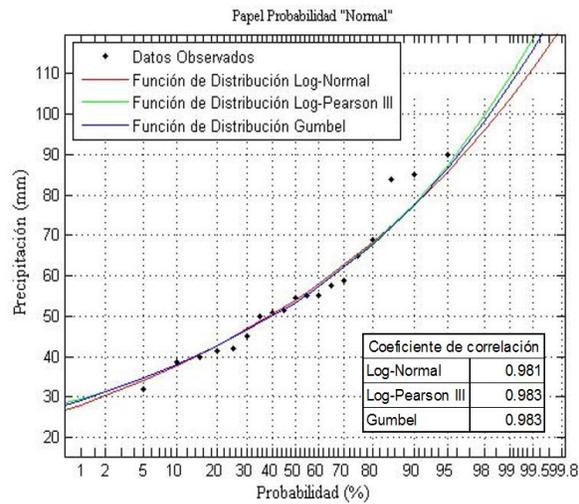


Figura 1.7. Precipitación máxima diaria, estación 15093.

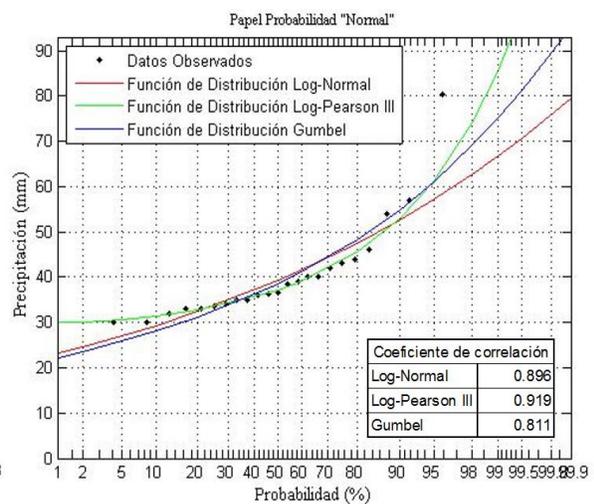


Figura 1.8. Precipitación máxima diaria, estación 15111.

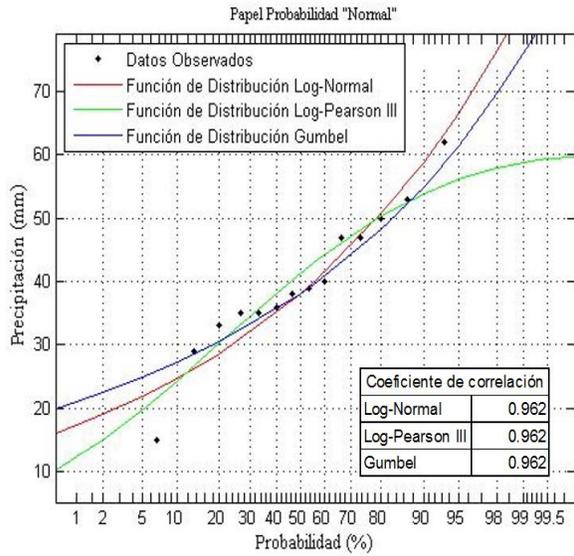


Figura 1.9. Precipitación máxima diaria, estación 15112.

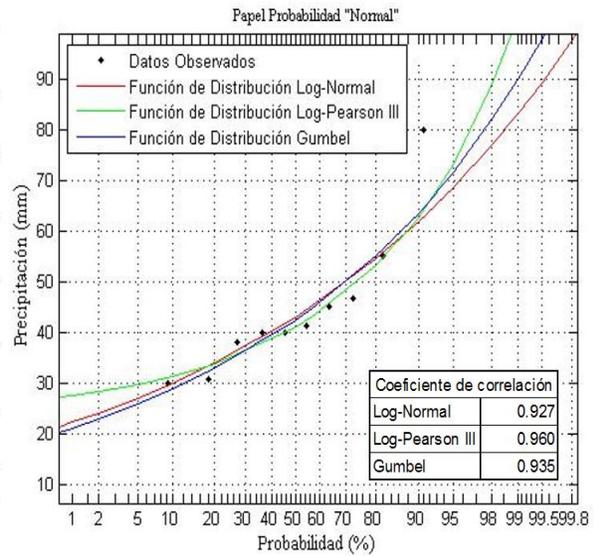


Figura 1.10. Precipitación máxima diaria, estación 15158.

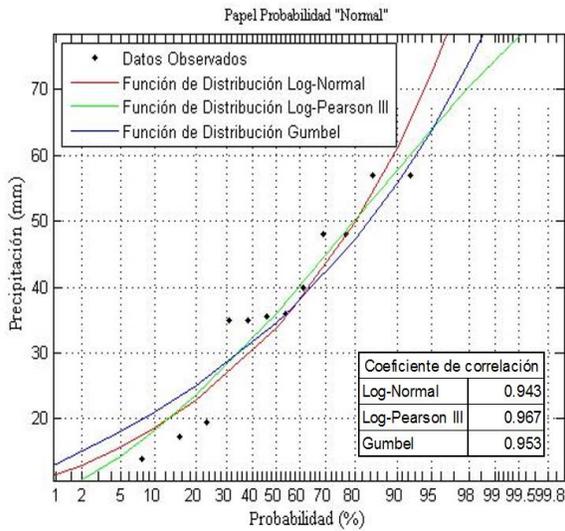


Figura 1.11. Precipitación máxima diaria, estación 15196.

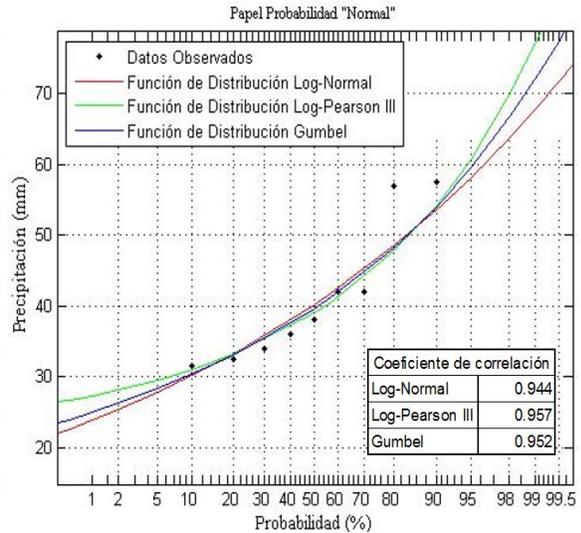


Figura 1.12. Precipitación máxima diaria, estación 15239.

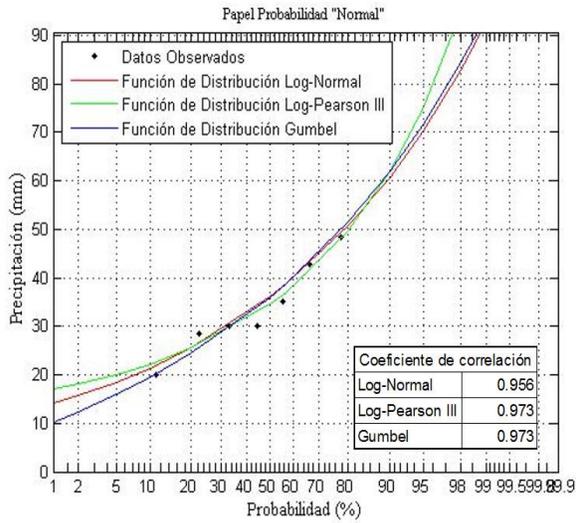


Figura 1.13. Precipitación máxima diaria, estación 15264.

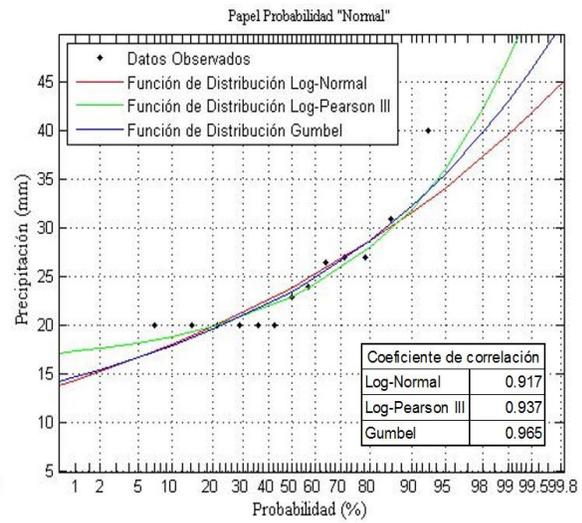


Figura 1.14. Precipitación máxima diaria, estación 15308.

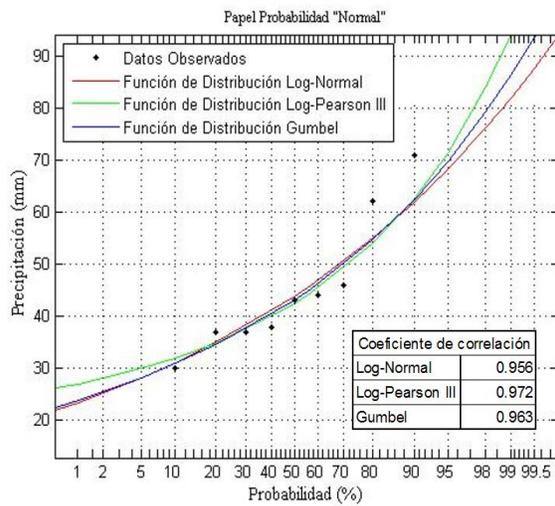


Figura 1.15. Precipitación máxima diaria, estación 15317.

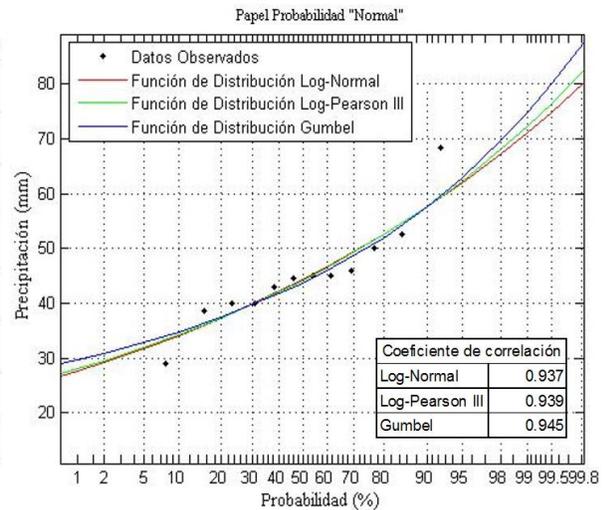


Figura 1.16. Precipitación máxima diaria, estación 15333.

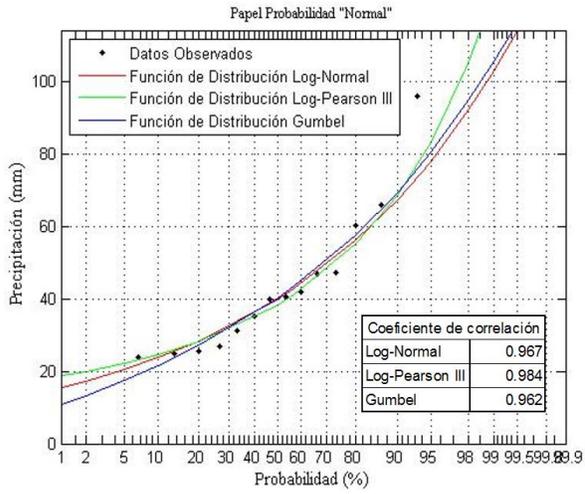


Figura 1.17. Precipitación máxima diaria, estación 15341.

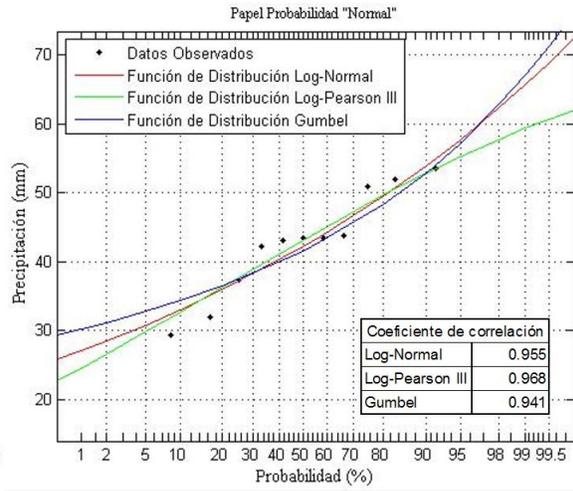


Figura 1.18. Precipitación máxima diaria, estación 15372.

