



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

**REGIONALIZACIÓN DE CRECIDAS PARA LA VERTIENTE DEL
GOLFO DE MÉXICO DE LA REPÚBLICA DE GUATEMALA**

Jacobo Ariel García Avila

Asesorado por el Ing. Sergio Antonio López Dubón

Guatemala, noviembre de 2015

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**REGIONALIZACIÓN DE CRECIDAS PARA LA VERTIENTE DEL
GOLFO DE MÉXICO DE LA REPÚBLICA DE GUATEMALA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

JACOBO ARIEL GARCÍA AVILA

ASESORADO POR EL ING. SERGIO ANTONIO LÓPEZ DUBÓN

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO CIVIL

GUATEMALA, NOVIEMBRE DE 2015

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Raúl Eduardo Ticún Córdova
VOCAL V	Br. Henry Fernando Duarte García
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

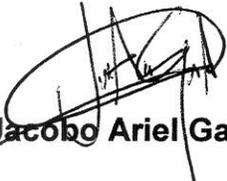
DECANO	Ing. Murphy Olimpo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Marco Antonio García Díaz
EXAMINADOR	Ing. Alejandro Castañón López
EXAMINADOR	Ing. Victor Manuel López Juárez
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

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:

REGIONALIZACIÓN DE CRECIDAS PARA LA VERTIENTE DEL GOLFO DE MÉXICO DE LA REPÚBLICA DE GUATEMALA

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil, con fecha agosto de 2014.


Jacobo Ariel García Avila

Guatemala, 30 de septiembre de 2015

Ingeniero
Hugo Leonel Montenegro Franco
Director Escuela de Ingeniería Civil
Facultad de Ingeniería
Presente

Estimado Ingeniero Montenegro:

El motivo de la presente es para hacer de su conocimiento que el estudiante Jacobo Ariel García Avila, carné 200915275 desarrolló el trabajo de graduación titulado "REGIONALIZACIÓN DE CRECIDAS PARA LA VERTIENTE DEL GOLFO DE MÉXICO DE LA REPÚBLICA DE GUATEMALA", personalmente le he orientado en el desarrollo del trabajo final de graduación y por esta razón extiendo la presente, para manifestarle que estoy de acuerdo con el referido trabajo, aprobando el mismo.

Sin otro particular me despido de usted, atentamente.

Sergio Antonio López Dubón
Ingeniero Civil
Cof. No. 9914



Ing. Sergio Antonio López Dubón
Colegiado No. 9914



USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

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

Universidad de San Carlos de Guatemala
FACULTAD DE INGENIERÍA
Escuela de Ingeniería Civil



Guatemala,
09 de noviembre de 2015

Ingeniero
Hugo Leonel Montenegro Franco
Director Escuela Ingeniería Civil
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos

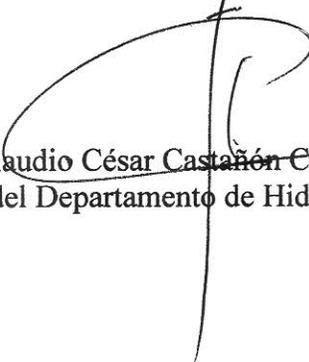
Estimado Ingeniero Montenegro.

Le informo que he revisado el trabajo de graduación REGIONALIZACIÓN DE CRECIDAS PARA LA VERTIENTE DEL GOLFO DE MÉXICO DE LA REPÚBLICA DE GUATEMALA, desarrollado por el estudiante de Ingeniería Civil Jacobo Ariel García Ávila, quien contó con la asesoría del Ing. Sergio Antonio López Dubón.

Considero que este trabajo está bien desarrollado y representa un aporte para el departamento y habiendo cumplido con los objetivos del referido trabajo doy mi aprobación al mismo solicitando darle el trámite respectivo.

Atentamente,

ID Y ENSEÑADA TODOS

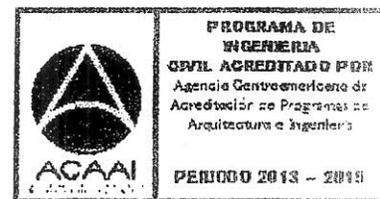

Ing. Claudio César Castañón Contreras
Jefe del Departamento de Hidráulica



FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO
DE
HIDRAULICA
USAC

/bbdeb.

Mas de 134 años de Trabajo Académico y Mejora Continua





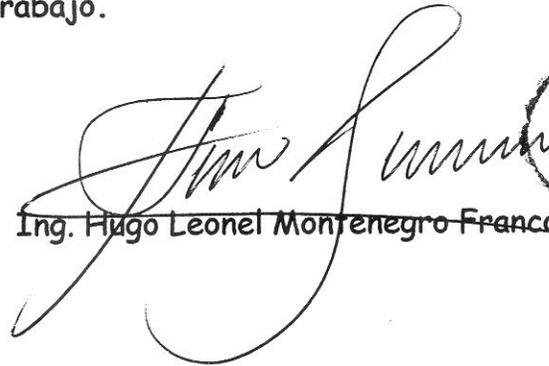
USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

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

Universidad de San Carlos de Guatemala
FACULTAD DE INGENIERÍA
Escuela de Ingeniería Civil



El director de la Escuela de Ingeniería Civil, después de conocer el dictamen del Asesor Ing. Sergio Antonio López Dubón y del Coordinador del Departamento de Hidráulica Ing. Claudio César Castañón Contreras, al trabajo de graduación del estudiante Jacobo Ariel García Ávila, titulado REGIONALIZACIÓN DE CRECIDAS PARA LA VERTIENTE DEL GOLFO DE MÉXICO DE LA REPÚBLICA DE GUATEMALA, da por este medio su aprobación a dicho trabajo.


Ing. Hugo Leonel Montenegro Franco



Guatemala, noviembre 2015

/bbdeb.

Mas de 134 años de Trabajo Académico y Mejora Continua





El Decano 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: **REGIONALIZACIÓN DE CRECIDAS PARA LA VERTIENTE DEL GOLFO DE MÉXICO DE LA REPÚBLICA DE GUATEMALA**, presentado por el estudiante universitario: **Jacobo Ariel García Avila**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Decano



Guatemala, noviembre de 2015

/gdech

ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Por ser darme la vida, llenarme de bendiciones y por darme la oportunidad de lograr grandes cosas.
Mis padres	José Francisco Amadeo García Arévalo y Claudina Celeste Avila Herrarte, por formarme y siempre darme todo su apoyo.
Mis hermanos	Sara Iris, Amadeo José y María Isabel García Avila, por estar ahí.
Mis abuelos	A todos, especialmente al ingeniero Amadeo García Zepeda, por ser inspiración y ejemplo de ética profesional.
Mi novia	Ana Paola Méndez de León, por ser una gran bendición en mi vida y apoyarme en todo lo que me propongo.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Por ser mi alma máter y ayudar a la población de Guatemala a continuar los estudios superiores.
Facultad de Ingeniería	Por darme los estudios y criterios para mi vida profesional.
Escuela de Ingeniería Civil	Por velar desinteresadamente en la formación de nuevos profesionales, éticos y preparados.
Familia Méndez de León	Por el cariño que siempre me han demostrado.
Mis amigos	A todos, en especial a Andrés Monterroso, Ardany Martínez, Axel Trujillo, Byron Roldán, Carlos Monterroso, Carlos Silva, Daniel Maldonado, David Solis, Edy Rodríguez Ernesto Guillén, Evelin Contreras, Hugo Vega, Keidel Orellana, José Castillo, Joseph Moreno, Luis Nájera, Obed Contreras, Omar Mazariegos, Sergio Berducido, Sammy Hernández, Mynor Carrillo, Víctor Hernández.

Ing. Sergio López

Por apoyarme y guiarme en este trabajo de graduación.

Licda. Diana Salguero

Por su gran amabilidad conmigo.

Ing. José Santiago

Por su invaluable amistad.

Insivumeh

Por permitirme realizar el estudio y darme el apoyo necesario.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	IX
RESUMEN.....	XV
OBJETIVOS.....	XVII
INTRODUCCIÓN.....	XIX
1. MARCO TEÓRICO.....	1
1.1. Red hidrométrica	3
1.2. División hidrológica de Guatemala	4
1.2.1. Vertientes y regiones homogéneas	6
1.2.1.1. Vertiente del Pacífico.....	6
1.2.1.2. Vertiente del Atlántico	7
1.2.1.3. Vertiente del golfo de México.....	8
1.3. Información disponible.....	10
1.4. Caudal índice	11
1.5. Análisis de frecuencia regional	12
1.6. Envolvente regional	13
1.7. Conceptos probabilísticos en el análisis de crecidas.....	14
1.7.1. Series	14
1.7.2. Probabilidad.....	15
1.7.3. Probabilidad empírica	15
1.7.4. Periodo de retorno	16
1.7.5. Parámetros estadísticos	16
1.7.5.1. Media.....	17

	1.7.5.2.	Varianza	17
	1.7.5.3.	Coefficiente de asimetría.....	18
1.7.6.		Distribuciones de probabilidades utilizadas en hidrología.....	18
	1.7.6.1.	Distribución normal.....	19
	1.7.6.2.	Distribución Log normal de dos parámetros	20
	1.7.6.3.	Distribución de Gumbel	22
	1.7.6.4.	Distribución de Pearson tipo III.....	23
1.7.7.		Prueba de valores atípicos (<i>outliers</i>)	24
1.7.8.		Envolvente regional.....	27
2.		METODOLOGÍA DEL ANÁLISIS	29
	2.1.	Regionalización por medio del método de trazos multidimensionales.....	29
	2.2.	Método estadístico o de estaciones-año.....	30
3.		DEFINICIÓN DE LAS REGIONES HIDROLÓGICAS PARA LA VERTIENTE DEL GOLFO DE MÉXICO	33
	3.1.	Regiones homogéneas	33
		3.1.1. Región I.....	35
		3.1.2. Región II.....	35
4.		ANÁLISIS DE FRECUENCIA REGIONAL	37
	4.1.	Método matemático.....	37
	4.2.	Método estaciones-año	39
		4.2.1. Caudal índice QMM.....	41
		4.2.2. Determinación de Q_{Tr}	45

5.	RESULTADOS	53
5.1.	Modelos de regionalización	53
5.2.	Regiones homogéneas.....	53
5.3.	Uso de los resultados de los análisis.....	54
	CONCLUSIONES	55
	RECOMENDACIONES.....	57
	BIBLIOGRAFÍA.....	59
	APÉNDICES	61

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Distribución del agua en el planeta	1
2.	Crecimiento poblacional mundial.....	3
3.	Mapa base de las vertientes de Guatemala. área sombreada: vertiente del golfo de México.....	5
4.	Mapa base de las regiones hidrológicas de Guatemala.....	9
5.	Regiones homogéneas	36
6.	Curvas de frecuencia teóricas, región I.....	47
7.	Curvas de frecuencia teóricas, región II.....	48

TABLAS

I.	Cuencas de la vertiente del Pacífico	6
II.	Regiones de la vertiente del Pacífico	7
III.	Cuencas de la vertiente del Atlántico	7
IV.	Regiones de la vertiente del Atlántico	8
V.	Cuencas de la vertiente del golfo de México.....	8
VI.	Regiones de la vertiente del Atlántico	9
VII.	Información disponible	10
VIII.	Distribuciones de probabilidades utilizadas en hidrología.....	19
IX.	Valores de K_n para datos dudosos	26
X.	Parámetros morfométricos de las cuencas	34
XI.	Caudales máximos probables	34
XII.	Variables utilizadas	37

XIII.	Evaluación de ecuaciones 30 y 31	38
XIV.	Series anuales de caudales máximos instantáneos	40
XV.	Caudales modulares	41
XVI.	Parámetros estadísticos de cuencas para QMM	42
XVII.	Caudales índice para Cuilco	43
XVIII.	Caudales índice para Xemal.....	43
XIX.	Caudales índice para Chojil	44
XX.	Caudales índice para El Porvenir	44
XXI.	Caudales índice para Machaquilá.....	45
XXII.	Parámetros estadísticos por región	46
XXIII.	Coeficientes regionales de ajuste para diferentes distribuciones de la región I.....	48
XXIV.	Coeficientes regionales de ajuste para diferentes distribuciones de la región II.....	49
XXV.	Caudales ajustados para el periodo de retorno Tr. Cuilco.	50
XXVI.	Caudales ajustados para el periodo de retorno Tr. Xemal.....	50
XXVII.	Caudales ajustados para el periodo de retorno Tr. Chojil.....	51
XXVIII.	Caudales ajustados para el periodo de retorno Tr. Cuilco.	51
XXIX.	Caudales ajustados para el periodo de retorno Tr. Cuilco.	52
XXX.	Resumen de cálculos de error promedio	54

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
Q	Caudal
QI	Caudal índice
hr	Hora
km	Kilómetro
Km²	kilómetro cuadrado
lts	Litros
m, mts	Metros
Msnm	Metros sobre el nivel del mar
mg	Miligramos
mm	Milímetros
m²	Metro cuadrado
m³	Metro cúbico
WS	Nivel de agua
Seg, s	Segundo

GLOSARIO

Afluencia	Acción y efecto de una corriente que vierte sus aguas en la de otra corriente, a un lago o a otro cuerpo de agua.
Afluente	Río tributario de otro.
Aforo	Proceso y arte de medir las alturas, áreas, velocidades y caudales en los ríos.
Agua freática	Sinónimo de agua subterránea.
Agua subterránea	Agua del suelo que se encuentra en la zona de saturación y que alimenta pozos, manantiales y escorrentía subterránea.
Agua superficial	Agua sobre la superficie del suelo.
Aguas abajo	Dirección en el sentido de la corriente.
Aguas arriba	Dirección en el sentido contrario de la corriente
Año hidrológico	División anual que principia en el mes en el que se considera que empieza la época de lluvia o invierno en los diferentes países.

Balance hidrológico	Balance de la entrada, salida y contenido de agua en una unidad hidrológica, por ejemplo, una cuenca de desagüe, un lago, un embalse, un sistema de regadío, una capa freática o una zona determinada del subsuelo.
Banco de arena	Lodo que se forma en una corriente.
Cauce	Conducto abierto creado natural o artificialmente, el cual contiene agua en movimiento periódico o continuamente.
Caudal	Magnitud del flujo de una corriente en un lugar determinado de su curso, o del flujo que mana de una fuente. Se mide por el volumen de agua que en la unidad de tiempo pasa por la sección transversal de la corriente o es vertida por la fuente. En un río el caudal suele expresarse en metros cúbicos por segundo.
Caudal medio	Media aritmética de los caudales de todos los años hidrológicos completos registrados, sean o no consecutivos. Generalmente, solo se publican los caudales medios cuando el número de años es igual o mayor de cinco.

