



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil

**DETERMINACIÓN DE LAS AVENIDAS DEL RÍO GUACALATE, HASTA LA ESTACIÓN
ALOTENANGO APLICANDO EL MÉTODO DE HIDROGRAMA UNITARIO SINTÉTICO,
UTILIZANDO EL MÉTODO *SOIL CONSERVATION SERVICE (SCS)***

Allan Emir Rac González

Asesorado por la Inga. Karla Giovanna Juith Pérez Loarca

Guatemala, marzo de 2020

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DETERMINACIÓN DE LAS AVENIDAS DEL RÍO GUACALATE, HASTA LA ESTACIÓN
ALOTENANGO APLICANDO EL MÉTODO DE HIDROGRAMA UNITARIO SINTÉTICO,
UTILIZANDO EL MÉTODO *SOIL CONSERVATION SERVICE (SCS)***

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

ALLAN EMIR RAC GONZÁLEZ

ASESORADO POR LA INGA. KARLA GIOVANNA JUDITH PÉREZ LOARCA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO CIVIL

GUATEMALA, MARZO DE 2020

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton De León Bran
VOCAL IV	Br. Christian Moisés de la Cruz Leal
VOCAL V	Br. Kevin Armando Cruz Lorente
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Angel Roberto Sic García a.i.
EXAMINADORA	Inga. Dilma Yanet Mejicanos Jol.
EXAMINADOR	Ing. Mario Estuardo Arriola Avila
EXAMINADOR	Ing. Victor Manuel López Jol
SECRETARÍA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**DETERMINACIÓN DE LAS AVENIDAS DEL RÍO GUACALATE, HASTA LA ESTACIÓN
ALOTENANGO APLICANDO EL MÉTODO DE HIDROGRAMA UNITARIO SINTÉTICO,
UTILIZANDO EL MÉTODO *SOIL CONSERVATION SERVICE (SCS)***

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil, con fecha 3 de noviembre de 2016.

Allan Emir Rac González

Guatemala 06 de septiembre de 2019

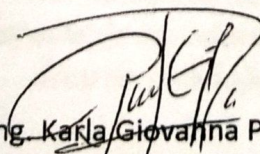
Ingeniero
Pedro Aguilar Polanco
Jefe del Departamento de Hidráulica
Escuela de Civil
Facultad de Ingeniería
Presente

Estimado Ingeniero:

Cumpliendo con lo resuelto por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil, se procedió a la asesoría y revisión del trabajo de graduación titulado: **DETERMINACIÓN DE LAS AVENIDAS DEL RÍO GUACALATE, HASTA LA ESTACIÓN ALOTENANGO APLICANDO EL MÉTODO DEL HIDROGRAMA UNITARIO SINTÉTICO, UTILIZANDO EL MÉTODO SOIL CONSERVATION SERVICE (SCS)**, presentado por el estudiante Allan Emir Rac González con número de registro académico 201113819, quien fue asesorado por la suscrita.

Considerando que el trabajo de graduación se desarrolló de forma satisfactoria y cumple con los objetivos que fueron trazados al inicio, hago de su conocimiento que extiendo la aprobación del mismo.

Sin otro particular me suscribo atentamente,



K. Giovanna J. Pérez Loarca
Msc. ING. CIVIL
COL. No. 7718

MSc. Ing. Karla Giovanna Pérez Loarca

Colegiado No. 7718

Asesor de Trabajo de Graduación

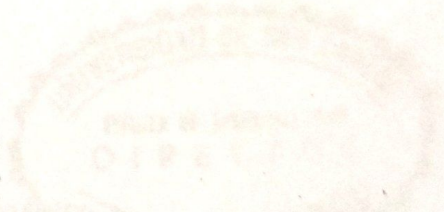
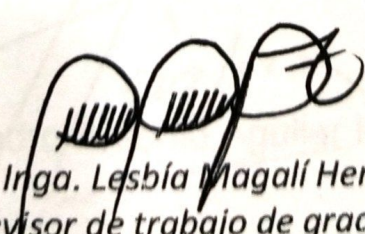
Guatemala 15 de octubre de 2019

Ingeniero
Pedro Antonio Aguilar Polanco
Jefe del Departamento de Hidráulica
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala

Estimado Ingeniero Aguilar Polanco

Por este medio me permito informar que en calidad de revisor de protocolo, se determina que se hizo la revisión del perfil de trabajo de graduación titulado "DETERMINACIÓN DE AVENIDAS DEL RÍO GUACALATE, HASTA LA ESTACIÓN ALOTENANGO APLICANDO EL MÉTODO DE HIDROGRAMA UNITARIO SINTÉTICO, UTILIZANDO EL MÉTODO SOIL CONSERVATION SERVICE (SCS) del estudiante Allan Emir Rac González. con registro Académico No. 201113819, informando que el mismo cumple con todos los requisitos, por lo tanto solicito se autorice continuar con los trámites correspondientes.

Atentamente



MSc. Inga. Lesbía Magalí Herrera López
Revisor de trabajo de graduación.
Registro de Personal 20091521
No. Colegiado 8263
Escuela de Ingeniería Civil
Área de Hidráulica



USAC

TRICENTENARIA

Universidad de San Carlos de Guatemala

CULTAD DE INGENIERÍA

<http://civil.ingenieria.usac.edu.gt>

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL



El director de la Escuela de Ingeniería Civil y Jefe del Departamento de Hidráulica, después de conocer el dictamen de la Asesora Inga. Karla Giovanna Judith Pérez Loarca, al trabajo de graduación del estudiante Allan Emir Rac González **DETERMINACIÓN DE LAS AVENIDAS DEL RÍO GUACALATE, HASTA LA ESTACIÓN ALOTENANGO APLICANDO EL MÉTODO DE HIDROGRAMA UNITARIO SINTÉTICO, UTILIZANDO EL MÉTODO SOIL CONSERVATION SERVICE (SCS)** da por este medio su aprobación a dicho trabajo.

[Handwritten signature]
 Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco



Guatemala, noviembre 2019

/mmm.





Ref.DTG.116.2020

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Civil, al trabajo de graduación titulado: **DETERMINACIÓN DE LAS AVENIDAS DEL RÍO GUACALATE, HASTA LA ESTACIÓN ALOTENANGO APLICANDO EL MÉTODO DE HIDROGRAMA UNITARIO SINTÉTICO, UTILIZANDO EL MÉTODO SOIL CONSERVATION SERVICE (SCS)**, presentado por el estudiante universitario: **Allan Emir Rac González**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, se autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada

Decana



Guatemala, marzo de 2020

ACTO QUE DEDICO A:

- Mis padres** Jacobo Rac y Teresa de Jesús González González, por brindarme su amor y confianza cada día y enseñarme que con paciencia, esfuerzo y dedicación se logran las metas.
- Mis hermanos** Zaida Vanessa, Jacobo Iván y Omar Francisco Rac González, por su apoyo incondicional.
- Mis sobrinos** Javier Iván, Esteban Elián, María Teresa y Alejandro José Gramajo Rac, por formar parte de mi vida.
- Mi novia** Nanci Lucrecia Gamboa Avila, por su apoyo incondicional y apoyarme.
- Mi tía** Petrona González González, por brindarme su apoyo y ayuda.
- Mi familia** A cada uno de los miembros de mi familia. Por brindarme su apoyo.

AGRADECIMIENTOS A:

Dios	Por ser una importante influencia en mi carrera, entre otras cosas.
Universidad de San Carlos de Guatemala	Por abrirme sus puertas y compartir sus enseñanzas en el transcurso de la carrera de Ingeniería Civil.
Facultad de Ingeniería	Por darme una buena formación académica y profesional.
Mis amigos de la Facultad	Bárbara Gatica, David Roberto, Sergio Sánchez, Marvin Orellana, entre otros.
Inga. Karla Giovanna	Por brindarme su apoyo incondicional y compartir sus conocimientos durante la realización de mi trabajo de graduación.
Mis amigos	Por los buenos momentos compartidos.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS	IX
GLOSARIO	XI
RESUMEN.....	XIII
OBJETIVOS.....	XV
INTRODUCCIÓN.....	XVII
1. CONCEPTOS GENERALES.....	1
1.1. Ciclo hidrológico	1
1.2. Hidrografía en Guatemala	1
1.2.1. Vertiente del Golfo de México.....	3
1.2.2. Vertiente del Caribe	3
1.2.3. Vertiente del Pacífico.....	4
1.3. Análisis de eventos extremos	5
1.3.1. Conceptos básicos	5
1.3.1.1. Probabilidad.....	5
1.3.1.2. Período de retorno.....	6
1.3.1.3. Tiempo de concentración	6
1.3.1.4. Crecidas	7
1.4. Componentes básicos de riesgo	7
1.4.1. Riesgo	7
1.4.2. Amenaza.....	8
1.4.3. Vulnerabilidad.....	9
1.4.4. Desastre	10
1.4.5. Inundaciones	11

1.4.6.	Efecto de los desastres	11
2.	CARACTERIZACIÓN DE LA SUBCUENCA DEL RÍO GUACALATE	13
2.1.	Ubicación geográfica de la subcuenca.....	13
2.2.	Delimitación de la cuenca	14
2.3.	Determinación de la cuenca.....	14
2.3.1.	Área de drenaje.....	14
2.3.2.	Tipo y uso de suelo	15
2.3.3.	Pendiente media	17
2.3.4.	Histograma de frecuencias altimétricas.....	18
2.3.5.	Curva hipsométrica	20
2.3.6.	Índice de compacidad (Kc).....	21
2.3.7.	Factor de forma	23
2.3.8.	Pendiente media de la cuenca	24
2.3.9.	Orden de las corrientes de agua	25
2.3.10.	Densidad de drenaje	26
3.	RÉGIMEN DE LLUVIA Y VARIABILIDAD	29
3.1.	Régimen de lluvias	29
3.1.1.	Clasificación de series.....	30
3.1.2.	Lluvia anual	30
3.1.3.	Lluvia mensual	32
3.1.4.	Lluvia diaria	33
3.2.	Precipitación máxima probable	33
3.3.	Ajuste de series de datos a una distribución	34
3.3.1.	Funciones de distribución.....	35
3.3.1.1.	Distribución normal o gaussiana	35
3.3.1.2.	Distribución log normal de dos parámetros	36

3.3.1.3.	Distribución log normal de tres parámetros.....	36
3.3.1.4.	Distribución gamma de dos parámetros.....	37
3.3.1.5.	Distribución gamma de tres parámetros o Pearson tipo III.....	38
4.	MODELADO DE PRECIPITACIONES REALES	43
4.1.	Distribución de precipitación en subcuenca.....	43
4.2.	Polígonos de <i>Thiessen</i>	43
4.3.	Isoyetas	47
5.	TRANSFORMACIÓN LLUVIA- ESCORRENTIA	49
5.1.	Modelación de lluvias	49
5.2.	Lluvia efectiva.....	49
5.3.	Infiltración	49
5.3.1.	Método del número de curva CN	50
5.3.1.1.	Condición hidrológica de la cuenca o área de drenajes.....	54
5.3.1.2.	Condición de humedad antecedente (AMC)	56
5.4.	HEC- HMS.....	59
5.4.1.	Modelo de la cuenca.....	60
5.4.2.	Modelo meteorológico	60
5.4.3.	Especificaciones de control	60
6.	MODELADO Y GENERACIÓN DE HIDROGRAMAS	61
6.1.	Hidrograma unitario	61
6.1.1.	Método del hidrograma unitario	61

6.2.	Hidrograma sintético	62
6.3.	Hidrograma de <i>Snyder</i>	62
6.4.	Hidrograma adimensional del SCS	62
6.5.	Hidrograma sintético triangular del SCS	65
7.	DETERMINACIÓN DE LAS AVENIDAS DE LA SUBCUENCA ANALIZADA	67
7.1.	Definición de avenida	67
7.2.	Origen de las avenidas.....	67
7.3.	Aplicación del método del hidrograma unitario sintético SCS ..	68
7.3.1.	Hietograma de diseño	68
	CONCLUSIONES.....	75
	RECOMENDACIONES	77
	BIBLIOGRAFÍA.....	79

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Hidrografía en Guatemala	2
2.	Imagen de subcuenca río Guacalate.....	13
3.	Mapa de bosques y de uso de suelo de la tierra del territorio de Guatemala.....	16
4.	Histograma de frecuencias altimétricas.....	20
5.	Curva hipsométrica	21
6.	Mapa orden de las cuencas	26
7.	Precipitación anual (1979-2016) estaciones Suiza Contenta, Santa Cruz, Insivumeh	31
8.	Precipitación anual (1979-2016) estaciones Sabana Grande y Alameda Icta	31
9.	Precipitación mensual de estaciones Santa Cruz Balanyá, Sabana Grande, Insivumeh, Suiza Contenta y Alameda.....	32
10.	Precipitación diaria máxima anual en estación Insivumeh	34
11.	Polígonos de <i>Thiessen</i> de la subcuenca del río Guacalate.....	46
12.	Isoyetas de la subcuenca del río Guacalate.....	48
13.	Hidrograma adimensional SCS	63
14.	Hietograma de diseño	69
15.	Hidrograma unitario asociado a un Tr y AMC I	72
16.	Hidrograma unitario asociado a un Tr y AMC II	73
17.	Hidrograma unitario asociado a un Tr y AMC III	74

TABLAS

I.	Cuencas de la vertiente del Golfo de México.....	3
II.	Cuencas de la vertiente del Atlántico.....	4
III.	Cuencas de la vertiente del Pacífico.....	5
IV.	Uso de suelo en subcuenca del río Guacalate	15
V.	Cálculo de pendiente media de la subcuenca del río Guacalate	17
VI.	Histograma de frecuencias altimétricas	18
VII.	Características de la cuenca de acuerdo con el valor kc	22
VIII.	Resultados del índice de compacidad	23
IX.	Resultado del factor de forma.....	24
X.	Estaciones meteorológicas utilizadas para el análisis de régimen de lluvia.....	29
XI.	Precipitación media anual en subcuenca del río Guacalate	30
XII.	Parámetros estadísticos de lluvia mensual.....	33
XIII.	Parámetros estadísticos de lluvia diaria.....	33
XIV.	Magnitud de la lluvia diaria máxima, en mm, asociada a diferentes periodos de retorno para la serie observada en la estación Alameda Icta, en el período 1982-2016	39
XV.	Magnitud de la lluvia diaria máxima, en mm, asociada a diferentes periodos de retorno para la serie observada en la estación Suiza Contenta, en el período 1979-2016	39
XVI.	Magnitud de la lluvia diaria máxima, en mm, asociada a diferentes periodos de retorno para la serie observada en la estación Santa Cruz Balanya, en el periodo 1979-2016.....	40
XVII.	Magnitud de la lluvia diaria máxima, en mm, asociada a diferentes periodos de retorno para la serie observada en la estación Insivumeh, en el periodo 1979-2016.....	40

XVIII.	Magnitud de la lluvia diaria máxima, en mm, asociada a diferentes periodos de retorno para la serie observada en la estación Sabana Grande, en el periodo 1979-2016	41
XIX.	Magnitud de la lluvia diaria máxima, en mm, asociada a diferentes periodos de retorno, para cada estación	44
XX.	Área asignada para cada estación	44
XXI.	Precipitación media para diferente tiempo de retorno	45
XXII.	Número de curva en función del uso del suelo y grupo hidrológico, para AMC II	53
XXIII.	Condición hidrológica	55
XXIV.	Condición de humedad antecedente propuesto por el SCS.....	57
XXV.	Número de curva en función del uso del suelo	57
XXVI.	Cálculo del número de curva para subcuenca	58
XXVII.	Número de curva en función de AMC	59
XXVIII.	Hidrograma adimensional tabulado SCS	64
XXIX.	Hietograma de la tormenta observada en la estación Insivumeh el 30/05/2010	69
XXX.	Valores de K para el cálculo de la lluvia de diseño para diferentes periodos de retorno, en la estación Suiza Contenta.....	70
XXXI.	Hietograma de 10 minutos de la tormenta asociada al periodo de retorno de 100 años en la estación Suiza Contenta basado en la tormenta observada en la estación Insivumeh	71

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
A	Área
Q	Caudal
km	Kilometro
km²	Kilómetro cuadrado
L	Longitud
m	Metro
mm	Milímetros
Msnm	Metros sobre el nivel del mar
CN	Número de curva
S	Pendiente
Tc.	Tiempo de concentración
Tr	Tiempo de retorno

GLOSARIO

Absorción	Incorporación de agua o materia disuelta o ambas dentro de la estructura de un sólido.
AMC	<i>Antecedent moisture condition.</i>
Año hidrológico	Periodo de 12 meses continuos del mes de mayo del presente año a abril del siguiente.
Capacidad de absorción	Cantidad de agua absorbida que la sustancia receptora puede aceptar.
Cuenca	Depresión de terreno cuyas aguas afluyen al mismo cuerpo de agua; es decir, un territorio que drena sus aguas naturalmente.
Crecidas	Elevación generalmente rápida en el nivel de las aguas de un curso, hasta un máximo a partir del cual dicho nivel desciende a una velocidad menor.
Escorrentía	Parte de la precipitación que se presenta en forma de flujo en un curso de agua.
HEC-HMS	<i>Hydrologic Engineering Center-Hydrologic Modeling System.</i>

Hidrograma	Expresión, grafica o no, de la variación del caudal a lo largo del tiempo.
Hietograma	Gráfico que muestra la intensidad de precipitación en función del tiempo.
INSIVUMEH	Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología.
Precipitación	Elementos líquidos o solidos procedentes de la condensación de vapor de agua que caen de la atmosfera o son depositados desde el aire en el suelo.
SCS	<i>Soil Conservation Service.</i>

RESUMEN

El siguiente trabajo de graduación presenta el análisis de la subcuenca del río Guacalate hasta la estación Alotenango. Dado que la parte baja del departamento de Sacatepéquez ha sido muy vulnerable a inundaciones a causa de las tormentas, se recabó información morfométrica de la subcuenca, así como sobre las precipitaciones históricas para un análisis de lluvia.