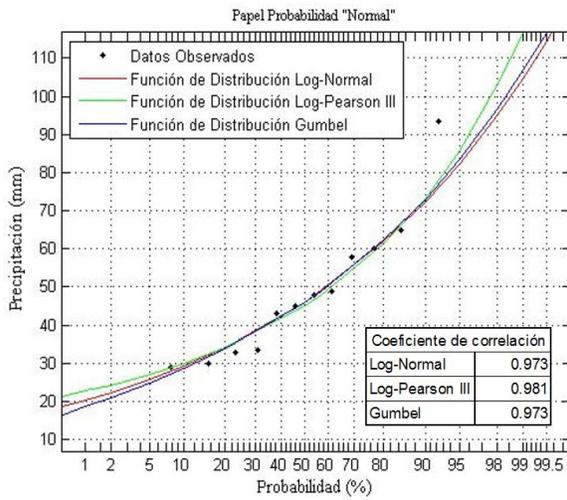


Figura 1.19. Precipitación máxima diaria, estación 15390.

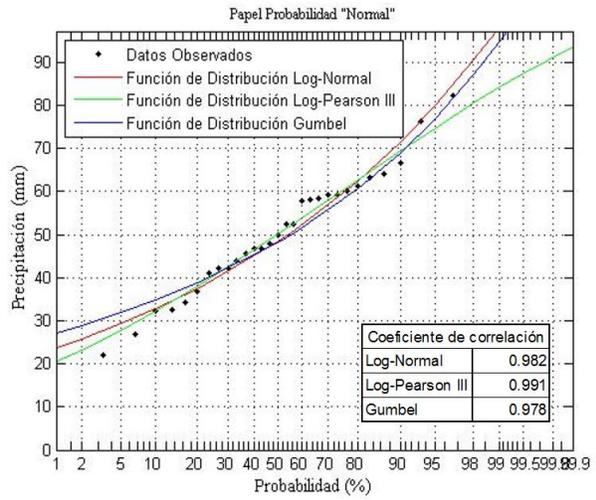


Figura 1.20. Precipitación máxima diaria, estación 15394.

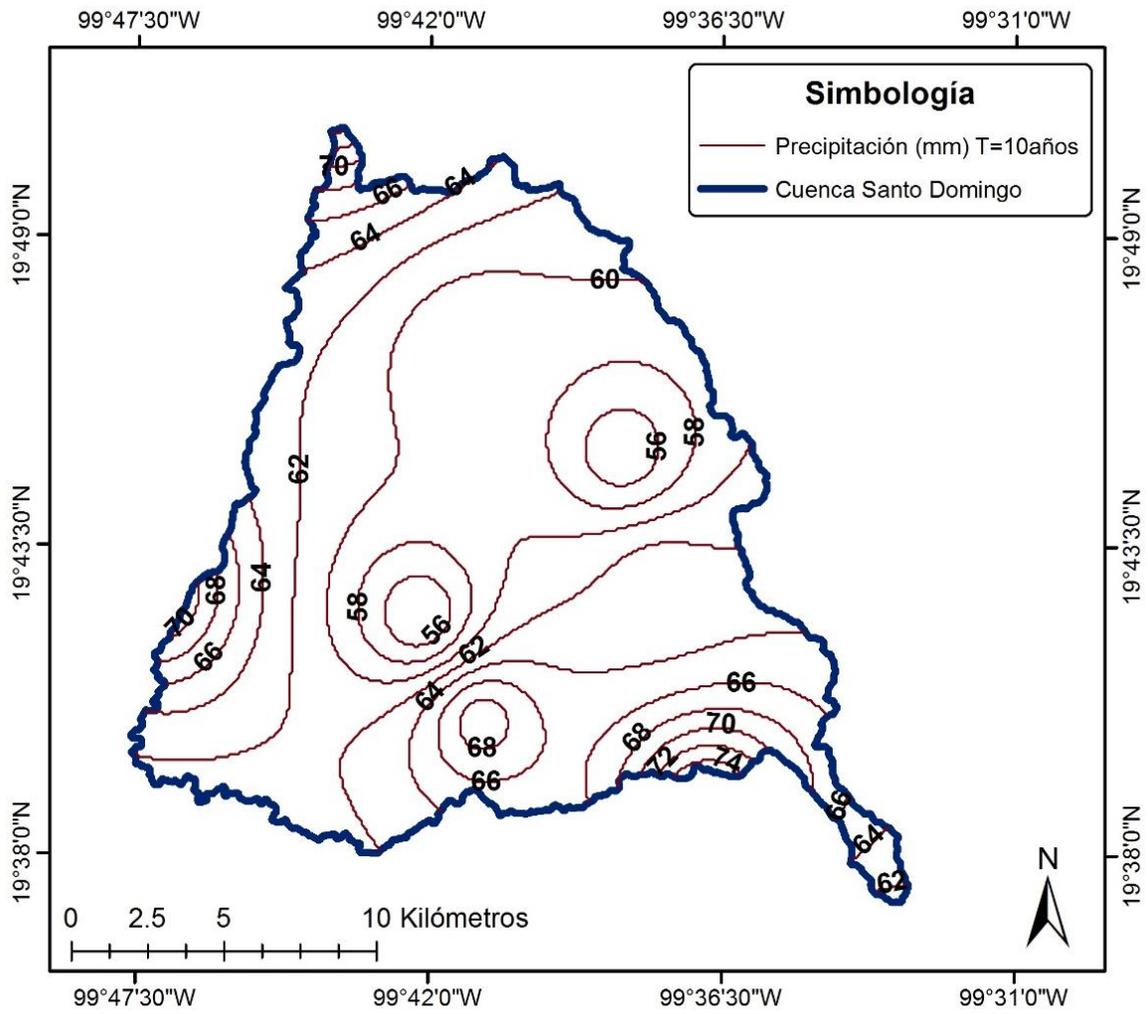


Figura 2. Distribución espacial de las precipitaciones máximas diarias para T=10 años.

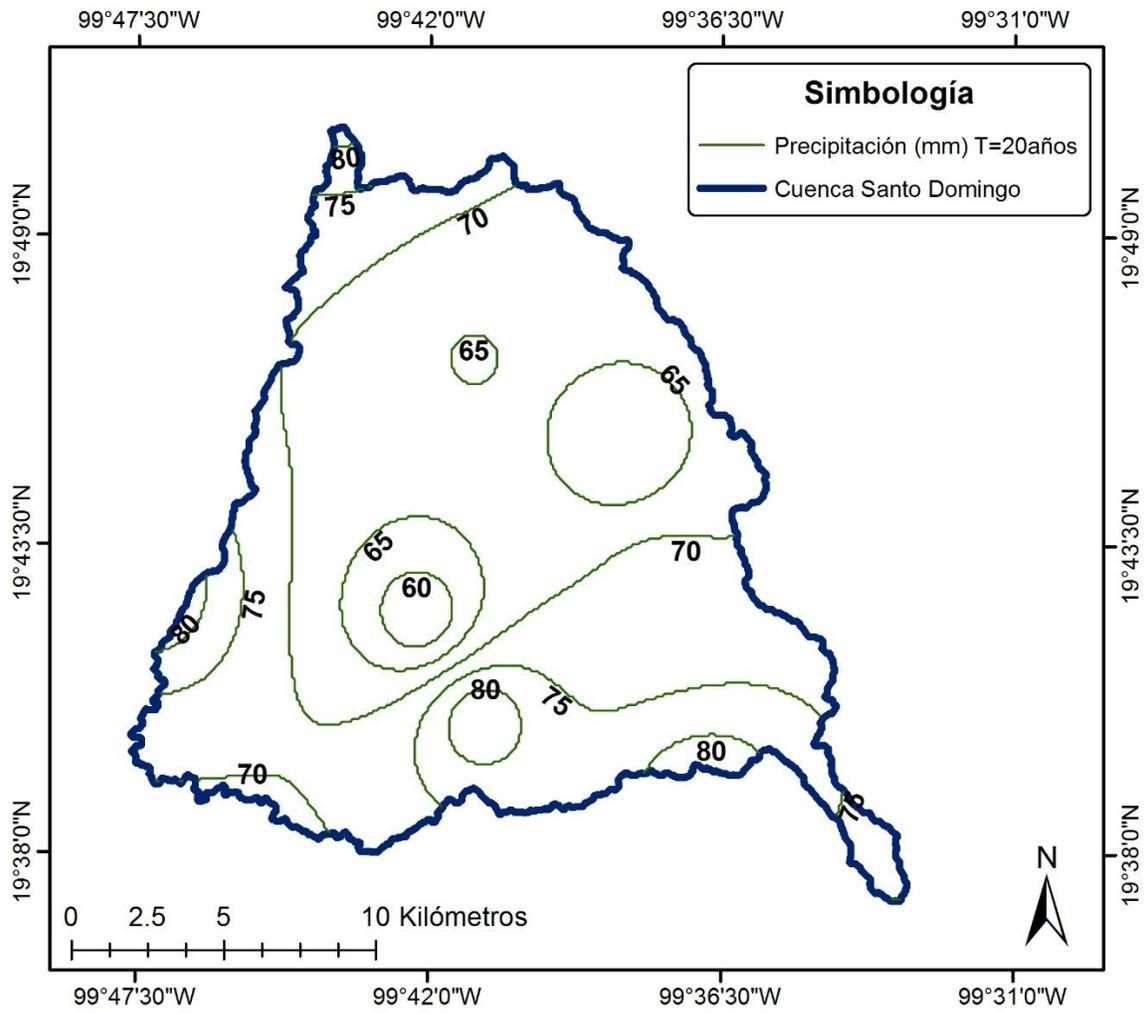


Figura 3. Distribución espacial de las precipitaciones máximas diarias para T=20 años.

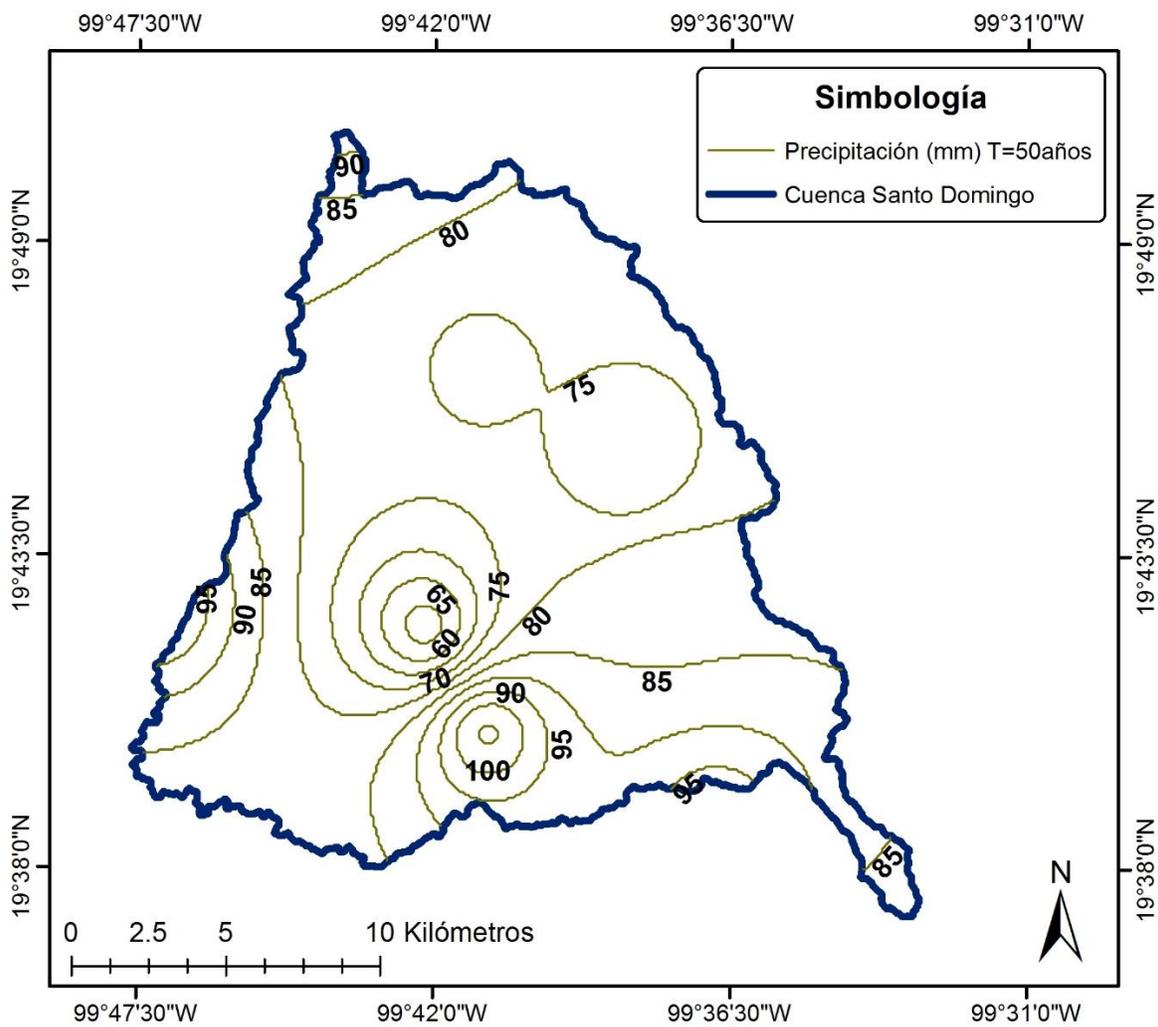


Figura 4. Distribución espacial de las precipitaciones máximas diarias para T=50 años.