Ciclo hidrológico	Circulación del agua desde el mar a la tierra y desde esta de nuevo al mar. Los circuitos secundarios se refieren a la circulación entre la tierra y la atmósfera mediante los procesos de precipitación, evaporación y transpiración.
Conred	Coordinadora Nacional para la Reducción de Desastres.
Corriente de agua	Termino general para definir la masa de agua que fluye en un cauce natural o artificial.
Crecida	Flujo relativamente alto de una corriente.
Estación de aforos	Estación para la medida regular del caudal de una corriente.
Estación hidrológica	Denominación que incluye, tanto a las estaciones fluviométricas como a las limnimétricas, no obstante, generalmente, la denominación hidrológica es sinónima de fluviométrica.
Hidrología	Ciencia natural que estudia el agua, su ocurrencia, circulación y distribución en la superficie terrestre, sus propiedades químicas y físicas y su relación con el medio ambiente, incluyendo a los seres vivos.
ICTA	Instituto de Ciencia y Tecnología Agrícola.

IGN	Instituto Geográfico Nacional.
Isivumeh	Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología.
INE	Instituto Nacional de Estadística.
Micivi	Ministerio de Comunicaciones, Infraestructura y Vivienda.
OMM	Organización Meteorológica Mundial.
Precipitación	Agua meteórica que cae en la superficie terrestre.
Reservorio	Estanque, lago o cuenca, naturales o artificiales, para la conservación, regulación y control de agua.
Río	Corriente de agua superficial que va a desembocar a un lago o al mar.
Sección de aforos	Sección transversal de una corriente donde se mide el caudal.
Sedimentos	Materiales fragmentarios originados por la acción de los elementos atmosféricos en las rocas y que es transportado, en estado de suspensión, por el agua o el viento, o que es depositado por estos dos agentes naturales, o acumulado por otros, en los lechos de las corrientes.

Temporal	En hidrología suele emplearse para designar un período de lluvias persistentes y generales.
Tributario	Cauce que vierte sus aguas a otro cauce de orden superior.
UTM	Universal Transverse Mercator (sistema de coordenadas).
Volumen de escorrentía	Volumen de agua que desagua a lo largo de la superficie del suelo durante y después de la precipitación.
Zona de inundación	Tierras que bordean un río y que están sujetas a inundaciones con una frecuencia parecida.

RESUMEN

La determinación de las crecidas máximas es importante, especialmente, para la correcta planificación de infraestructura, de tal manera que se pueda prevenir y evitar riesgos.

El análisis regional se basa en el concepto de homogeneidad regional que asume, que el flujo anual de crecidas máximas en varios sitios de una región es similar en características, estadísticas y que no dependen en el tamaño de captación.

Primero se determinó cuántas regiones de comportamiento homogéneo existen en la vertiente del golfo de México, esto se realizó a través del método de trazos multidimensionales.

Al momento de tener ya definidas las regiones, se prosiguió a determinar una ecuación matemática para cada región, que describe el comportamiento del caudal en función de los factores morfológicos de cualquier cuenca dentro de cada lugar.

Luego, con métodos estadísticos, distribuciones de probabilidad de frecuencia normal, Gumbel, Pearson tipo III, Log Normal, Log Gumbel y Log Pearson tipo III, para cada una de las regiones y diferentes períodos de retorno, se calculó el factor adimensional de ajuste; el cual, multiplicado con los valores de caudal previamente determinados con el método matemático, devuelve el valor de los caudales máximos probables, concluyendo con esto los objetivos del presente trabajo.

OBJETIVOS

General

Establecer un modelo de regionalización de crecidas para la vertiente del golfo de México, con el fin de poder estimar valores de crecidas máximas.

Específicos

1. Determinar los parámetros morfométricos principales que permitan generar un modelo de regionalización para la vertiente del golfo de México.
2. Identificar posibles regiones de comportamiento homogéneo ante crecidas.
3. Realizar modelos que relacionen el caudal índice con el área de drenaje para cada región homogénea.
4. Estimar los valores de crecidas en diferentes estaciones de la vertiente del golfo de México con distintas distribuciones estadísticas.

INTRODUCCIÓN

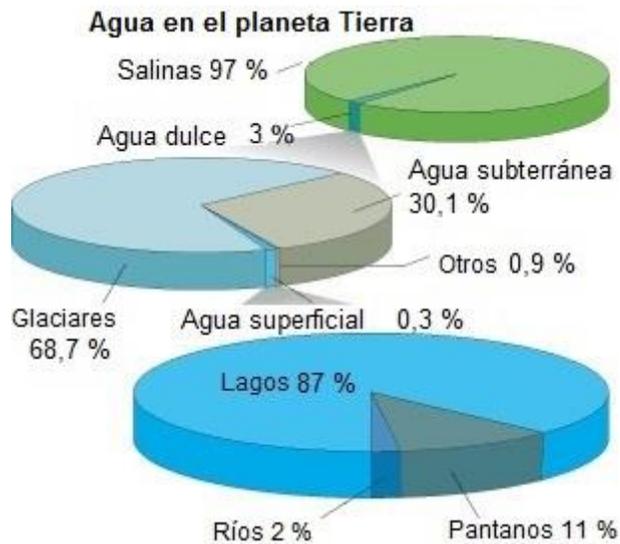
Las crecidas consisten en incrementos de elevación de los niveles o caudales normales de un río, los cuales pueden causar inundaciones o poner en riesgo elementos de un sistema socioeconómico. Una crecida puede originarse a partir de eventos de lluvias de altas intensidades o larga duración. También pueden ocurrir como producto de la operación y control de infraestructura dentro del cauce, tal como embalses. El rompimiento de una presa de almacenamiento puede dar origen a crecidas repentinas. Por otro lado, la magnitud de crecidas puede aumentar, producto de las actividades humanas, por ejemplo, el cambio del uso del suelo en las cuencas tributarias.

Para este trabajo se toma la vertiente del golfo de México, utilizando estaciones hidrológicas para el análisis de regionalización. Para cada región se establecen relaciones entre la crecida y los parámetros morfométricos de la cuenca, para luego hacer un análisis de frecuencia regional, se utilizan métodos ponderados probabilísticamente. Finalmente, al ajustar las distribuciones se obtienen las curvas de frecuencias regionales envolventes, que estiman los caudales máximos asociados a los periodos de retornos.

1. MARCO TEÓRICO

La superficie del planeta Tierra está constituida aproximadamente de 70 % de agua, del cual el 97 % es agua de océanos y el restante 3 % está dividido en glaciares, aguas subterráneas, y por último, el agua superficial, representando esta solamente el 0,3 % de toda el agua dulce del planeta y se encuentra dividida en ríos, lagos, lagunas y escorrentías, entre otras.

Figura 1. **Distribución del agua en el planeta**



Fuente: elaboración propia. Datos tomados de la OMM.

Todos los seres vivos están conformados, en algún porcentaje de agua, esto quiere decir, que sin este recurso la vida es imposible, es por eso que desde los comienzos de la humanidad se ha estudiado sus características

y propiedades, se determinó su ciclo y su comportamiento en las diferentes estaciones del año.

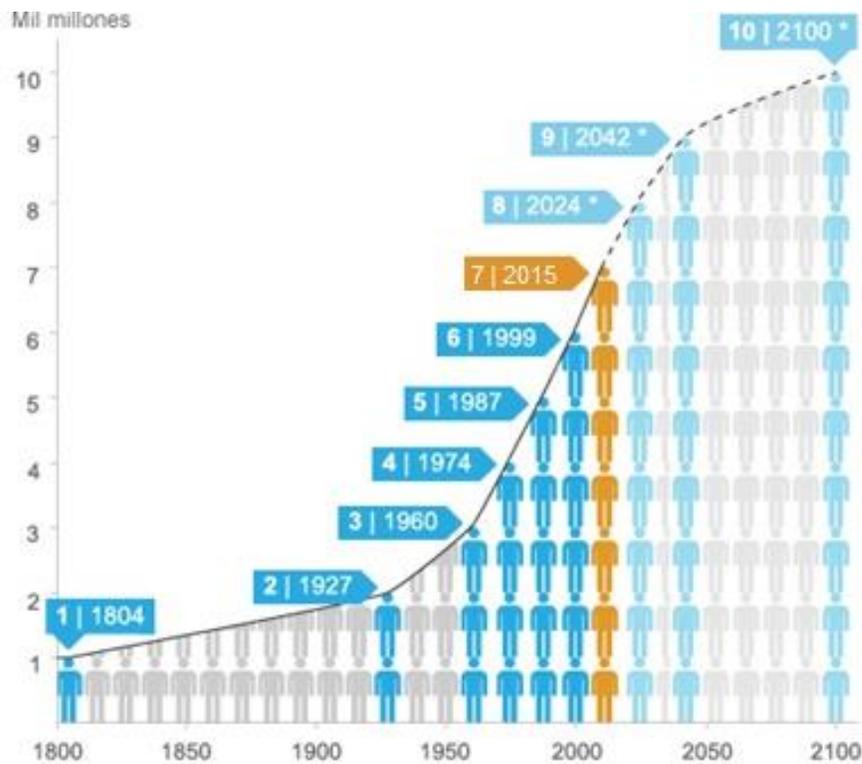
A través de la historia, cuando la raza humana decidió establecerse en sitios de manera permanente, siempre se prefirió la cercanía de cuerpos de agua y para los lugares que no poseen estos, se implementaron diferentes sistemas y métodos para manejar el recurso hídrico.

La importancia del agua se ha marcado con mayor intensidad en la era moderna debido a que la población humana ha crecido de manera exponencial, y en los últimos 100 años ha pasado de ser de 2 billones de personas a más de 7 billones, esto indica no solo un aumento en la densidad poblacional, sino también en el consumo diario para satisfacer las necesidades básicas de las personas.

Es por demás decir, que junto a la población humana también han crecido diferentes poblaciones vegetales y animales, utilizadas para consumo, además, que el agua es el material principal en la mayoría de las industrias modernas.

Esto quiere decir, que la demanda de agua ha crecido de manera significativa y es necesario su aprovechamiento. Con los estudios de crecidas máximas probables es posible diseñar tanques de captación, embalses y planificar puntos para alimentar los niveles freáticos en los suelos.

Figura 2. Crecimiento poblacional mundial



Fuente: elaboración propia, datos tomados de la ONU.

1.1. Red hidrométrica

En Guatemala, la investigación y recolección de datos para los diferentes cuerpos de agua está a cargo del Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (Insivumeh), perteneciente al Ministerio de Comunicaciones, Infraestructura y Vivienda (Micivi). El cuál, a través del Departamento de Investigación y Servicios Hídricos, mantiene un monitoreo constante tanto de los ríos, como de algunos de los lagos y lagunas existentes en el territorio nacional con la ayuda de las estaciones hidrológicas que posee.

Actualmente, el Departamento de Hidrología es el encargado de recopilar información hidrológica, evaluando su cantidad y calidad de ríos, lagos principales e investigando acuíferos para la explotación y aprovechamiento para agua potable, irrigación e industria. Incluyendo también, la parte norte del territorio nacional, en la que además de medición de caudales superficiales de sus principales ríos y niveles en sus principales lagos, se cuenta con medición de condiciones meteorológicas.

También se cuenta con la elaboración de un pronóstico de mareas, una efeméride solar, manuales con datos bastante utilizados por el público y elaborados con programas especiales por personal profesional y técnicos especializados en esta labor.

En la parte de hidrología aplicada e investigación se cuenta con estudios de cuencas y aplicación de modelos. Se tiene además, investigación de calidad de agua y boletines anuales de datos hidrológicos, como también estudios de balance hídrico superficial por cuenca hidrográfica. Para realizar un estudio completo del comportamiento de las cuencas en Guatemala es necesario estudiar las tres vertientes del país detalladas en la siguiente sección.

1.2. División hidrológica de Guatemala

A pesar de ser un país pequeño en extensión territorial, Guatemala posee diversos microclimas, debido a sus variaciones orográficas. Estas afectan directamente el comportamiento del agua y funcionan como parte aguas en las cuencas y los puntos más elevados de la República sirven como divisorias de vertientes.

1.2.1. Vertientes y regiones homogéneas

El estudio realizado por el Insivumeh dividió al país en ocho zonas, agrupándolas en cuencas por ser estas la unidad de su análisis. Las vertientes y regiones en consideración se describen a continuación.

1.2.1.1. Vertiente del Pacífico

Tiene longitudes promedio de 110 km y se encuentra a lo largo de toda la costa sur del país, representando aproximadamente el 25 % del territorio nacional. Se encuentra dividida en cuatro regiones.

Tabla I. Cuencas de la vertiente del Pacífico

Núm.	Cuenca	Área (km ²)	núm.	Cuenca	Área (km ²)
1	Coatán	270	10	Coyolate	1 648
2	Suchiate	1 054	11	Acomé	706
3	Naranjo	1 273	12	Achiguate	1 291
4	Ocosito	2 035	13	María Linda	2 727
5	Samalá	1 510	14	Paso Hondo	512
6	Sis-Icán	919	15	Los Esclavos	2 271
7	Nahualate	1 941	16	Paz	1 732
8	Atitlán	541	17	Ostúa-Güija	2 243
9	Madre Vieja	1 007	18	Olopa	310
Área total de la vertiente del Pacífico (km ²)					23 990

Fuente: Insivumeh. <http://www.insivumeh.gob.gt/riosdeguatemala.html>. Consulta: abril de 2015.

Las cuencas de las regiones pertenecientes a la vertiente del Pacífico se muestran en la tabla II, cabe mencionar que la región II comparte todas sus cuencas con las de la región I, excepto Coatán.

Tabla II. **Regiones de la vertiente del Pacífico**

Región I: Altiplano occidental		Región II: Pacífico sur-occidental		Región III Pacífico sur-oriental	Región IV Altiplano oriental
Coatán	Nahualate	Suchiate	Atitlán	María Linda	Ostúa-Güija
Suchiate	Atitlán	Naranjo	Madre Vieja	Paso Hondo	Olopa
Naranjo	Madre Vieja	Ocosito	Coyolate	Los Esclavos	
Ocosito	Coyolate	Samalá	Acomé	Paz	
Samalá	Acomé	Sis-Iscán	Achiguate		
Sis-Iscán	Achiguate	Nahualate			

Fuente: Insivumeh. <http://www.insivumeh.gob.gt/riosdeguatemala.html>. Consulta: abril de 2015.

1.2.1.2. **Vertiente del Atlántico**

Ocupa un área de 34 259 kilómetros cuadrados; posee las longitudes de río más grande del país, la mayor de ellas es de 486,55 Km correspondiente al río Motagua. Ocupa aproximadamente el 35 % del área del territorio nacional. Está dividida en dos regiones y un porcentaje de la vertiente es homogéneo con la región VIII, perteneciente a la vertiente del golfo de México.