En el capítulo 3 se analiza la lluvia histórica mediante distribuciones probabilísticas, entre ellas Log Normal, Gamma, Log Pearson y Gumbel. Esto para determinar si se ajustan a dichas distribuciones y conocer la precipitación para diferentes periodos de retorno. Para el análisis se utilizó el programa Hidroesta.

En el capítulo 4 se modela la precipitación mediante dos métodos de distribución de lluvia sobre la cuenca; estos métodos son los polígonos de *Thiessen* y las Isoyetas.

En los últimos 3 capítulos se analiza la superficie de la subcuenca mediante el método de servicio de conservación de suelos. Se explica sobre el hidrograma unitario y sus variantes y por último, con la información obtenida del análisis de lluvia y de los componentes morfométricos de la subcuenca, se determina el caudal para diferentes periodos de retorno con tres humedades antecedentes diferentes.

OBJETIVOS

General

Determinar la avenida máxima en el río Guacalate en la estación Alotenango, a través del método *Soil Conservation Service* (SCS).

Específicos

1. Modelar un hidrograma unitario sintético para la subcuenca del río Guacalate, utilizando el método *Soil Conservation Service* (SCS).
2. Caracterizar el área de la subcuenca en estudio.
3. Evaluar la información hidroclimática para el análisis de crecida.
4. Realizar el análisis hidrológico de crecida con diferentes distribuciones teóricas de frecuencia.
5. Evaluar el río Guacalate bajo distintos valores de CN para un mismo cauce natural.

INTRODUCCIÓN

El río Guacalate, localizado en la vertiente del Pacífico, nace en la Sierra Madre, en el departamento de Chimaltenango dirección sur. Atraviesa Sacatepéquez y se une con el río Achguate en Masagua, Escuintla, para desembocar en el Océano Pacífico.

En la época lluviosa, los caudales de los ríos aumentan significativamente y el río Guacalate no es la excepción. Estos caudales amenazan con inundaciones a varios municipios del departamento de Sacatepéquez, y provocan inundaciones en los municipios aledaños al río.

Por esta razón, es importante la estimación del caudal máximo probable en un punto del río, para conocimiento de las autoridades y proyectar obras para la retención del caudal, así como para proyectos de infraestructura.

En el presente trabajo se deducirán hidrogramas sintéticos con el método *soil conservation service* (SCS) de la subcuenca del río Guacalate, a partir de un análisis de datos pluviométricos, donde inicialmente se describen conceptos generales para el desarrollo de este trabajo.

1. CONCEPTOS GENERALES

1.1. Ciclo hidrológico

El ciclo hidrológico se define como la secuencia de fenómenos por medio de los cuales el agua pasa de la superficie terrestre, en la fase de vapor, a la atmósfera y regresa en sus fases líquida y sólida. La transferencia de agua desde la superficie de la tierra hacia la atmósfera, en forma de vapor de agua, se debe a la evaporación directa, a la transpiración por las plantas y animales y por sublimación (paso directo del agua sólida a vapor de agua).

El ciclo hidrológico puede ser visto, en una escala planetaria, como un gigantesco sistema de destilación, extendido por todo el planeta. El calentamiento de las regiones tropicales debido a la radiación solar provoca la evaporación continua del agua de los océanos, la cual es transportada bajo forma de vapor de agua por la circulación general de la atmósfera, a otras regiones. Durante la transferencia, parte del vapor de agua se condensa debido al enfriamiento y forma nubes que originan la precipitación. El regreso a las regiones de origen resulta de la acción combinada del escurrimiento proveniente de los ríos y de las corrientes marinas¹

1.2. Hidrografía en Guatemala

La República de Guatemala se puede dividir en 3 grandes vertientes, de acuerdo al punto donde desembocan todos los ríos que atraviesan o nacen en el territorio nacional.

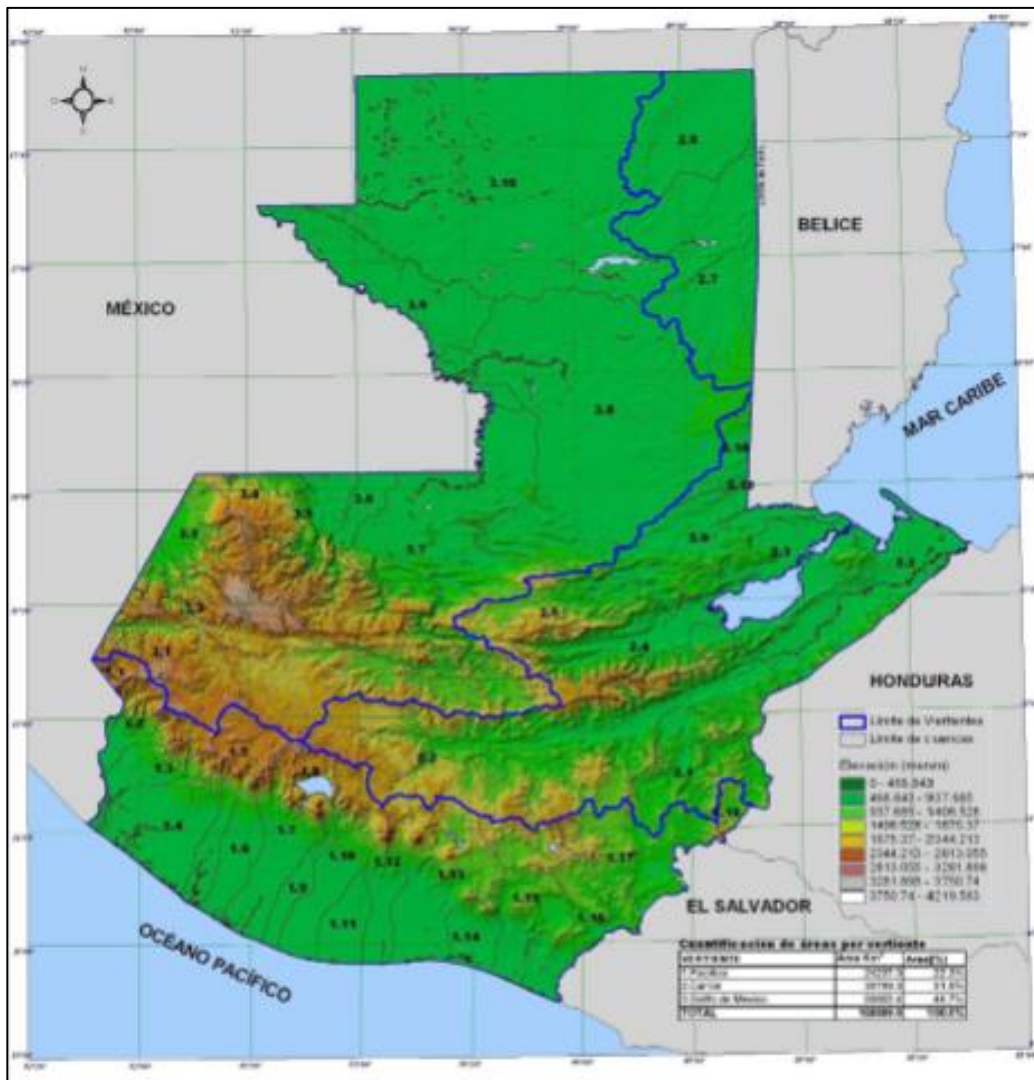
Cada vertiente tiene condiciones propias que afectan las características de los ríos que están incluidos en ella. Las tres vertientes son:

- La vertiente del Golfo de México

¹ MARCANO, José E. *Educacion Ambiental*. <https://jmarcano.com/nociones/ciclo1.html>. Consulta: mayo de 2019.

- La vertiente del Mar Caribe
- La vertiente del Pacífico

Figura 1. Hidrografía en Guatemala



Fuente: Sistema de información del Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación (MAGA) (2016).

1.2.1. Vertiente del Golfo de México

“La vertiente del Golfo de México, contiene cuencas que cruzan la frontera con dicho país, con un área de 50 803 km² (47 % del territorio), está conformada por 10 cuencas, con un caudal medio anual de 1 372 m³ /s. Son las cuencas más extensas del país y las más caudalosas, todas conforman finalmente el caudal del río Grijalva en México”.²

Tabla I. Cuencas de la vertiente del Golfo de México

Núm.	Cuenca	Área (km ²)	Núm.	Cuenca	Área (km ²)
3.1	Cuilco	2 274	3,6	Xacibal	1 366
3.2	Selegua	1 535	3,7	Chixoy	12 150
3.3	Nentón	1 451	3,8	La Pasión	12 156
3.4	Pojom	813	3,9	Usumacinta	2 638
3.5	Ixcán	2 085	3,10	San Pedro	14 335
Área total de la vertiente de México (kms ²)					50 803

Fuente: elaboración propia.

1.2.2. Vertiente del Caribe

La vertiente del Caribe tiene una extensión de 33 799,29 km² (31 % del país), con 10 cuencas y un caudal promedio anual de 1 010 m³ /s. Incluye los ríos con mayor longitud en el territorio guatemalteco. En general las cuencas están muy bien definidas. En las partes altas tiene fuertes pendientes, que van drenando para convertirse en ríos sinuosos con valles inundables en las partes más bajas cerca de las desembocaduras. Las condiciones orográficas inducen a que en esta vertiente se tenga una de las zonas más secas del istmo centroamericano³.

² COBOS, Carlos Roberto y COLOM DE MORAN, Elisa. *Situación del recurso hídrico en Guatemala: documento técnico del perfil ambiental de Guatemala*. p. 5.

³ *Ibíd.*

Tabla II. **Cuencas de la vertiente del Atlántico**

No.	Cuenca	Área (km2)	No.	Cuenca	Área (km2)
2.1	Grande de Zacapa	2 462	2,5	Cahabón	2 459
2.2	Motagua	12 670	2,6	Sarstún	2 109
2.3	Río Dulce	3 435	2,7	Vertiente Belice	8 159
2.4	Polochic	2 811			
Área total de la vertiente del Caribe (kms2)					34 105

Fuente: elaboración propia.

1.2.3. **Vertiente del Pacífico**

La vertiente del Pacífico tiene una extensión de 24 237,26 km² (22 % del territorio), 18 cuencas y caudal promedio anual de 808 m³ /s. En su parte alta está conformada por los valles del altiplano central del país, que drenan tanto a esta vertiente como a la del Caribe y la del Golfo de México, los cauces atraviesan la cadena volcánica para drenar finalmente en la planicie costera y llegar al Océano Pacífico. En general las cuencas son angostas, con fuertes pendientes en la parte media y con una pendiente muy suave en la parte baja. Las cuencas de esta vertiente se ven caracterizadas por una rápida respuesta a la precipitación y un alto grado de sedimentación en la planicie costera, incrementado por la alta disponibilidad de sedimento producto de los volcanes activos. Los cauces corren perpendiculares a la costa y a la cadena volcánica. Los límites entre las cuencas en la planicie costera están vagamente definidos. La figura 1 muestra las cuencas hidrográficas de Guatemala⁴.

⁴ COBOS, Carlos Roberto y COLOM DE MORAN, Elisa. *Situación del recurso hídrico en Guatemala: documento técnico del perfil ambiental de Guatemala*. p.5

Tabla III. **Cuencas de la vertiente del Pacífico**

Núm.	Cuenca	Área (km ²)	Núm.	Cuenca	Área (km ²)
1.1	Coatán	270	1,10	Coyolate	1 648
1.2	Suchiate	1 054	1,11	Acomé	706
1.3	Naranjo	1 273	1,12	Achiguate	1 291
1.4	Ocosito	2 035	1,13	María Linda	2 727
1.5	Salamá	1 510	1,14	Paso Hondo	512
1.6	Sis-cán	919	1,15	Los Esclavos	2 271
1.7	Nahualate	1 941	1,16	Paz	1 732
1.8	Atitlán	541	1,17	Ostúa-Guija	2,243
1.9	Madre Vieja	1,007	1,18	Olopa	310
Área total de la vertiente del Pacífico (kms ²)					23,990

Fuente: elaboración propia.

1.3. **Análisis de eventos extremos**

A continuación, se presentan los análisis de eventos externos.

1.3.1. **Conceptos básicos**

A continuación, se describen los conceptos básicos de los eventos externos.

1.3.1.1. **Probabilidad**

“Muchos fenómenos hidrológicos son erráticos y aleatorios y solo pueden ser interpretados en un sentido probabilístico. Uno de los problemas más importantes en la hidrología es la interpretación de los registros del pasado para inferir la ley de probabilidades de la variable aleatoria de interés. Esto se conoce como Análisis de frecuencia”⁵.

⁵ ZAPATA HERNÁNDEZ, Arley David. *Estadística-Análisis de frecuencia*. p. 35.

1.3.1.2. Periodo de retorno

El periodo de retorno T se define como el tiempo o lapso promedio entre la ocurrencia de un evento igual o mayor a una magnitud dada; dicho de otra forma, es el intervalo de recurrencia promedio para un cierto evento. Estadísticamente, el periodo de retorno es la inversa de la probabilidad de excedencia, es decir:

$$T = \frac{1}{P(X \geq x)}$$

O también puede ser representado por la probabilidad de no excedencia, como se muestra a continuación:

$$T = \frac{1}{1 - P(X \geq x)}$$

El período de retorno se puede entender como un coeficiente de seguridad que se asigna a las distintas estructuras, a raíz de la falta de información y conocimiento del comportamiento de las variables hidrológicas (precipitación, caudales). Es una medida de seguridad ante cualquier eventualidad.

1.3.1.3. Tiempo de concentración

“El tiempo de concentración también puede definirse como el tiempo mínimo necesario para que todos los puntos de la superficie de la cuenca contribuyan simultáneamente al caudal recibido en la salida. Efectivamente, si el tiempo es un poco menor, cuando lleguen las gotas caídas en los puntos más alejados, la superficie próxima a la salida ya no está aportando escorrentía”⁶.

⁶ SÁNCHEZ SAN ROMÁN, F. Javier. *Hidrología Superficial (III): Relación Precipitación - Escorrentía*. p. 3.

1.3.1.4. Crecidas

Es un evento natural, constituido por un incremento importante y súbito de caudal en un sistema fluvial. Lleva consigo un ascenso del nivel de la corriente, que puede desbordar el cauce menor para ocupar progresivamente el cauce mayor, hasta alcanzar un máximo o punta de caudal o caudal-punta y descender a continuación.

1.4. Componentes básicos de riesgo

El impacto de los desastres en las actividades humanas ha sido tema tratado en los últimos años en un amplio número de publicaciones desarrolladas por diversas disciplinas, que han conceptualizando sus componentes en forma diferente, aunque en la mayoría de los casos de una manera similar. En una reunión realizada por la UNDRR en conjunto con la UNESCO, expertos definieron algunos conceptos.

1.4.1. Riesgo

El riesgo, o daño, o pérdida esperada, obtenida de la convolución de la probabilidad de ocurrencia de eventos peligrosos y de la vulnerabilidad de los elementos expuestos a tales amenazas. Por lo tanto, el riesgo puede ser de carácter geológico, hidrológico, atmosférico o, también, tecnológico, dependiendo de la naturaleza de la amenaza a la cual está referido.

Desde el punto de vista físico, el riesgo específico es la pérdida esperada en un periodo de tiempo, que puede ser expresada como una proporción del valor o costo de reemplazo de los elementos bajo riesgo. Usualmente, el riesgo específico representa pérdida de vidas, heridos y pérdidas de inversión de capital. Ahora bien, debido a la dificultad que significa estimar el "riesgo total", o sea la cuantificación acumulativa del riesgo específico de cada uno de los elementos expuestos y para cada una de las amenazas, en general se acepta referirse al riesgo haciendo alusión a un riesgo específico representativo para la región, como el riesgo por inundación para las cosechas, el riesgo sísmico de las edificaciones o el riesgo de las líneas vitales por deslizamiento.

Adicionalmente, es común que el riesgo sea estimado solamente en términos físicos, dado que la vulnerabilidad social es difícil de evaluar en términos cuantitativos, pero esto no quiere decir que no sea posible estimar, para estos casos, en forma relativa o mediante indicadores, riesgos relativos, que igualmente permiten tomar decisiones y definir prioridades de prevención y mitigación.⁷

1.4.2. Amenaza

La amenaza está relacionada con el peligro que significa la posible ocurrencia de un fenómeno físico de origen natural, de origen tecnológico o provocado por el hombre, que puede manifestarse en un sitio y durante un tiempo de exposición prefijado. Técnicamente, se expresa como la probabilidad de exceder un nivel de ocurrencia de un evento con un nivel de severidad, en un sitio específico y durante un periodo de tiempo.⁸

Infortunadamente, debido a la complicación de los sistemas físicos en los cuales un gran número de variables puede limitar el proceso, la ciencia aún no cuenta con técnicas que le permitan esculpir con alta precisión dichos sistemas y, por lo tanto, los mecanismos generadores de cada una de las amenazas. Por esta razón, la estimación de la amenaza, en la mayoría de los casos, se realiza al armonizar el análisis probabilístico con el análisis del comportamiento físico de la fuente generadora. Maneja información de eventos que han ocurrido en el pasado y modelando con algún grado de aproximación los sistemas físicos involucrados.