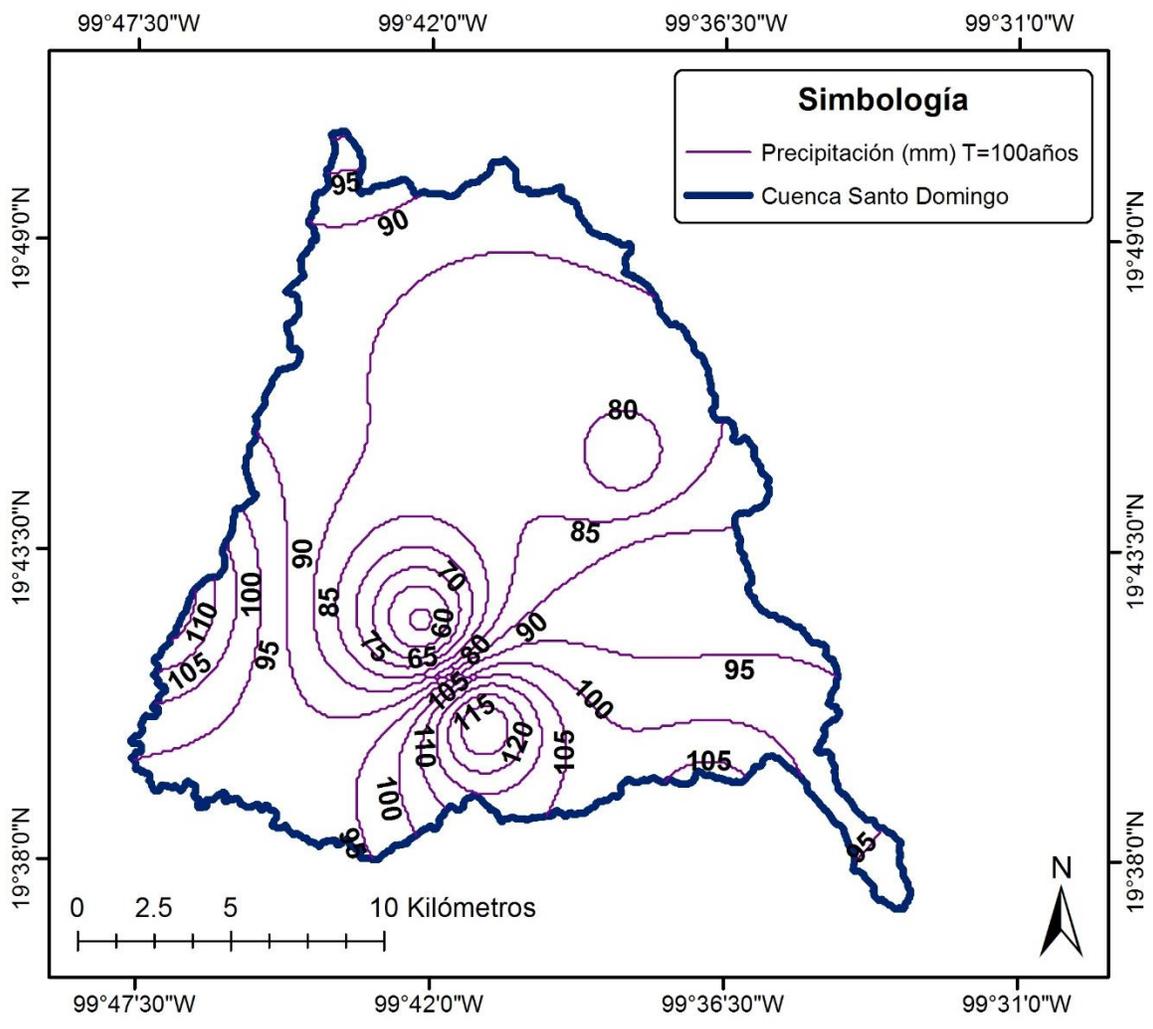


Figura 5. Distribución espacial de las precipitaciones máximas diarias para T=100 años.

Tabla 2. Temperatura media mensual por estación

Estación	Periodo de registro			Temperatura media mensual (C°)											
	Inicio	Final	Años	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
15025	1963	2009	46	9.6	10.7	12.6	14.3	15.2	15.1	14.4	14.4	14.4	13.2	11.4	10.1
15036	1923	2003	80	11.2	12.1	14.2	16.2	17.3	16.7	15.8	15.8	15.6	14.5	12.8	11.7
15037	1962	2011	49	10.7	11.5	13.0	14.1	14.4	13.8	13.1	13.2	13.2	12.6	11.8	10.9
15071	1961	2009	48	9.0	9.9	12.0	13.7	14.6	14.6	13.9	13.7	13.5	12.1	10.4	9.5
15078	1961	2009	48	9.8	10.9	13.0	14.5	15.0	14.4	13.5	13.5	13.3	12.3	11.0	10.2
15084	1964	2010	46	10.4	11.5	13.4	15.2	15.7	15.1	14.5	14.3	14.0	12.9	11.6	10.8
15093	1967	2008	41	11.0	12.2	14.1	15.5	16.2	15.5	14.7	14.6	14.3	13.4	12.1	11.2
15111	1961	1990	29	12.1	12.7	14.0	15.3	15.1	14.0	13.4	13.2	13.2	13.1	12.7	12.1
15112	1964	2010	46	9.6	10.8	12.6	14.3	15.0	14.5	13.7	13.7	13.5	12.4	10.8	9.9
15158	1965	2008	43	10.2	11.2	12.9	14.6	15.6	15.2	14.2	14.0	14.1	13.3	11.7	10.4
15196	1974	1993	19	11.8	12.1	13.1	14.6	14.6	14.2	14.0	14.1	14.3	13.8	12.8	11.8
15239	1976	2008	32	9.6	10.4	11.6	13.4	14.5	14.9	14.1	14.0	13.7	12.5	10.7	10.0
15264	1980	2010	30	11.1	12.0	13.5	15.2	16.3	15.8	15.1	15.0	14.9	14.1	12.3	11.7
15308	1980	2009	29	11.8	12.6	13.7	14.5	14.9	14.7	13.5	13.4	13.5	13.0	12.5	12.0
15317	1981	2009	28	11.1	11.6	13.2	14.8	14.8	15.0	14.2	14.4	14.2	13.2	12.1	10.8
15333	1981	2008	27	10.4	11.9	13.5	14.7	14.9	14.6	14.0	14.2	13.5	12.7	12.3	11.2
15341	1982	2008	26	12.2	12.5	13.6	14.5	15.5	15.6	14.5	15.0	14.4	14.5	13.1	12.0
15372	1985	2006	21	11.1	12.7	14.3	16.4	17.1	16.9	16.1	16.0	16.3	14.8	13.1	11.2
15390	1986	2010	24	9.6	10.5	12.4	14.2	15.5	15.6	14.8	15.0	15.0	13.2	11.4	10.1
15394	1983	2008	25	11.8	13.1	14.6	16.2	16.3	15.8	15.1	15.3	14.6	13.8	13.3	12.0

ANEXO B.

Tabla 1. Evapotranspiración de referencia mensual por el método de Heargraves-Samani

No.	Estación	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	ET ₀ mm/año
1	15025	98	118	141	158	159	142	135	132	124	116	104	74	1499
2	15036	98	117	144	162	164	145	130	128	117	112	102	73	1491
3	15037	91	108	131	145	147	133	126	123	114	107	96	68	1389
4	15071	92	112	137	155	155	135	123	120	110	104	96	78	1418
5	15078	90	109	134	151	151	132	118	115	105	99	92	77	1373
6	15084	95	115	140	158	161	144	132	127	116	107	98	85	1478
7	15093	98	121	146	165	166	147	136	133	121	111	101	77	1521
8	15111	98	115	141	167	169	155	141	137	125	115	102	73	1538
9	15112	96	117	143	161	160	144	132	127	118	110	100	78	1485
10	15158	96	116	141	160	164	148	137	132	125	114	102	76	1511
11	15196	93	109	129	147	150	142	130	129	126	117	101	80	1454
12	15239	91	109	132	149	150	137	121	116	108	106	95	76	1390
13	15264	99	120	142	158	163	146	133	129	118	112	103	77	1501
14	15308	99	122	149	172	178	162	151	148	137	125	109	81	1633
15	15317	100	118	144	161	152	143	125	124	114	111	103	81	1475
16	15333	99	123	147	170	172	157	148	144	131	120	107	93	1611
17	15341	111	128	147	161	171	161	140	143	130	122	108	84	1606
18	15372	103	127	149	172	175	155	143	137	127	118	108	76	1590
19	15390	97	115	140	156	161	144	131	130	120	114	103	80	1491
20	15394	91	115	135	157	157	150	141	142	126	112	101	76	1503

Tabla 2. Evapotranspiración de referencia mensual por el método de Thornthwaite

No.	Estación	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	ET ₀ mm/año
1	15025	34	42	53	66	74	75	69	68	65	55	44	36	681
2	15036	37	43	57	72	82	79	72	70	67	57	46	39	721
3	15037	41	46	56	66	70	67	63	61	59	53	47	41	672
4	15071	34	40	52	65	73	74	69	66	63	52	41	36	665
5	15078	37	43	57	68	74	72	65	64	60	51	43	38	672
6	15084	37	44	57	70	76	74	69	66	61	52	44	38	688
7	15093	39	46	59	71	77	74	68	66	61	53	45	39	699
8	15111	45	50	60	70	72	66	62	59	56	53	49	45	687
9	15112	36	43	55	67	74	72	67	65	61	52	42	37	672
10	15158	37	43	54	67	76	74	68	64	62	55	45	37	684
11	15196	43	47	55	66	68	67	65	64	63	57	49	43	688
12	15239	36	42	50	62	72	75	70	67	63	53	42	37	669
13	15264	38	45	55	68	77	75	71	68	64	57	45	41	704
14	15308	44	50	58	66	71	71	63	61	58	53	48	44	686
15	15317	41	45	56	68	70	73	67	66	63	54	46	39	687
16	15333	38	47	58	68	72	71	66	66	59	52	48	41	684
17	15341	44	47	55	64	72	74	67	67	61	59	49	42	702
18	15372	36	45	56	73	80	80	74	71	70	58	46	36	726
19	15390	34	40	52	65	75	77	72	71	68	54	43	36	686
20	15394	40	49	60	73	76	74	69	68	61	54	49	41	713

Tabla 3. Evapotranspiración de referencia mensual por el método de Turc.

No.	Estación	t	L	P	ET ₀ (mm/año)
1	15025	12.9	731.8	876.7	574
2	15036	14.5	814.2	758.7	571
3	15037	12.7	719.1	879.8	568
4	15071	12.2	697.2	810.3	540
5	15078	12.6	715.7	777.7	539
6	15084	13.3	748.7	981.4	607
7	15093	13.7	772.1	1006.3	624
8	15111	13.4	755.1	911.7	594
9	15112	12.6	713.2	892.3	568
10	15158	13.1	740.1	708.8	526
11	15196	13.4	756.6	849.1	578
12	15239	12.4	707.5	700.8	511
13	15264	13.9	783.1	714.0	543
14	15308	13.3	751.7	624.0	495
15	15317	13.3	748.3	901.8	588
16	15333	13.2	743.1	755.4	543
17	15341	13.9	784.0	805.4	576
18	15372	14.7	823.7	747.3	569
19	15390	13.1	740.5	754.3	542
20	15394	14.3	804.5	1009.9	642

ANEXO C.