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

Núm	Cuenca	Área (km ²)	núm	Cuenca	Área (km ²)
1	Grande de Zacapa	2 462	5	Cahabón	2 459
2	Motagua	12 670	6	Sarstún	2 109
3	Río Dulce	3 435	7	Vertiente Belice	8 159
4	Polochic	2 811			
Área total de la vertiente del Caribe (km ²)					34 105

Fuente: Insivumeh. <http://www.insivumeh.gob.gt/riosdeguatemala.html>. Consulta: abril de 2015.

Tabla IV. **Regiones de la vertiente del Atlántico**

Región V: Motagua	Región VI: Polochic–Cahabón y bajo Motagua
Grande Zacapa	Rio Dulce
Motagua	Polochic
	Cahabón
	Sarstun
	Vertiente de Belice

Fuente: Insivumeh. <http://www.insivumeh.gob.gt/riosdeguatemala.html>. Consulta: abril 2015.

1.2.1.3. **Vertiente del golfo de México**

Es la vertiente más grande de Guatemala y ocupa aproximadamente el 40 % del territorio nacional, cuenta con longitudes de ríos grandes y afluentes caudalosos. Está subdividida en dos regiones, la VII y VIII, misma que es compartida con la vertiente del Atlántico. El estudio de regionalización hidrológica de este trabajo se centró en esta vertiente.

Tabla V. **Cuencas de la vertiente del golfo de México**

Núm	Cuenca	Área (km²)	núm	Cuenca	Área (km²)
1	Cuilco	2 274	6	Xaclbal	1 366
2	Selegua	1 535	7	Chixoy	12 150
3	Nentón	1 451	8	La Pasión	12 156
4	Pojom	813	9	Usumacinta	2 638
5	Ixcán	2 085	10	San Pedro	14 335
Área total de la vertiente del golfo de México (km ²)					50 803

Fuente: Insivumeh. <http://www.insivumeh.gob.gt/riosdeguatemala.html>. Consulta: abril de 2015.

1.3. Información disponible

En el análisis regional es necesario contar con una cantidad de datos suficientes para poder generar modelos exactos, por lo que las cuencas con pocos datos históricos tienen poco valor en este estudio.

Guatemala posee varias estaciones hidrométricas con registros muy cortos o que no cumplen con los requisitos para realizar los análisis de frecuencia para tener resultados aceptables.

La vertiente del golfo de México cuenta con diecisiete estaciones hidrométricas, de las cuales únicamente se encuentra información relevante para cinco, por lo que únicamente se trabajó con dichas estaciones.

Tabla VII. Información disponible

	Estación	Disponible
1	Cuilco	Sí
2	Xemal	Sí
3	Chojil	Sí
4	Nentón	No
5	La Laguna	No
6	Yulquisis	No
7	San Luis Ixcán	No
8	San Agustín Chixoy	No
9	Río Blanco	No
10	Xococ	No
11	Puente Chocox	No
12	Playa Grande	No
13	El Porvenir	Sí
14	Machaquilá	Sí

Continuación de la tabla VII.

15	El Pato	No
16	El Tigre	No
17	San Pedro Mactún	No

Fuente: elaboración propia.

1.4. Caudal índice

La suposición principal en el índice de las crecidas es que su distribución, en diferentes lugares de una región, es el mismo, a excepción de una escala o parámetro de crecida índice que refleja las precipitaciones y los tipos de escorrentía de cada región. El caudal proporciona la avenida media, aunque cualquier parámetro de localización de la frecuencia de distribución puede ser utilizado. En este caso, las estimaciones regionales de cuantiles (QTr), en un lugar determinado durante un período de retorno dado Tr , se puede obtener como en la ecuación que sigue, donde QTr es la estimación de cuantiles de la distribución regional para el período de retorno dado, y QI es el caudal índice llamado también caudal medio máximo (QMM), KTr es el valor adimensional obtenido en la curva de frecuencia y es el parámetro de crecida índice.

$$QMM = QTr * KTr$$

El análisis regional de métodos de análisis de frecuencia se basa en la suposición de que la variable estandarizada en cada estación tenga la misma distribución en todos los sitios en la región en estudio.

Un método de asignación de regiones homogéneas es la geografía, basada en la similitud en cuanto a los tipos de suelo, clima y topografía. Por

otra parte, dos sitios en diferentes regiones pueden llegar a ser similares en cuanto a la frecuencia de inundaciones, a pesar del hecho de que todas son geográficamente diferentes.

Otro enfoque es dividir inicialmente el grupo entero de las cuencas en dos o más grupos en función de una o más características de la cuenca, tomando en consideración el tamaño de la cuenca, precipitación u otras características.

1.5. Análisis de frecuencia regional

Para cuencas con muy pocos datos, el análisis histórico tiene poco valor para el estudio de frecuencias. En la región centroamericana este caso se presenta muy a menudo, puesto que muchas de las estaciones cuentan con registros cortos que no llenan los requisitos para hacer un análisis de frecuencia que proporcione resultados confiables.

La estimación de caudales máximos para diferentes períodos de retorno, es uno de los principales procedimientos en hidrología, que tiene como fin la determinación del caudal de diseño para una determinada estructura hidráulica o para el trazado de mapas de inundación.

La metodología más común para la determinación de estos caudales máximos, es la metodología estadística, la cual ajusta los datos registrados en una estación hidrométrica (crecidas máximas instantáneas) a una función de distribución de frecuencia y determina los valores para diferentes períodos de retorno.

La disponibilidad de datos es un aspecto importante en el análisis de frecuencia. La estimación de la probabilidad de ocurrencia de eventos

extraordinarios es una extrapolación basada en datos limitados. Así, cuanto mayor sea la base de datos, más precisas serán las estimaciones.

Desde el punto de vista estadístico, las estimaciones a partir de pequeñas muestras pueden dar estimaciones de parámetros irrazonables o físicamente poco realistas, en especial para las distribuciones con un gran número de parámetros.

Grandes variaciones asociadas con tamaños de muestra pequeños causan que las estimaciones no sean realistas. En la práctica, sin embargo, los datos pueden ser limitados o en algunos casos no se tienen disponibles para un sitio. En tales casos, el análisis regional es más útil. Este se basa en el concepto de homogeneidad regional, el cual asume que el flujo anual de crecidas máximas, en varios sitios de una región, es similar en características estadísticas y no dependen en el tamaño de captación. La regionalización tiene dos propósitos.

Para los sitios donde no se cuenta con disponibilidad de los datos, el análisis se basa en datos regionales. Para sitios con datos disponibles, el uso conjunto de datos medidos en un sitio y los datos regionales de un número de estaciones en una región, proporciona la información suficiente que permita determinar una distribución de probabilidad para ser utilizado con mayor fiabilidad.

1.6. Envoltente regional

El comportamiento general de los caudales máximos anuales en una región se puede apreciar en una gráfica que relaciona esta variable con la correspondiente área de drenaje de la cuenca. La curva suave que cubre a

todos los puntos de esa gráfica se conoce como envolvente de caudales máximos.

La envolvente no está asociada con frecuencias o probabilidades específicas de ocurrencia, pero dentro de la región de aplicación, proporciona evidencia de las magnitudes máximas de los caudales esperados. También permite realizar estimados gruesos de los eventos extraordinarios esperados en una determinada región, en función solamente de la superficie de grandes obras hidráulicas.

1.7. Conceptos probabilísticos en el análisis de crecidas

El análisis probabilístico es utilizado para la estimación de crecidas, ya que utiliza valores pasados, los cuales pueden ser obtenidos en las estaciones hidrométricas y los extrapola con diferentes distribuciones de frecuencia, como las distribuciones utilizadas en este estudio: Normal, Log-Normal, Gamma, Gamma 3P, Log- Pearson III, Gumbel, Log-Gumbel, entre otras. El análisis fue realizado para cada una de las distribuciones de frecuencia, luego se comparó con datos presentes conocidos para determinar la que cumple de mejor manera con las regiones homogéneas.

1.7.1. Series

El uso de las series de máximos anuales es muy común en el análisis probabilístico por dos razones. La primera es por conveniencia, ya que la mayoría de los datos se procesan de manera que la serie anual está fácilmente disponible. La segunda es que hay una base teórica para extrapolar los datos de series anuales más allá de las posibilidades de observación.

Una limitación de los datos de series anuales es que cada año está representado por solo un evento. El segundo evento más alto en un año en particular puede ser más alto que los más altos de otros años, y aun así no estaría contenido en la serie.

1.7.2. Probabilidad

La probabilidad de un evento $P(A)$, se define como la frecuencia de su ocurrencia durante la repetición de un número de observaciones. Si una muestra con N observaciones tiene N_A valores en el rango del evento A , la frecuencia relativa de A es N_A/N . La estimación de la $P(A)$ a partir de la frecuencia relativa, mejora progresivamente al aumentar de tamaño la muestra. Matemáticamente:

$$P(A) = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{N_A}{N} \quad (\text{Ec. 1, ref 1})$$

Tales probabilidades se conocen como probabilidades objetivas o posteriores debido a que dependen concretamente de las observaciones de la variable aleatoria.

1.7.3. Probabilidad empírica

Con los parámetros estadísticos y una función de frecuencia se puede calcular la probabilidad teórica para un valor determinado de x . Para una serie de observaciones puede determinarse la probabilidad $P(X=x_i)$, a partir de la frecuencia. Esta probabilidad empírica corresponde a la suma de las frecuencias relativas, cuando las observaciones se ordenan de manera ascendente.

Existen diversas ecuaciones para el cálculo de la probabilidad empírica, pero una de las más usadas es la de Weibull, misma que se enuncia a continuación:

$$P = \frac{m}{N+1} \quad (\text{Ec. 2, ref 1})$$

Donde:

m : posición

N : número de datos de la muestra

P : probabilidad

1.7.4. Periodo de retorno

El período de retorno Tr de un evento dado es el número promedio de años dentro del cual se espera que el evento sea igualado. El que se espera cada N años es XTr . Ambos términos se refieren a la frecuencia de ocurrencia promedio esperada de un evento durante un largo período de años.

El Tr es igual al inverso de la probabilidad de excedencia en un solo año.

$$Tr = \frac{1}{P} \quad (\text{Ec. 3, ref 1})$$

1.7.5. Parámetros estadísticos

Los análisis estadísticos extraen información de una muestra, indicando las características de la población. Los principales parámetros estadísticos son los momentos de primer, segundo y tercer orden correspondiente a la media, varianza, y asimetría respectivamente.

1.7.5.1. Media

Es el punto de partida para describir las propiedades de todos los valores de la población, también se le conoce como la tendencia central; es decir, el valor central alrededor del cual se aglomeran todas las observaciones.

El valor estimado de la media a partir de la muestra es:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (\text{Ec. 4, ref 1})$$

1.7.5.2. Varianza

Mide la variabilidad de los datos. Es el segundo momento respecto a la media. El valor estimado de la varianza a partir de la muestra es:

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (\text{Ec. 5, ref 1})$$

En el cual el divisor es n-1 en lugar de n para asegurar que la estadística de la muestra no sea sesgada, es decir, que no tenga una tendencia, en promedio, a ser mayor o menor que el valor verdadero. Las unidades de la varianza son la media al cuadrado, la desviación estándar (σ) es una medida de la variabilidad que tiene las mismas dimensiones que la media y simplemente es la raíz cuadrada de la varianza.

1.7.5.3. Coeficiente de asimetría

La distribución de los valores de una distribución alrededor de la media se mide por la asimetría. Se obtiene a partir del tercer momento alrededor de la media, dividiéndolo por el cubo de la desviación estándar para que sea adimensional.

$$E[(x - \mu)]^3 = \int_{-\infty}^{\infty} (x - \mu)^3 f(x) dx \quad (\text{Ec. 6, ref 1})$$

Tercer momento respecto a la media.

$$\gamma = \frac{1}{\sigma^3} E'[(x - \mu)]^3 \quad (\text{Ec. 7, ref 1})$$

Un estimado del coeficiente de asimetría está dado por:

$$C_s = \frac{n \sum_{i=1}^n (x - \bar{x})^3}{(n-1)(n-2) * s^3} \quad (\text{Ec. 8, ref 1})$$

1.7.6. Distribuciones de probabilidades utilizadas en hidrología

Se usan en una amplia variedad de estudios hidrológicos, por ejemplo, los estudios de recursos hídricos de caudales extremos altos y bajos, de sequías, de volúmenes en embalses, de cantidades de lluvia y de modelos de series cronológicas. Los totales anuales, como los volúmenes de escurrimiento o la cantidad de lluvia, tienden a estar distribuidos normalmente o casi, debido al teorema estadístico del límite central. Los totales semanales y mensuales son

menos simétricos (asimetría casi siempre positiva) y, por lo general, no se pueden modelar con la distribución normal.

Tabla VIII. **Distribuciones de probabilidades utilizadas en hidrología**

Nombre	Acrónimo	Referencia
Normal	(N)	Gauss
Log Normal	(LN)	Hazen, 1914
Pearson tipo III	(P3)	Foster, 1924
Valor extremo tipo 1	(EV1)	Gumbel, 1941
Valor extremo tipo 2	(EV2)	Gumbel, 1941
Valor extremo tipo 3	(EV3)	Jenkinson, 1969
Gamma o Pearson tipo 3	(G)	Morán, 1957
Gamma tres parámetros		
Log Pearson tipo 3	(LP3)	U.S. Water Resources Council, 1981
Valor extremo generalizado	(VEG)	Jenkinson, 1969
Logística generalizada	(GLG)	Ahmad, 1988

Fuente: AGUILAR SIERRA, Elvin Geovany. *Análisis regional de crecidas máximas para Honduras*. p.12 .

1.7.6.1. Distribución normal

Es una distribución simétrica en forma de campana, también conocida como campana de Gauss. Aunque muchas veces no se ajusta a los datos hidrológicos tiene amplia aplicación, por ejemplo, a los datos transformados que siguen la distribución normal.

La función de densidad está dada por:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp \frac{-1(x-\mu)^2}{2\sigma^2} \quad (\text{Ec. 9, ref 1})$$

Los dos parámetros de la distribución son la media y la desviación estándar para los cuales \bar{x} (media) y μ (desviación estándar) son derivados de los datos.

El factor de frecuencia se calcula con la siguiente ecuación: si se trabaja con los "X" sin transformar el "K" se calcula como:

$$K_T = \frac{x_T - \mu}{\sigma} \quad (\text{Ec. 10, ref 1})$$

Este valor es el mismo de la variable normal estándar.

1.7.6.2. Distribución Log normal de dos parámetros

Si los logaritmos Y de una variable aleatoria X se distribuyen normalmente, se dice que X se distribuye normalmente.

Esta distribución es muy usada para el cálculo de valores extremos, por ejemplo, Q máx., Q mínimos, P máx., P mínima. Tiene la ventaja que $X > 0$ y que la transformación Log tiende a reducir la asimetría positiva, ya que al sacar logaritmos se reducen en mayor proporción los datos mayores que los menores.