En otras palabras, para ponderar la probabilidad de que se presente un evento de una u otra intensidad durante un periodo de exposición, es preciso contar con información, o más completa posible, acerca del número de eventos que han ocurrido en el pasado y acerca de la intensidad que tuvieron los mismos.

⁷ CARDONA A., Omar Dario. *Los desastres no son naturales*. p. 51-75.

⁸ *Ibíd.*

Es importante diferenciar la amenaza del evento que la caracteriza, puesto que la amenaza significa la potencialidad de la ocurrencia de un evento con cierto grado de severidad, mientras el evento en sí mismo representa al fenómeno en términos de sus características, su dimensión y ubicación geográfica.

Igualmente, es importante diferenciar entre un evento posible y un evento probable, puesto que el primero se refiere a un fenómeno que puede suceder, mientras que el segundo se refiere a un fenómeno esperado debido a que existen razones o argumentos técnico-científicos para creer que ocurrirá o se verificará en un tiempo determinado. Estos conceptos están íntimamente relacionados con calificativos como máximo posible y máximo probable, cuya diferenciación es básicamente la misma.

Por otra parte, es común en la literatura técnica utilizar el concepto de período de retorno o intervalo de recurrencia de un evento, que corresponde al tiempo promedio entre eventos con características similares en una región. Este es un concepto estadístico importante de tomar en cuenta, ya que en ocasiones se tiene la idea errónea de que ese intervalo es determinístico.⁹

1.4.3. Vulnerabilidad

La vulnerabilidad corresponde a la predisposición o susceptibilidad que tiene un elemento de ser afectado o de sufrir una pérdida. En consecuencia, la diferencia de vulnerabilidad de los elementos determina el carácter selectivo de la severidad de los efectos de un evento externo sobre los mismos.

La vulnerabilidad, en términos generales, puede clasificarse como de carácter técnico y de carácter social, siendo la primera más factible de cuantificar en términos físicos y funcionales, por ejemplo, en pérdidas potenciales referidas a los daños o la interrupción de los servicios, a diferencia de la segunda, que prácticamente sólo puede valorarse cualitativamente y en forma relativa, debido a que está relacionada con aspectos económicos, educativos, culturales, ideológicos, entre otros.¹⁰

⁹ CARDONA A., Omar Dario. *Los desastres no son naturales*. p. 51-75.

¹⁰ *Ibíd.*

En consecuencia, un análisis de vulnerabilidad es un proceso mediante el cual se establece el nivel de exposición y la predisposición a la pérdida de un elemento o grupo de elementos ante una amenaza específica. Contribuye al conocimiento del riesgo a través de interacciones de dichos elementos con el ambiente peligroso.

1.4.4. Desastre

Un desastre puede definirse como un evento o suceso que ocurre, en la mayoría de los casos, en forma repentina e inesperada, causando sobre los elementos sometidos alteraciones intensas, representadas en la pérdida de vida y salud de la población, la destrucción o pérdida de los bienes de una colectividad y/o daños severos sobre el medio ambiente. Esta situación significa la desorganización de los patrones normales de vida, genera adversidad, desamparo y sufrimiento en las personas, efectos sobre la estructura socioeconómica de una región o un país y/o la modificación del medio ambiente; lo anterior determina la necesidad de asistencia y de intervención inmediata.¹¹

Los desastres pueden ser ocasionados por un fenómeno natural, estimulados por el hombre o ser el resultado de una falla de carácter técnico en sistemas industriales o bélicos.

Algunos desastres de origen natural corresponden a amenazas que no pueden ser neutralizadas debido a que difícilmente su mecanismo de origen puede ser intervenido, aunque en algunos casos puede controlarse parcialmente. Terremotos, erupciones volcánicas, tsunamis y huracanes son ejemplos de amenazas que aún no pueden ser intervenidas en la práctica, mientras que inundaciones y deslizamientos pueden llegar a controlarse o atenuarse con obras civiles de canalización y estabilización de suelos.

Una lista representativa de los fenómenos naturales que pueden originar desastres o calamidades es la siguiente.

- Terremoto
- Volcanes
- Inundaciones
- Sequías

¹¹ CARDONA A., Omar Dario. *Los desastres no son naturales*. p. 51-75.

- Deforestación
- Tsunamis
- Huracanes
- Derrumbes
- Desertificación
- Epidemias¹²

1.4.5. Inundaciones

Puede definirse como una invasión de las tierras situadas junto a un cauce por el desbordamiento de sus aguas, debido a crecidas del caudal, causado por lluvias abundantes.

1.4.6. Efecto de los desastres

Los efectos que puede causar un evento varían dependiendo de las características propias de los elementos expuestos y de la naturaleza del evento mismo. El impacto puede causar diferentes tipos de alteraciones. En general, pueden considerarse como elementos bajo riesgo la población, el medio ambiente y la estructura física representada por la vivienda, la industria, el comercio y los servicios públicos.

En un amplio número de países en vías de desarrollo, como los de América Latina, se han presentado desastres en los cuales han muerto miles de personas y se han perdido cientos de millones de dólares en veinte o treinta segundos. Eventos cuyos costos directos y obviamente indirectos pueden llegar a cifras en muchos casos incalculables, que equivalen a un inmenso porcentaje de su producto interno bruto.

Debido a la recurrencia de diferentes tipos de desastres, en varios países del continente se puede llegar a tener un significativo porcentaje promedio anual de pérdidas por desastres naturales con respecto a su producto interno bruto. Esta situación, como es obvio, se traduce en empobrecimiento de la población y en estancamiento, puesto que implica llevar a cabo gastos no previstos que afectan la balanza de pagos y en general el desarrollo económico.¹³

¹² CARDONA A., Omar Dario. *Los desastres no son naturales*. p. 51-75.

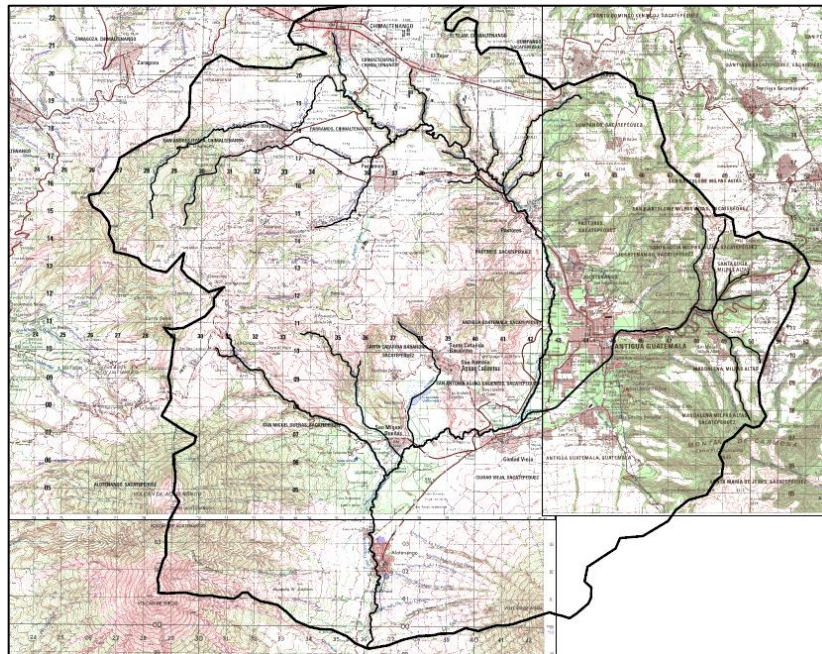
¹³ *Ibíd.*

2. CARACTERIZACIÓN DE LA SUBCUENCA DEL RÍO GUACALATE

2.1. Ubicación geográfica de la subcuenca

La subcuenca del río Guacalate se ubica en varios municipios del departamento de Sacatepéquez (Antigua Guatemala, Sumpango, San Miguel Dueñas, Ciudad Vieja, Alotenango, Pastores, Jocotenango) y de Chimaltenango (Parramos, San Andrés Itzapa y el Tejar). Forma parte de la cuenca Achiguate de la vertiente del Pacífico.

Figura 2. Imagen de subcuenca río Guacalate



Fuente: Recorte de mapa cartográfico escala 1:50000, proporcionado por el IGN.

2.2. Delimitación de la cuenca

El río Guacalate tiene como principales afluentes el río de La Virgen que inicia en San Andrés Itzapa, departamento de Chimaltenango. La subcuenca está delimitada al noroccidente por los municipios de Zaragoza y Patzicia, al noreste con los municipios de Santiago Sacatepéquez y San Lucas Sacatepéquez, al este con el municipio de Villa Nueva del departamento de Guatemala, al occidente con el municipio de Acatenango.

2.3. Determinación de la cuenca

Entre los parámetros morfométricos de la subcuenca del río Guacalate en el departamento de Sacatepéquez se puede mencionar.

2.3.1. Área de drenaje

Es el área plana en proyección horizontal, de forma muy irregular, obtenida después de delimitar la cuenca mediante una línea divisora llamada parteaguas o divisoria de aguas. Consiste en una línea imaginaria formada por los puntos de mayor nivel topográfico, que separa la cuenca en estudio de las cuencas vecinas.

El área de drenaje de la subcuenca del río Guacalate calculada es de 434 km², delimitada desde la curva 3 800 hasta los 1 300 metros sobre el nivel del mar.

2.3.2. Tipo y uso de suelo

La agricultura es el uso mayor de suelo que se da en la subcuenca con más del 50 % del territorio; esto se debe a que el suelo es muy rico en minerales y nutrientes para las plantaciones, por lo que se considera un territorio agrícola.

Los bosques son el segundo uso de suelo, ya que por las pendientes pronunciadas, en gran parte de la subcuenca dificulta su uso para la agricultura. Con un porcentaje menor al 7 % del territorio de la subcuenca, se encuentran los centros poblados. La mano del hombre en el territorio aún para infraestructura es escasa.

Esta información da a entender que el suelo tiene una menor retención del agua de precipitación al ocurrir una tormenta; así pues, genera crecidas de gran magnitud.

Tabla IV. **Uso de suelo en subcuenca del río Guacalate**

Uso del suelo	Porcentaje área
Agricultura limpia anual	54 %
Hortalizas	4 %
Siembra café	3 %
Bosque natural	8 %
Bosque secundario	23 %
Centros poblados	7 %
Espacio abierto, sin vegetación	1 %
Total	100 %

Fuente: elaboración propia.

2.3.3. Pendiente media

La pendiente del terreno es un factor importante en el proceso de flujo de superficie; es, por lo tanto, un parámetro hidrológico de interés.

$$s = \frac{DL_I}{A}$$

Donde:

D= equidistancia entre curvas de nivel (kilómetros).

L_I= longitud total de todas las curvas de nivel comprendidas en la cuenca (km).

A= área de la cuenca (kilómetros cuadrados).

Tabla V. **Cálculo de pendiente media de la subcuenca del río Guacalate**

Cota	Longitud	Equidistancia (Km)	Área de la subcuenca	Pendiente media
1 300	2,68605	0,1	434,79	0,00061778
1 400	9,57637	0,1	434,79	0,00220253
1 500	34,9131	0,1	434,79	0,00802988
1 600	80,76133	0,1	434,79	0,01857479
1 700	122,2983	0,1	434,79	0,02812813
1 800	128,31385	0,1	434,79	0,02951168
1 900	146,60099	0,1	434,79	0,03371765
2 000	112,83351	0,1	434,79	0,02595127
2 100	107,33668	0,1	434,79	0,02468702
2 200	83,51391	0,1	434,79	0,01920787
2 300	70,54788	0,1	434,79	0,01622574
2 400	55,39742	0,1	434,79	0,01274119
2 500	25,08032	0,1	434,79	0,00576838
2 600	16,7707	0,1	434,79	0,0038572
2 700	13,47773	0,1	434,79	0,00309983
2 800	11,73825	0,1	434,79	0,00269975
2 900	10,46311	0,1	434,79	0,00240647
3 000	9,82082	0,1	434,79	0,00225875
3 100	9,50093	0,1	434,79	0,00218518

Continuación de la tabla V.

Cota	Longitud	Equidistancia (Km)	Área de la subcuenca	Pendiente media
3 200	9,45451	0,1	434,79	0,0021745
3 300	9,03274	0,1	434,79	0,00207749
3 400	7,55383	0,1	434,79	0,00173735
3 500	6,17755	0,1	434,79	0,00142081
3 600	4,64102	0,1	434,79	0,00106742
3 700	3,51977	0,1	434,79	0,00080953
3 800	1,60026	0,1	434,79	0,00036805
3 900	0,66234	0,1	434,79	0,00015234
1094,27327			0,25167857	25,17 %

Fuente: elaboración propia.

2.3.4. Histograma de frecuencias altimétricas

En un histograma se indica el porcentaje del área comprendida entre dos alturas determinadas.

Tabla VI. Histograma de frecuencias altimétricas

Intervalo entre curvas de nivel (m)		Cota Media (Ci) en M.	Área (ai) en Km ²	Área /Total Área (%)	Porcentaje de área acumulado (%)	
1 200	1 300	1 250	0,38	0,00	0,09 %	476,32
1 300	1 400	1 350	4,75	0,01	1,18 %	6 416,98
1 400	1 500	1 450	25,81	0,06	7,12 %	37 423,05
1 500	1 600	1 550	45,17	0,10	17,51 %	70 012,18
1 600	1 700	1 650	32,66	0,08	25,02 %	53 882,32
1 700	1 800	1 750	70,33	0,16	41,19 %	123 070,85
1 800	1 900	1 850	51,44	0,12	53,02 %	95 170,61
1 900	2 000	1 950	54,27	0,12	65,51 %	105 817,37
2 000	2 100	2 050	37,31	0,09	74,09 %	76 486,28
2 100	2 200	2 150	26,82	0,06	80,25 %	57 654,57
2 200	2 300	2 250	21,61	0,05	85,22 %	48 611,50
2 300	2 400	2 350	18,01	0,04	89,37 %	42 330,73
2 400	2 500	2 450	14,74	0,03	92,76 %	36 101,11
2 500	2 600	2 550	10,17	0,02	95,09 %	25 923,42

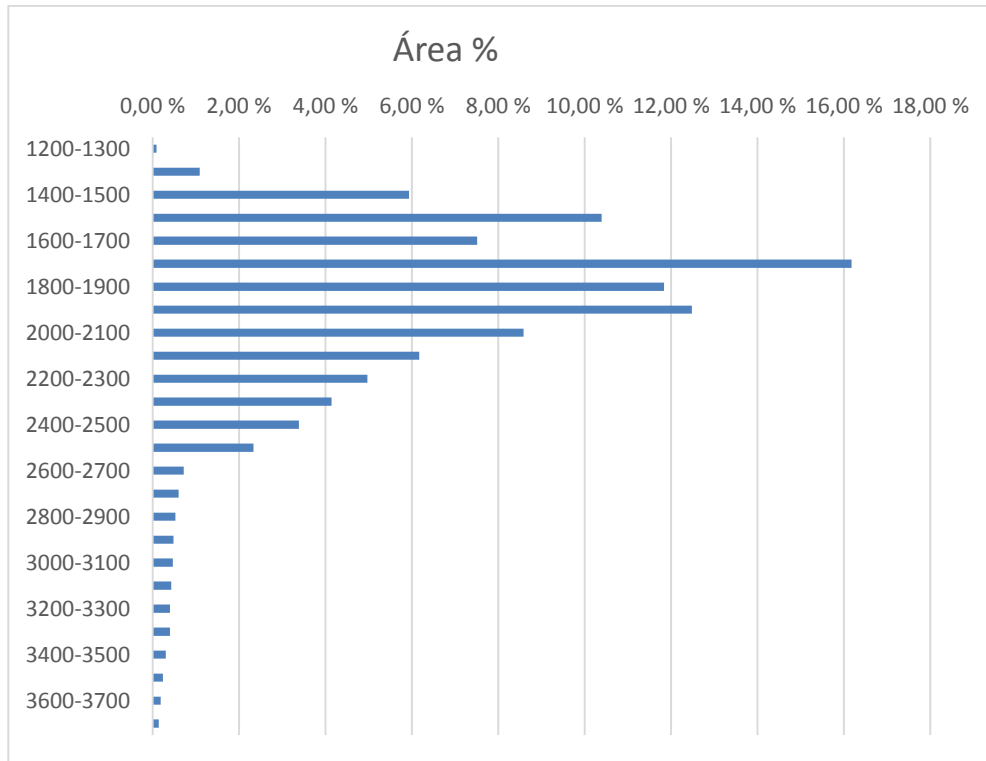
Continuación de la tabla VI.