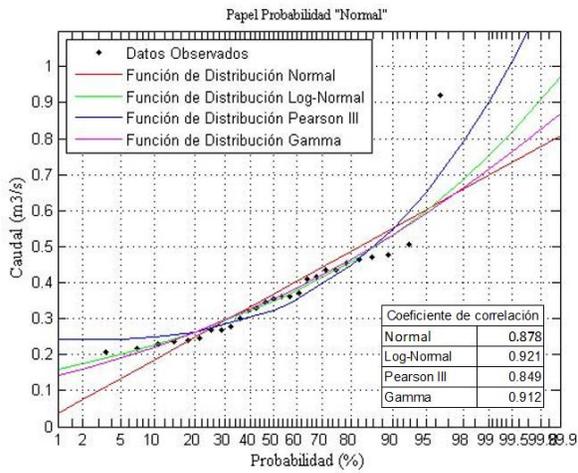


Figura 1.1. Distribución del caudal medio del mes de Enero

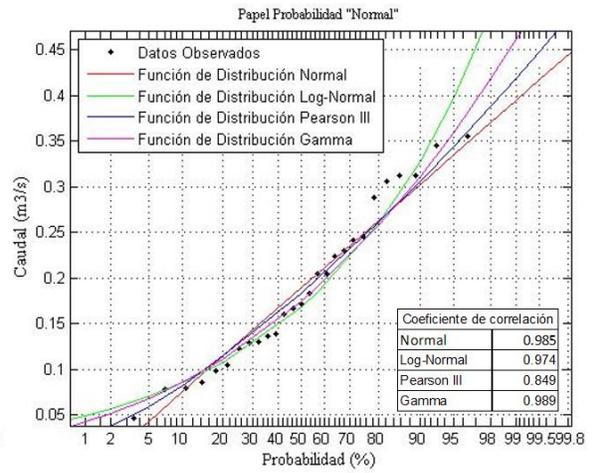


Figura 1.2. Distribución del caudal medio del mes de Febrero

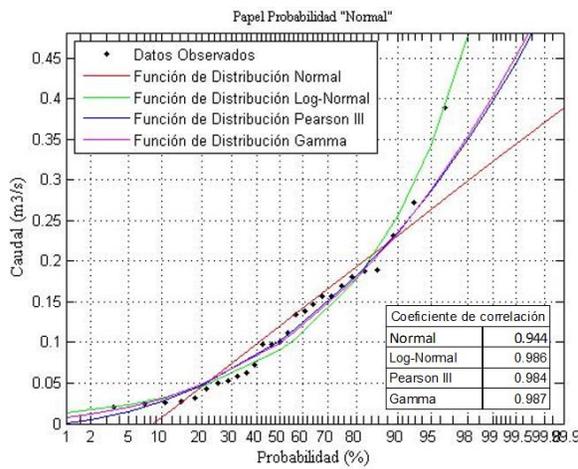


Figura 1.3. Distribución del caudal medio del mes de Marzo

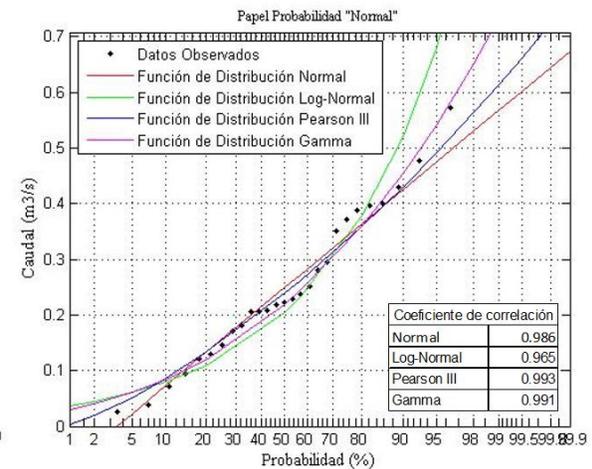


Figura 1.4. Distribución del caudal medio del mes de Abril

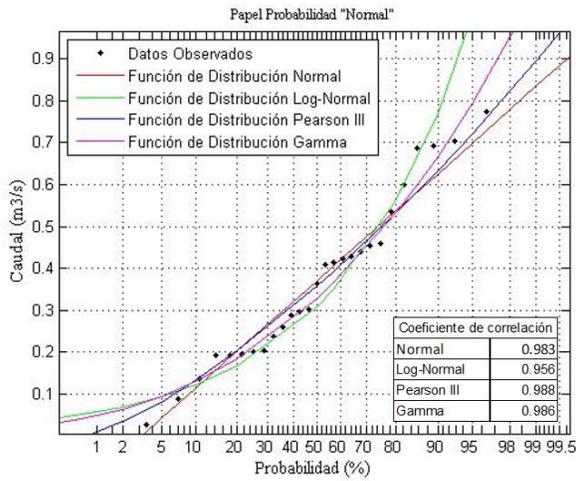


Figura 1.5. Distribución del caudal medio del mes de Mayo

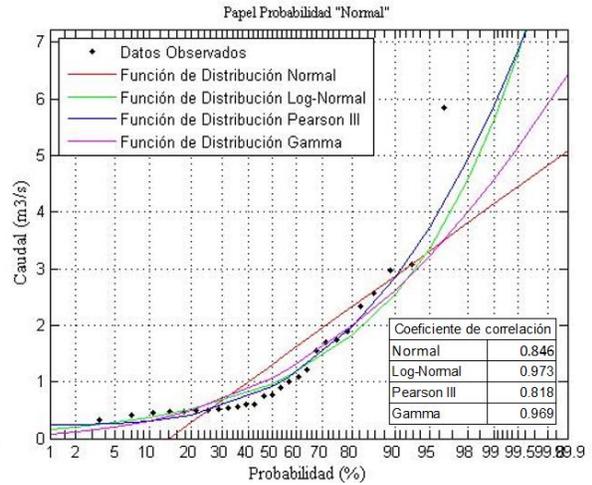


Figura 1.6. Distribución del caudal medio del mes de Junio

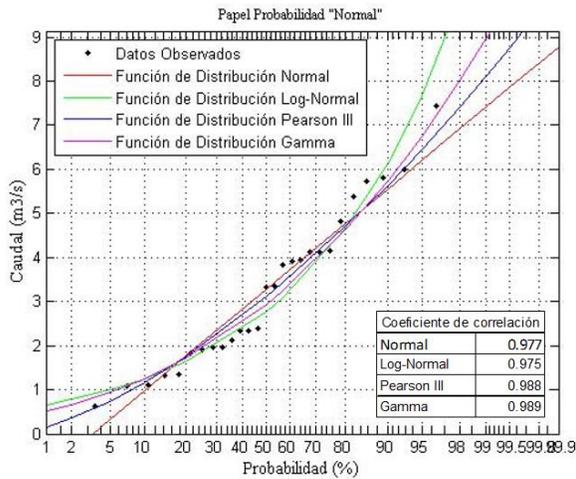


Figura 1.7. Distribución del caudal medio del mes de Julio

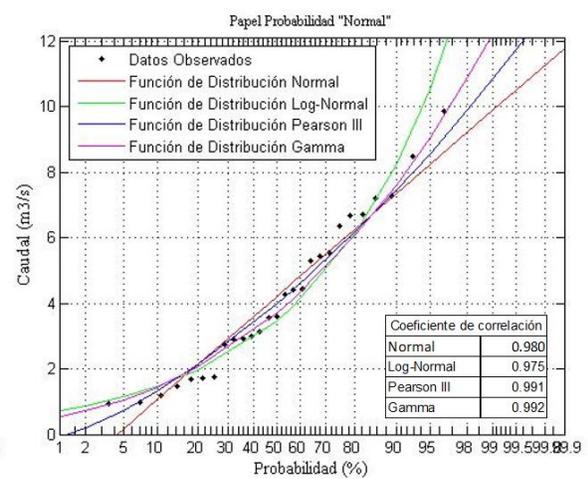


Figura 1.8. Distribución del caudal medio del mes de Agosto

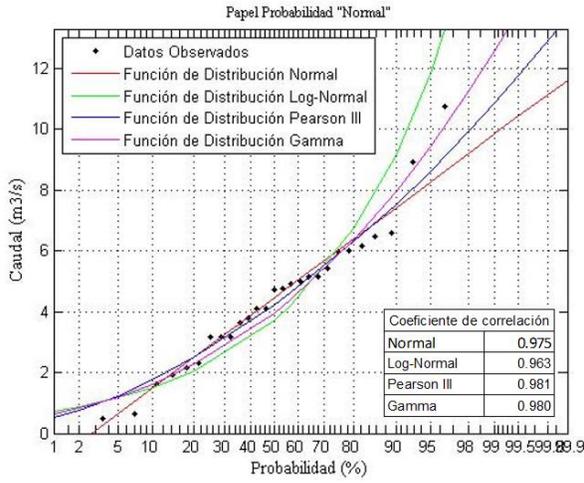


Figura 1.9. Distribución del caudal medio del mes de Septiembre

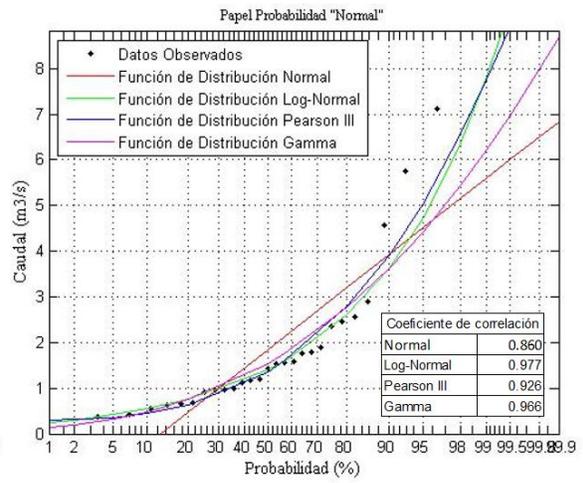


Figura 1.10. Distribución del caudal medio del mes de Octubre

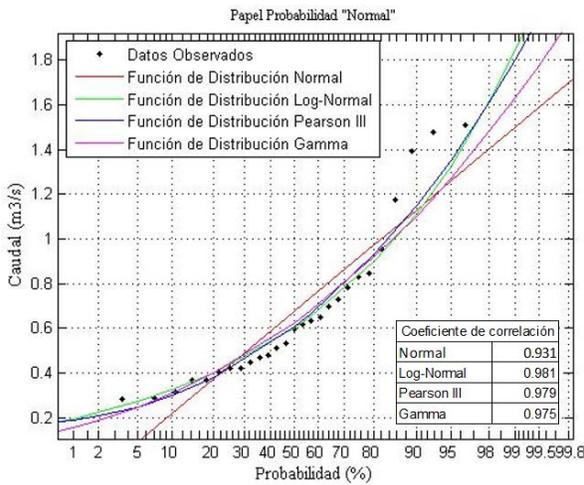


Figura 1.11. Distribución del caudal medio del mes de Noviembre

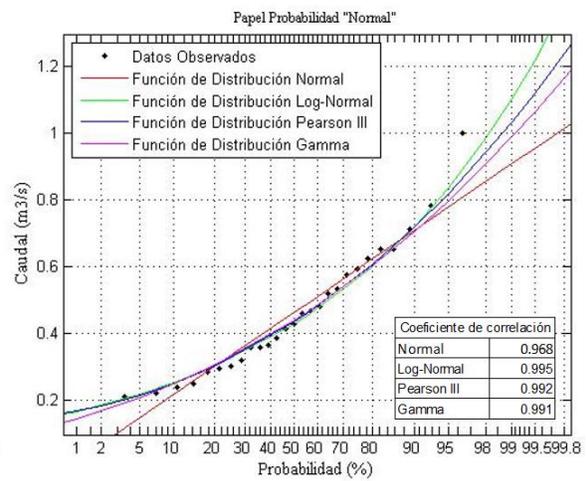


Figura 1.12. Distribución del caudal medio del mes de Diciembre

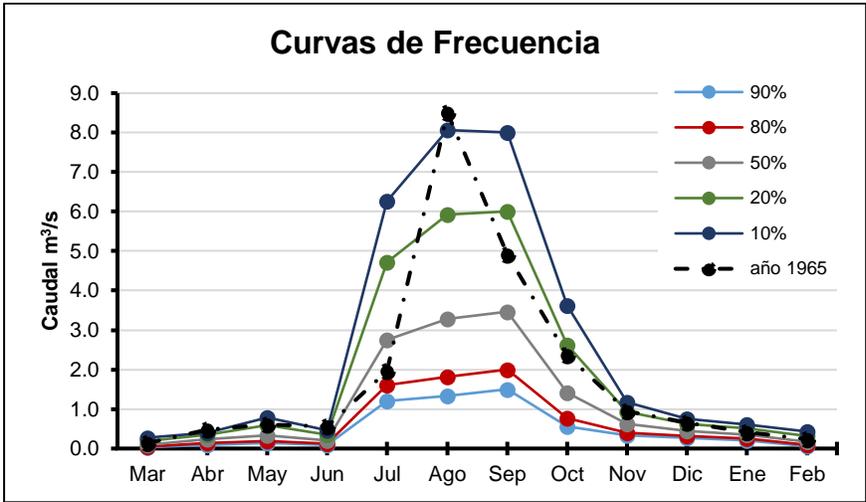


Figura 2.1 Análisis del régimen hidrológico para el año 1965

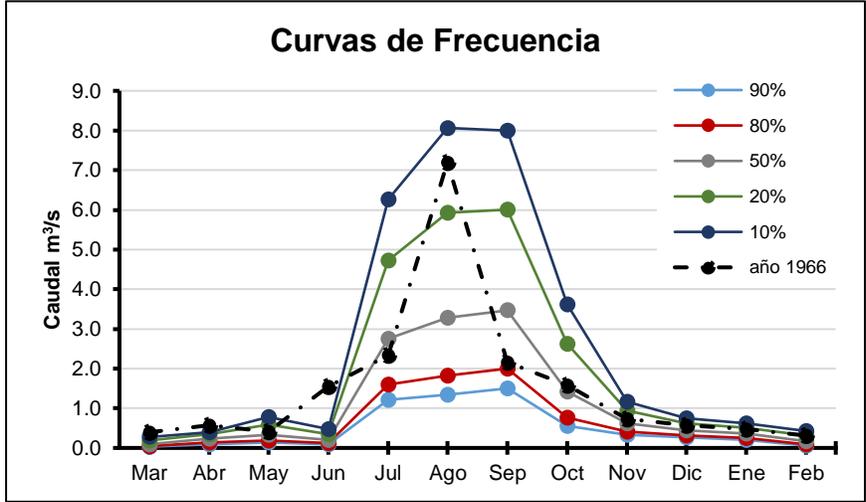


Figura 2.2 Análisis del régimen hidrológico para el año 1966

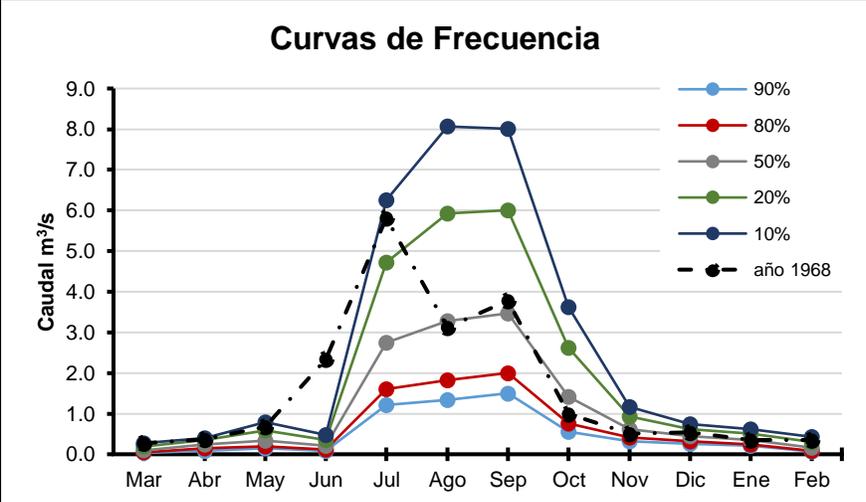


