



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

**ANÁLISIS DE LA VARIABILIDAD HIDROMETEOROLÓGICA  
EN LA PARTE ALTA DE LA CUENCA DEL RÍO CHIXOY**

**Jorge David Figueróa García**

Asesorado por el Ing. Claudio César Castañón Contreras

Guatemala, marzo de 2016

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**ANÁLISIS DE LA VARIABILIDAD HIDROMETEOROLÓGICA  
EN LA PARTE ALTA DE LA CUENCA DEL RÍO CHIXOY**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

**JORGE DAVID FIGUERÓA GARCÍA**

ASESORADO POR EL ING. CLAUDIO CÉSAR CASTAÑÓN CONTRERAS

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERO CIVIL**

GUATEMALA, MARZO DE 2016

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 Olympto Paiz Recinos
EXAMINADORA	Inga. Carmen Marina Mérida Alva
EXAMINADOR	Ing. Nicolás de Jesús Guzmán Sáenz
EXAMINADOR	Ing. Daniel Alfredo Cruz Pineda
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:

### **ANÁLISIS DE LA VARIABILIDAD HIDROMETEOROLÓGICA EN LA PARTE ALTA DE LA CUENCA DEL RÍO CHIXOY**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Industrial, con fecha 3 de febrero de 2014.

**Jorge David Figueróa García**



Guatemala, 15 de octubre de 2015

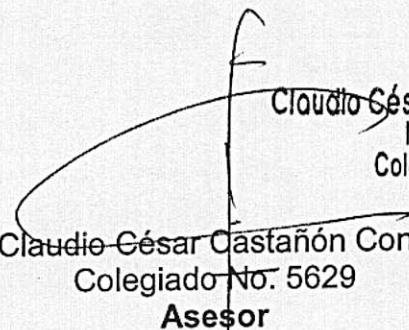
Ingeniero  
Claudio César Castañón Contreras  
Jefe del Departamento de Hidráulica  
Escuela de Ingeniería Civil  
Facultad de Ingeniería

Ingeniero Castañón:

Luego de un cordial y breve saludo, mediante la presente le informo que el trabajo de graduación **"ANÁLISIS DE LA VARIABILIDAD HIDROMETEOROLÓGICA EN LA PARTE ALTA DE LA CUENCA DEL RÍO CHIXOY"**, elaborado por el estudiante Jorge David Figueró García, ha sido finalizado a satisfacción y revisado por mi persona.

Sin otro particular, me despido.

Atentamente,

  
Claudio César Castañón Contreras  
Ingeniero Civil  
Colegiado No. 5,629  
Ing. Claudio César Castañón Contreras  
Colegiado No. 5629  
**Asesor**





**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,  
11 de enero de 2016

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 ANÁLISIS DE LA VARIABILIDAD HIDROMETEOROLÓGICA EN LA PARTE ALTA DE LA CUENCA DEL RÍO CHIXOY, desarrollado por el estudiante de Ingeniería Civil Jorge David Figueróa García, quien contó con la asesoría del Ing. Claudio César Castañón Contreras.

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,

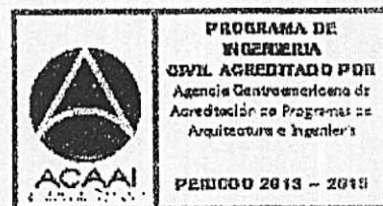
ID Y ENSEÑAD A TODOS

Ing. Claudio César Castañón Contreras  
Jefe del Departamento de Hidráulica



FACULTAD DE INGENIERIA  
DEPARTAMENTO  
DE  
HIDRAULICA  
SAC

Más 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



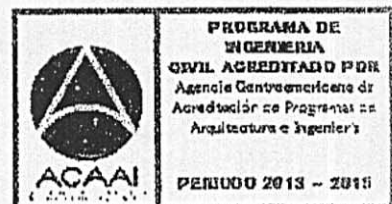
El director de la Escuela de Ingeniería Civil, después de conocer el dictamen del Asesor y del Coordinador del Departamento de Hidráulica Ing. Claudio César Castañón Contreras, al trabajo de graduación del estudiante Jorge David Figueróa García, titulado **ANÁLISIS DE LA VARIABILIDAD HIDROMETEOROLÓGICA EN LA PARTE ALTA DE LA CUENCA DEL RÍO CHIXOY**, da por este medio su aprobación a dicho trabajo.

*[Handwritten signature]*  
Ing. Hugo Leonel Montenegro Franco



Guatemala, marzo 2016  
/mrrm.

Mas de 134 años de Trabajo Académico y Mejora Continua

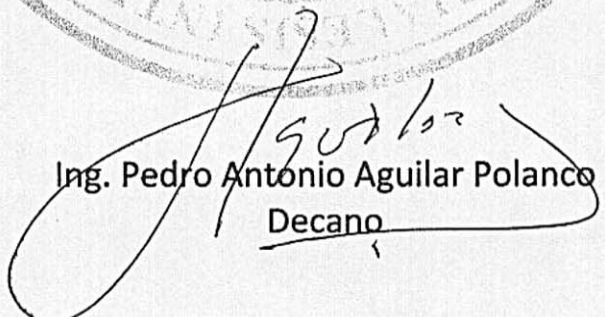






El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Civil, al Trabajo de Graduación titulado: **ANÁLISIS DE LA VARIABILIDAD HIDROMETEOROLÓGICA EN LA PARTE ALTA DE LA CUENCA DEL RÍO CHIXOY**, presentado por el estudiante universitario: **Jorge David Figueróa García**, 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, marzo de 2016