2 600	2 700	2 650	3,12	0,01	95,81 %	8 276,94
2 700	2 800	2 750	2,63	0,01	96,42 %	7 220,02
2 800	2 900	2 850	2,28	0,01	96,94 %	6 496,54
2 900	3 000	2 950	2,11	0,00	97,43 %	6 216,84
3 000	3 100	3 050	2,05	0,00	97,90 %	6 240,91
3 100	3 200	3 150	1,88	0,00	98,33 %	5 912,18
3 200	3 300	3 250	1,75	0,00	98,73 %	5 693,16
3 300	3 400	3 350	1,73	0,00	99,13 %	5 803,78
3 400	3 500	3 450	1,33	0,00	99,44 %	4 597,47
3 500	3 600	3 550	1,03	0,00	99,67 %	3 662,40
3 600	3 700	3 650	0,81	0,00	99,86 %	2 956,42
3 700	3 800	3 750	0,61	0,00	100,00 %	2 295,38
						434,78
						844 749,33

Fuente: elaboración propia.

$$H = \frac{\sum(C_i \cdot a_i)}{A} \quad 1\,942,94 \text{ Msnm}$$

Figura 4. **Histograma de frecuencias altimétricas**

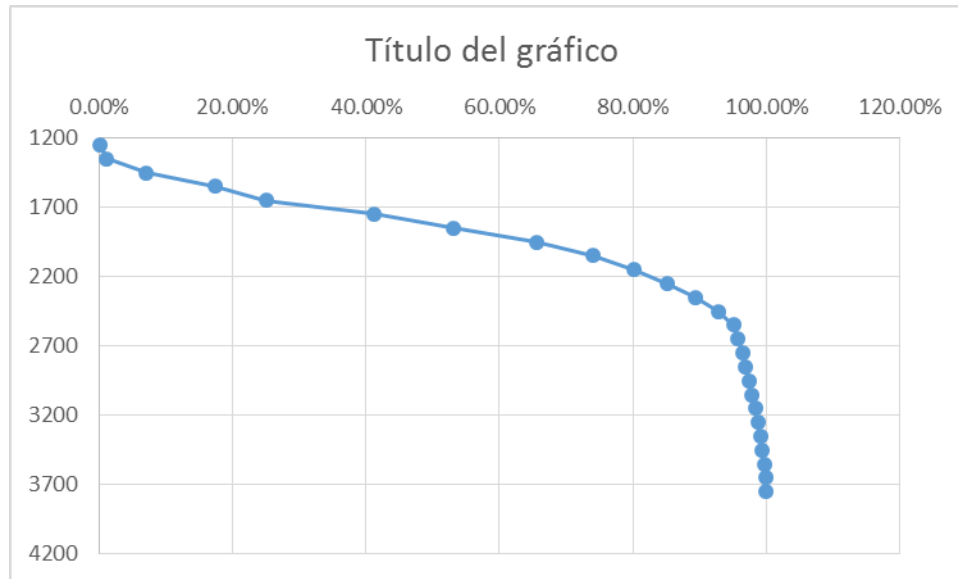


Fuente: elaboración propia.

2.3.5. **Curva hipsométrica**

Es la representación gráfica del relieve de una cuenca; es decir, la curva hipsométrica indica el porcentaje de área de la cuenca o superficie de la cuenca en km^2 que existe por encima de una cota determinada, representada en coordenadas rectangulares.

Figura 5. **Curva hipsométrica**



Fuente: elaboración propia.

La curva hipsométrica (figura 5) muestra que la pendiente en gran parte de la cuenca es suave; sin embargo, al final de la misma presenta un fuerte incremento de la pendiente, lo cual ocasiona una escorrentía superficial alta y erosión del suelo.

2.3.6. Índice de compacidad (Kc)

El índice de compacidad de Gravelius (Gravelius, 1914) compara la longitud del perímetro con la circunferencia de un círculo con igual superficie que la cuenca.

- Área de la cuenca

$$A = \pi * r^2$$

- Radio en función del área y π

$$r = \sqrt{\frac{A}{\pi}}$$

El índice será mayor o igual a la unidad, de modo que cuanto más cercano a ella se encuentra, más se aproximará su forma a la del círculo. El coeficiente K es un número adimensional independiente de la extensión de las cuencas cuando K se aleja más del valor unidad significa un mayor alargamiento en forma de la cuenca.

El grado de aproximación de este índice a la unidad indicará la tendencia a concentrar fuertes volúmenes de aguas de escurrimiento. Es más acentuado cuanto más cercano a uno sea; es decir, mayor concentración de agua.

Tabla VII. **Características de la cuenca de acuerdo con el valor kc**

Clase de forma	Índice de Compacidad	Forma de la cuenca
Clase I	1,0 a 1,25	Casi redonda a oval-redonda
Clase II	1,26 a 1,50	Oval-Redonda a oval oblonga
Clase III	1,51 o más de 2	Oval-oblonga a rectangular-oblonga

Fuente: CARDONA, Benjamín. *Conceptos básicos de Morfometría de Cuencas Hidrográficas*. p. 58.

La razón para usar la relación del área equivalente a la ocupada por un círculo es porque una cuenca circular tiene mayores posibilidades de producir avenidas superiores, dada su simetría.

$$K = \frac{P}{2\pi r}$$

Donde:

K: índice de compacidad

A= área

P= perímetro

$$K = \frac{P}{2\pi\sqrt{\frac{A}{\pi}}}$$

Tabla VIII. **Resultados del índice de compacidad**

Índice de compacidad	
Perímetro	99,58 km
Kc	1,35

Fuente: elaboración propia.

Dado el resultado la subcuenca es de oval redonda a oval oblonga.

2.3.7. Factor de forma

“El factor de forma, según Horton, expresa la relación existente entre el área de la cuenca, y un cuadrado de la longitud máxima o longitud axial de la

misma. Un valor de Kf superior a la unidad proporciona el grado de achatamiento de ella o de un río principal corto y, por consecuencia, con tendencia a concentrar el escurrimiento de una lluvia intensa formando fácilmente grandes crecidas”.¹⁴

Una cuenca con un factor de forma bajo está menos sujeta a crecientes que una de la misma área y mayor factor de forma.

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

Tabla IX. **Resultado del factor de forma**

Factor de forma	
Área de la cuenca	434,77877
Longitud del río	49,1516
Kf	0,18

Fuente: elaboración propia.

2.3.8. **Pendiente media de la cuenca**

Es la relación entre la altura total del cauce principal y la longitud del mismo. Es decir, la diferencia total de elevación del cauce principal (cota máxima- cota mínima), dividida por su longitud total (Lc)

$$S_m = \frac{H_{\max} - H_{\min}}{L}$$

$$S_m = \frac{3\,900\text{ m} - 1\,200\text{ m}}{49\,151\text{ m}}$$

¹⁴ HORTON, R. E. *Erosional development of streams and their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology Geological Society of America Bulletin. U.S.A. p. 25.*

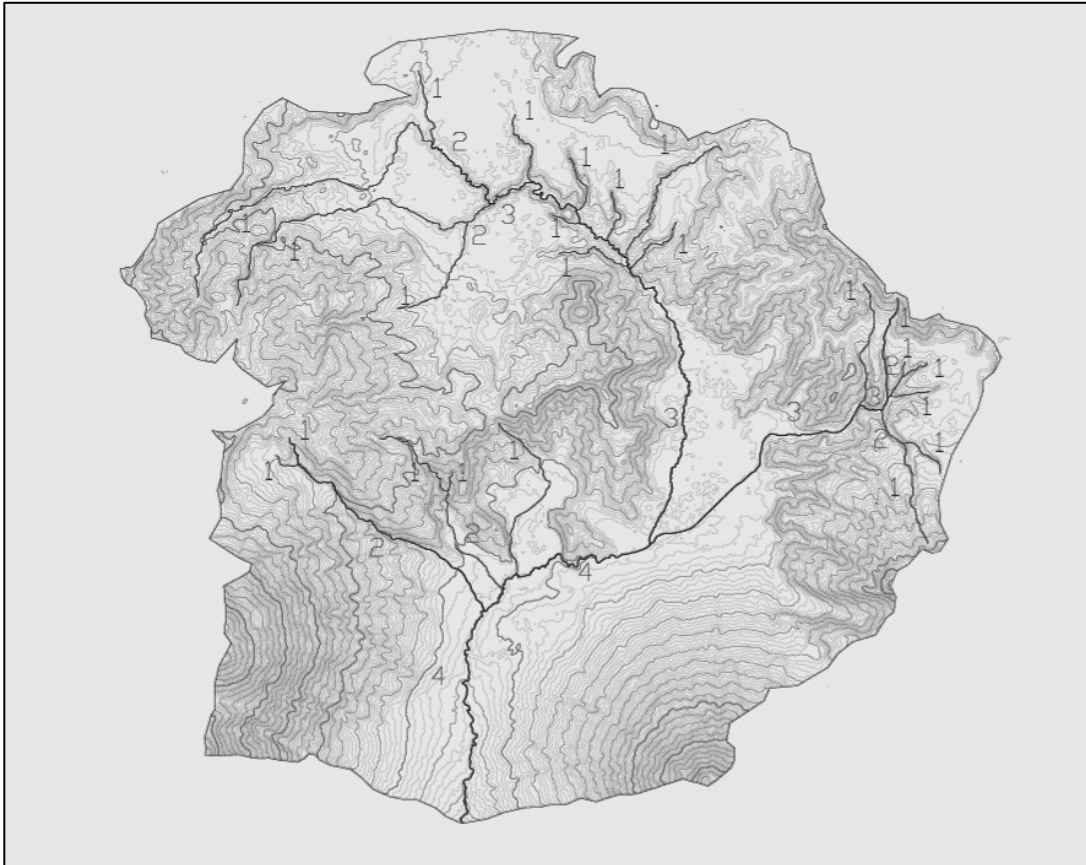
$$S_m = 5,49 \%$$

2.3.9. Orden de las corrientes de agua

El orden de una corriente es el reflejo del grado de ramificación o bifurcación que presenta una cuenca. Se define como corrientes de primer orden son aquellos pequeños canales que no tienen tributarios; corrientes de segundo orden se forman cuando se unen dos corrientes de primer orden; corrientes de tercer orden se forma cuando se unen dos corrientes de segundo orden, corrientes de orden n se forman cuando se unen dos corrientes de n-1.

El río Guacalate se clasifica como de cuarto orden y tienen como principales corrientes tributarias el Pensativo, y el río Guacalate que nace en cercanías del municipio de Patzicia.

Figura 6. **Mapa orden de las cuencas**



Fuente: elaboración propia.

2.3.10. **Densidad de drenaje**

Densidad de drenaje

$$D_d = \frac{L}{A}$$

Donde:

L = longitud total de las corrientes de agua

A = área de la cuenca

$$D_d = \frac{132,70\text{km}}{434,78\text{km}^2}$$

$$D_d = 0,31\text{km}/\text{km}^2$$

3. RÉGIMEN DE LLUVIA Y VARIABILIDAD

La subcuenca del río Guacalate está ubicada en la parte alta de la cuenca Achiguate. Para el análisis de la subcuenca, se utilizaron 5 estaciones meteorológicas, con longitud de 38 a 46 años, siendo de estas la estación Insivumeh la que tiene mayor número de registros. El régimen de lluvia que presenta la subcuenca comprende entre los valores de 1 040 a 3 142 mm al año.

Tabla X. **Estaciones meteorológicas utilizadas para el análisis de régimen de lluvia**

Núm.	Estación	Institución	Inicio	Fin	Longitud de años
1	Santa Cruz Balanya	Insivumeh	1979	2016	38
2	Sabana Grande	Insivumeh	1979	2016	38
2	Insivumeh	Insivumeh	1970	2016	46
4	Alameda	Insivumeh	1979	2016	38
5	Suiza Contenta	Insivumeh	1972	2016	44

Fuente: Insivumeh. *Departamento de Climatología*. <http://historico.insivumeh.gob.gt/que-es-climatologia/>. Consulta: mayo de 2019.

3.1. Régimen de lluvias

A continuación, se describe el régimen de lluvias.

3.1.1. Clasificación de series

Para la clasificación de la serie se utilizó el promedio aritmético para la completación de datos faltantes. Ya que las estaciones por fallas técnicas o algún otro inconveniente no registran datos, con la ayuda de las estaciones cercanas se puede completar dichos registros.

Se presenta la lluvia en forma anual, mensual y diaria.

3.1.2. Lluvia anual

La lluvia anual es la sumatoria de toda la precipitación registrada a lo largo de un año. Según los registros, en 2010 se tuvo un pico de precipitación y según las estaciones, de Sabana Grande obtuvo el mayor registro a lo largo del año.

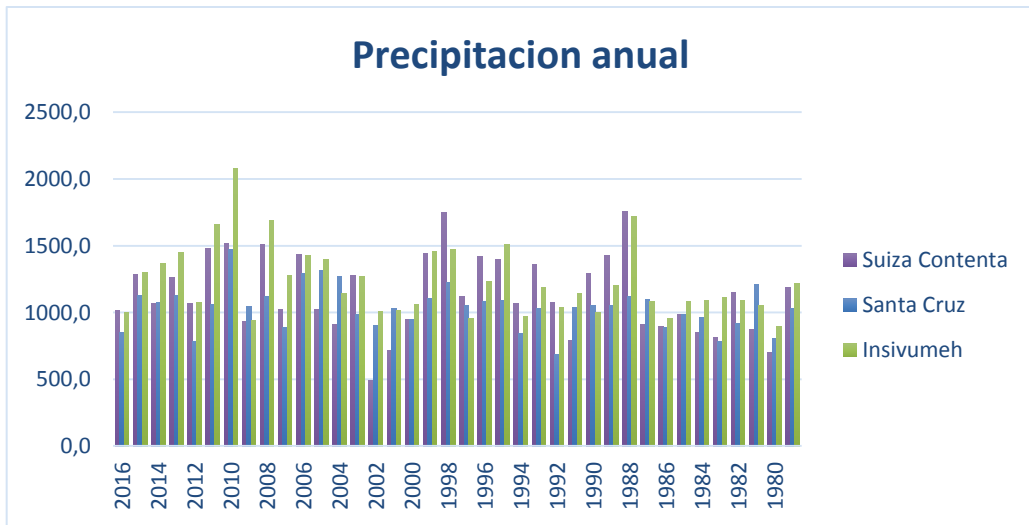
Dado la ubicación de cada estación se aprecia una variación de los registros, en la parte baja. Con una mayor precipitación.

Tabla XI. **Precipitación media anual en subcuenca del río Guacalate**

Núm.	Estación	Media Anual (mm)	Elevación (msnm)	Ubicación en subcuenca
1	Santa Cruz Balanya	1 062,93	2 080	Parte alta
2	Sabana Grande	3 190,90	730	Parte baja
3	Insivumeh	1 257,70	1 502	Parte media
5	Alameda	1 063,82	1 766	Parte media
6	Suiza Contenta	1 166,88	2 015	Parte alta

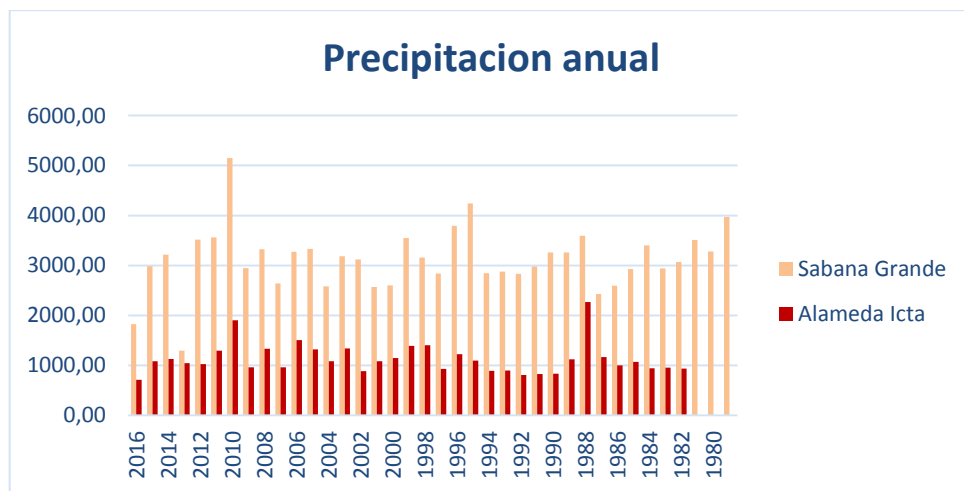
Fuente: Insivumeh. *Departamento de Climatología*. <http://historico.insivumeh.gob.gt/que-es-climatologia/>. Consulta: mayo de 2019.

Figura 7. **Precipitación anual (1979-2016) estaciones Suiza Contenta, Santa Cruz, Insivumeh**



Fuente: elaboración propia.