Figura 2.3 Análisis del régimen hidrológico para el año 1968

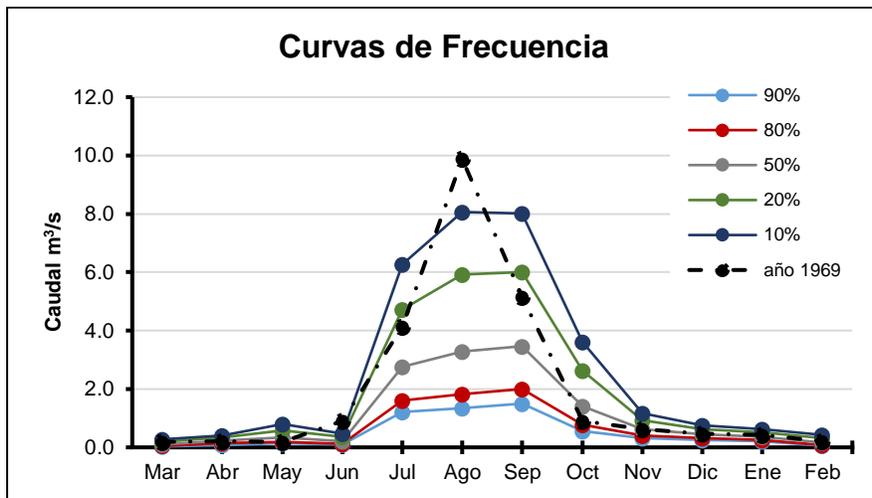


Figura 2.4 Análisis del régimen hidrológico para el año 1969

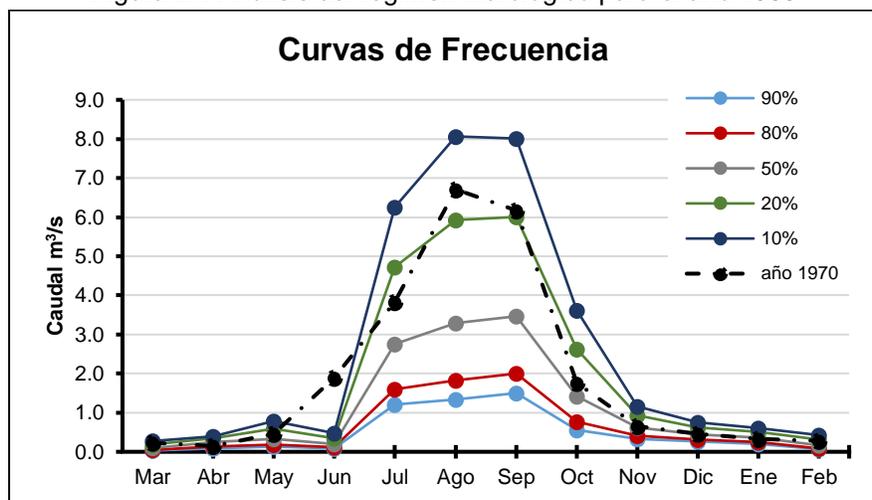


Figura 2.5 Análisis del régimen hidrológico para el año 1970

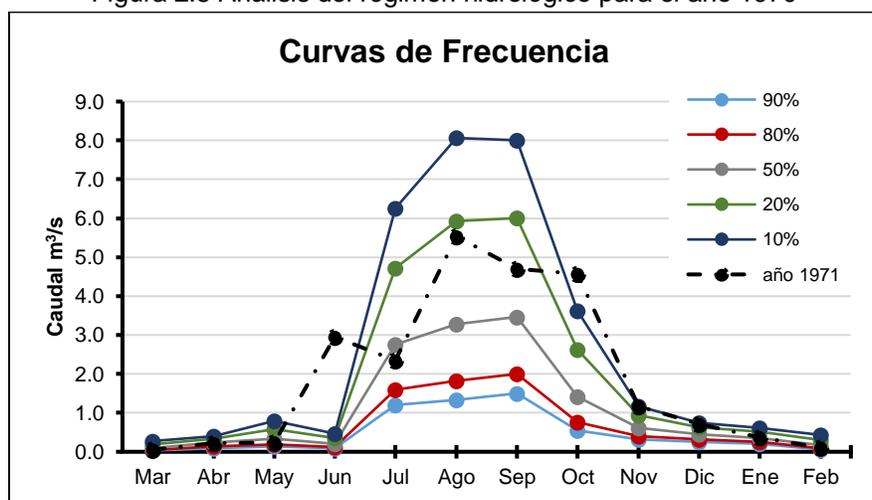


Figura 2.6 Análisis del régimen hidrológico para el año 1971

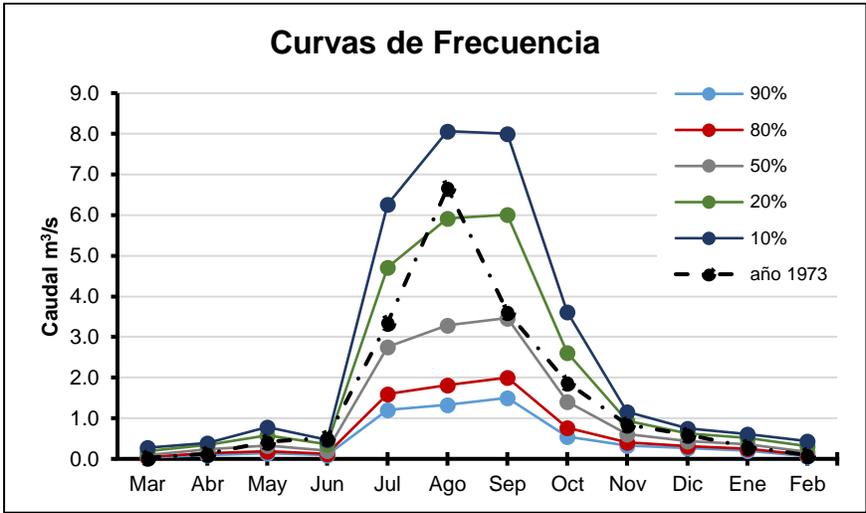


Figura 2.7 Análisis del régimen hidrológico para el año 1973

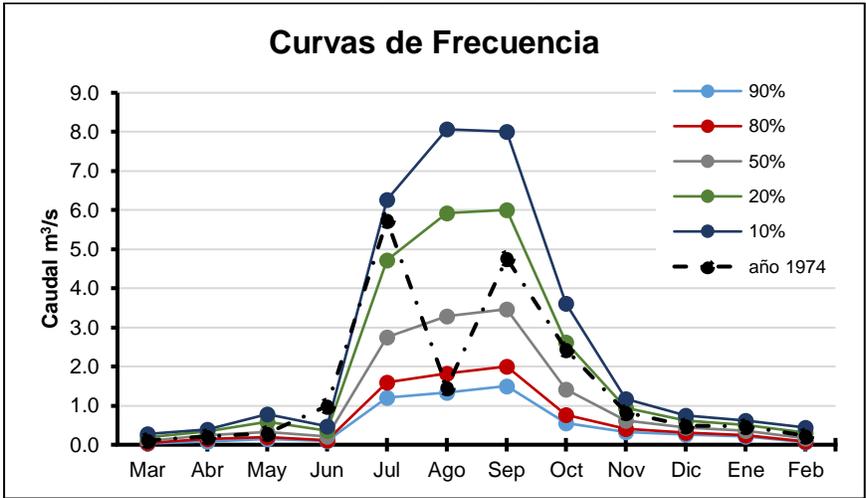


Figura 2.8 Análisis del régimen hidrológico para el año 1974

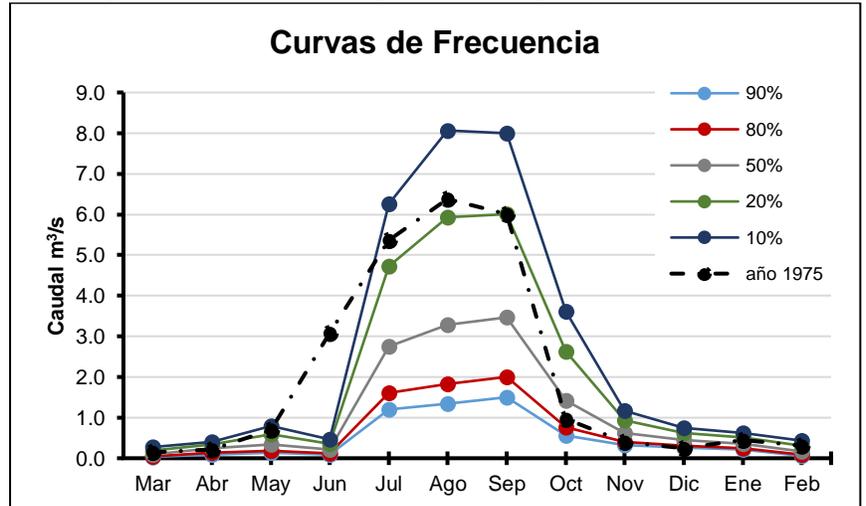


Figura 2.9 Análisis del régimen hidrológico para el año 1975

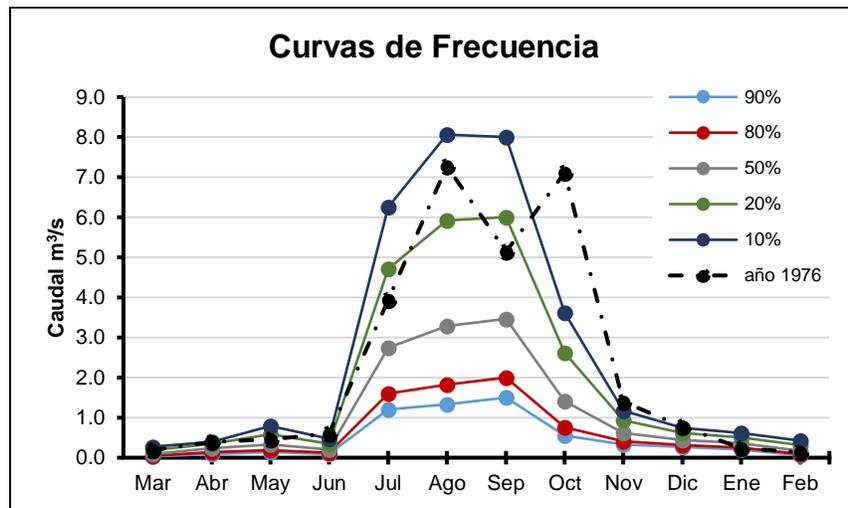


Figura 2.10 Análisis del régimen hidrológico para el año 1976

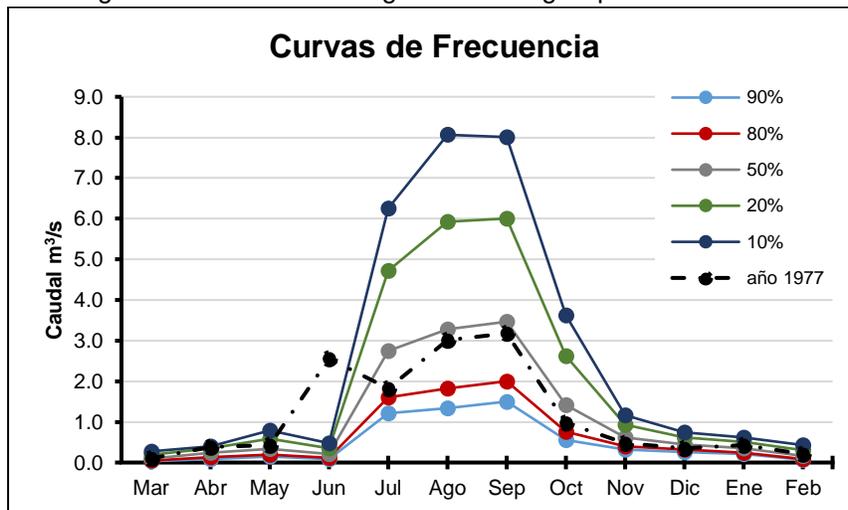


Figura 2.11 Análisis del régimen hidrológico para el año 1977

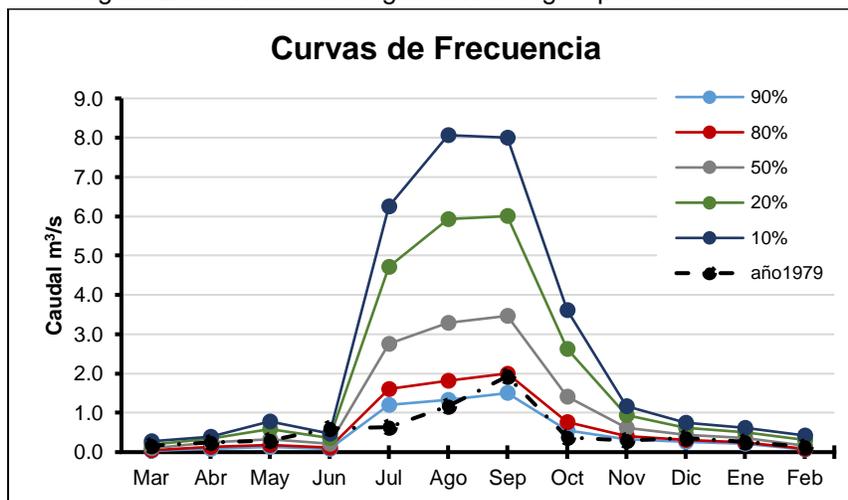


Figura 2.12 Análisis del régimen hidrológico para el año 1979

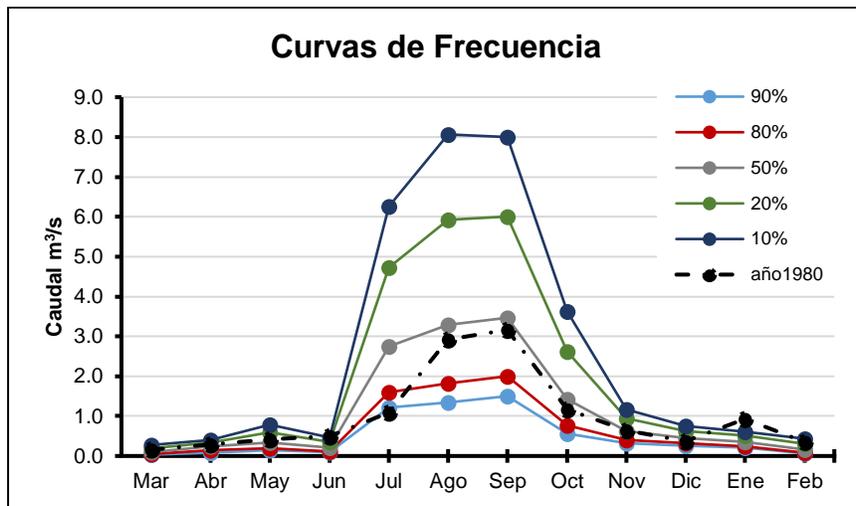


Figura 2.13 Análisis del régimen hidrológico para el año 1980

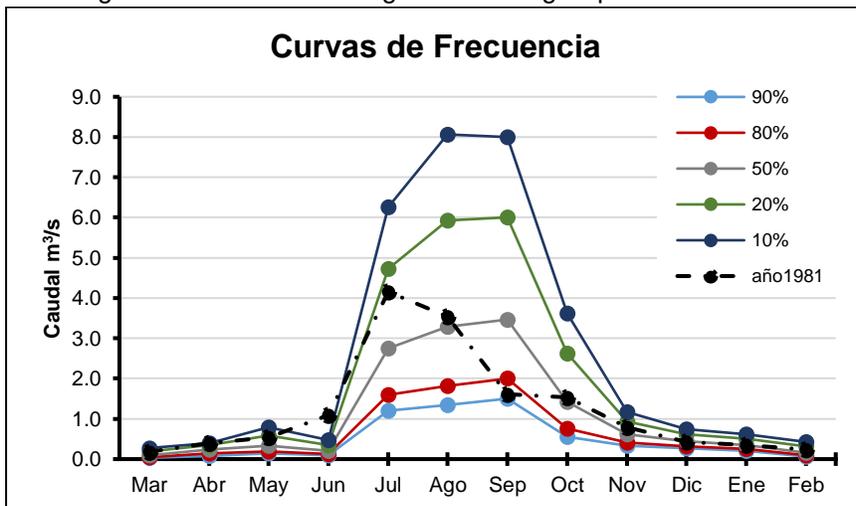


Figura 2.14 Análisis del régimen hidrológico para el año 1981

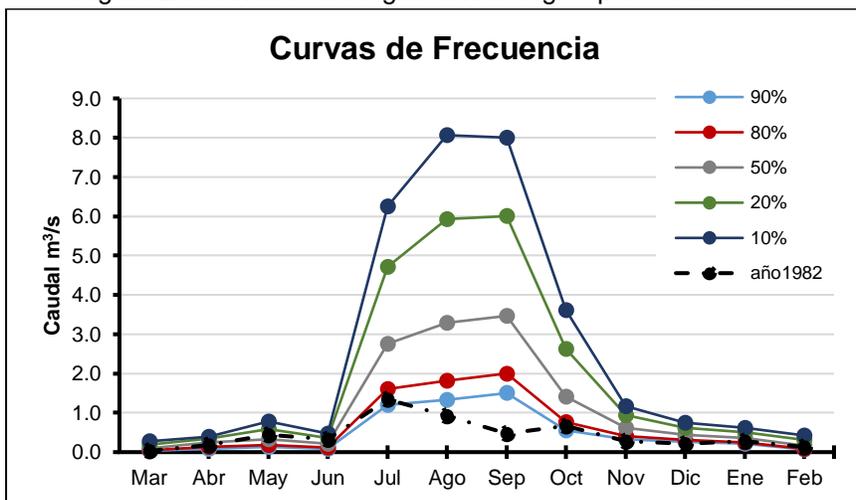


Figura 2.15 Análisis del régimen hidrológico para el año 1982

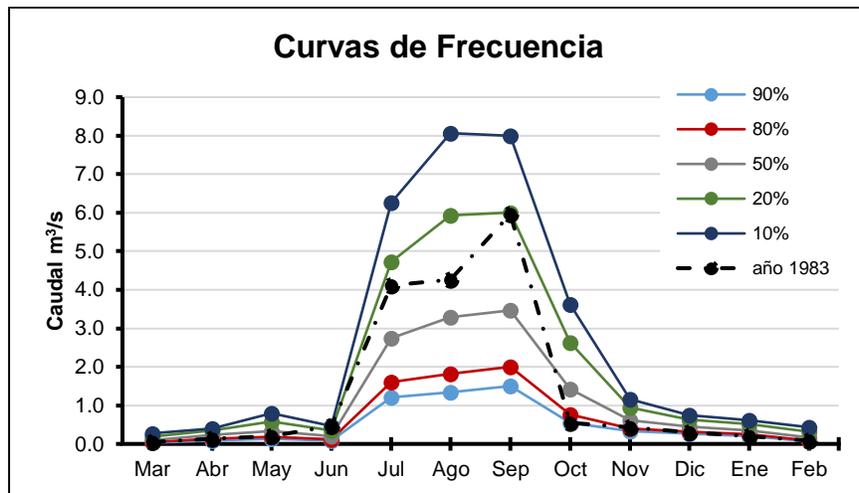


Figura 2.16 Análisis del régimen hidrológico para el año 1983

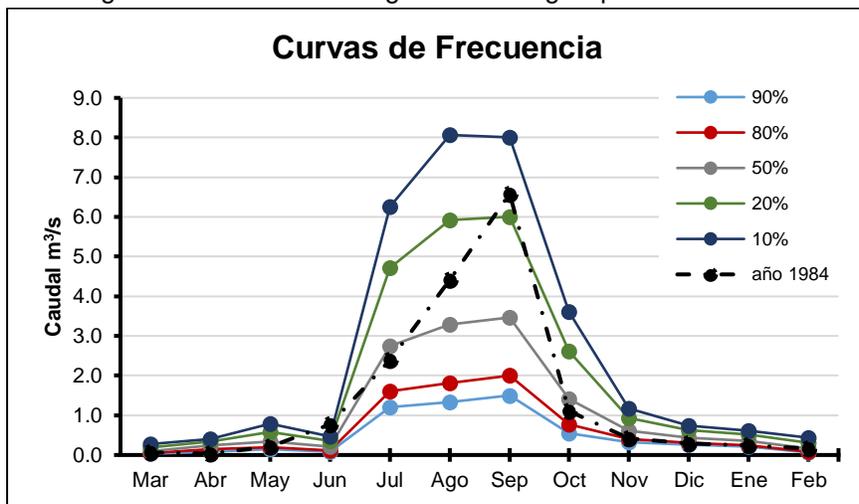


Figura 2.17 Análisis del régimen hidrológico para el año 1984