La función de densidad de la distribución Log normal viene dada de la siguiente manera:

$$f(x) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} \exp \frac{-1(y-\mu_y)}{2\sigma y^2} \quad x > 0 \quad (\text{Ec. 11, ref 1})$$

$$y = \ln x \quad (\text{Ec. 12, ref 1})$$

Donde:

μ_y : media de los logaritmos de la población (parámetro escalar) estimado σ_y :
desviación estándar de los logaritmos de la población estimada, s_y .

La estimación de parámetros se da de la siguiente manera:

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln(x_i) \quad (\text{Ec. 13, ref 1})$$

$$s_y = \left\{ \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n ((\ln(x_i) - \bar{y}))^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (\text{Ec. 14, ref 1})$$

El factor de frecuencia puede trabajarse en el campo original y en el campo transformado.

Si se trabaja en el campo transformado se trabaja con la media y la desviación estándar de los logaritmos, así:

$$\ln(x_{Tr}) = x_{Tr} + ks_y \quad (\text{Ec. 15, ref 1})$$

Donde:

$$X_{Tr} = e^{\ln(x_{Tr})} \quad (\text{Ec. 16, ref 1})$$

K con variable normal estandarizada para un Tr dado, x_y media de los logaritmos y S_y es la desviación estándar de los logaritmos.

En el campo original, si se trabaja con los "X" sin transformar "K" se calcula como:

$$k_t = \frac{\exp\left\{k_T * (\ln(1+c_v^2))^{\frac{1}{2}} - \left(\frac{\ln(1+c_v^2)}{2}\right)\right\} - 1}{c_v} \quad (\text{Ec. 17, ref 1})$$

K es la variable normal estandarizada para el Tr dado, $Cv = \frac{s}{x}$ es el coeficiente de variación, x media de los datos originales y s desviación estándar de los datos originales.

1.7.6.3. Distribución de Gumbel

Una familia importante de distribuciones usadas en el análisis de frecuencia hidrológico es la distribución general de valores extremos, la cual ha sido ampliamente utilizada para representar el comportamiento de crecientes y sequías.

La función de densidad viene dada por:

$$f(x) = \frac{1}{\alpha} \exp\left[\frac{-(x-\beta)}{\alpha}\right] - \exp\left(\frac{-(x-\beta)}{\alpha}\right) \quad (\text{Ec. 18, ref 1})$$

En donde α y β son los parámetros de la distribución.

$$F(x) = \int f(x)dx = \exp\left[-\exp\left(-\frac{(x-\beta)}{\alpha}\right)\right] \quad (\text{Ec. 19, ref 1})$$

La estimación de parámetros viene dada de la siguiente manera:

$$\alpha = \frac{\sqrt{6}}{\pi} s \quad (\text{Ec. 20, ref 1})$$

$$\beta = \bar{x} - 0,5772\alpha \quad (\text{Ec. 21, ref 1})$$

Donde \bar{x} y s son la media y la desviación estándar estimadas con la muestra.

El factor de frecuencia viene dado por:

$$K_T = -\frac{\sqrt{6}}{\pi} \left\{ 0,5772 + \ln \left[\ln \left(\frac{T_r}{T_r - 1} \right) \right] \right\} \quad (\text{Ec. 22, ref 1})$$

Donde T_r es el periodo de retorno.

1.7.6.4. Distribución de Pearson tipo III

Esta distribución ha sido una de las más utilizadas en hidrología. Como la mayoría de las variables hidrológicas son sesgadas, la función PTIII se utiliza para ajustar la distribución de frecuencia de variables, tales como crecientes máximas anuales, caudales mínimos, volúmenes de flujo anuales y estacionales, valores de precipitaciones extremas y volúmenes de lluvia de corta duración. La función de distribución tiene dos o tres parámetros.

La función de densidad de la distribución Pearson tipo III viene dada por:

$$f(x) = \frac{1}{|\alpha| \Gamma(\beta)} \left(\frac{x - \hat{x}_0}{\alpha} \right)^{\beta - 1} \exp \left(-\frac{x - \hat{x}_0}{\alpha} \right) \quad (\text{Ec. 23, ref 1})$$

Donde:

$x_0 \leq x \leq \infty$ Para $\alpha > 0$

$\infty < x \leq x_0$ Para $\alpha < 0$

α Y β son los parámetros de escala y forma, respectivamente y x_0 es el parámetro de localización.

La estimación de estos parámetros viene dada de la siguiente manera:

$$\hat{\beta} = \left(\frac{z}{c_s}\right)^2; \quad \hat{\alpha} = s \frac{c_s}{2}; \quad \hat{x}_0 = \bar{x} - \alpha \hat{\beta}$$

C_s : coeficiente de asimetría

\bar{x} y s : la media y la desviación estándar de la muestra respectivamente

El factor de frecuencia se determina de la siguiente manera:

$$K \approx z + (z^2 - 1) \frac{c_s}{6} + \frac{1}{3} (z^3 - 6z) \left(\frac{c_s}{6}\right)^2 - (z^2 - 1) \left(\frac{c_s}{6}\right)^3 + z \left(\frac{c_s}{6}\right)^4 + \frac{1}{3} \left(\frac{c_s}{6}\right)^5$$

(Ec. 24, ref 1)

Donde Z es la variable normal estandarizada.

Este valor de K se encuentra tabulado de acuerdo al valor de C_s calculado con la muestra.

1.7.7. Prueba de valores atípicos (*outliers*)

El método Water Resources Council recomienda la realización de ajustes de datos dudosos. Los datos dudosos (*Outliers*) son puntos de la información que se alejan significativamente de la tendencia de la información restante. La retención o eliminación de estos datos puede afectar significativamente la magnitud de los parámetros estadísticos calculados para la información, especialmente en muestras pequeñas.

Los procedimientos para tratar datos dudosos requieren de un criterio que involucra consideraciones matemáticas e hidrológicas. Si la asimetría de los datos de la serie es mayor que +0,4, se consideran las pruebas para tratar datos dudosos altos, si la asimetría es que -0,4 se consideran las pruebas para tratar datos dudosos bajos.

Un valor atípico es una observación que se aparta significativamente de la mayor parte de los datos, que puede ser debido a errores en la recopilación de datos, o la grabación, o por causas naturales. La presencia de valores atípicos en los datos es la causa de dificultades en la instalación de una distribución a los mismos. En esta prueba la X_H y X_L se calcula utilizando la ecuación:

$$X_H = \exp(x + k_n * s_x) \quad (\text{Ec. 25, ref 1})$$

Donde X_H es el umbral de dato dudoso alto en unidades logarítmicas y k_n es un valor en función del tamaño de la muestra, se usan en pruebas de un lado para detectar datos dudosos en el nivel de significancia del 10 % en información normalmente distribuida. Si un valor de la serie en unidades logarítmicas sobrepasa el valor de X_H , entonces se considera como dato dudoso alto, en este caso se debe comparar el caudal pico con otros caudales obtenidos en estaciones vecinas.

Si existe información para sustentar que el dato dudoso alto es el máximo obtenido sobre un período, el dato dudoso es tratado como información histórica y es excluido del análisis, si no hay disponibilidad de información histórica útil para comparar con los datos dudosos altos, entonces estos deben ser retenidos como parte del registro sistemático.

Una ecuación similar puede utilizarse para detectar los datos dudosos bajos:

$$X_L = x - k_n * s_x \quad (\text{Ec. 26, ref 1})$$

Donde X_L es el umbral de datos dudosos bajos en unidades logarítmicas. Los picos de crecientes considerados como datos dudosos bajos se eliminan del registro.

El análisis de datos dudosos es aplicable solamente para series que cuentan con un número de observaciones mayores o iguales a 10.

El valor de k_n resulta de la siguiente ecuación propuesta:

$$K_n = -3,62201 + 6,28446N^{0,24} - 2,49835N^{0,5} + 0,491436N^{0,75} - 0,037911N$$

Donde N es el número de observaciones.

Tabla IX. **Valores de K_n para datos dudosos**

Tamaño de muestra n	K_n	Tamaño de muestra n	K_n
10	2,034	24	2,467
11	2,088	25	2,487
12	2,134	26	2,502
13	2,175	27	2,519
14	2,213	28	2,534
15	2,247	29	2,549
16	2,279	30	2,563
17	2,309	31	2,577
18	2,335	32	2,591
19	2,361	33	2,604
20	2,385	34	2,616
21	2,408	35	2,628
22	2,429	36	2,639
23	2,448	37	2,65

Fuente: AGUILAR SIERRA, Elvin Geovany. *Análisis regional de crecidas máximas para Honduras*. p. 18 .

1.7.8. Envolverte regional

El comportamiento general de los caudales máximos anuales en una región se puede apreciar en una gráfica que relaciona esta variable con la correspondiente área de drenaje de la cuenca. La curva suave que cubre a todos los puntos de esa gráfica se conoce como envolverte de crecidas.

La envolverte no está asociada con frecuencias o probabilidades específicas de ocurrencia, pero dentro de la región de aplicación, proporciona evidencia de las magnitudes máximas de los caudales esperados.

La envolverte permite realizar estimados gruesos de los eventos extraordinarios esperados en una determinada región, en función solamente de la superficie de la cuenca

Para una región la curva envolverte puede ajustarse a diferentes ecuaciones, una de ellas y la más utilizada es la propuesta por Creager, que se detalla a continuación:

$$Q = 1,303 * C_c * \left(\frac{A}{2,59}\right)^{0,936 * A^{-0,048}} \quad (\text{Ec. 27, ref 1})$$

Donde:

Q : caudal máximo – m^3/s

C_c : coeficiente empírico de Creager

A : área de la cuenca – Km^2

Creager encontró que $C_c = 100$ para la envolverte de los datos con los que trabajó, a la cual se le conoce como envolverte mundial. El coeficiente C_c

es característico de cada región y para el caso de Guatemala se usa un C_c de 50 y para Centro América es de 65.

2. METODOLOGÍA DEL ANÁLISIS

2.1. Regionalización por medio del método de trazos multidimensionales

La heterogeneidad de los grupos se evalúa mediante una técnica propuesta por Andrews (1972), en el que un punto en el espacio multidimensional se representa por una curva de dos dimensiones con la siguiente función:

$$f(t) = \frac{x_1}{\sqrt{2}} + x_2 \sin(t) + x_3 \cos(t) + x_4 \sin(2t) + x_5 \cos(2t) + \dots$$

(Ec. 28, ref 7)

Donde: x_1, x_2, \dots son las características fisiográficas o meteorológicas obtenidas del análisis de regresión y la función se evalúa en el rango $-\pi \leq t \leq \pi$.

El hecho de que esta función preserve las distancias la hace una técnica ideal de comparación visual para la formación de grupos homogéneos. Los racimos de cuencas con comportamientos similares aparecen como una banda de curvas muy próximas unas de otras.

Una característica del método, que no se identifica en forma inmediata, consiste en que los resultados que se obtienen dependen del tipo y del ordenamiento de las variables seleccionadas. Las primeras variables son asociadas con componentes cíclicas de baja frecuencia y las últimas de alta

frecuencia. Las bajas frecuencias son más fáciles de observar, de esta manera, x_1 representará a aquella que en el análisis de regresión resultó más significativa desde el punto de vista estadístico, x_2 a la segunda y así sucesivamente.

Una vez que se han desarrollado las funciones del tipo $f(t)$ para cada uno de los sitios involucrados, se generarán envolventes que formen conjuntos de curvas de comportamiento similar y se derivará una curva media $\bar{f}(t)$ que presente los atributos físicos de cada grupo formado.

2.2. Método estadístico o de estaciones-año

Este método considera el tratamiento de una sola muestra de datos conformada por un registro estandarizado de eventos, el cual, una vez que se construye se ajusta a un conjunto de distribuciones de probabilidad. Esta técnica regional, a diferencia de otras, no requiere que las muestras tengan una longitud de registro común.

Con referencia al tamaño de muestra aceptable en cada población participante del análisis, se recomienda que, al menos sea de 10 años. Esta recomendación no es del todo estricta, ya que si se tiene un sitio con 9 años, por ejemplo, pero dentro de este están eventos extremos que puedan afectar el comportamiento del fenómeno en la región, entonces se debe incluir en el estudio.

Existe otra recomendación en cuanto el número de estaciones-año que se requieren para una correcta estimación del evento Q_t , y es que $L \leq 5T$ donde T es el periodo de retorno en años.

La secuencia puede resumirse como:

- Probar dentro de cada región analizada la homogeneidad de la serie de datos.
- Obtener los estadísticos muestrales de las series $Q_i^j: \bar{x}, S^2, S, g, k, C_v$, para cada $j = 1 \dots ms$.
- Para cada serie se verifica mediante la prueba de Anderson la independencia de eventos.
- Para cada serie se genera una muestra modulada.
- Se forma el registro de estaciones-año, con todos los eventos modulados.
- El registro se ordena de mayor a menor y se le asigna un periodo de retorno y una probabilidad de no excedencia.
- Al registro formado en el paso anterior se le ajustan las diferentes distribuciones de probabilidad para el análisis de máximos (Normal, Log normal con 2 y 3 parámetros, Gamma con 2 y 3 parámetros, Log Pearson tipo III, Gumbel) y se selecciona aquel que proporcione el mínimo error estándar de ajuste.
- Una vez obtenida la distribución de mejor ajuste, es posible estimar los eventos regionales para diferentes periodos de retorno, los cuales serán válidos para cualquier punto dentro de la zona analizada.
- Si se quiere obtener un evento en un sitio que tiene escasa información, basta multiplicar la relación regional obtenida en el paso anterior por el correspondiente valor de la media.

3. DEFINICIÓN DE LAS REGIONES HIDROLÓGICAS PARA LA VERTIENTE DEL GOLFO DE MÉXICO

3.1. Regiones homogéneas

Utilizando el método de trazos multidimensionales expuesto en el capítulo anterior, se evaluó la función en la que x_1, x_2, \dots son características fisiográficas o meteorológicas obtenidas del análisis de regresión. En este caso en particular, la función quedó de la siguiente manera:

$$f(t) = \frac{Q_{\max}}{\sqrt{2}} + A * \text{sen}(t) + P * \text{cos}(t) + \Delta h * \text{sen}(2t) + L * \text{cos}(2t) \quad (\text{Ec. 29})$$

Donde:

Q_{\max} = crecida máxima (m^3/s)

A = área de la cuenca bajo análisis (Km^2)

P = perímetro de la cuenca bajo análisis (Km)

h = diferencia entre alturas máximas y mínimas (m)

L = longitud del flujo más largo (km)

t = intervalo de análisis ($-\pi, \pi$)

Los parámetros utilizados se describen en la tabla X, los cuales fueron proporcionados por el Insivumeh.