Figura 8. **Precipitación anual (1979-2016) estaciones Sabana Grande y Alameda Icta**

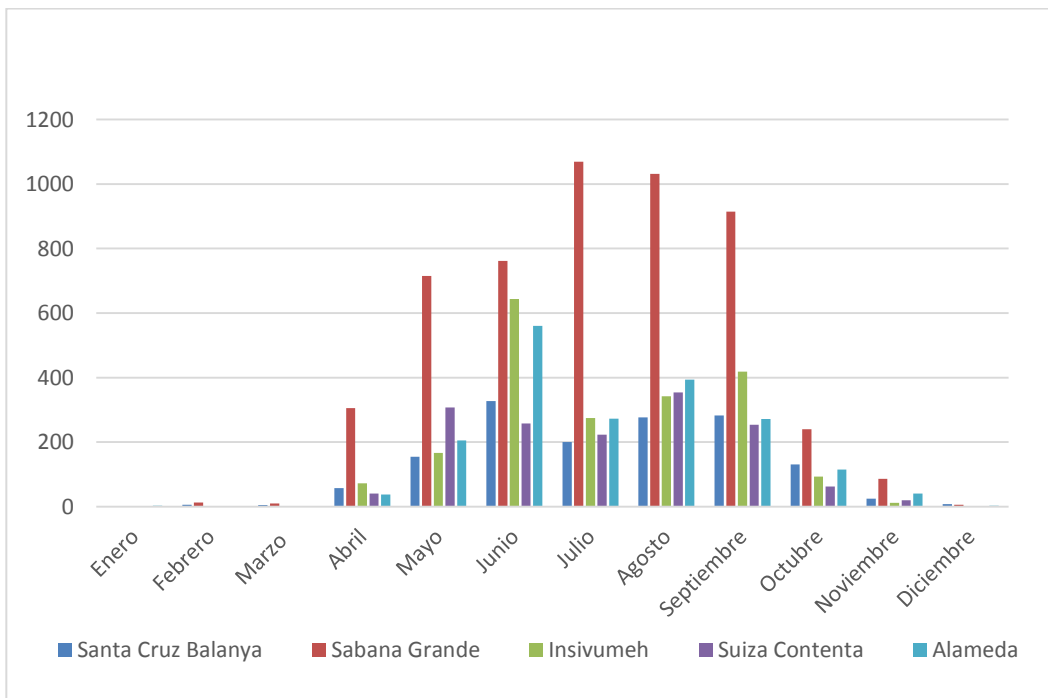


Fuente: elaboración propia.

3.1.3. Lluvia mensual

La lluvia mensual es la sumatoria de toda la precipitación registrada a lo largo de un mes. Según los registros, entre los meses de junio a septiembre se registra una mayor acumulación de lluvia. Así mismo, se aprecia que en la estación Sabana Grande, que está ubicada en la parte baja de la cuenca, se encuentra la mayor cantidad de precipitación registrada.

Figura 9. **Precipitación mensual de estaciones Santa Cruz Balanyá, Sabana Grande, Insivumeh, Suiza Contenta y Alameda**



Fuente: elaboración propia.

Tabla XII. **Parámetros estadísticos de lluvia mensual**

Estación	Media	Desv. Estándar	CV
Santa Cruz Balanyá	86,42	92,10	1,07
Sabana Grande	259,87	248,73	0,96
Insivumeh	102,30	114,25	1,12
Alameda	86,68	103,08	1,19
Suiza Contenta	94,92	113,15	1,19

Fuente: elaboración propia.

3.1.4. **Lluvia diaria**

La lluvia diaria es la sumatoria de la precipitación en un lapso de 24 horas; estas comprenden de 7:00 a.m. del día actual hasta las 7:00 a.m. del día siguiente. Según los registros, el día 30 de mayo de año 2010 se presentó un registro máximo de la serie de datos desde 1983.

Tabla XIII. **Parámetros estadísticos de lluvia diaria**

Estación	media	Desv. estándar	CV
Santa Cruz Balanyá	2,84	7,10	2,50
Sabana Grande	8,54	18,28	2,14
Insivumeh	3,36	9,35	2,78
Alameda	2,85	7,81	2,74
Suiza Contenta	3,12	8,10	2,60

Fuente: elaboración propia.

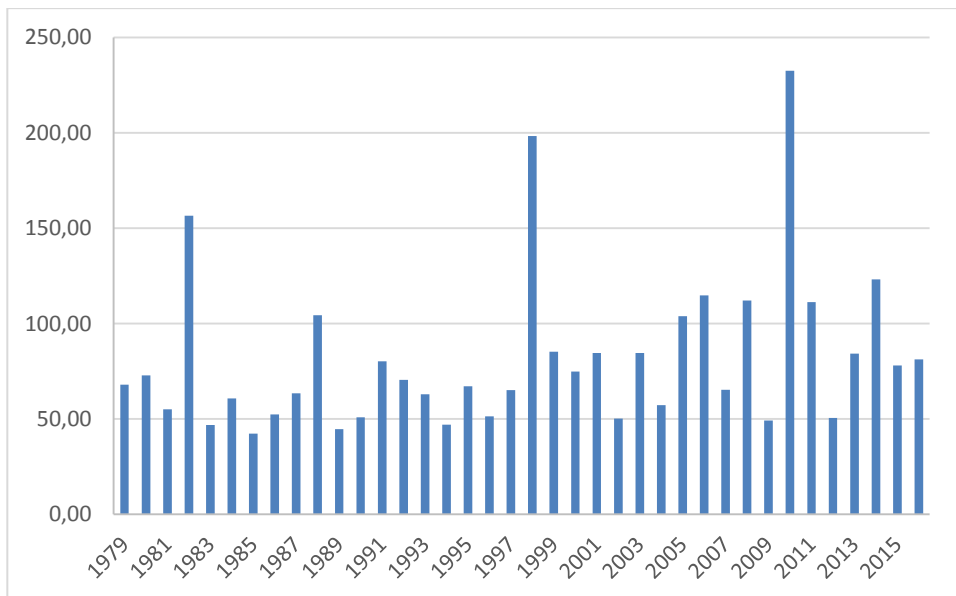
3.2. **Precipitación máxima probable**

La precipitación máxima probable (PMP), está asociada con su máximo valor; es decir, que se define como la máxima intensidad de precipitación para

una duración dada que es físicamente posible sobre una cuenca en particular, en un periodo de tiempo particular del año.

Los procedimientos para calcular la precipitación máxima probable pueden ser meteorológico o estadísticos. Como resultado final, se obtiene de ellos una aproximación.

Figura 10. **Precipitación diaria máxima anual en estación Insivumeh**



Fuente: elaboración propia.

3.3. Ajuste de series de datos a una distribución

Con el programa HIDROESTA se realizó un análisis estadístico en las cinco estaciones, para determinar una máxima precipitación a diferente periodo de retorno con 7 distribuciones estadísticas, las cuales son:

- Normal
- Log Normal 2 Parámetros
- Log Normal 3 Parámetros
- Gamma de 2 Parámetros
- Log Pearson III
- Gumbel
- Log Gumbel o Distribución de Fréchet

3.3.1. Funciones de distribución

A continuación, se describe las funciones de la distribución.

3.3.1.1. Distribución normal o gaussiana

Se dice que una variable aleatoria X tiene una distribución normal si su función densidad es.

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi S}} \text{EXP} \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{x - X}{S} \right)^2 \right]_{-\infty}^{\infty}$$

Para $-\infty < x < \infty$

Donde:

$f(x)$ = función de densidad normal de la variable x .

x = variable independiente

X = parámetro de localización, igual a la media aritmética de x

S = parámetro de escala, igual a la desviación estándar de x

EXP = función exponencial con base e , de los logaritmos neperianos

3.3.1.2. Distribución log normal de dos parámetros

Cuando los logaritmos $\ln(x)$ de una variable x están normalmente distribuidos, entonces se dice que la distribución de x sigue la distribución de probabilidad log-normal en que la función de probabilidad log-normal $f(x)$ es representada como:

$$f(x) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} \text{EXP} \left\{ -\frac{1}{2} \left[\frac{\ln x - \mu_y}{\sigma_y} \right]^2 \right\}$$

Para $0 < x < \infty$, se tiene que $x \sim \text{logN}(\mu_y, \sigma_y^2)$

Donde:

μ_y, σ_y = son la media y desviación estándar de los logaritmos naturales de x ; es decir, de $\ln(x)$ y representan, respectivamente, el parámetro de escala y el parámetro de forma de la distribución.

3.3.1.3. Distribución log normal de tres parámetros

Si la distribución log normal representa la distribución normal de los logaritmos de la variable x , entonces la distribución log normal 3 parámetros representa la distribución normal del logaritmo de la variable reducida $(x-c)$, respectivamente.

En muchos casos, el logaritmo de una variable aleatoria x , del todo no son normalmente distribuidos, pero si se resta un parámetro de límite inferior X_0 , antes de tomar logaritmos, se puede conseguir que sea normalmente distribuida.

La función de densidad, de la distribución log normal de tres parámetros es:

$$f(x) = \frac{1}{(x - x_0)\sigma_y\sqrt{2\pi}} \text{EXP} \left\{ -\frac{1}{2} \left[\frac{\ln(x - x_0) - \mu_y}{\sigma_y} \right]^2 \right\}$$

Para $X_0 \leq x < \infty$

Donde:

X_0 = parámetro de posición en el dominio x

μ_y = parámetro de escala en el dominio x

σ_y = parámetro de forma en el dominio x

3.3.1.4. Distribución gamma de dos parámetros

Se dice que una variable aleatoria X tiene una distribución gamma de 2 parámetros si su función densidad de probabilidad es:

$$f(x) = \frac{x^{y-1} e^{-\frac{x}{\beta}}}{\beta y \tau_y}$$

Para:

$$0 \leq x < \infty$$

$$0 < y < \infty$$

$$0 < \beta < \infty$$

Donde:

y = parámetro de forma (+)

β = parámetro de escala (+)

τ_y = función gamma completa, definida como:

$\tau_y = \int x^{y-1} \beta^{-x} dx$, que converge si $y > 0$

3.3.1.5. Distribución gamma de tres parámetros o Pearson tipo III

La función de distribución es una familia flexible de tres parámetros capaz de tomar muchas formas diferentes; por consiguiente, es ampliamente utilizada en el modelamiento de series anuales de máximas de los datos no transformados.

Se dice que una variable aleatoria X , tiene una distribución gamma de 3 parámetros si su función de densidad es:

$$f(x) = \frac{(x - x_0)^{y-1} e^{-\frac{(x-x_0)}{\beta}}}{\beta \gamma \Gamma_y}$$

Para:

$$x_0 \leq x < \infty$$

$$-\infty < y < \infty$$

$$0 < \beta < \infty$$

$$0 < \gamma < \infty$$

Tabla XIV. **Magnitud de la lluvia diaria máxima, en mm, asociada a diferentes periodos de retorno para la serie observada en la estación Alameda Icta, en el período 1982-2016**

Tr (años)	Normal	Log Normal 2 Parametros	Log Normal 3 Parametros	Gamma de 2 Parametros	Log Pearson iii	Gumbel	Log Gumbel
2	62,29	59,51	56,19	61,42		59,42	55,74
5	95,34	83,17	80,15	86,75		90,98	79,23
10	111,06	99,09	99,62	102,34		111,88	100
25	127,82	119,44	128,23	120,84		138,28	134,19
50	138,65	134,75	152,43	133,83		157,86	166,91
100	148,38	150,18	179,06	146,21		177,3	207,28
Teorico	0,2588	0,1493	0,1052	0,1871		0,1901	0,0953
Tabular	0,2229	0,2229	0,2229	0,2229	0,2229	0,2229	0,2229
a (%)	5	5	5	5	5	5	5

Fuente: elaboración propia.

Tabla XV. **Magnitud de la lluvia diaria máxima, en mm, asociada a diferentes periodos de retorno para la serie observada en la estación Suiza Contenta, en el período 1979-2016**

Tr (años)	Normal	Log Normal 2 Parametros	Log Normal 3 Parametros	Gamma de 2 Parametros	Log Pearson iii	Gumbel	Log Gumbel
2	61,89	58,43	58,07	59,58		58,12	55,37
5	81,18	77,7	77,37	78,37		78,38	74,55
10	91,27	90,19	90,16	89,58		91,79	90,89
25	102,03	105,73	106,31	102,61		108,74	116,74
50	108,98	117,15	118,35	111,64		121,31	140,57
100	115,22	128,49	130,41	120,16		133,79	169,03
Teorico	0,1821	0,1203	0,115	0,1354		0,1244	0,1066
Tabular	0,2206	0,2206	0,2206	0,2206		0,2206	0,2206
a (%)	5	5	5	5		5	5

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVI. **Magnitud de la lluvia diaria máxima, en mm, asociada a diferentes periodos de retorno para la serie observada en la estación Santa Cruz Balanya, en el periodo 1979-2016**

Tr (años)	Normal	Log Normal 2 Parametros	Log Normal 3 Parametros	Gamma de 2 Parametros	Log Pearson iii	Gumbel	Log Gumbel
2	55,8	53,77	52,95	54,44		53,23	51,39
5	68,99	67,81	67,49	67,97		67,07	65,57
10	75,88	76,56	77,2	75,38		76,24	77,04
25	83,24	87,14	89,56	84,85		87,82	94,46
50	87,29	94,73	98,82	91,02		96,42	109,89
100	92,26	102,14	108,13	96,81		104,95	127,68
Teorico	0,1124	0,1097	0,1186	0,1028		0,1233	0,149
Tabular	0,2206	0,2206	0,2206	0,2206		0,2206	0,206
a (%)	5	5	5	5		5	5

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVII. **Magnitud de la lluvia diaria máxima, en mm, asociada a diferentes periodos de retorno para la serie observada en la estación Insivumeh, en el periodo 1979-2016**

Tr (años)	Normal	Log Normal 2 Parametros	Log Normal 3 Parametros	Gamma de 2 Parametros	Log Pearson iii	Gumbel	Log Gumbel
2	81,65	74,58	68,87	76,92	69,87	74,91	69,77
5	116,19	104,93	100,91	108,22	101,5	111,18	99,86
10	134,26	125,45	128,97	127,46	128,44	135,2	126,62
25	153,53	151,77	172,56	150,25	170,47	165,54	170,91
50	165,97	171,64	211,15	166,25	208,38	188,05	213,51
100	177,16	191,7	255,15	181,5	252,7	210,4	266,28
Teorico	0,2082	0,1139	0,0689	0,1469	0,0654	0,1377	0,078
Tabular	0,2206	0,2206	0,2206	0,2206	0,2206	0,2206	0,2206
a (%)	5	5	5	5	5	5	5

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVIII. **Magnitud de la lluvia diaria máxima, en mm, asociada a diferentes periodos de retorno para la serie observada en la estación Sabana Grande, en el periodo 1979-2016**

Tr (años)	Normal	Log Normal 2 Parametros	Log Normal 3 Parametros	Gamma de 2 Parametros	Log Pearson iii	Gumbel	Log Gumbel
2	126,78	121,24	119,17	123,08	119,35	120,09	115,45
5	161,06	155,78	155,08	156,87	154,91	156,09	150,22
10	179	177,62	179,49	176,73	179,15	179,93	178,83
25	198,12	204,27	210,92	199,62	210,67	210,05	222,89
50	210,47	223,58	234,72	215,36	234,83	232,39	262,45
100	221,57	242,49	258,82	230,15	259,57	254,57	308,67
Teorico	0,1171	0,0885	0,0963	0,0902	0,0931	0,0995	0,0875
Tabular	0,2206	0,2206	0,2206	0,2206	0,2206	0,2206	0,2206
a (%)	5	5	5	5	5	5	5

Fuente: elaboración propia.

De la prueba de ajuste Smirnov-Kolmogorov se obtiene que los datos de lluvia diaria máxima se ajustan a las distribuciones analizadas con el programa HIDROESTA; para esta práctica el nivel de significación es del 5 %.

Las series de datos de tres estaciones pluviométricas no se ajustaron a la distribución Log Pearson III. Para cada estación se escogió la mejor distribución teórica cuando en esta el valor teórico es más cercano a cero. Por ejemplo, para la estación Sabana Grande la distribución Log-Gumbel es la que mejor se ajusta; entonces, el valor para generar histogramas de crecidas con un período de retorno de 100 años es de 308,67 mm.

4. MODELADO DE PRECIPITACIONES REALES

4.1. Distribución de precipitación en subcuenca

La lluvia al caer se distribuye en la cuenca de forma irregular, debido a las condiciones atmosféricas y a la orografía de la cuenca en estudio.

Se tiene información de lluvia solo en aquellos lugares donde se encuentra una estación para la medición diaria las 24 horas, por lo que a partir de esta información se obtiene una distribución de precipitación que será un aproximado a lo que realmente se produjo en el lugar.

Para el análisis se utilizaron dos métodos: polígonos de *Thiessen* y el método de las isoyetas.

4.2. Polígonos de *Thiessen*

Este método consiste en realizar una red de polígonos de distribución de precipitación conforme la ubicación de una estación, para ponderar la lluvia en función de su área. Estos polígonos son un método de interpolación simple.

Este método se crea al unir cada estación entre sí, trazando las mediatrices de los segmentos que unen las estaciones. Los datos se analizan como un factor de ponderación.

$$P_{Tr} = \frac{\sum_{i=1}^n a_i P_i}{A}$$

Donde:

a_i = área asignada con el pluviómetro i con el método de polígonos de *Thiessen*

P_i = precipitación en el pluviómetro i

P_{Tr} = precipitación media para la cuenca

Tabla XIX. **Magnitud de la lluvia diaria máxima, en mm, asociada a diferentes periodos de retorno, para cada estación**

Estación	Tr (años)					
	2	5	10	25	50	100
Alameda	55,74	79,23	100	134,19	166,91	207,28
Sabana Grande	115,45	150,22	178,83	222,89	262,45	308,67
Santa Cruz Balanyá	54,44	67,97	75,38	84,85	91,02	96,81
Suiza Contenta	55,37	74,55	90,89	116,74	140,57	169,03

Fuente: elaboración propia.