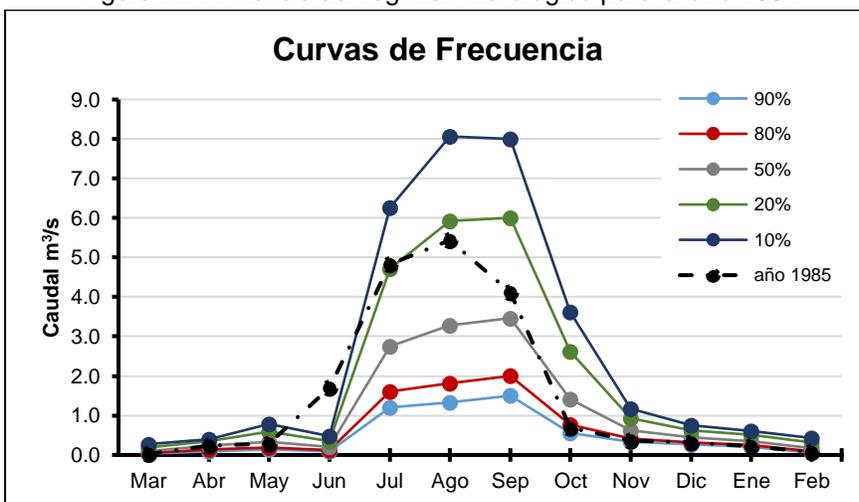


Figura 2.18 Análisis del régimen hidrológico para el año 1985

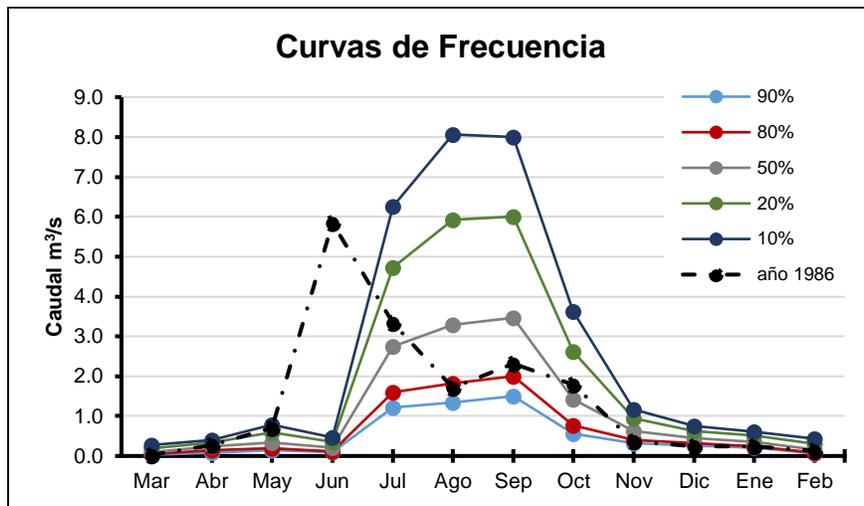


Figura 2.19 Análisis del régimen hidrológico para el año 1986

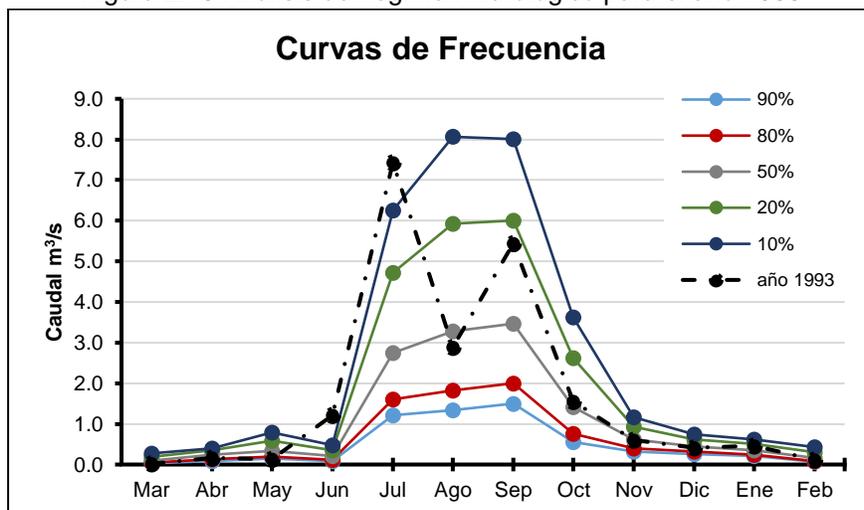


Figura 2.20 Análisis del régimen hidrológico para el año 1993

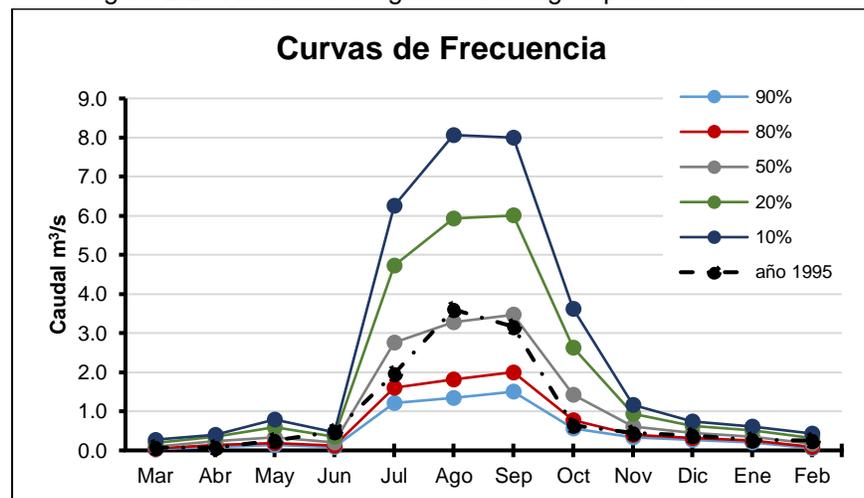


Figura 2.21 Análisis del régimen hidrológico para el año 1995

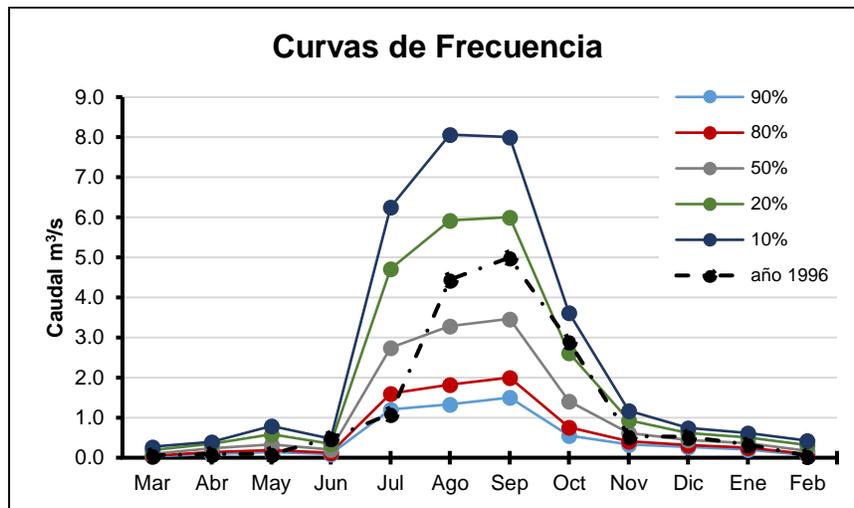


Figura 2.22 Análisis del régimen hidrológico para el año 1996

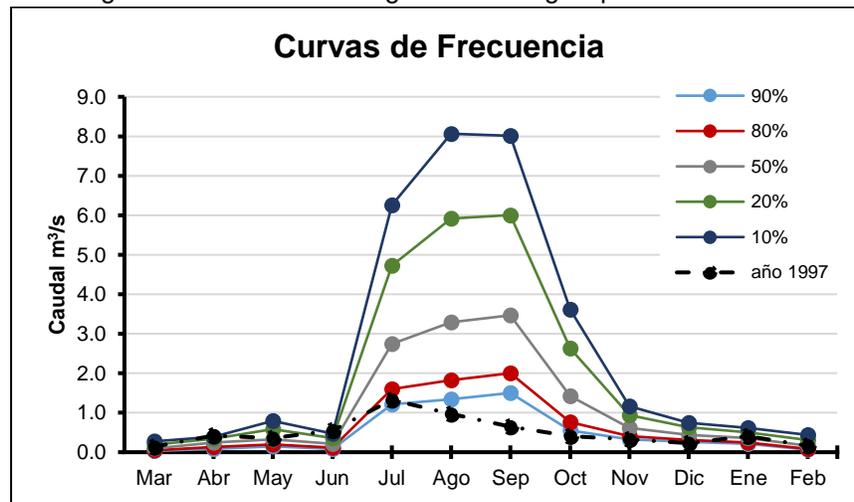


Figura 2.23 Análisis del régimen hidrológico para el año 1997

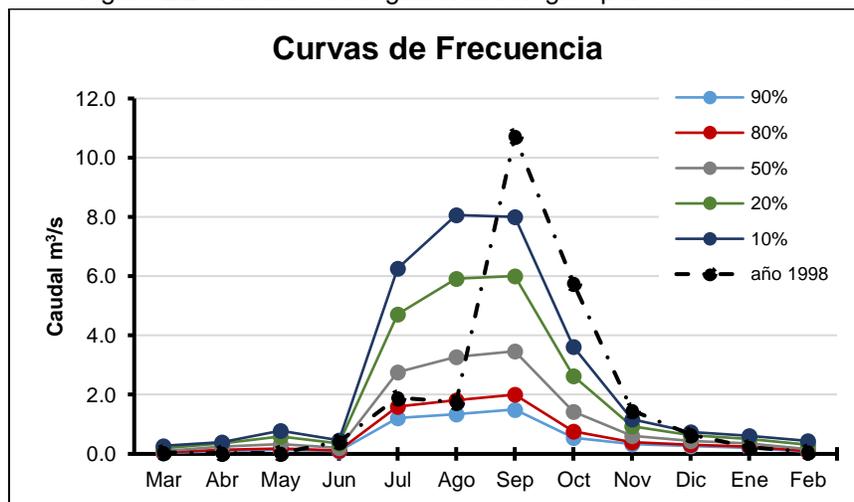


Figura 2.24 Análisis del régimen hidrológico para el año 1998

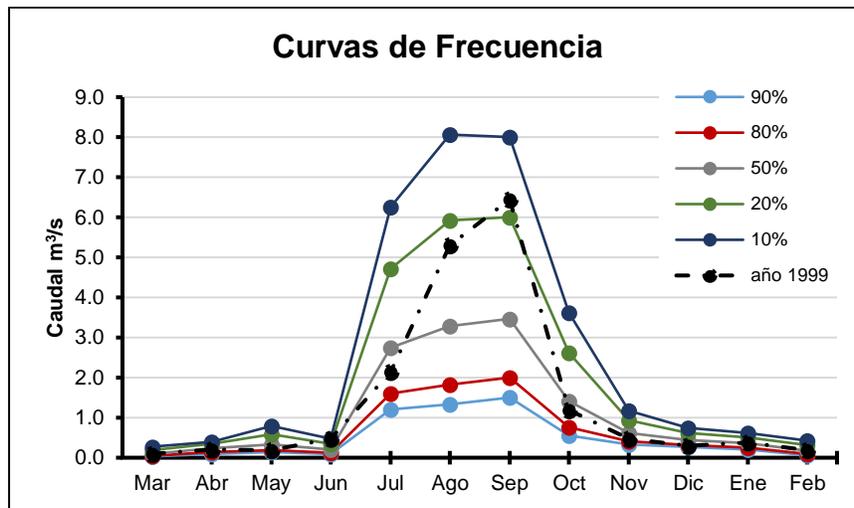


Figura 2.25 Análisis del régimen hidrológico para el año 1999

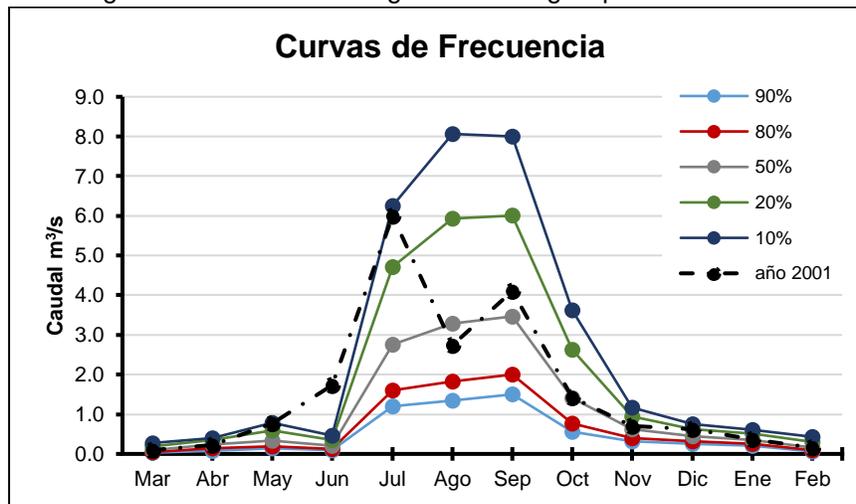


Figura 2.26 Análisis del régimen hidrológico para el año 2001

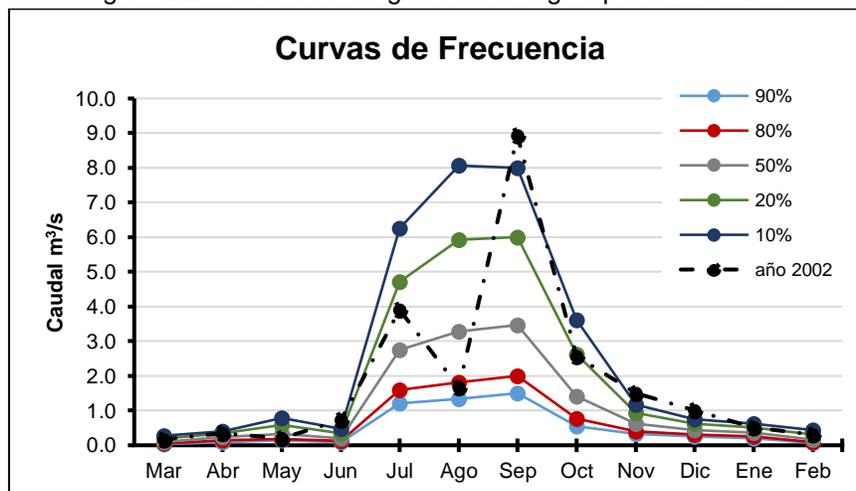


Figura 2.27 Análisis del régimen hidrológico para el año 2002

Tabla 1.1. Aforo del 8 de octubre de 2015

Fecha	10/08/2015	Hora Inicial	11:30 horas	Nivel Inicial	0.72 m
Ancho de la sección	3.20 m	Hora Final	12:30 horas	Nivel Final	0.72 m

Vertical	Punto	x (m)	h (m)	n (rev)	t (s)	n/t (rev/s)	v (m/s)	V media	Área parcial	Q parcial	Q(m ³ /s)
V1	p ₁	0.52	0.18	69	61	1.14	0.383	0.392	0.091	0.036	0.81
	p ₂		0.25	72	60	1.20	0.402				
	p _{total}		0.35								
V2	p ₁	1.00	0.18	128	60	2.13	0.704	0.625	0.233	0.146	
	p ₂		0.5	99	60	1.65	0.546				