Tabla X. **Parámetros morfométricos de las cuencas**

	Cuilco	Xemal	Chojil	El Porvenir	Machaquilá
Área	1 609,80049	560,214058	1 112,11002	77,651503	175,092099
Perímetro	252,261406	136,337715	2 51,864	58,854946	98,321574
Elev. máx	3 718,00	3 833,00	3 833,00	202,00	985,00
Elev. mín	1 112,00	1508,00	633,00	112,00	436,00
Long. máx	1 33,37	65,40	116,00	21,22	51,01

Fuente: elaboración propia.

Tabla XI. **Caudales máximos probables**

Prob.	Tr	Cuilco	Xemal	Chojil	El Porvenir	Machaquilá
0,50	2	209,70	106,62	379,54	1 218,25	45,02
0,80	5	347,67	179,20	573,35	1 554,70	54,61
0,90	10	419,79	217,13	674,66	1 730,57	59,63
0,93	15	455,77	236,07	725,22	1 818,33	62,13
0,95	20	479,34	248,46	758,33	1 875,80	63,77
0,96	25	496,69	257,59	782,70	1 918,11	64,97
0,97	30	510,34	264,77	801,86	1 951,38	65,92
0,98	50	546,37	283,72	852,49	2 039,27	68,43
0,99	75	573,03	297,75	889,94	2 104,27	70,28
0,99	100	591,06	307,23	915,27	2 148,24	71,53
0,998	500	681,52	354,82	1 042,34	2 368,83	77,82

Fuente: elaboración propia.

La función se analizó para periodos de retorno de 2, 10, 25 y 50 años. Y se evaluó en forma individual para cada una de las cuencas. Los resultados pueden ser observados en la sección de anexos.

Debido al comportamiento de las curvas obtenidas de la función multidimensional en los periodos establecidos (ver apéndice 1), se evidencia

dos clases de comportamientos similares, las cuales serán llamadas región I y II, para este trabajo.

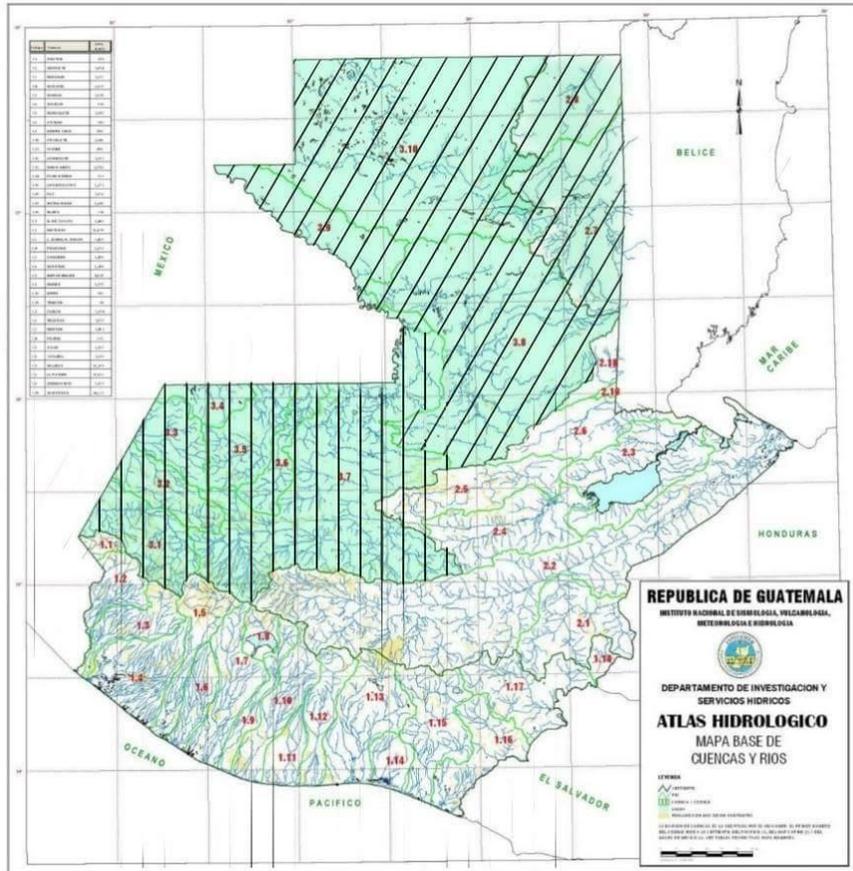
3.1.1. Región I

Está comprendida por las cuencas de las estaciones Cuilco, Xemal y Chojil. En el mapa base de regiones homogéneas del Insivumeh se encuentra como región VII.

3.1.2. Región II

En esta se agrupan las cuencas de El Porvenir y Machaquilá. En el mapa base de regiones homogéneas del Insivumeh se encuentra como región VIII. Se describe en la figura 5.

Figura 5. Regiones homogéneas



Fuente: elaboración propia. Mapa base tomado de figura 3.

Región I:



Región II:



4. ANÁLISIS DE FRECUENCIA REGIONAL

4.1. Método matemático

La finalidad del método matemático es relacionar las propiedades morfométricas de la cuenca con su caudal medio y determinar así una expresión que se cumpla para ese caudal y estimar crecidas futuras.

En este caso se utilizó el software para estudiantes “Eureqa” con el cual se relacionaron las variables conocidas, por ejemplo, el área, el perímetro, la longitud y la diferencia de alturas, para poder explicar en forma matemática, el comportamiento del caudal máximo registrado, de manera regional.

Los valores utilizados se muestran en la tabla XII.

Tabla XII. **Variables utilizadas**

Estación	Qmm	Área	Perímetro	Longitud
Cuilco	209,70	1 609,80	252,26	133,37
Xemal	106,62	560,21	136,34	65,40
Chojil	379,54	1 112,11	251,86	116,00
El Porvenir	1 218,25	77,65	58,85	21,22
Machaquilá	45,02	175,09	98,32	51,01

Fuente: elaboración propia.

Los resultados para la región I demuestran un comportamiento del caudal en función directa con su perímetro y su área

- Ecuación obtenida para la región I

$$QMM = 4,00785221958109 * P - 246,838010906747 - 0,344444706292281 * A$$

(Ec. 30).

Para la región II se evidencia un comportamiento en función únicamente del área de la cuenca y de manera inversa

- Ecuación obtenida para la región II

$$QMM = 13,5561010967267 + \frac{3\ 148,44187516197}{A - 75,0374818089517}$$

(Ec. 31)

La manera en la que se calculó la bondad de dichas ecuaciones es evaluándolas para determinar un valor de caudal, para cada cuenca y comparándolo con los valores de Q_{MM} ya obtenidos previamente, de la misma forma como se determinó para la sección.

Tabla XIII. **Evaluación de ecuaciones 30 y 31**

Estación	QMM	QTR	Diferencia %
Cuilco	209,70	209,701167	0
Xemal	106,62	106,620636	0
Chojil	379,54	379,535273	0
El Porvenir	1218,25	1218	0
Machaquilá	45,02	45,0233333	0

Fuente: elaboración propia.

4.2. Método estaciones-año

Para la estimación de los caudales máximos asociados a diferentes períodos de retorno, en cualquier sitio de interés y en cualquier región del país, se usó la siguiente expresión:

$$Q_{Tr} = Q_{MM} * K_{Tr} \quad (\text{Ec. 32, ref 1})$$

Donde Q_{Tr} es el caudal para el período de retorno Tr , Q_{MM} es la crecida índice o caudal índice y K_{Tr} es un valor de ajuste adimensional.

Q_{MM} es obtenido a partir de una serie de datos anuales de crecidas máximas, proporcionada por el Insivumeh, válido para la región a la que pertenece la cuenca de interés y es el promedio de los caudales máximos anuales. K_{Tr} se obtiene de acuerdo a la región y la curva de frecuencia que se estime conveniente, estos valores han sido proporcionados por el Inisvumeh, luego del análisis presentado.

Para Q_{MM} y K_{Tr} se realizó el mismo análisis estadístico, Q_{MM} por cuenca y K_{Tr} por región.

En la tabla XIV se muestran los valores de los caudales máximos anuales para las estaciones y los años que poseen registro.

Tabla XIV. **Series anuales de caudales máximos instantáneos**

Nombre	Cuilco	Xemal	Chojil	El Porvenir	Machaquilá
Área	1 603	464	1023	12 156	385
Qmm	210	107	380	1 218	45
1966		138			
1967		84			
1968		58			
1969		65			
1970		65		1 101	
1971	157	301	108	1 060	
1972	79	42	120	1 166	
1973	264	72	398	1 071	33
1974	196	128	231		33
1975	207	58	395	921	32
1976	187	317	507	1 145	44
1977	74	70	946	804	48
1978	62		424	1 732	51
1979	274		424	2 124	49
1980	672			1 059	48
1983					68
1998	247	51	400		
1999		68			
2000	97	83	221		

Fuente: Insivumeh.

Con los valores de la tabla XIV se calcula los caudales modulares que son el resultado de la relación entre el caudal medio anual y el caudal máximo de cada año de la misma estación:

$$K_{ij} = \frac{QMM_{ij}}{Qmax_{ij}} \quad (\text{Ec. 33, ref 1})$$

Tabla XV. **Caudales modulares**

Región I			Región II	
Cuilco	Xemal	Chojil	El Porvenir	Machaquilá
	0,659271			
	0,399139			
	0,27811			
	0,309011			
	0,309011		5,2479441	
0,750592	1,435424	0,515019	5,054526	
0,376154	0,20224	0,572243	5,5597211	
1,258744	0,342583	1,897939	5,1068385	0,156889924
0,936857	0,609391	1,101568		0,156889924
0,985402	0,274772	1,883633	4,3919641	0,153074971
0,891745	1,511675	2,417726	5,4601508	0,210776128
0,351929	0,331424	4,511181	3,8340273	0,227466546
0,295182		2,022831	8,2593723	0,241295749
1,306621		2,022831	10,128699	0,23557332
3,204083			5,0515217	0,22770498
				0,322649612
1,17863	0,241582	1,908621		
	0,325218			
0,46406	0,397761	1,055159		

Fuente: elaboración propia.

4.2.1. Caudal índice QMM

Para determinar QMM se prefirió no realizar el cálculo de la manera tradicional, que hubiera sido simplemente:

$$QMM = B A^n \quad (\text{Ec. 34, ref 1})$$

Donde A es el área tributaria de la cuenca, B y n son parámetros de ajuste, obtenidos del método caudal índice–área tributaria. En cambio se optó por realizar el método estadístico, también para el caudal índice, ya que la

comparación entre dos métodos similares daría una mejor perspectiva al comparar los resultados obtenidos. Debido a esas razones, se determinaron los parámetros estadísticos aplicables a la hidrología, los cuales se aprecian en la tabla XVI.

Tabla XVI. **Parámetros estadísticos de cuencas para QMM**

Parámetro	Cuilco	Xemal	Chojil	El Porvenir	Machaquila
Media	209,70	106,62	379,54	1218,25	45,02
Desviación estándar.	163,93	86,23	230,29	399,76	11,40
Coefficiente sesgo	2,22	2,02	1,39	1,67	0,67
α Gumbel	127,82	67,24	179,56	311,69	8,89
μ Gumbel	135,93	67,82	275,91	1038,36	39,90
Y	0,22	0,20	0,17	0,04	0,03
Alfa	2,41	2,60	3,09	12,57	18,11
Beta	87,14	41,01	122,95	96,88	2,49
Alfa 3P	0,81	0,98	2,06	1,44	8,90
Beta 3P	181,99	87,04	160,51	333,70	3,82
Xo	62,04	21,18	49,13	739,36	11,03
Media Ln	5,12	4,46	5,77	7,06	3,78
Desviación estándar Ln	0,68	0,60	0,64	0,29	0,25
Coefficiente sesgo Ln	0,27	1,34	-0,41	1,20	0,12
Alfa 3P Ln	53,24	2,24	24,35	2,79	268,91
Beta 3P Ln	0,09	0,40	-0,13	0,17	0,02
XoLn	0,14	3,57	8,92	6,59	-0,32
α Log Gumbel	0,53	0,47	0,50	0,22	0,19
μ Log Gumbel	4,82	4,19	5,48	6,94	3,67
Años de registro	12,00	15,00	11,00	10,00	9,00
Máximo registrado	671,90	317,00	946,00	2124,00	67,66

Fuente: elaboración propia.

Ya obtenidos los parámetros se procedió a calcular el valor del caudal índice para cada distribución estadística, los cuales han sido ordenados en las tablas XVII, XVIII, XIX, XX y XXI.

Tabla XVII. **Caudales índice para Cuilco**

Prob.	Tr	Normal	Log normal	Gamma	Gamma 3p	Log pearson III	Gumbel	Log gumbel
0,50	2	209,70	167,94	181,48	155,24	162,78	182,78	150,10
0,80	5	347,67	298,55	307,11	303,16	295,29	327,65	274,63
0,90	10	419,79	403,29	390,73	419,87	410,45	423,57	409,69
0,93	15	455,77	468,59	437,34	489,15	486,04	477,68	513,41
0,95	20	479,34	516,98	469,67	538,62	543,86	515,57	601,29
0,96	25	496,69	555,77	494,39	577,15	591,29	544,76	679,11
0,97	30	510,34	588,30	514,39	608,73	631,80	568,50	749,79
0,98	50	546,37	683,70	569,58	697,54	754,33	634,66	988,01
0,99	75	573,03	764,09	612,65	768,36	861,80	686,92	1 228,56
0,99	100	591,06	823,75	642,86	818,75	943,97	723,90	1 433,44
0,998	500	681,52	1 201,21	807,98	1 102,35	1 509,23	930,13	3 387,31

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVIII. **Caudales índice para Xemal**

Periodo de Retorno	Prob	Normal	Log normal	Gamma	Gamma 3p	Log pearson III	Gumbel	Log gumbel
0,50	2	106,62	86,89	93,31	79,96	76,33	92,46	78,74
0,80	5	179,20	143,95	154,71	158,89	133,33	168,67	133,78
0,90	10	217,13	187,41	195,23	218,81	193,90	219,12	190,02
0,93	15	236,07	213,79	217,73	253,91	239,07	247,59	231,63
0,95	20	248,46	233,04	233,32	278,82	276,51	267,52	266,07
0,96	25	257,59	248,31	245,22	298,15	309,09	282,87	296,06
0,97	30	264,77	261,02	254,84	313,95	338,25	295,36	322,93
0,98	50	283,72	297,81	281,37	358,23	433,95	330,17	411,37
0,99	75	297,75	328,32	302,04	393,39	527,21	357,66	498,05
0,99	100	307,23	350,71	316,53	418,34	604,45	377,11	570,22
0,998	500	354,82	488,31	395,55	558,01	1277,63	485,60	1 212,65

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIX. **Caudales índice para Chojil**

Prob.	Tr	Normal	Log normal	Gamma	Gamma 3p	Log pearson III	Gumbel	Log gumbel
0,50	2	379,54	319,95	339,43	327,85	–	341,71	288,12
0,80	5	573,35	547,42	539,51	542,12	–	545,23	506,38
0,90	10	674,66	724,83	669,19	687,39	–	679,97	735,57
0,93	15	725,22	833,82	740,69	768,96	–	755,99	908,04
0,95	20	758,33	913,93	790,02	825,74	–	809,22	1 052,34
0,96	25	782,70	977,78	827,61	869,25	–	850,22	1 178,95
0,97	30	801,86	1 031,11	857,95	904,51	–	883,57	1 293,10
0,98	50	852,49	1 186,39	941,37	1 002,06	–	976,52	1 672,94
0,99	75	889,94	1 316,11	1 006,19	1 078,40	–	1 049,93	2 050,31
0,99	100	915,27	1 411,79	1 051,54	1 132,06	–	1 101,89	2 367,79
0,998	500	1 042,34	2 007,66	1 297,78	1 426,47	–	1 391,59	5 284,04

Fuente: elaboración propia.