Tabla XX. **Área asignada para cada estación**

Estación	Área (km ²)
Alameda	235,46
Sabana Grande	65,10
Santa Cruz	13,26
Suiza Contenta	93,83

Fuente: elaboración propia.

$$P_{50} = \frac{(166,91 * 235,46) + (262,45 * 65,10) + (91,02 * 13,26) + (140,57 * 93,83)}{407,7}$$

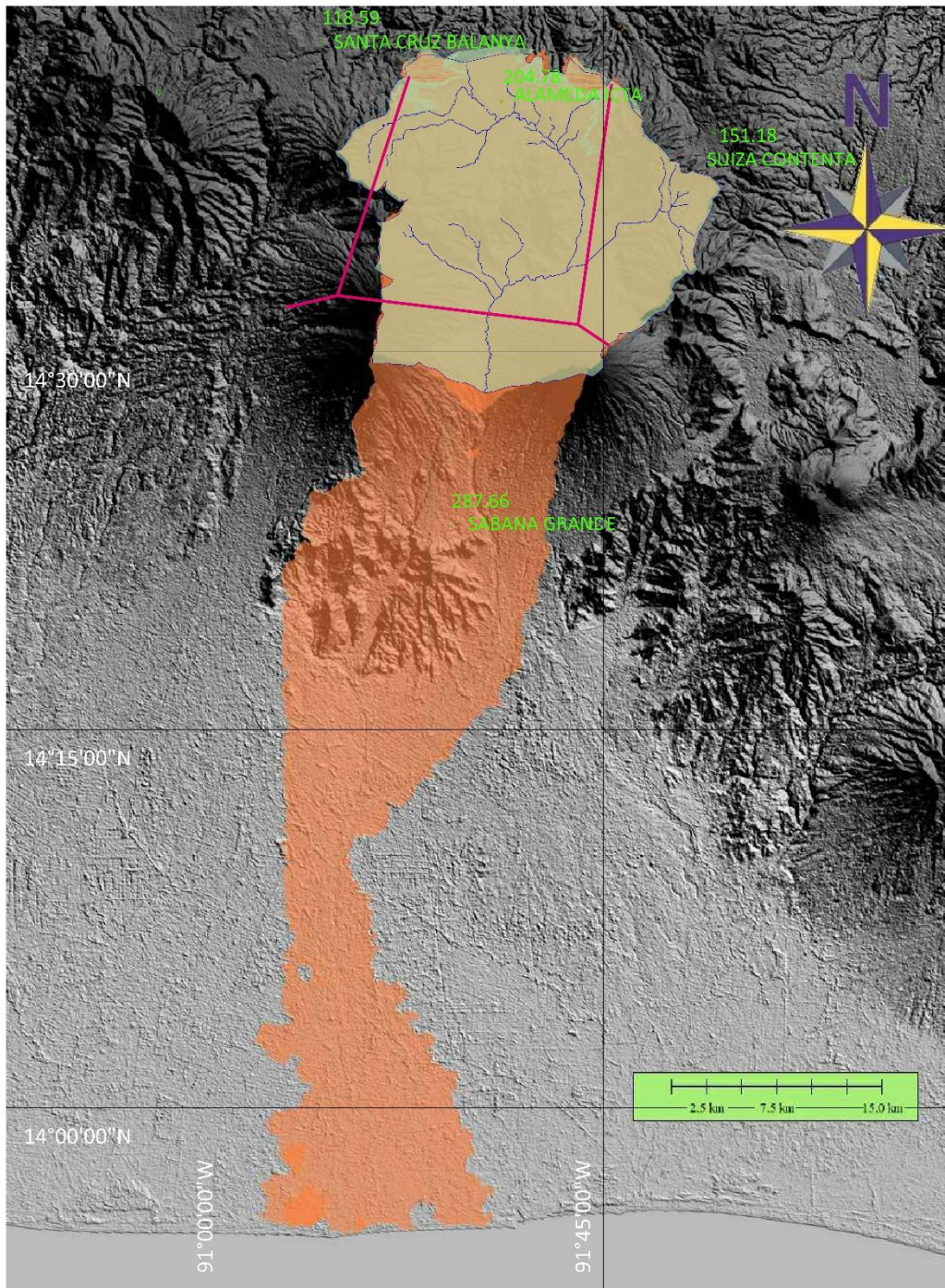
$$P_{50} = 173,64 \text{ mm}$$

Tabla XXI. **Precipitación media para diferente tiempo de retorno**

Tr (años)	mm
2	65,15
5	89,12
10	109,69
25	142,73
50	173,64
100	211,07

Fuente: elaboración propia.

Figura 11. Polígonos de *Thiessen* de la subcuenca del río Guacalate



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2016.

4.3. Isoyetas

El método de las isoyetas es una distribución espacial de precipitación, que cuya calidad depende de la abundancia y distribución geográfica de estaciones.

Consiste en determinar líneas de igual altura de precipitación; luego de esto se calculan las áreas entre isoyetas y se determina la precipitación caída entre estas.

Este método es más exacto, ya que tiene la ventaja que pueden ser trazadas para tener en cuenta efectos locales.

En resumen:

- Trazar las Isoyetas, interpolando entre diversas estaciones
- Hallar las áreas $A_i, A_{i+1},,$ entre cada 2 isoyetas seguidas

$$P_m = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} \left(\frac{P_i + P_{i+1}}{2} \right) A_{i,i+1}}{A_T}$$

Donde:

P_m = precipitación media

A_T = área total de la cuenca

P_i = altura precipitación de las isoyetas

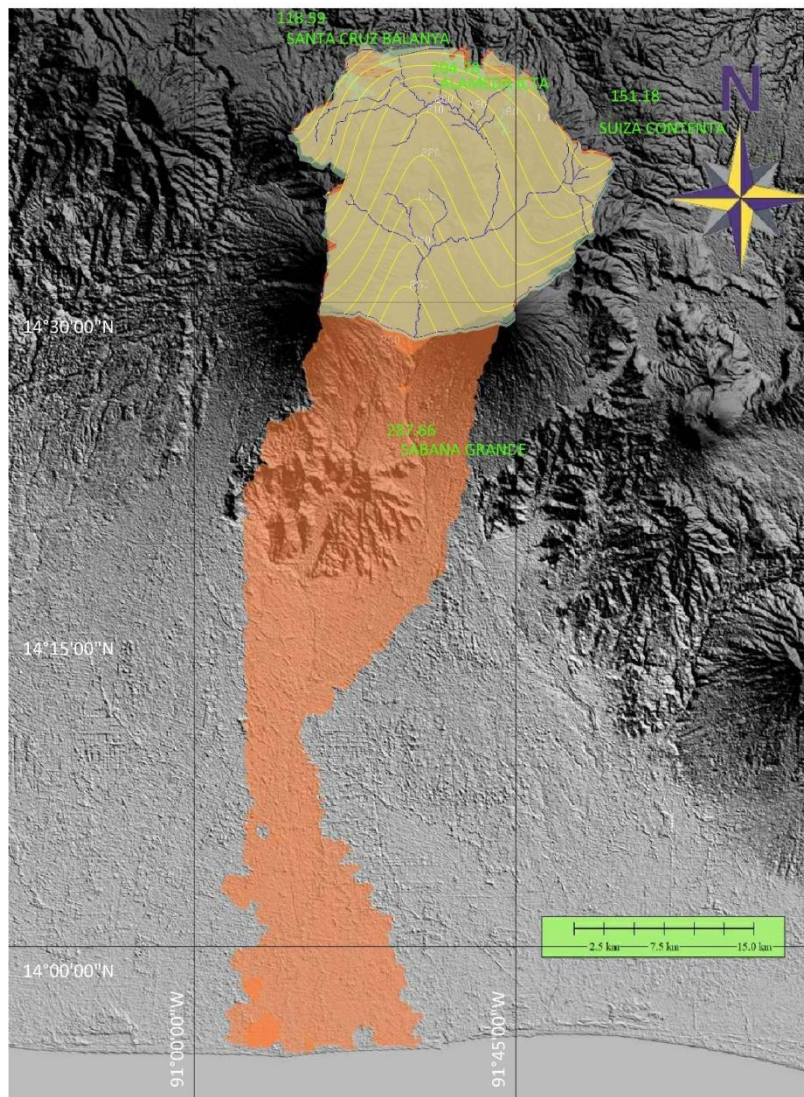
A_i = área parcial de las isoyetas i

n = número de áreas parciales

$$P_m = \frac{((260 * 12,28) + (240 * 23,04) + (220 * 39,56) + (200 * 59,25) + (180 * 64,99) + (160 * 77,44) + (140 * 55) + (120 * 50,72) + (100 * 25,37))}{407,65}$$

$$P_m = 170,95 \text{ mm}$$

Figura 12. Isoyetas de la subcuenca del río Guacalate



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2016.

5. TRANSFORMACIÓN LLUVIA- ESCORRENTIA

5.1. Modelación de lluvias

Para la modelación de lluvias existen modelos hidrológicos que aproximan el hidrograma de una cuenca a partir de la precipitación que se define en altura de precipitación y la forma en cómo se distribuye; esto mediante un hietograma de una zona y la orografía del lugar como la pendiente, tipo de suelo y usos del mismo, entre otros.

5.2. Lluvia efectiva

La lluvia efectiva es la precipitación que produce escorrentía superficial directa. Esta lluvia no se infiltra en el suelo y fluye superficial. La escorrentía superficial es la consecuencia de una precipitación dada a la parte no consumida en la intercepción vegetal, la evaporación durante la llovizna y la infiltración. Esta lluvia recorre toda la cuenca desde el punto más alto hasta su desembocadura.

Depende de la intensidad de la lluvia, la infiltración del suelo de la cuenca y la pendiente de esta.

5.3. Infiltración

La infiltración se cataloga como el proceso en el cual el agua penetra la superficie del terreno hacia el suelo. La infiltración depende de varios factores

como las condiciones de la superficie del terreno, la vegetación, pendiente, áreas urbanizadas y propiedades como la porosidad.

La velocidad en la que el agua penetra el suelo se le llama tasa de infiltración; esta se mide en pulgadas por hora o milímetros por hora. Este proceso sucede gracias a dos fuerzas, la gravitatoria y la capilaridad.

Existe un proceso por el cual se produce la infiltración, el cual es la percolación; este consiste en un paso lento de fluidos a través de los materiales porosos. Es así como se originan las corrientes subterráneas.

La vegetación aumenta la capacidad de infiltración y a su vez dificulta el escurrimiento superficial del agua. Cuando la lluvia termina, la humedad existente en el suelo es retirada por las raíces de la vegetación, que ayudan así a la capacidad de infiltración para las próximas precipitaciones.

5.3.1. Método del número de curva CN

El método número de curva de escorrentía CN fue desarrollado para el cálculo de las abstracciones de una tormenta. “En este método, la profundidad de escorrentía o precipitación efectiva P_e está en función de la precipitación total P y de un parámetro de abstracción referido al número de curva o CN, cuyos valores fluctúan entre 1 y 100”.¹⁵

El número de curva (CN) depende de ciertas propiedades productoras de escorrentía tales como:

¹⁵ VERA MUTRE, Carlos; JARAMILLO NIETO, Jimmy y SANGA SUÁREZ, Christian. *Análisis Hidrológico de la Cuenca del Cerro Colorado y su Interacción con la Autopista Terminal Terrestre - Pascuales*. p. 6.

- Tipo de suelo hidrológico
- Utilización y tratamiento del suelo
- Condiciones de la superficie del terreno
- Condición de humedad antecedente del suelo

El método del número de curva (CN) se desarrolla con base en datos de precipitación y escorrentía de 24 horas. Esto mismo limita el cálculo de la precipitación efectiva [Pe], y no toma explícitamente en consideración las variaciones temporales de intensidad de lluvia. Una herramienta que permite transformar los datos de lluvia en caudal es la que introdujo Sherman y la denominó hidrograma unitario de una cuenca, la misma que se analizará en el siguiente ítem.

La ecuación que permite calcular la precipitación efectiva se basa en una hipótesis que relaciona dos cantidades reales y dos cantidades potenciales. A continuación, se muestra la ecuación expresada en términos del número de curva y de la precipitación total.

$$P_e = \frac{(CN(P + 2) + 200)^2}{CN[CN(P - 8) + 800]}$$

Siendo:

$$P \geq \frac{200}{CN} - 2$$

y

P: precipitación [pulg]

Pe: precipitación efectiva [pulg]

Cuando sus parámetros están en unidades del sistema métrico utiliza un coeficiente R adimensional que cambia su expresión original.

$$P_e = \frac{R[(CN(\frac{P}{R})+2) - 200]^2}{CN[CN((\frac{P}{R}) - 8) + 800]}$$

Siendo:

$$P \geq R \times \left(\frac{200}{CN} - 2 \right)$$

Y

P: precipitación [cm.]

Pe: precipitación efectiva [cm.]

R: 2,54

Siendo simplificada de la siguiente forma

$$P_e = \frac{(CN(P + 5,08) + 508)^2}{CN[CN(P - 20,32) + 2032]}$$

Donde:

P_e = precipitación en exceso en mm

P = precipitación de la tormenta, en mm

CN = número de curva cuyos valores se muestran en la tabla XXII

Basados en este supuesto se aplicó el principio de continuidad y se introdujo la relación empírica entre la abstracción inicial y la retención potencial máxima que encontró el SCS para muchas cuencas experimentales ($I_a=0,2S$)

De muchas cuencas estudiadas por SCS se obtuvieron curvas, las cuales fueron estandarizadas mediante de un número adimensional de curva CN de acuerdo con circunstancias como el estado, uso y tratamiento del suelo.

Tabla XXII. **Número de curva en función del uso del suelo y grupo hidrológico, para AMC II**

Clase	Condiciones hidrológicas para la infiltraciones	A	B	C	D
Barbecho	-	77	86	91	94
Cultivos alienados	Pobres	72	81	88	91
	Buenas	67	78	85	89
Cultivos no alienados o con surcos pequeños o mal definidos	Pobres	65	76	84	88
	Buenas	63	75	83	87
Cultivos densos de leguminosas o prados en alternativa	Pobres	66	77	84	88
	Buenas	58	72	81	85
Pastizales (pastos naturales)	Pobres	68	79	86	89
	Regulares	49	69	79	84
	Buenas	39	61	74	80
Prados permanentes montes con pasto	Pobres	30	58	71	78
	Regulares	45	66	77	83
	Buenas	36	60	73	79
Bosques (forestales)	Muy pobres	56	75	86	91
	Pobres	46	68	78	84
	Regulares	36	60	70	76
	Buenas	26	52	63	69
	Muy buenas	15	44	54	61
Caseríos	-	59	74	82	86
Caminos de tierra	-	72	82	87	89
Caminos en firme	-	74	84	90	92
Pavimentos con cunetas	-	98	98	98	98
Distritos industriales	-	81	88	91	93
Áreas comerciales	-	89	92	94	95
Cultivos surcos rectos	Pobres	72	81	88	91
	Buenas	67	78	85	89

Continuación de la tabla XXII.

Cultivos curvas de nivel	Pobres	70	79	84	88
	Buenas	65	75	82	86
Pequeños granos surcos rectos	Pobres	65	76	84	88
	Buenas	63	75	83	87
Pequeños granos curvas de nivel	Pobres	63	74	82	85
	Buenas	61	73	81	84
Sembríos cerrados surcos rectos	Pobres	66	77	85	89
	Buenas	58	72	81	85
Sembríos cerrados curvas de nivel	Pobres	64	75	83	85
	Buenas	55	69	78	83

Fuente: GÁMEZ MORALES, William R. *Texto Básico de Hidrología*. p. 127.

Este método surgió al observar el fenómeno hidrológico en distintos tipos de suelo y distintas condiciones de humedad antecedente. Se observaron curvas al representarse en gráficas la profundidad de precipitación (P) y la profundidad de exceso de precipitación directa (Pe). Para estandarizar estas curvas, se definió un número adimensional de curva CN, tal que:

$$0 \leq CN \leq 100$$

Para superficies impermeables y cuerpos de agua CN=100; para superficies naturales CN<100 y para superficies sin escurrimiento, CN=0.

5.3.1.1. Condición hidrológica de la cuenca o área de drenajes

Este indicador de la cobertura vegetal y su variación depende de la densidad de la cobertura, de tal manera que se presentan entre grandes grupos.

Tabla XXIII. **Condición hidrológica**

Condición hidrológica	e:
Buena	> del 75 %
Regular	entre el 50 y 75 %
Mala	< del 50 %

Fuente: GÁMEZ MORALES, William R. *Texto básico de hidrología*. p. 51.

Como la vegetación es clasificada de acuerdo con su porte, el tipo de vegetación influye en la condición hidrológica y ella varía con el uso del terreno.

El método del número de curva establece cuatro tipos o grupos de suelo (A, B, C y D), de acuerdo con la siguiente descripción (NRCS, 2002):

- Grupo A: suelos con bajo potencial de escurrimiento por su gran permeabilidad y con elevada capacidad de infiltración, aun cuando estén húmedos. Se trata principalmente de suelos profundos y con texturas gruesas (arenosa o areno-limosa).
- Grupo B: suelos con moderada capacidad de infiltración cuando están saturados. Principalmente consisten en suelos de mediana a alta profundidad, con buen drenaje. Sus texturas van de moderadamente finas a moderadamente gruesas (franca, franco-arenosa o arenosa).
- Grupo C: suelos con escasa capacidad de infiltración una vez saturados. Su textura va de moderadamente fina a fina (franco-arcillosa o arcillosa). También se incluyen aquí suelos que presentan horizontes someros bastante impermeables.