	p _{total}		0.62								
V3	p ₁	1.50	0.18	92	60	1.52	0.507	0.567	0.328	0.186	
	p ₂		0.59	114	60	1.90	0.627				
	p _{total}		0.69								
V4	p ₁	2.00	0.18	121	60	2.01	0.665	0.594	0.335	0.199	
	p ₂		0.55	95	60	1.57	0.523				
	p _{total}		0.65								
V5	p ₁	2.50	0.18	44	32	1.39	0.463	0.446	0.310	0.138	
	p ₂		0.49	45	35	1.29	0.430				
	p _{total}		0.59								
V6	p ₁	3.00	0.18	31	32	0.98	0.331	0.359	0.303	0.108	
	p ₂		0.52	36	31	1.15	0.387				
	p _{total}		0.62								

Tabla 1.2. Aforo del 22 de octubre de 2015

Fecha		22/10/2015		Hora Inicial		12:45 horas		Nivel Inicial		0.69 m	
Ancho de la sección		3.20 m		Hora Final		13:30 horas		Nivel Final		0.68 m	
Vertical	Punto	x (m)	h (m)	n (rev)	t (s)	n/t (rev/s)	v (m/s)	V media	Área parcial	Q parcial	Q(m ³ /s)
V1	p ₁	0.30	0.18	15	32	0.475	0.168	0.242	0.083	0.020	0.61
	p ₂		0.45	29	31	0.937	0.317				
	p _{total}		0.55								
V2	p ₁	0.50	0.18	29	31	0.945	0.320	0.331	0.110	0.036	
	p ₂		0.45	32	32	1.016	0.342				
	p _{total}		0.55								
V3	p ₁	1.00	0.16	36	31	1.173	0.393	0.538	0.338	0.182	
	p ₂		0.43	51	30	1.684	0.558				
	p ₃		0.7	59	30	1.948	0.644				
	p _{total}		0.8								
V4	p ₁	1.50	0.18	34	30	1.146	0.385	0.349	0.408	0.142	
	p ₂		0.44	31	30	1.027	0.346				
	p ₃		0.73	29	31	0.948	0.320				
	p _{total}		0.83								
V5	p ₁	2.00	0.15	31	30	1.021	0.344	0.374	0.390	0.146	
	p ₂		0.63	37	31	1.205	0.404				
	p _{total}		0.73								
V6	p ₁	2.50	0.13	24	30	0.795	0.271	0.195	0.353	0.069	
	p ₂		0.58	10	31	0.327	0.120				
	p _{total}		0.68								