Tabla XX. **Caudales índice para El Porvenir**

Prob.	Tr	Normal	Log normal	Gamma	Gamma 3p	Log pearson III	Gumbel	Log gumbel
0,50	2	1 218,25	1 170,13	1 186,12	1 112,76	1 106,64	1 152,60	1 116,33
0,80	5	1 554,70	1 489,30	1 494,04	1 483,87	1 443,66	1 505,88	1 438,07
0,90	10	1 730,57	1 689,41	1 674,04	1 748,12	1 718,19	1 739,79	1 700,61
0,93	15	1 818,33	1 799,11	1 768,90	1 899,32	1 892,05	1 871,75	1 869,35
0,95	20	1 875,80	1 874,79	1 832,86	2 005,51	2 022,44	1 964,15	1 997,36
0,96	25	1 918,11	1 932,52	1 880,88	2 087,35	2 127,95	2 035,32	2 101,92
0,97	30	1 951,38	1 979,17	1 919,21	2 153,93	2 217,18	2 093,22	2 191,00
0,98	50	2 039,27	2 107,86	2 022,86	2 339,25	2 482,72	2 254,57	2 459,66
0,99	75	2 104,27	2 208,42	2 101,78	2 485,27	2 711,20	2 382,00	2 694,94
0,99	100	2 148,24	2 279,14	2 156,25	2 588,38	2 883,66	2 472,20	2 874,95
0,998	500	2 368,83	2 669,62	2 443,06	3 159,51	4 033,91	2 975,10	4 122,89

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXI. **Caudales índice para Machaquilá**

Prob.	Tr	Normal	Log normal	Gamma	Gamma 3p	Log pearson III	Gumbel	Log gumbel
0,50	2	45,02	43,79	44,20	43,76	43,56	43,15	42,03
0,80	5	54,61	54,03	53,60	54,06	53,95	53,22	52,41
0,90	10	59,63	60,31	59,00	60,20	60,50	59,89	60,66
0,93	15	62,13	63,72	61,82	63,46	64,11	63,65	65,88
0,95	20	63,77	66,05	63,72	65,68	66,61	66,29	69,80
0,96	25	64,97	67,82	65,14	67,34	68,52	68,32	72,97
0,97	30	65,92	69,24	66,27	68,68	70,07	69,97	75,66
0,98	50	68,43	73,15	69,31	72,29	74,35	74,56	83,69
0,99	75	70,28	76,19	71,62	75,06	77,71	78,20	90,63
0,99	100	71,53	78,31	73,21	76,97	80,08	80,77	95,89
0,998	500	77,82	89,89	81,53	87,12	93,28	95,10	131,31

Fuente: elaboración propia.

Cada valor de QMM se comparó con su valor homogéneo de Q_{Tr} para evaluar la bondad de ajuste para las distribuciones teóricas de frecuencia.

4.2.2. Determinación de Q_{Tr}

Para obtener el valor del caudal Q, en el periodo de retorno Tr, es necesario determinar primero el valor del K_{Tr}, los cuales son determinados de la misma manera como lo fueron los Q_{MM}.

Primero fueron determinados los parámetros estadísticos por región con la ayuda de los caudales modulares.

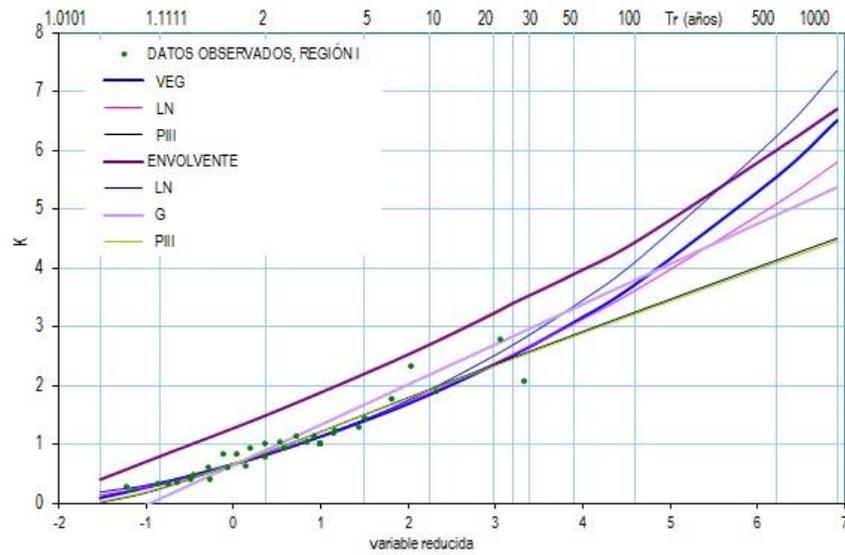
Tabla XXII. **Parámetros estadísticos por región**

Parámetro	Región I	Región II
Media	1,45	1,07
Desviación estándar.	0,84	0,26
Coefficiente sesgo	0,93	-0,17
α Gumbel	0,66	0,20
μ Gumbel	1,07	0,95
γ	0,17	0,03
Alfa	3,06	16,43
Beta	0,47	0,06
Alfa 3P	4,59	144,71
Beta 3P	0,39	-0,02
X_0	-0,35	4,18
Media Ln	0,20	0,03
Desviación estándar. Ln	0,62	0,26
Coefficiente sesgo Ln	-0,41	-0,73
Alfa 3P Ln	24,29	7,58
Beta 3P Ln	-0,13	-0,10
X_0 Ln	3,26	0,76
α Log Gumbel	0,48	0,20
μ Log Gumbel	-0,08	-0,08
Años de registro	38,00	19,00
Máximo registrado	3,51	1,52

Fuente: elaboración propia.

Con estos parámetros se calculó también los valores de ajuste adimensionales o coeficientes regionales de ajuste para el análisis de crecidas máximas, colocado en las tablas XI para la región I, y en la tabla XII para la región II.

Figura 6. Curvas de frecuencia teóricas, región I



Fuente: elaboración propia.

VEG: valor extremo generalizado

LN: Log-normal

PIII: Pearson tipo III

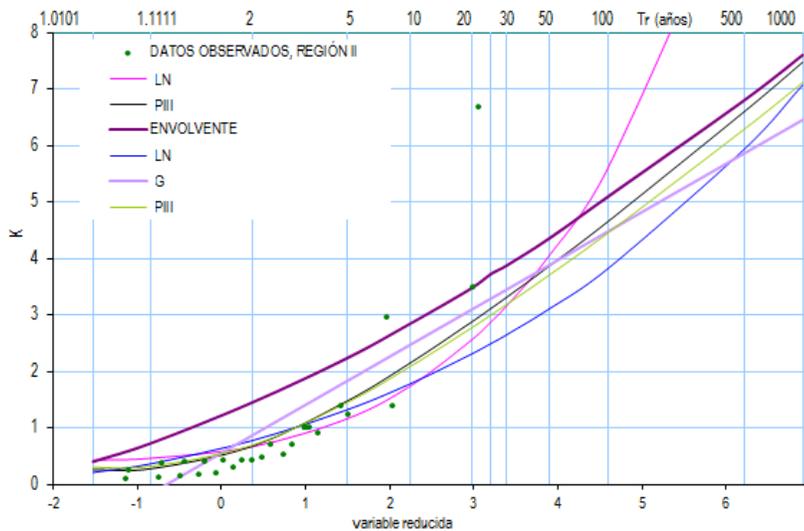
G: Gumbel

Tabla XXIII. **Coefficientes regionales de ajuste para diferentes distribuciones de la región I**

Prob.	Periodo de retorno	Normal	Log normal	Gamma	Gamma 3p	Log Pearson III	Gumbel	Log Gumbel
0,50	2	1,45	1,22	1,30	1,32	–	1,31	1,10
0,80	5	2,16	2,06	2,07	2,10	–	2,06	1,91
0,90	10	2,53	2,71	2,56	2,58	–	2,55	2,75
0,93	15	2,71	3,10	2,84	2,84	–	2,83	3,37
0,95	20	2,84	3,39	3,03	3,02	–	3,02	3,89
0,96	25	2,92	3,62	3,17	3,16	–	3,17	4,35
0,97	30	3,00	3,82	3,29	3,27	–	3,29	4,76
0,98	50	3,18	4,37	3,61	3,57	–	3,63	6,11
0,99	75	3,32	4,84	3,86	3,80	–	3,90	7,45
0,99	100	3,41	5,18	4,03	3,96	–	4,09	8,57
0,998	500	3,87	7,30	4,98	4,83	–	5,15	18,71

Fuente: elaboración propia.

Figura 7. **Curvas de frecuencia teórica, región II**



Fuente: elaboración propia.

LN: Log-normal

PIII: Pearson tipo III

G: Gumbel

Tabla XXIV. **Coefficientes regionales de ajuste para diferentes distribuciones de la región II**

Prob.	Periodo de retorno	Normal	Log normal	Gamma	Gamma 3p	Log Pearson III	Gumbel	Log Gumbel
0,50	2	1,07	1,04	1,05	–	–	1,02	0,99
0,80	5	1,29	1,29	1,28	–	–	1,25	1,25
0,90	10	1,40	1,45	1,42	–	–	1,41	1,46
0,93	15	1,46	1,53	1,49	–	–	1,49	1,59
0,95	20	1,49	1,59	1,53	–	–	1,55	1,69
0,96	25	1,52	1,64	1,57	–	–	1,60	1,77
0,97	30	1,54	1,67	1,60	–	–	1,63	1,84
0,98	50	1,60	1,77	1,68	–	–	1,74	2,04
0,99	75	1,64	1,85	1,73	–	–	1,82	2,22
0,99	100	1,67	1,91	1,77	–	–	1,88	2,36
0,998	500	1,81	2,20	1,98	–	–	2,21	3,28

Fuente: elaboración propia.

Obtenidos los coeficientes, resta realizar el cálculo de Q_{Tr} que es caudal en el periodo de retorno para cada una de las cuencas de las regiones determinadas, como se indicó al principio de este capítulo, utilizando la ecuación 32.

Los valores obtenidos se ordenaron en las tablas XXV, XXVI, XXVII, XXVIII y XXIX.

Tabla XXV. **Caudales ajustados para el periodo de retorno Tr. Cuilco**

Normal	Log normal	Gamma	Gamma 3p	Log Pearson III	Gumbel	Log Gumbel
304,36	256,22	271,95	277,29	–	275,38	231,38
452,91	432,07	433,06	439,43	–	431,36	400,52
530,56	567,78	537,57	540,79	–	534,63	575,97
569,31	650,70	595,21	595,83	–	592,90	706,99
594,69	711,46	634,98	633,51	–	633,69	816,09
613,37	759,78	665,30	662,09	–	665,12	911,48
628,06	800,07	689,76	685,06	–	690,68	997,25
666,86	917,08	757,04	747,91	–	761,92	1 281,26
695,56	1 014,51	809,32	796,42	–	818,18	1 561,69
714,97	1 086,21	845,91	830,22	–	858,01	1 796,53
812,37	1 530,07	1 044,58	1 011,99	–	1080,05	3 923,37

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVI. **Caudales ajustados para el periodo de retorno Tr. Xemal**

NORMAL	LOG NORMAL	GAMMA	GAMMA 3P	LOG PEARSON III	GUMBEL	LOG GUMBEL
154,75	130,27	138,27	140,98	–	140,01	117,64
230,28	219,68	220,19	223,43	–	219,32	203,64
269,76	288,68	273,32	274,96	–	271,83	292,85
289,46	330,84	302,63	302,94	–	301,45	359,46
302,36	361,73	322,85	322,10	–	322,20	414,94
311,86	386,30	338,26	336,63	–	338,17	463,43
319,33	406,79	350,70	348,31	–	351,17	507,04
339,06	466,28	384,91	380,27	–	387,39	651,44
353,65	515,82	411,49	404,93	–	416,00	794,03
363,52	552,27	430,09	422,12	–	436,24	913,43
413,04	777,95	531,11	514,54	–	549,14	1 994,80

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVII. Caudales ajustados para el periodo de retorno Tr. Chojil

NORMAL	LOG NORMAL	GAMMA	GAMMA 3P	LOG PEARSON III	GUMBEL	LOG GUMBEL
550,87	463,72	492,21	501,86	–	498,40	418,77
819,72	782,00	783,79	795,32	–	780,71	724,89
960,26	1 027,62	972,94	978,77	–	967,62	1 042,44
1 030,39	1 177,69	1 077,26	1 078,38	–	1 073,08	1 279,57
1 076,31	1 287,65	1 149,24	1 146,58	–	1 146,91	1 477,04
1 110,12	1 375,11	1 204,11	1 198,30	–	1 203,79	1 649,68
1 136,71	1 448,04	1 248,39	1 239,89	–	1 250,05	1 804,91
1 206,94	1 659,81	1 370,16	1 353,63	–	1 378,99	2 318,93
1 258,88	1 836,15	1 464,78	1 441,43	–	1 480,82	2 826,49
1 294,02	1 965,92	1 530,99	1 502,60	–	1 552,89	3 251,51
1 470,29	2 769,26	1 890,58	1 831,59	–	1 954,76	7 100,85

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVIII. Caudales ajustados para el periodo de retorno Tr. Cuilco

NORMAL	LOG NORMAL	GAMMA	GAMMA 3P	LOG PEARSON III	GUMBEL	LOG GUMBEL
1 300,29	1 260,91	1 274,00	–	–	1 248,48	1 207,72
1 565,79	1 572,53	1 559,77	–	–	1 527,27	1 522,93
1 704,57	1 764,96	1 724,62	–	–	1 711,85	1 775,67
1 773,83	1 869,62	1 810,97	–	–	1 815,98	1 936,34
1 819,18	1 941,50	1 869,00	–	–	1 888,90	2 057,42
1 852,57	1 996,17	1 912,48	–	–	1 945,06	2 155,82
1 878,82	2 040,25	1 947,13	–	–	1 990,75	2 239,33
1 948,17	2 161,41	2 040,59	–	–	2 118,08	2 489,51
1 999,47	2 255,63	2 111,54	–	–	2 218,64	2 706,72
2 034,17	2 321,68	2 160,42	–	–	2 289,81	2 871,81
2 208,25	2 683,42	2 416,51	–	–	2 686,67	3 995,05

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIX. **Caudales ajustados para el periodo de retorno Tr. Cuilco**

NORMAL	LOG NORMAL	GAMMA	GAMMA 3P	LOG PEARSON III	GUMBEL	LOG GUMBEL
45,02	43,79	44,20	43,76	43,56	43,15	42,03
54,61	54,03	53,60	54,06	53,95	53,22	52,41
59,63	60,31	59,00	60,20	60,50	59,89	60,66
62,13	63,72	61,82	63,46	64,11	63,65	65,88
63,77	66,05	63,72	65,68	66,61	66,29	69,80
64,97	67,82	65,14	67,34	68,52	68,32	72,97
65,92	69,24	66,27	68,68	70,07	69,97	75,66
68,43	73,15	69,31	72,29	74,35	74,56	83,69
70,28	76,19	71,62	75,06	77,71	78,20	90,63
71,53	78,31	73,21	76,97	80,08	80,77	95,89
77,82	89,89	81,53	87,12	93,28	95,10	131,31

Fuente: elaboración propia.