- Grupo D: suelos muy arcillosos con elevado potencial de escurrimiento y, por lo tanto, con muy baja capacidad de infiltración cuando están saturados. También se incluyen aquí los suelos que presentan una capa de arcilla somera y muy impermeable, así como suelos jóvenes de escaso espesor sobre una roca impermeable, ciertos suelos salinos y suelos con nivel freático alto.

5.3.1.2. Condición de humedad antecedente (AMC)

El escurrimiento que se produce en una cuenca dependerá de la condición de humedad antecedente; esta es la humedad que contiene el suelo en el momento que se presenta una tormenta. Se tienen 3 niveles de condición de humedad antecedente, esto al analizar la cantidad de lluvia ocurrida en los 5 días previos.

Se espera que el escurrimiento aumente a medida que aumenta la condición de humedad del suelo al presentarse una tormenta. Por esa razón, en este método la condición de humedad del suelo producto de los cinco días previos a la tormenta son considerados y se presentan en tres grupos.

- AMC I suelo seco, potencial de escurrimiento, los suelos de la cuenca están secos, pero con buen estado para cultivarse.
- AMC II condición promedio.
- AMCIII humedad alto, alto potencial de escurrimiento, cuenca prácticamente saturada por las lluvias previas.

Tabla XXIV. **Condición de humedad antecedente propuesto por el SCS**

Condición de humedad antecedente (AMC)	Precipitación acumulada de los 5 días previos al evento en consideración (cm)	
	Estación seca	Estación de crecimiento
I (seca)	menor a 1,3	menor a 1,3
II (media)	1,3 a 2,5	3,5 a 5
III (húmeda)	más de 2,5	más de 5

Fuente: BEJAR, Máximo Villon. *Ejemplo de HEC-HMS*. p. 12.

Con la tabla XXII se calcula el número $CN_{(II)}$ para AMC-II; al tener AMC-I o AMC-III el número equivalente se calcula con las siguientes ecuaciones.

$$CN_{(I)} = \frac{4,2CN_{(II)}}{10 - 0,058CN_{(II)}}$$

$$CN_{(III)} = \frac{23CN_{(II)}}{10 - 0,13CN_{(II)}}$$

Tabla XXV. **Número de curva en función del uso del suelo**

Uso del suelo al 2015		Porcentaje área	CN
Suelos agrícolas	Agricultura limpia Anual	54 %	81
	Hortalizas	4 %	69
	Siembra café	3 %	71
Bosques y medio seminaturales	Bosque natural	8 %	60
	Bosque secundario	23 %	74
Territorios artificiales	Centros poblados	7 %	98
Tierras áridas	Espacio abierto, sin vegetación	1 %	69

100 %

Fuente: elaboración propia.

Por medio de un promedio ponderado y para una humedad antecedente promedio se obtuvo el número de curva.

Tabla XXVI. **Cálculo del número de curva para subcuenca**

Uso del suelo	Área subcuenca (km ²) (1)	CN (2)	(1)*(2)
Agricultura limpia Anual	220,16	81	17832,80
Hortalizas	16,31	69	1125,25
Siembra café	12,23	71	868,40
Bosque natural	32,62	60	1956,96
Bosque secundario	93,77	74	6939,05
Centros poblados	28,54	98	2796,82
Espacio abierto, sin vegetación	4,08	69	281,31
	407,70		31800,60

Fuente: elaboración propia.

$$CN_{(II)} = \frac{31\,800,60\text{km}^2}{407,70\text{km}^2} = 78$$

Este valor indica que el 78 % de lo que se precipita durante una tormenta, escurre; esto ocasiona que los caudales aumenten drásticamente ante cualquier evento de precipitación que se genere en la subcuenca analizada.

Siguiendo el análisis con el porcentaje obtenido del número de curva se procede a calcular las infiltraciones para las distintas condiciones de humedad y sus respectivas infiltraciones iniciales.

$$CN_{(I)} = \frac{4,2(78)}{10 - 0,058(78)} = 59,82$$

$$CN_{(III)} = \frac{23(78)}{10 - 0,13(78)} = 89,08$$

Tabla XXVII. **Número de curva en función de AMC**

Humedad antecedente (AMC)	Número de curva (CN)
AMC-I	59,82
AMC-II	78,00
AMC-III	89,08

Fuente: elaboración propia.

$$I_a = \frac{5\ 080}{CN} - 50,8 = (\text{abstracciones iniciales})$$

$$I_a = \frac{5\ 080}{59,82} - 50,8 = 34,11 \text{ mm}$$

$$I_a = \frac{5\ 080}{78} - 50,8 = 14,33 \text{ mm}$$

$$I_a = \frac{5\ 080}{89,08} - 50,8 = 6,23 \text{ mm}$$

5.4. HEC- HMS

El programa de computación HEC-HMS es una herramienta para la modelación de los procesos hidrológicos más habituales que se dan en una cuenca. Fue desarrollado por el centro de Ingeniería Hidrológica del cuerpo de Ingenieros de la armada de los Estados Unidos.

El HEC-HMS se usa para simular los procesos hidrológicos en cuencas. El programa crea una corrida de simulación, combinan los modelos y las especificaciones. Para esto se utilizan datos de entrada como las series de temporales, área de cuenca y número de curva, entre otros.

Los componentes principales son los modelos de cuenca, los modelos meteorológicos y las características de control.

5.4.1. Modelo de la cuenca

Es la información pertinente a la cuenca o subcuenca analizada y sus características físicas. Su principal objetivo es convertir las condiciones de la atmósfera en escurrimiento superficial en lugares específicos de la cuenca. Los elementos hidrológicos se utilizan para romper la cuenca en piezas manejables. Están conectados entre sí en una red dendrítica para formar una representación del sistema de flujo.

5.4.2. Modelo meteorológico

Es la información de precipitaciones y evapotranspiración, entre otros. En este apartado se ingresa la información de la precipitación media calculada a través de los métodos de polígonos de *Thiessen* e isoyetas.

5.4.3. Especificaciones de control

En este apartado se le indica al programa los tiempos de inicio y finalización, para que el programa realice el cálculo y obtener el hidrograma unitario.

6. MODELADO Y GENERACIÓN DE HIDROGRAMAS

6.1. Hidrograma unitario

Un hidrograma unitario es el escurrimiento directo que es la consecuencia de una lluvia efectiva unitaria, distribuida homogéneamente sobre la subcuenca y constante sobre una unidad de tiempo.

6.1.1. Método del hidrograma unitario

El hidrograma unitario permite calcular la cantidad de flujo que se producirá en un determinado periodo. Se inicia con la precipitación promediada para la cuenca; es decir, un valor de la cantidad de lluvia caída o prevista para determinada cuenca, que típicamente se da como altura de lluvia en función de tiempo. La teoría del hidrograma unitario supone que esta lluvia se distribuye uniformemente en toda la cuenca hidrológica.

A partir de estas condiciones se necesita saber qué parte de la precipitación para la cuenca se transformará en escorrentía. El escurrimiento se conoce también como exceso de lluvia o precipitación efectiva. Típicamente, los modelos empleados para calcular la escorrentía producida por la lluvia generan un cálculo aproximado de lo que se transforma en exceso de lluvia.¹⁶

¹⁶ CHOW, Ven Te; MAIDMENT, David R. y MAYS, Larry W. *Hidrología aplicada*. p. 107.

6.2. Hidrograma sintético

El hidrograma sintético es un hidrograma unitario estimado que se utiliza para representar una cuenca hidrográfica sin la información de caudales adecuada. Esta se genera con parámetros físicos de la cuenca en estudio como área, longitud del cauce principal, pendiente y otros.

6.3. Hidrograma de Snyder

El hidrograma unitario de *Snyder* se utiliza cuando no se cuenta con los datos necesarios históricos de caudal y precipitación, para la deducción del hidrograma unitario de la cuenca analizada.

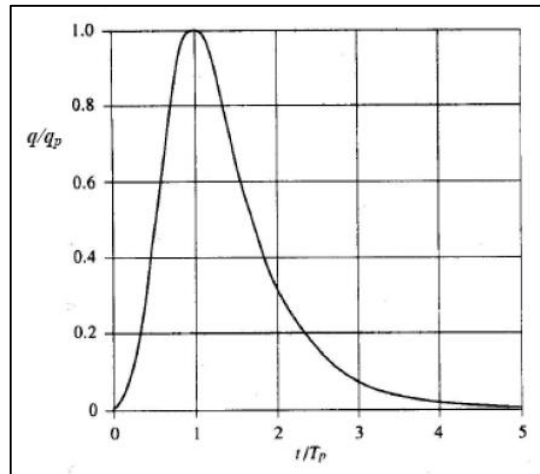
Este hidrograma se formuló a partir del estudio de un gran número de cuencas en la región de los montes Apalaches (EEUU), con áreas de cuenca comprendidas entre 30 y 30 000 km².¹⁷

6.4. Hidrograma adimensional del SCS

El método SCS (*Soil Conservation Center*), es un hidrograma unitario sintético que requiere una base de datos como precipitación y factor de escorrentía, entre otros. Este expresa los caudales en función del caudal pico Q_p y los tiempos en función del tiempo al pico T_p .

¹⁷ CHOW, Ven Te; MAIDMENT, David R. y MAYS, Larry W. *Hidrología aplicada*. p. 107.

Figura 13. **Hidrograma adimensional SCS**



Fuente: Hidrología aplicada: escorrentía.

Tabla XXVIII. **Hidrograma adimensional tabulado SCS**

t/Tp	q/Qp
0	0
0,1	0,015
0,2	0,075
0,3	0,16
0,4	0,28
0,5	0,43
0,6	0,6
0,7	0,77
0,75	0,84
0,8	0,89
0,9	0,97
1	1
1,1	0,98
1,2	0,92
1,25	0,88
1,3	0,84
1,4	0,75
1,5	0,66
1,6	0,56
1,75	0,45
1,8	0,42
2	0,32
2,2	0,24
2,25	0,22
2,4	0,18
2,5	0,15
2,6	0,13
2,75	0,105
2,8	0,098
3	0,075
3,25	0,053
3,5	0,036
3,75	0,026
4	0,018
4,25	0,012
4,5	0,009
4,75	0,006
5	0,004

Fuente: elaboración propia.

6.5. Hidrograma sintético triangular del SCS

“Se aplica a cuencas pequeñas y homogéneas y produce resultados aceptables en el cálculo de caudales de creciente generados por escorrentía. La lluvia unitaria que se aplica al hidrograma es 1 mm de lluvia de exceso.”¹⁸

El tiempo de recesión puede aproximarse a:

$$t_r = 1,67T_p$$

El área bajo el hidrograma unitario debe ser igual a una escorrentía de 1 cm:

$$q_p = \frac{2,08 * A}{T_p}$$

Donde:

A = área de drenaje en Km²

T_p= tiempo de ocurrencia del pico (horas)

El estudio de muchas cuencas ha demostrado que:

$$T_p = 0,6T_c$$

¹⁸ PÉREZ SESMA, José Antonio. *Estimación de la creciente de diseño utilizando el hidrograma unitario instantáneo: el caso de la cuenca del río Tecolutla, México*. p. 188.

Donde:

T_p = tiempo de retardo o *Log Time*, entre el centroide del hietograma y el pico del caudal (horas).

T_c = tiempo de concentración de la cuenca.

El tiempo de ocurrencia del pico t_p puede expresarse como:

$$T_p = \frac{D}{2} + t_p$$

Donde D es la duración de la lluvia en horas.

El tiempo de concentración comúnmente se calcula con la expresión matemática de Kirpich.

$$T_c = 0,066 * \frac{L^{0,77}}{S^{0,385}}$$

Donde:

T_c = tiempo de concentración en horas

L = longitud del cauce principal en km

S = pendiente medio del cauce principal en porcentaje

7. DETERMINACIÓN DE LAS AVENIDAS DE LA SUBCUENCA ANALIZADA

7.1. Definición de avenida

Según la Directriz Básica de Planificación de Protección Civil ante el riesgo de inundación del Gobierno de España, la avenida es un aumento inusual del caudal de agua de un cauce que puede o no, producir desbordamientos o inundaciones.

Las magnitudes de las crecientes están descritas por sus caudales, sus elevaciones, sus volúmenes y su duración. Para el diseño hidrológico de las diferentes estructuras de control de flujo, los factores anteriores son elementos indispensables.

7.2. Origen de las avenidas

Las avenidas o crecidas de un río pueden ser de tipo climático, parcialmente climáticas y de otros como, por ejemplo, antrópico.

En el primer grupo destacan las lluvias intensas o muy prolongadas. En el segundo grupo se encuentran factores climáticos y el tercer grupo a causa de actividades humanas que se han desarrollado a lo largo del tiempo.

7.3. Aplicación del método del hidrograma unitario sintético SCS

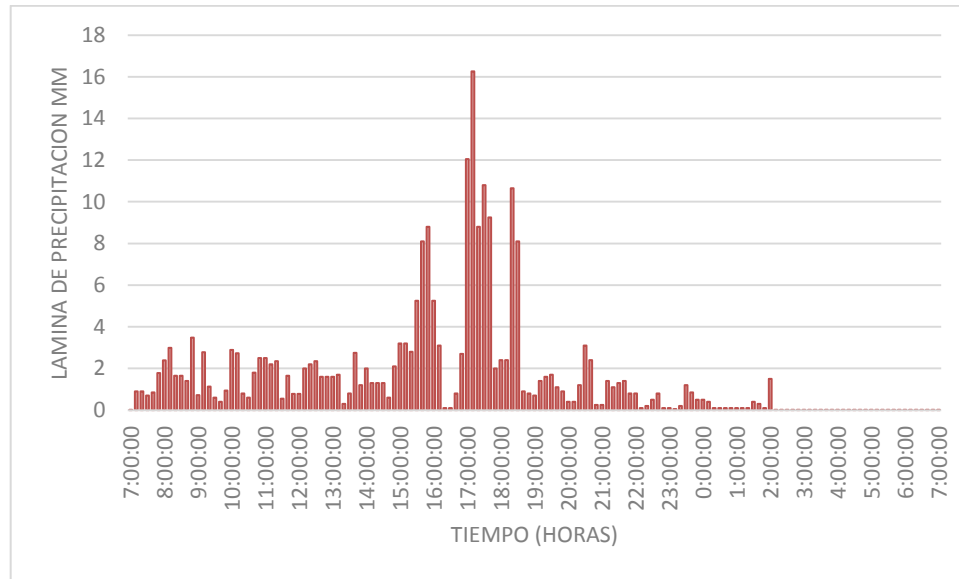
A continuación, se describe la aplicación del método del hidrograma unitario sintético SCS.

7.3.1. Hietograma de diseño

Es necesario determinar la tormenta de diseño que se aplicará como variable de entrada en el modelo lluvia-escorrentía.

Para el modelado se ha utilizado el hietograma de la lluvia observada en 24 horas del día 30 de mayo de 2010 que corresponder a la tormenta Agatha, en la estación Insivumeh. Está representado con una distribución horaria, discretizado cada 10 minutos. La lluvia observada en 24 horas fue de 232,5 mm (figura 14).

Figura 14. Hietograma de diseño



Fuente: FUENTES MONTEPEQUE, Juan Carlos. *Impacto hidrológico asociado al proceso de urbanización*. p. 103.

Tabla XXIX. Hietograma de la tormenta observada en la estación Insivumeh el 30/05/2010

Horas	P(mm)	Horas	P(mm)	Horas	P(mm)	Horas	P(mm)	Horas	P(mm)
07:00:00	0,01	11:50:00	0,78	16:40:00	0,8	21:30:00	1,3	02:20:00	0,01
07:10:00	0,9	12:00:00	0,78	16:50:00	2,7	21:40:00	1,4	02:30:00	0,01
07:20:00	0,9	12:10:00	2	17:00:00	12,05	21:50:00	0,8	02:40:00	0,01
07:30:00	0,7	12:20:00	2,2	17:10:00	16,26	22:00:00	0,8	02:50:00	0,01
07:40:00	0,85	12:30:00	2,35	17:20:00	8,8	22:10:00	0,1	03:00:00	0,01
07:50:00	1,78	12:40:00	1,6	17:30:00	10,8	22:20:00	0,2	03:10:00	0,01
08:00:00	2,39	12:50:00	1,6	17:40:00	9,25	22:30:00	0,5	03:20:00	0,01
08:10:00	2,99	13:00:00	1,6	17:50:00	2	22:40:00	0,8	03:30:00	0,00
08:20:00	1,65	13:10:00	1,7	18:00:00	2,4	22:50:00	0,1	03:40:00	0,01
08:30:00	1,65	13:20:00	0,3	18:10:00	2,4	23:00:00	0,1	03:50:00	0,01
08:40:00	1,4	13:30:00	0,8	18:20:00	10,65	23:10:00	0,05	04:00:00	0,01
08:50:00	3,48	13:40:00	2,75	18:30:00	8,1	23:20:00	0,2	04:10:00	0,01
09:00:00	0,72	13:50:00	1,2	18:40:00	0,9	23:30:00	1,2	04:20:00	0,00
09:10:00	2,78	14:00:00	2	18:50:00	0,8	23:40:00	0,85	04:30:00	0,01
09:20:00	1,13	14:10:00	1,3	19:00:00	0,7	23:50:00	0,5	04:40:00	0,01
09:30:00	0,6	14:20:00	1,3	19:10:00	1,4	00:00:00	0,5	04:50:00	0,00
09:40:00	0,4	14:30:00	1,3	19:20:00	1,6	00:10:00	0,4	05:00:00	0,01
09:50:00	0,94	14:40:00	0,6	19:30:00	1,7	00:20:00	0,1	05:10:00	0,01
10:00:00	2,89	14:50:00	2,1	19:40:00	1,1	00:30:00	0,1	05:20:00	0,01
10:10:00	2,73	15:00:00	3,2	19:50:00	0,9	00:40:00	0,1	05:30:00	0,01

Continuación de la tabla XXIX.