Tabla 1.2. Aforo del 22 de octubre de 2015 (Continuación)

Fecha		22/10/2015		Hora Inicial		12:45 horas		Nivel Inicial		0.69 m	
Ancho de la sección		3.20 m		Hora Final		13:30 horas		Nivel Final		0.68 m	
Vertical	Punto	x (m)	h (m)	n (rev)	t (s)	n/t (rev/s)	v (m/s)	V media	Área parcial	Q parcial	Q(m ³ /s)
V7	p ₁	3.00	0.1	7	31	0.227	0.087	0.056	0.283	0.016	
	p ₂		0.35	1	30	0.033	0.025				
	p _{total}		0.45								

Tabla 1.3. Aforo de 29 de octubre de 2015

Fecha		29/10/2015		Hora Inicial		10:10 horas		Nivel Inicial		0.72 m	
Ancho de la sección		3.20 m		Hora Final		10:39 horas		Nivel Final		0.72 m	
Vertical	Punto	x (m)	h (m)	n (rev)	t (s)	n/t (rev/s)	v (m/s)	V media	Área parcial	Q parcial	Q(m ³ /s)
V1	p ₁	0.20	0.11	35	31	1.13	0.379	0.350	0.055	0.019	1.18
	p ₂		0.28	30	31	0.97	0.327				
	p ₃		0.44	34	31	1.10	0.369				
	p _{total}		0.55								
V2	p ₁	0.50	0.11	55	31	1.77	0.588	0.505	0.283	0.143	
	p ₂		0.29	45	31	1.45	0.483				
	p ₃		0.47	42	30	1.40	0.467				
	p _{total}		0.58								
V3	p ₁	1.00	0.17	71	31	2.29	0.754	0.681	0.358	0.244	
	p ₂		0.42	62	30	2.07	0.682				
	p ₃		0.68	55	30	1.83	0.607				
	p _{total}		0.85								

Tabla 1.3. Aforo de 29 de octubre de 2015 (Continuación)

Fecha		29/10/2015		Hora Inicial		10:10 horas		Nivel Inicial		0.72 m	
Ancho de la sección		3.20 m		Hora Final		10:39 horas		Nivel Final		0.72 m	
Vertical	Punto	x (m)	h (m)	n (rev)	t (s)	n/t (rev/s)	v (m/s)	V media	Área parcial	Q parcial	Q(m ³ /s)
V4	p ₁	1.50	0.17	71	31	2.29	0.754	0.681	0.423	0.288	
	p ₂		0.42	62	30	2.07	0.682				
	p ₃		0.67	55	30	1.83	0.607				
	p _{total}		0.84								
V5	p ₁	2.00	0.13	72	30	2.40	0.790	0.729	0.368	0.268	
	p ₂		0.31	69	31	2.23	0.734				
	p ₃		0.48	62	31	2.00	0.661				
	p _{total}		0.63								
V6	p ₁	2.50	0.11	49	31	1.58	0.525	0.545	0.303	0.165	
	p ₂		0.29	54	31	1.74	0.577				
	p ₃		0.47	45	30	1.50	0.499				
	p _{total}		0.58								
V7	p ₁	3.00	0.11	28	34	0.82	0.280	0.334	0.168	0.056	
	p ₂		0.27	31	30	1.03	0.348				
	p ₃		0.43	32	30	1.07	0.359				
	p _{total}		0.54								

Tabla 1.4. Aforo del 30 de junio de 2016

Fecha		30/06/2016		Hora Inicial		10:41 horas		Nivel Inicial		0.72 m	
Ancho de la sección		3.20 m		Hora Final		11:27 horas		Nivel Final		0.72 m	
Vertical	Punto	x (m)	h (m)	n (rev)	t (s)	n/t (rev/s)	v (m/s)	V media	Área parcial	Q parcial	Q(m ³ /s)
V1	p ₁	0.20	0.2	38	30	1.27	0.424	0.364	0.050	0.018	0.81
	p ₂		0.4	27	30	0.90	0.305				
	p _{total}		0.5								
V2	p ₁	0.70	0.2	39	30	1.30	0.434	0.450	0.275	0.124	
	p ₂		0.45	42	30	1.40	0.467				
	p _{total}		0.6								
V3	p ₁	1.20	0.15	70	30	2.33	0.768	0.609	0.363	0.221	
	p ₂		0.55	50	30	1.67	0.553				
	p ₃		0.75	51	30	1.70	0.564				
	p _{total}		0.85								
V4	p ₁	1.70	0.15	47	30	1.57	0.521	0.521	0.388	0.202	
	p ₂		0.45	48	30	1.60	0.531				
	p ₃		0.6	45	30	1.50	0.499				
	p _{total}		0.7								
V5	p ₁	2.20	0.2	12	30	0.40	0.143	0.289	0.338	0.097	
	p ₂		0.5	39	30	1.30	0.434				
	p _{total}		0.65								
V6	p ₁	2.70	0.2	24	30	0.80	0.273	0.327	0.313	0.102	
	p ₂		0.5	34	30	1.13	0.380				
	p _{total}		0.6								
V7	p ₁	3.00	0.15	24	30	0.80	0.273	0.262	0.177	0.046	
	p ₂		0.45	22	30	0.73	0.251				
	p _{total}		0.58								

Referencias bibliográficas

- Aparicio, F. (2001) *Fundamentos de Hidrología de Superficie*, Editorial Limusa, México, D.F.
- Bâ, K., Díaz, C., Magaña, F. y Salinas, H., (2015) *Avances en el análisis de frecuencia de valores extremos en hidrología: Software y caso de estudio*. En "Avances en ciencias del Agua". 313-337: Ed. Universidad Autónoma del Estado de México. ISBN: 978-607-422-568-6. 1era. Edición, Enero de 2015
- Breña, A. y Jacobo, M. (2006) *Principios y fundamentos de la hidrología Superficial*, Universidad Autónoma Metropolitana, Ciudad de México, México.
- Campos, D. (1998) *Proceso del Ciclo Hidrológico*, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, 2a edición, México.
- Campos, D. (2005) *Estimación empírica de la ETP en la República Mexicana*, Ingeniería hidráulica en México, Vol. XX, núm.3, pp. 99-110.
- Casa, G. (1997) *Climas del estado de México*, Catálogo de metadatos geográficos. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad.
- Cervantes, Y., Cornejo S., Lucero R., Espinoza, J., Miranda, E., Pineda, A., (1990) *Provincias fisiográficas de México*. Clasificación de regiones Naturales de México, Atlas Nacional de México (1990-1992). Instituto de geografía, UNAM. México.

- Díaz, C., Bâ, K., Iturbe, A., Esteller, M. y Reyna, F., (1999) *Estimación de las características fisiográficas de una cuenca con la ayuda de SIG y MEDT: caso del curso alto del río Lerma*, Estado de México Ciencia Ergo Sum, vol. 6, núm. 2. Universidad Autónoma del Estado de México Toluca, México.
- Dourojeanni, A., Jouravlev, A., y Chávez, G., (2002) *Gestión del agua a nivel de cuencas: teoría y práctica*, Publicación de las Naciones Unidas, Santiago Chile. 88pp.
- Eastman, J. (2015) *Guide to GIS and Image Processing. Accessed in TerrSet*. Clark University: Worcester, MA.
- Franco, R. (2008) *Concepción e implementación de un módulo hidroneumático para la evaluación de disponibilidad de recursos hídricos*. Tesis de Doctorado, Universidad Autónoma del Estado de México.
- Gobierno del Estado de México, (2009) *La diversidad biológica del Estado de México*. Estudio de Estado, Primera edición, México.
- INEGI, (2010) *Localidades de la República Mexicana, 2010*, escala: 1:1. Obtenido de Principales resultados por localidad (ITER). Censo de Población y Vivienda 2010. Editado por Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), México, D.F.
- Instituto de Fomento Minero y Estudios Geológicos del Estado de México (IFOMEGEM) (2014), *Carta geológica del Estado de México*, México.
- Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI) (2013) *Conjunto de datos vectoriales de uso de suelo y vegetación*, escala 1:250 000, serie V (capa Unión), 2a edición. México.

- Instituto Nacional de Estadística y Geografía e Informática (INEGI) (2006) *División Municipal de México*. Obtenido de Marco Geoestadístico Municipal, Censo de Población y Vivienda 2005.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía e Informática (INEGI) (2006), *Características edafológicas, fisiográficas, climáticas e hidrográficas de México*, Dirección de Capacitación.
- Llamas, J. (1993) *Hidrología general, principios y aplicaciones*. Servicio editorial de la Universidad del país Vasco, Argitarapen Zerbitzua Euskal Herruko Unibertsitatea.
- Llanos H., BÂ K. y Trujillo E. (2009-2010) *Estudio de precipitaciones máximas en la Comunidad Autónoma del País Vasco*. Est. Mus. Cienc. Nat. de Álava, 23: 19-38.
- Martínez, E. (1999) *Estudio Monográfico de la Cuenca del río Amacuzac*. Tesis de Licenciatura. México, Universidad Autónoma del Estado de México.
- Miller, D., Clark, R. y Schamach, S., (1977). *Flood Studies*. Chapter III, in Design of Small Dams. U. S. Bureau of Reclamation. Washington, D. C., U.S.A. Revised reprint. 37-95.
- Monsalve, G. (1999) *Hidrología en la Ingeniería*, 2ª Edición Alfaomega, Colombia.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), (2006). *Evaporación del cultivo; Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*, Estudio FAO, Riego y Drenaje, 263 pp.

- Organización Meteorológica Mundial (OMM), (2011) *Guía de Practicas Hidrológicas, Volumen I Hidrología – De la medición a la información hidrológica OMM-N° 168*, Sexta edición, ISBN 978-92-63-30168-0.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat), Comisión Nacional del Agua (CNA) (2007) *Estadísticas del Agua en México*, 1a edición, CNA, México.
- Secretaria de Recursos Hidráulicos (SRH) (1980) *Boletín Hidrológico Núm. 50*, Región Hidrológica Núm. 12, Tomo I y II., México.
- Témez, J., (1975). *Programa de cálculo para la previsión hidrometeorológica de avenidas*. Asociación de Investigación Industrial Eléctrica (ASINEL). Madrid, España. 47 pp.
- Thornthwaite, C., (1948). *An approach towards a rational classification of climate*. Geographical Review. 38: 55-94.
- Trujillo, E. (1999), *Análisis Estadístico-Probabilístico para eventos Extremos Hidrológicos (Concepción y diseño de un Software de aplicación)* Tesis de Maestría, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de México, México.
- Williams, G., (1950). Hydrology. Chapter IV, in Engineering Hydraulics, edited by Hunter Rouse. Proceedings of the 4th. Hydraulics Conference. Iowa Institute of Hydraulics Reserarch. June 12-15, 1949. John Wiley & Sons. Inc. New York, U.S.A 229-320.
- , 1979b: *Liquid Flow Measurement in Open Channels: Velocity-area Methods*, segunda edición, ISO 748, Ginebra.



UAEM | Universidad Autónoma
del Estado de México

Toluca, México a 25 de Agosto de 2017

Espacio Académico, Subdirector Académico, Coordinador de Programa Presente

Carta de autorización para publicación en el RI

Declaración de autoría original, libre de embargo, susceptible de ser depositado en el Repositorio Institucional y solicitud de evaluación de grado

Quien firma al calce declara que: soy autor intelectual del original titulado "**Estudio hidrológico de la cuenca del río Santo Domingo hasta la estación Santa María del Llano**", y que estoy de acuerdo con la totalidad de su contenido y apruebo para ser publicado en el Repositorio Institucional en los términos del Reglamento de Acceso Abierto y la Normatividad vigente emitida por la Universidad Autónoma del Estado de México.

Que el/la **Tesis** presentada es original y no se encuentra en proceso de dictaminación o embargo en ninguna otra publicación o medio. Afirmando que el trabajo cumple con la cientificidad y los aspectos metodológicos para su publicación bajo las licencias Creative Commons.

Quien abajo firma solicita que el trabajo titulado "**Estudio hidrológico de la cuenca del río Santo Domingo hasta la estación Santa María del Llano**", sea incluido en alguna de las colecciones del Repositorio Institucional. Así mismo permito que la Oficina de Conocimiento Abierto realice lo propio para la preservación y difusión de la obra.

Sin otro particular.

Gloria Vanessa Domínguez Sánchez

Nombre y firma

No de cuenta: 0511138

Conozco y acepto los términos de privacidad de la Universidad Autónoma del Estado de México
http://web.uaemex.mx/avisos/Aviso_Privacidad.pdf