Luego los valores de Q_{Tr} y Q_{MM} fueron comparados para determinar la diferencia porcentual que existe entre cada uno y poder concluir sobre qué distribución de frecuencia es la que posee mayor bondad, dichas comparaciones se evidencian en el apéndice 3.

5. RESULTADOS

5.1. Modelos de regionalización

Las ecuaciones obtenidas, que describen el comportamiento de las regiones homogéneas, al utilizar el modelo matemático son las siguientes:

- Región I

$$QMM = 4,00785221958109 * P - 246,838010906747 - 0,3444444706292281 * A$$

- Región II

$$QMM = 13,5561010967267 + \frac{3\ 148,44187516197}{A - 75,0374818089517}$$

5.2. Regiones homogéneas

Al realizar un cotejo entre las gráficas de las regiones homogéneas determinadas y las del Insivumeh, las cuales se aprecian en las figuras 4 y 5, se determina que el estudio de regionalización devolvió límites territoriales bastante similares, a pesar de la poca cantidad de datos utilizados para el análisis.

En la tabla XXX se muestra el resumen de la evaluación y las diferencias obtenidas entre los valores de Q_{MM} y Q_{TR} para el método de estaciones-año

Tabla XXX. **Resumen de cálculos de error promedio**

	REGIÓN I		REGIÓN II	
	Cuenca	Error promedio	Cuenca	Error promedio
	Cuilco	30 %	El Porvenir	4 %
	Xemal	36 %	Machaquilá	7 %
	Chojil	42 %		
Promedio		36 %		6 %

Fuente: elaboración propia.

Se logra apreciar que la región I posee variaciones más significativas que la II, esto debido a que se trabajó con poca información.

5.3. **Uso de los resultados de los análisis**

Como ejemplo de aplicación a considerar es el río Nentón. El área de la cuenca es de 244,5840 km² y un perímetro de 89,0220 km, de los cuales el 100 % se encuentra dentro de la región I del presente análisis. La estimación de la crecida máxima para un periodo de retorno de 100 años se realiza de la siguiente manera:

- Calcular el QMM. Como se encuentra en la región I se utiliza la ecuación 30:

$$QMM = 4,0078522196 * (89,0220) - 246,83801091 - 0,344444470629 * (244,5840) =$$

$$QMM = 25,033 \text{ m}^3$$
- Para el Tr = 100 años, en la región I se utilizará la distribución Gamma 3P, ya que se estima es la más confiable en dicha región, por lo que Ktr= 3,96. (Tabla XXIII).

$$Qtr = 25,033 * 3,96 = \mathbf{99,1307 \text{ m}^3}.$$

CONCLUSIONES

1. Es posible determinar los parámetros morfométricos de una cuenca, teniendo la información adecuada, en Guatemala existen algunas instituciones como el IGN, el INE y el Insivumeh que poseen información acertada y útil para este tipo de estudios.
2. El método de trazos multidimensionales resultó ser bastante acertado al momento de identificar las regiones de comportamiento homogéneo, ya que coincidió exactamente con estudios previos sobre regionalización de cuencas en el país.
3. Para este estudio se logró determinar la relación que existe entre el área de una cuenca y el caudal máximo que posee, mediante dos métodos, los cuales fueron evaluados para determinar sus limitaciones.
4. Al evaluar el método de estaciones-año se evidencian diferentes comportamientos cuando son comparados sus resultados con los valores esperados.
5. El método matemático tiene la limitación de no poder predecir las crecidas, sino únicamente estimar las presentes en cada cuenca de la región evaluando sus propiedades en las funciones desarrolladas.

RECOMENDACIONES

1. Es importante mantener un registro continuo de información hidrológica a nivel nacional, debido al significado que tiene este tipo de estudios para predecir las crecidas máximas de los ríos y así poder planificar de manera adecuada, el diseño de la infraestructura de obras civiles y minimizar riesgos a la población.
2. Debido a que las series de datos con las que se trabajó no cuentan con más de 20 años, las estimaciones para periodos de frecuencia mayores a 100 años deben realizarse con prudencia.
3. Los resultados más confiables para la región I se encuentran al utilizar la estimación de frecuencia Gamma 3P. En la región II las estimaciones para las frecuencias Gamma y Gumbel son las recomendadas.

BIBLIOGRAFÍA

1. AGUILAR SIERRA, Elvin Geovany. *Análisis regional de crecidas máximas para Honduras*. Trabajo de graduación Magister Científica en Recursos Hidráulicos, opción hidrología, Universidad de San Carlos de Guatemala, ERIS, Facultad de Ingeniería, 2010. 68 p
2. Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología. *Análisis regional de crecidas en la República de Guatemala*. Insivumeh, 2004. 18 p.
3. LARIOS ALVAREZ, Rafael. *Análisis regional de frecuencia de avenidas máximas*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Universidad Mariano Gálvez de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 1986. 176 p.
4. Organización Meteorológica Mundial. *Guía de prácticas hidrológicas. Adquisición y proceso de datos, análisis, predicción y otras aplicaciones*. OMM, 1994. 781 p.
5. PLAZA VERA, Fernando Javier. *Eficiencia de las técnicas regionales hidrológicas en función del tamaño de muestra disponible*. Trabajo de graduación de Maestro en Ingeniería. Universidad Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, 2010. 210 p.
6. PONCE REYES, Héctor Raúl. *Evaluación de crecidas en la República de Guatemala*. Usac- IGN, 1972. 184 p.

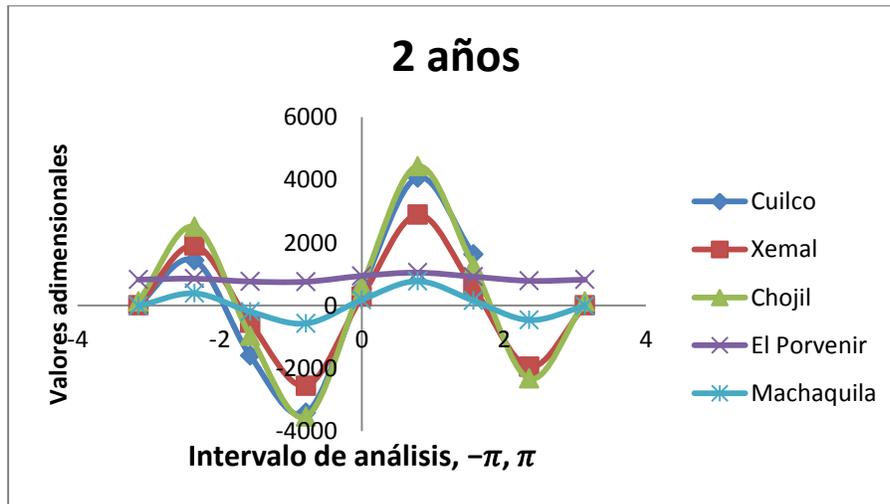
7. RAMACHANDRA RAO, A. and SRINIVAS, V. V. *Regionalization of watersheds An aproach base on cluster analysis*. Volume 58. USA: Advisory Board, 2008. 241 p.

APÉNDICES

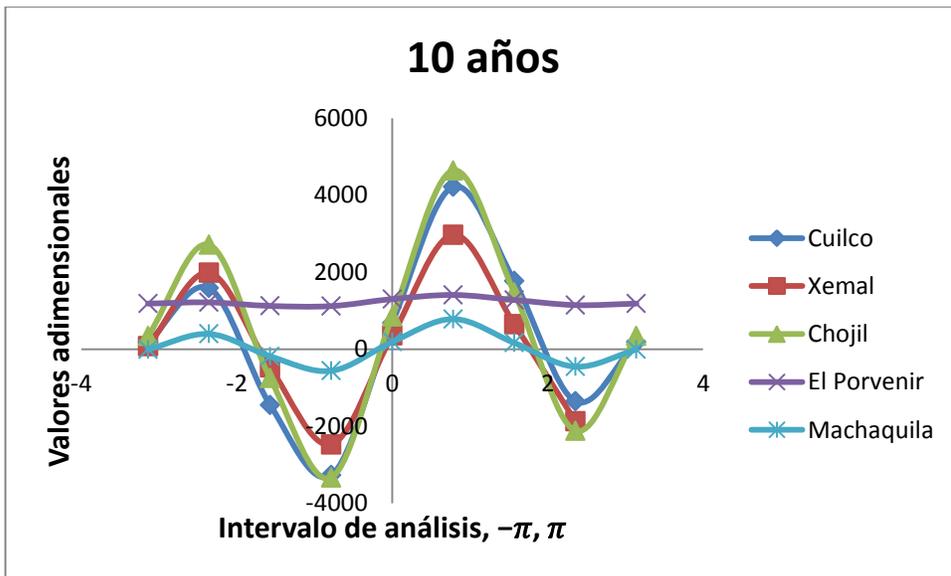
Apéndice 1. Trazos multidimensionales

Al evaluar la ecuación 29 en el intervalo indicado y para los periodos de retorno definidos, se obtuvo los valores que se muestran en las siguientes tablas. Luego se graficó los resultados y se determinaron dos comportamientos similares para cada uno de los periodos de retorno, por lo que se dedujo que existen dos regiones homogéneas.

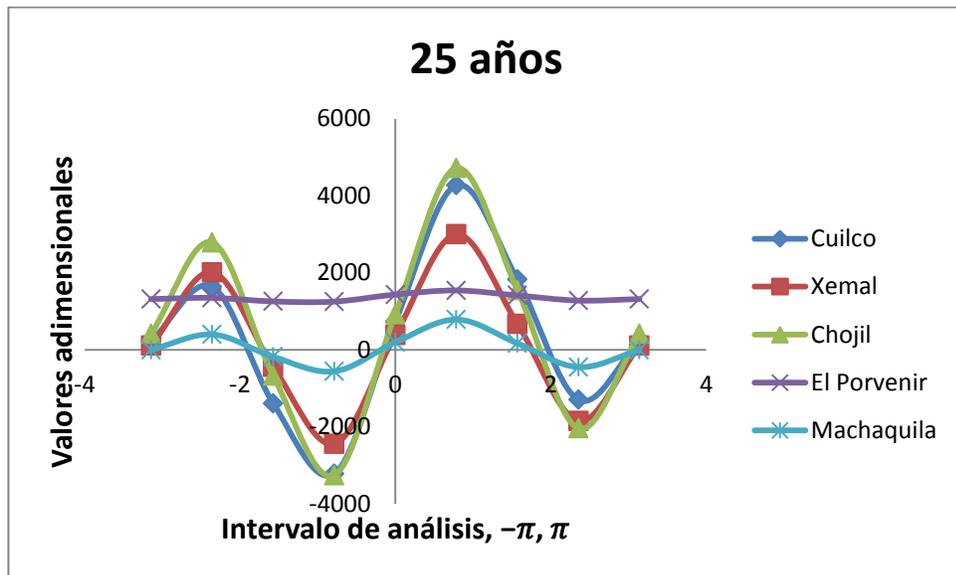
	2 años								
	-3.14	-2.36	-1.57	-0.79	0.00	0.79	1.57	2.36	3.14
Cuilco	29.39	1437.60	-1594.89	-3417.64	533.91	4070.96	1624.71	-1497.79	29.39
Xemal	4.46	1907.86	-550.23	-2549.33	277.13	2892.93	570.20	-1949.88	4.46
Chojil	132.51	2503.90	-959.74	-3539.91	636.24	4432.85	1264.48	-2323.34	132.51
El Porvenir	823.80	854.91	762.57	758.14	941.51	1047.96	917.87	784.73	823.80
Machaquilá	-15.48	387.50	-194.26	-571.45	181.16	774.17	155.92	-462.88	-15.48



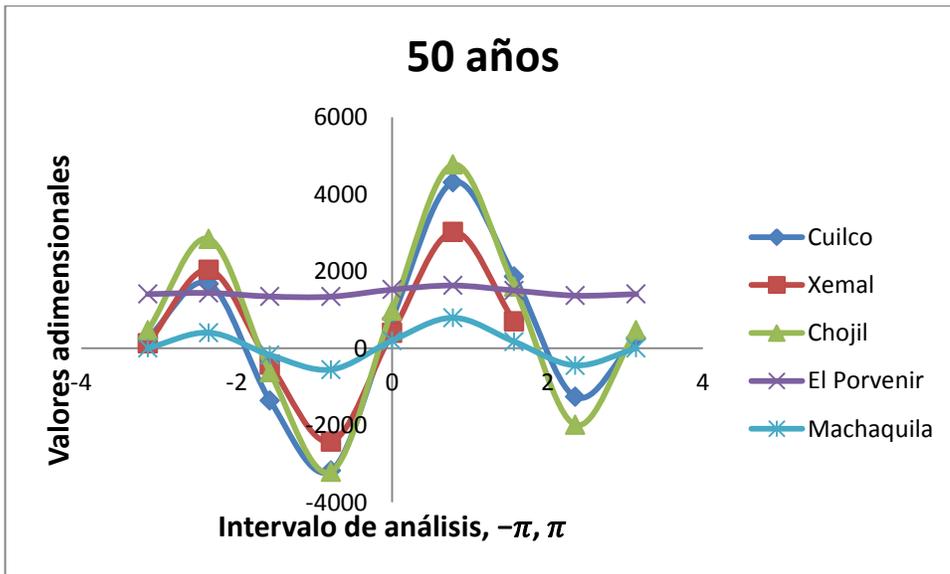
	10 años								
	-3.14	-2.36	-1.57	-0.79	0.00	0.79	1.57	2.36	3.14
Cuilco	1 77,94	1 586,16	-1 446,34	-3 269,09	682,47	4 219,51	1 773,26	-1 349,24	177,94
Xemal	82,60	1 986,00	-472,08	-2 471,19	355,28	2 971,07	648,35	-1 871,74	82,60
Chojil	341,20	2 712,58	-751,06	-3 331,23	844,93	4 641,53	1 473,16	-2 114,66	341,20
El Porvenir	1 186,06	1 217,17	1 124,83	1 120,41	1 303,77	1 410,22	1 280,13	1 146,99	1 186,06
Machaquilá	-5,15	397,83	-183,93	-561,12	191,49	784,50	166,25	-452,55	-5,15