10:20:00	0,8	15:10:00	3,2	20:00:00	0,4	00:50:00	0,1	05:40:00	0,00
10:30:00	0,6	15:20:00	2,8	20:10:00	0,4	01:00:00	0,1	05:50:00	0,01
10:40:00	1,8	15:30:00	5,25	20:20:00	1,2	01:10:00	0,1	06:00:00	0,01
10:50:00	2,5	15:40:00	8,1	20:30:00	3,1	01:20:00	0,1	06:10:00	0,01
11:00:00	2,5	15:50:00	8,8	20:40:00	2,4	01:30:00	0,4	06:20:00	0,01
11:10:00	2,2	16:00:00	5,25	20:50:00	0,25	01:40:00	0,3	06:30:00	0,01
11:20:00	2,35	16:10:00	3,1	21:00:00	0,25	01:50:00	0,1	06:40:00	0,00
11:30:00	0,55	16:20:00	0,1	21:10:00	1,4	02:00:00	1,5	06:50:00	0,00
11:40:00	1,65	16:30:00	0,1	21:20:00	1,1	02:10:00	0,01	07:00:00	0,00
									<u>232,5</u>

Fuente: elaboración propia.

El cociente de la lluvia de la estación Suiza Contenta para un período de retorno de 100 años es de 0,726. Se obtiene al tomar la mejor distribución de frecuencias que correspondió a la distribución de Gumbel, cuyo valor es de 169,03 mm, y la lluvia total observada en la estación Insivumeh de la tormenta Agatha, 232,5 mm.

Tabla XXX. **Valores de K para el cálculo de la lluvia de diseño para diferentes periodos de retorno, en la estación Suiza Contenta**

Tr(años)	Lluvia (mm)	k
2	55,37	0,238
5	74,55	0,320
10	90,89	0,390
25	116,74	0,501
50	140,57	0,604
100	169,03	0,726

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXI. **Hietograma de 10 minutos de la tormenta asociada al periodo de retorno de 100 años en la estación Suiza Contenta basado en la tormenta observada en la estación Insivumeh**

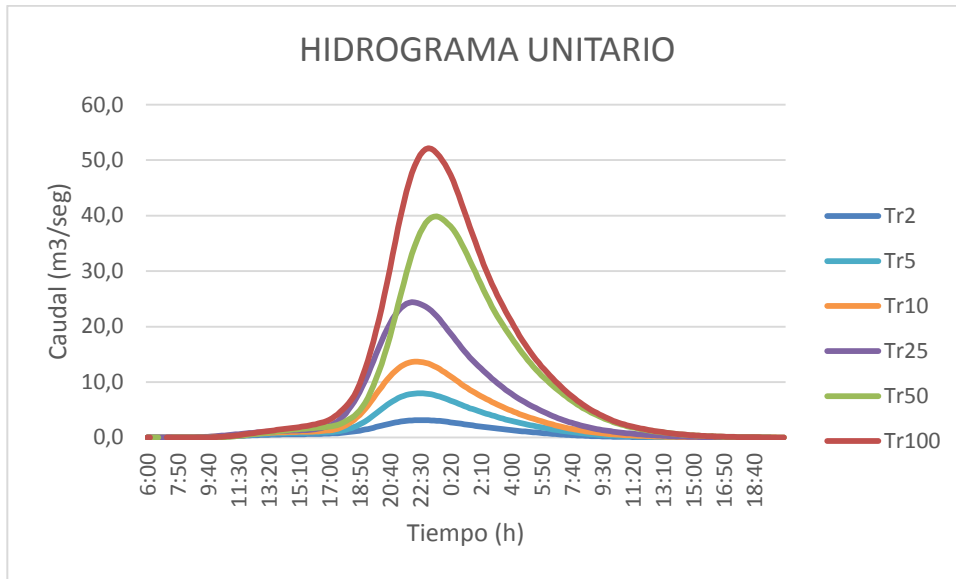
Horas	P(mm)	Horas	P(mm)	Horas	P(mm)	Horas	P(mm)	Horas	P(mm)
07:00:00	0,01	11:50:00	0,57	16:40:00	0,58	21:30:00	0,94	02:20:00	0,01
07:10:00	0,65	12:00:00	0,57	16:50:00	1,96	21:40:00	1,02	02:30:00	0,01
07:20:00	0,65	12:10:00	1,45	17:00:00	8,75	21:50:00	0,58	02:40:00	0,01
07:30:00	0,51	12:20:00	1,60	17:10:00	11,80	22:00:00	0,58	02:50:00	0,01
07:40:00	0,62	12:30:00	1,71	17:20:00	6,39	22:10:00	0,07	03:00:00	0,01
07:50:00	1,29	12:40:00	1,16	17:30:00	7,84	22:20:00	0,15	03:10:00	0,01
08:00:00	1,73	12:50:00	1,16	17:40:00	6,71	22:30:00	0,36	03:20:00	0,01
08:10:00	2,17	13:00:00	1,16	17:50:00	1,45	22:40:00	0,58	03:30:00	0,01
08:20:00	1,20	13:10:00	1,23	18:00:00	1,74	22:50:00	0,07	03:40:00	0,01
08:30:00	1,20	13:20:00	0,22	18:10:00	1,74	23:00:00	0,07	03:50:00	0,01
08:40:00	1,02	13:30:00	0,58	18:20:00	7,73	23:10:00	0,04	04:00:00	0,01
08:50:00	2,53	13:40:00	2,00	18:30:00	5,88	23:20:00	0,15	04:10:00	0,01
09:00:00	0,52	13:50:00	0,87	18:40:00	0,65	23:30:00	0,87	04:20:00	0,01
09:10:00	2,02	14:00:00	1,45	18:50:00	0,58	23:40:00	0,62	04:30:00	0,01
09:20:00	0,82	14:10:00	0,94	19:00:00	0,51	23:50:00	0,36	04:40:00	0,01
09:30:00	0,44	14:20:00	0,94	19:10:00	1,02	00:00:00	0,36	04:50:00	0,01
09:40:00	0,29	14:30:00	0,94	19:20:00	1,16	00:10:00	0,29	05:00:00	0,01
09:50:00	0,68	14:40:00	0,44	19:30:00	1,23	00:20:00	0,07	05:10:00	0,01
10:00:00	2,10	14:50:00	1,52	19:40:00	0,80	00:30:00	0,07	05:20:00	0,01
10:10:00	1,98	15:00:00	2,32	19:50:00	0,65	00:40:00	0,07	05:30:00	0,01
10:20:00	0,58	15:10:00	2,32	20:00:00	0,29	00:50:00	0,07	05:40:00	0,01
10:30:00	0,44	15:20:00	2,03	20:10:00	0,29	01:00:00	0,07	05:50:00	0,01
10:40:00	1,31	15:30:00	3,81	20:20:00	0,87	01:10:00	0,07	06:00:00	0,01
10:50:00	1,81	15:40:00	5,88	20:30:00	2,25	01:20:00	0,07	06:10:00	0,01
11:00:00	1,81	15:50:00	6,39	20:40:00	1,74	01:30:00	0,29	06:20:00	0,01
11:10:00	1,60	16:00:00	3,81	20:50:00	0,18	01:40:00	0,22	06:30:00	0,01
11:20:00	1,71	16:10:00	2,25	21:00:00	0,18	01:50:00	0,07	06:40:00	0,01
11:30:00	0,40	16:20:00	0,07	21:10:00	1,02	02:00:00	1,09	06:50:00	0,01
11:40:00	1,20	16:30:00	0,07	21:20:00	0,80	02:10:00	0,01	07:00:00	0,01

169,03

Fuente: elaboración propia.

Con la información de la tormenta y los datos del área de la subcuenca, número de curva, tiempo de retardo y las lluvias de diseño, se procede a calcular los hidrogramas unitarios por medio de *HEC-HMS*.

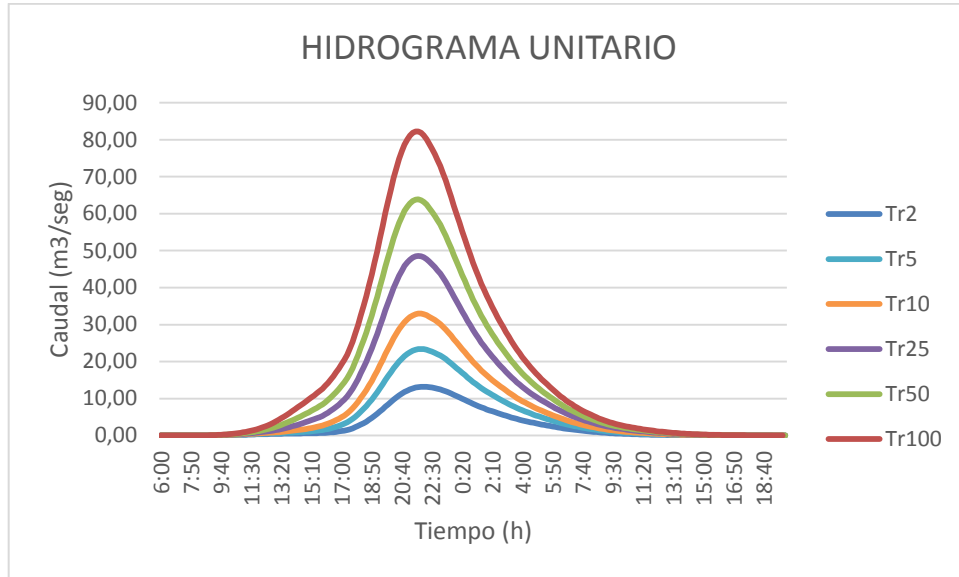
Figura 15. Hidrograma unitario asociado a un Tr y AMC I



Fuente: elaboración propia.

Con un antecedente de humedad I (seca) se obtiene un caudal máximo de 52,1 m³/seg para un periodo de retorno de 100 años.

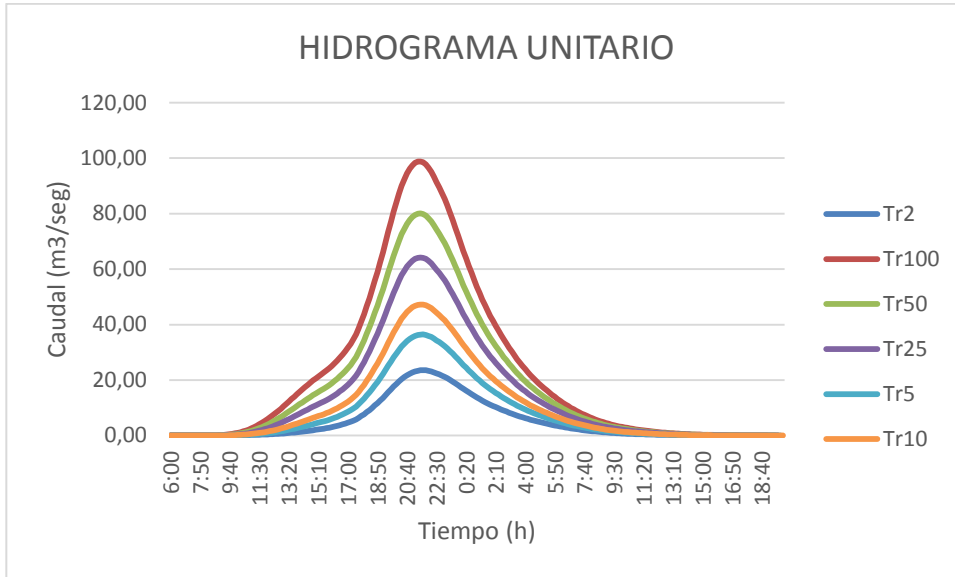
Figura 16. Hidrograma unitario asociado a un Tr y AMC II



Fuente: elaboración propia.

Con un antecedente de humedad II (media) se obtuvo un caudal máximo de $82,24 \text{ m}^3/\text{seg}$ para un periodo de retorno de 100 años.

Figura 17. **Hidrograma unitario asociado a un Tr y AMC III**



Fuente: elaboración propia.

Con un antecedente de humedad III (húmeda) se obtuvo un caudal máximo de $98.80 \text{ m}^3/\text{seg}$ para un periodo de retorno de 100 años.

CONCLUSIONES

1. Se determinó que la crecida, para un periodo de retorno de 100 años, es de 98,9 m³/s, con un antecedente de humedad III, a través del hidrograma unitario sintético.
2. El área de la subcuenca del río Guacalate es de 434,70 km². De este territorio, el 54 % es ocupado por agricultura. El río principal consta de 49 km de longitud y el río es de orden 4.
3. Se analizó estadísticamente la precipitación histórica de las estaciones para determinar la lluvia con diferentes periodos de retorno. Se utilizaron distintos parámetros de distribuciones estadísticas, entre ellos la distribución log normal de 2 y 3 parámetros; Gamma, Log Pearson, Gumbel y Log Gumbel, donde 3 estaciones no se ajustaron a una de cinco distribuciones probabilísticas.
4. Una gran parte del territorio de la subcuenca es utilizada por la agricultura. Esta actividad, sumada a la pendiente media que es de 25,17 % de la subcuenca, ocasiona que se genere mayor escorrentía superficial sobre gran parte de la cuenca cuando se presenta una tormenta, lo que ocasiona crecidas que amenazan los poblados cercanos al río Guacalate.

RECOMENDACIONES

1. Instalar más estaciones hidrometereológicas por parte del Insivumeh en el territorio de Guatemala, para la recopilación de datos que son útiles para el desarrollo de estudios e investigaciones.
2. Dar mantenimiento a las estaciones existentes, ya que hay registros no continuos por meses o años, la cual implica que la información no sea confiable.
3. Implementar programas de control de avenidas en el río Guacalate, con el objetivo de prevenir desastres.

BIBLIOGRAFÍA

1. BARDALES ESPINOZA, Walter Arnoldo. *Estimación de los caudales generados por el evento de lluvia suscitado entre el 5 y 6 de agosto del 2015, en las cuencas Sumaché, río Túnico y El Sauce*. Guatemala: Ministerio de Comunicaciones, Infraestructura y Vivienda, 2016. 14 p.
2. BÉJAR, Máximo. *Hidrología*. Lima Perú: Villon, 2002. 216 p.
3. CAHUEX COTÍ, Alfredo Antonio. *Evaluación de caudales de crecida en la cuenca del río Samalá: modelos lluvia-escorrentía, con fines de evaluación de amenazas de origen hidrometeorológico*. Trabajo de Graduación de Ing. Civil. Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2005. 95 p.
4. CHOW, Ven Te. *Statistical and probability analysis of hydrologic data; part I: frequency analysis. Handbook of applied hydrology; a compendium of water resource technology*. New York, USA.: McGraw-Hill, 1964. 572 p.
5. _____. MAIDMENT, David y MAYS, Larry. *Hidrología aplicada*. Colombia: McGraw-Hill, 1994. 577 p.
6. GÁMEZ MORALEZ, William R. *Texto básico de hidrología*. Managua, Nicaragua: Editronic, S.A., 2010. 152 p.

7. LABBÉ, Damián. *Análisis de datos de lluvia*. Chile: Universidad Concepción, 1979. 95 p.
8. SANCHEZ, Javier F. *HEC-HMS manual elemental*. [en línea]. <<http://hidrologia.usal.es/Complementos/Hec-hms-4.pdf>>. [Consulta: mayo de 2019].
9. Tierra, Grupo interinstitucional de monitoreo de bosques y uso de la. 2014. *The Purpose. the infinite power*. [en línea] <<http://www.thepurposeconsulting.com/mapa-de-bosques-y-uso-de-la-tierra-en-guatemala/>>. [Consulta: mayo de 2019].
10. TOLEDO REYES, Víctor. *Metodología para el diseño de sistemas de alerta temprana en microcuencas, aplicación a la cuenca alta del río Guacalate, Guatemala*. Guatemala: PREVDA, 2006. 114 p.
11. VARAC, Eduardo. *Crecidas de diseño*. Argentina: Universidad de San Juan, 2010. 104 p.
12. VERA MUTRE, Carlos; JARAMILLO NIETO, Jimmy y SANGA SUÁREZ, Christian. *Análisis hidrológico de la cuenca del Cerro Colorado y su interacción con la autopista terminal terrestre, Pascuales*. Guayaquil, Colombia: Escuela Superior Politécnica del Litoral, 2009. 220 p.
13. ZAPATA HERNÁNDEZ, Arley David. *Estadística-análisis de frecuencia*. 2005. Colombia: Universidad Nacional de Colombia, 2015. 44 p.