	25 años								
	-3,14	-2,36	-1,57	-0,79	0,00	0,79	1,57	2,36	3,14
Cuilco	232,32	1 640,54	1 391,96	-3 214,71	736,85	4 273,89	1 827,64	-1 294,86	232,32
Xemal	111,21	2 014,61	-443,47	-2 442,58	383,89	2 999,68	676,95	-1 843,13	111,21
Chojil	417,59	2 788,98	-674,66	-3 254,83	921,32	4717,93	1549,56	-2 038,26	417,59
El Porvenir	1 318,67	1 349,79	1 257,44	1 253,02	436,38	1 542,83	1 412,74	1 279,60	318,67
Machaquilá	-2,23	400,76	-181,01	-558,19	194,42	787,42	169,18	-4 49,62	-2,23



	50 años								
	-3,14	-2,36	-1,57	-0,79	0,00	0,79	1,57	2,36	3,14
Cuilco	267,45	1675,67	-1356,83	-3179,58	771,98	4309,02	1862,77	-1259,73	267,45
Xemal	129,69	2033,09	-425,00	-2424,10	402,37	3018,16	695,43	-1824,65	129,69
Chojil	466,94	2838,33	-625,31	-3205,48	970,67	4767,28	1598,91	-1988,91	466,94
El Porvenir	1404,34	1435,45	1343,11	1338,69	1522,05	1628,50	1498,41	1365,27	1404,34
Machaquilá	1,07	404,05	-177,71	-554,90	197,71	790,72	172,47	-446,33	1,07



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2. Comparaciones de Q_{Tr} y Q_{MM}

CUILCO

NORMAL		
QTR	QMM	DIFERENCIA
304,364508	209,70	45%
452,913128	347,67	30%
530,562124	419,79	26%
569,310587	455,77	25%
594,686005	479,34	24%
613,365742	496,69	23%
628,055828	510,34	23%
666,857223	546,37	22%
695,559049	573,03	21%
714,971741	591,06	21%
812,368509	681,52	19%
		26%

LOG NORMAL		
QTR	QMM	DIFERENCIA
256,217464	167,94	53%
432,06992	298,55	45%
567,782972	403,29	41%
650,699341	468,59	39%
711,455411	516,98	38%
759,776181	555,77	37%
800,070888	588,30	36%
917,080245	683,70	34%
1014,51058	764,09	33%
1086,21136	823,75	32%
1530,0737	1201,21	27%
		38%

GAMMA		
QTR	QMM	DIFERENCIA
271,954398	181,48	50%
433,061096	307,11	41%
537,568421	390,73	38%
595,208072	437,34	36%
634,981241	469,67	35%
665,297144	494,39	35%
689,761217	514,39	34%
757,042387	569,58	33%
809,322804	612,65	32%
845,906347	642,86	32%
1044,58345	807,98	29%
		36%

GAMMA 3P		
QTR	QMM	DIFERENCIA
277,287617	155,24	79%
439,4331	303,16	45%
540,790058	419,87	29%
595,825308	489,15	22%
633,507427	538,62	18%
662,085659	577,15	15%
685,063683	608,73	13%
747,907232	697,54	7%
796,420354	768,36	4%
830,219178	818,75	1%
1011,98922	1102,35	8%
		22%

LOG PEARSON III		
QTR	QMM	DIFERENCIA
-	162,78	-
-	295,29	-
-	410,45	-
-	486,04	-
-	543,86	-
-	591,29	-
-	631,80	-
-	754,33	-
-	861,80	-
-	943,97	-
-	1509,23	-
		-

GUMBEL		
QTR	QMM	DIFERENCIA
275,377245	182,78	51%
431,35809	327,65	32%
534,630982	423,57	26%
592,896675	477,68	24%
633,69282	515,57	23%
665,116555	544,76	22%
690,680651	568,50	21%
761,918207	634,66	20%
818,183018	686,92	19%
858,005091	723,90	19%
1080,04721	930,13	16%
		25%

GUMBEL		
QTR	QMM	DIFERENCIA
231,378718	150,10	54%
400,519165	274,63	46%
575,96828	409,69	41%
706,991248	513,41	38%
816,094381	601,29	36%
911,481862	679,11	34%
997,248987	749,79	33%
1 281,25877	988,01	30%
1 561,69231	1 228,56	27%
1 796,52674	1 433,44	25%
3 923,36538	3 387,31	16%
		34%

XEMAL

NORMAL		
QTR	QMM	DIFERENCIA
154,751344	106,62	45%
230,279528	179,20	29%
269,759449	217,13	24%
289,46075	236,07	23%
302,362648	248,46	22%
311,860189	257,59	21%
319,329229	264,77	21%
339,057443	283,72	20%
353,650623	297,75	19%
363,520828	307,23	18%
413,041323	354,82	16%
		34%

LOG NORMAL		
QTR	QMM	DIFERENCIA
130,271421	86,89	50%
219,68199	143,95	53%
288,684048	187,41	54%
330,842115	213,79	55%
361,732983	233,04	55%
386,301235	248,31	56%
406,78871	261,02	56%
466,281045	297,81	57%
515,818606	328,32	57%
552,274211	350,71	57%
777,95195	488,31	59%
		55%

GAMMA		
QTR	QMM	DIFERENCIA
138,272721	93,31	48%
220,185945	154,71	42%
273,321736	195,23	40%
302,628089	217,73	39%
322,850392	233,32	38%
338,264235	245,22	38%
350,702769	254,84	38%
384,911263	281,37	37%
411,492762	302,04	36%
430,093329	316,53	36%
531,108878	395,55	34%
		39%

GAMMA 3P		
QTR	QMM	DIFERENCIA
140,984347	79,96	76%
223,425732	158,89	41%
274,959748	218,81	26%
302,941916	253,91	19%
322,101045	278,82	16%
336,631385	298,15	13%
348,31435	313,95	11%
380,266577	358,23	6%
404,932629	393,39	3%
422,117331	418,34	1%
514,536645	558,01	8%
		20%

LOG PEARSON III		
-	76,33	-
-	133,33	-
-	193,90	-
-	239,07	-
-	276,51	-
-	309,09	-
-	338,25	-
-	433,95	-
-	527,21	-
-	604,45	-
-	1 277,63	-
		-

GUMBEL		
140,013036	92,46	51%
219,320067	168,67	30%
271,828223	219,12	24%
301,45288	247,59	22%
322,195306	267,52	20%
338,172416	282,87	20%
351,170246	295,36	19%
387,390329	330,17	17%
415,997656	357,66	16%
436,244824	377,11	16%
549,140105	485,60	13%
		23%

LOG GUMBEL		
117,642388	78,74	49%
203,640299	133,78	52%
292,845793	190,02	54%
359,46322	231,63	55%
414,935708	266,07	56%
463,434598	296,06	57%
507,042107	322,93	57%
651,444279	411,37	58%
794,028142	498,05	59%
913,427552	570,22	60%
1 994,79917	1 212,65	64%
		57%

CHOJIL

NORMAL		
550,865158	379,54	45%
819,721274	573,35	43%
960,257129	674,66	42%
1 030,38744	725,22	42%
1 076,31406	758,33	42%
1 110,12227	782,70	42%
1 136,70965	801,86	42%
1 206,93577	852,49	42%
1 258,88281	889,94	41%
1 294,01757	915,27	41%
1 470,29465	1 042,34	41%
		42%

LOG NORMAL		
463,724484	319,95	45%
781,997437	547,42	43%
1 027,62263	724,83	42%
1 177,69183	833,82	41%
1 287,65342	913,93	41%
1 375,10852	977,78	41%
1 448,03735	1 031,11	40%
1 659,81099	1 186,39	40%
1 836,14882	1 316,11	40%
1 965,91908	1 411,79	39%
2 769,25946	2 007,66	38%
		41%

GAMMA		
492,206544	339,43	45%
783,791352	539,51	45%
972,93773	669,19	45%
1 077,25895	740,69	45%
1 149,24386	790,02	45%
1 204,1122	827,61	45%
1 248,38939	857,95	46%
1 370,16066	941,37	46%
1 464,78227	1 006,19	46%
1 530,99432	1 051,54	46%
1 890,57729	1 297,78	46%
		45%

GAMMA 3P		
501,859065	327,85	53%
795,323956	542,12	47%
978,768527	687,39	42%
1 078,37607	768,96	40%
1 146,57643	825,74	39%
1 198,29978	869,25	38%
1 239,88739	904,51	37%
1 353,62707	1 002,06	35%
1 441,4303	1 078,40	34%
1 502,60233	1 132,06	33%
1 831,58545	1 426,47	28%
		39%

LOG GUMBEL		
418,769176	288,12	45%
724,894158	506,38	43%
1 042,43711	735,57	42%
1 279,57379	908,04	41%
1 477,03806	1 052,34	40%
1 649,67855	1 178,95	40%
1 804,9073	1 293,10	40%
2 318,93272	1 672,94	39%
2 826,48555	2 050,31	38%
3 251,50916	2 367,79	37%
7 100,84533	5 284,04	34%
		40%

EL PORVENIR

NORMAL		
1 300,29037	1 218,25	7%
1 565,79129	1 554,70	1%
1 704,57332	1 730,57	2%
1 773,82844	1 818,33	2%
1 819,18192	1 875,80	3%
1 852,56821	1 918,11	3%
1 878,8238	1 951,38	4%
1 948,17352	2 039,27	4%
1 999,47229	2 104,27	5%
2 034,16859	2 148,24	5%
2 208,24581	2 368,83	7%
		4%

LOG NORMAL		
1 260,90901	1 170,13	8%
1 572,52612	1 489,30	6%
1 764,95598	1 689,41	4%
1 869,6176	1 799,11	4%
1 941,4985	1 874,79	4%
1 996,17263	1 932,52	3%
2 040,24874	1 979,17	3%
2 161,40527	2 107,86	3%
2 255,63204	2 208,42	2%
2 321,68098	2 279,14	2%
2 683,42335	2 669,62	1%
		4%

GAMMA		
1 274,00454	1 186,12	7%
1 559,77251	1 494,04	4%
1 724,62343	1 674,04	3%
1 810,96709	1 768,90	2%
1 869,00256	1 832,86	2%
1 912,48416	1 880,88	2%
1 947,13369	1 919,21	1%
2 040,59189	2 022,86	1%
2 111,54455	2 101,78	0%
2 160,41767	2 156,25	0%
2 416,50626	2 443,06	1%
		2%

GAMMA 3P		
-	1 112,76	-
-	1 483,87	-
-	1 748,12	-
-	1 899,32	-
-	2 005,51	-
-	2 087,35	-
-	2 153,93	-
-	2 339,25	-
-	2 485,27	-
-	2 588,38	-
-	3 159,51	-
		-

LOG PEARSON III		
-	1 106,64	-
-	1 443,66	-
-	1 718,19	-
-	1 892,05	-
-	2 022,44	-
-	2 127,95	-
-	2 217,18	-
-	2 482,72	-
-	2 711,20	-
-	2 883,66	-
-	4 033,91	-
		-

GUMBEL		
1 248,48144	1 152,60	8%
1 527,26597	1 505,88	1%
1 711,84559	1 739,79	2%
1 815,98385	1 871,75	3%
1 888,89879	1 964,15	4%
1 945,06243	2 035,32	4%
1 990,75313	2 093,22	5%
2 118,076	2 254,57	6%
2 218,63808	2 382,00	7%
2 289,81207	2 472,20	7%
2 686,6679	2 975,10	10%
		5%

LOG GUMBEL		
1207,72318	1116,33	8%
1522,93133	1438,07	6%
1775,66501	1700,61	4%
1936,34052	1869,35	4%
2057,41917	1997,36	3%
2155,81902	2101,92	3%
2239,33153	2191,00	2%
2489,51472	2459,66	1%
2706,7209	2694,94	0%
2871,80925	2874,95	0%
3995,05368	4122,89	3%
		3%

MACHAQUILÁ

NORMAL		
48,0551731	45,02	7%
57,8673602	54,61	6%
62,9963643	59,63	6%
65,555844	62,13	6%
67,2319844	63,77	5%
68,4658503	64,97	5%
69,436185	65,92	5%
71,999161	68,43	5%
73,895023	70,28	5%
75,1773033	71,53	5%
81,610721	77,82	5%
		5%

LOG NORMAL		
46,5997459	43,79	6%
58,1162612	54,03	8%
65,2279421	60,31	8%
69,0959493	63,72	8%
71,7524705	66,05	9%
73,7730768	67,82	9%
75,4020089	69,24	9%
79,8796227	73,15	9%
83,3619862	76,19	9%
85,8029743	78,31	10%
99,1719821	89,89	10%
		9%

GAMMA		
47,0837208	44,20	7%
57,6449229	53,60	8%
63,7373613	59,00	8%
66,9283868	61,82	8%
69,0732188	63,72	8%
70,68018	65,14	9%
71,9607317	66,27	9%
75,414691	69,31	9%
78,036907	71,62	9%
79,8431237	73,21	9%
89,3074573	81,53	10%
		8%

GAMMA 3P		
-	43,76	-
-	54,06	-
-	60,20	-
-	63,46	-
-	65,68	-
-	67,34	-
-	68,68	-
-	72,29	-
-	75,06	-
-	76,97	-
-	87,12	-
		-

LOG PEARSON III		
-	43,56	-
-	53,95	-
-	60,50	-
-	64,11	-
-	66,61	-
-	68,52	-
-	70,07	-
-	74,35	-
-	77,71	-
-	80,08	-
-	93,28	-
		-

GUMBEL		
46,1404569	43,15	7%
56,4435701	53,22	6%
63,2651275	59,89	6%
67,1137926	63,65	5%
69,8085292	66,29	5%
71,8841834	68,32	5%
73,5727868	69,97	5%
78,2782915	74,56	5%
81,9947909	78,20	5%
84,6251864	80,77	5%
99,2918918	95,10	4%
		5%

LOG GUMBEL		
44,6341429	42,03	6%
56,2833735	52,41	7%
65,6237187	60,66	8%
71,5618458	65,88	9%
76,0365811	69,80	9%
79,6731704	72,97	9%
82,7595641	75,66	9%
92,0056501	83,69	10%
100,032996	90,63	10%
106,13421	95,89	11%
147,646249	131,31	12%
		9%

Fuente: elaboración propia.