/gdech



## **ACTO QUE DEDICO A:**

<b>Dios</b>	Por su misericordia e infinitas bendiciones.
<b>Mis padres</b>	Daniel Figueróa y Magda García, por su amor, apoyo incondicional y fuente de inspiración.
<b>Mi esposa</b>	Gloria Córdova de Figueróa, por su amor, apoyo, dedicación y comprensión.
<b>Mi hija</b>	Daniela Figueróa Córdova, por inspirar mi esfuerzo.
<b>Mis hermanos</b>	Daniel, José y Laura Figueróa García, por su aprecio y cariño.
<b>Mis abuelos</b>	Por su apoyo y buenos deseos.
<b>Mis suegros</b>	Por su cariño y afecto.
<b>Tíos, primos y demás familia en general</b>	Por ser influencia positiva durante el desarrollo de mi carrera, entre otras cosas.

## **AGRADECIMIENTOS A:**

<b>Universidad de San Carlos de Guatemala</b>	Por haberme permitido formarme como profesional en ella.
<b>Facultad de Ingeniería</b>	Por abrirme las puertas de sus aulas y brindarme su formación académica.
<b>Mi asesor</b>	Ing. Claudio Castañón, por su apoyo, información y directrices durante el desarrollo de mi trabajo de graduación.
<b>Ingenieros Juan Carlos Fuentes Montepeque, Elibar Montejo, Jorge Stalling, Juan Carlos Dávila</b>	Por su apoyo y aprecio.
<b>Erwin Aquino, Gerardo Lobos, Alvin Poitán, Luis Tórtola y Francisco Gálvez</b>	Por su amistad y aprecio.

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS .....	IX
GLOSARIO .....	XI
RESUMEN.....	XIII
OBJETIVOS.....	XV
JUSTIFICACIÓN.....	XVII
INTRODUCCIÓN .....	XIX
1. METODOLOGÍA.....	1
1.1. Etapa preparatoria.....	1
1.2. Etapa de campo .....	3
1.3. Etapa de análisis .....	6
2. MARCO TEÓRICO.....	7
2.1. Conceptos básicos .....	7
2.1.1. Cuenca hidrográfica.....	7
2.1.2. Ciclo hidrológico .....	8
2.2. Cambio climático .....	10
2.2.1. Causas del cambio climático .....	11
2.2.2. Efectos del cambio climático.....	11
2.3. Variabilidad climática.....	12
2.4. Conceptos asociados al análisis de eventos hidrometeorológicos .....	13
2.4.1. Frecuencia y probabilidad.....	13
2.4.2. Período de retorno.....	14

2.4.3.	Riesgo y confiabilidad .....	14
2.4.4.	Tiempo de concentración .....	14
2.4.5.	Crecidas .....	14
2.4.6.	Análisis de frecuencia .....	15
3.	DESCRIPCIÓN BIOFÍSICA DE PARTE ALTA DE LA CUENCA DEL RÍO CHIXOY .....	17
3.1.	Ubicación geográfica.....	17
3.2.	Región fisiográfica.....	19
3.2.1.	Región .....	19
3.2.2.	Subregión .....	19
3.3.	Región climática.....	21
3.4.	Región hidrográfica e hidrológica.....	21
3.5.	Geología.....	22
3.6.	Geomorfología .....	25
3.7.	Caracterización morfométrica .....	25
3.7.1.	Delimitación del parteaguas de la cuenca.....	26
3.7.2.	Área de la cuenca (Ak) y perímetro (Pk) .....	28
3.7.3.	Longitud del cauce principal .....	28
3.7.4.	Forma de la cuenca.....	30
3.7.5.	Relación de la forma (Rf).....	30
3.7.6.	Relación de la forma circular (Rc) .....	31
3.7.7.	Radio de elongación (Re).....	32
3.7.8.	Índice de compacidad o de gravelius (Kc).....	33
3.8.	Caracterización biofísica .....	34
3.8.1.	Red fluvial.....	34
3.8.2.	Número de corrientes y orden de corrientes .....	37
3.8.3.	Longitud media de corrientes ( <b>Lu</b> ).....	38
3.8.4.	Longitud acumulada de corrientes .....	39



3.8.5.	Radio de bifurcación medio (Rb) .....	40
3.8.6.	Radio de longitud media (RI) .....	41
3.8.7.	Frecuencia o densidad de corrientes (F <sub>c</sub> ) .....	42
3.8.8.	Densidad de drenaje (D).....	43
3.8.9.	Pendiente media de la cuenca.....	44
3.8.10.	Pendiente media del cauce principal (Scp).....	46
3.8.11.	Elevación máxima, media y mínima de la cuenca ..	47
3.8.12.	Curva hipsométrica .....	49
3.8.13.	Patrón de drenaje .....	50
3.8.14.	Tipo de cauce y transporte de sedimentos .....	53
3.9.	Zona de vida .....	55
4.	ESTACIONES DE OBSERVACIÓN .....	57
4.1.	Estación meteorológica .....	57
4.1.1.	Componentes de una estación meteorológica .....	57
4.1.1.1.	Terreno circundante.....	57
4.1.1.2.	Parcela meteorológica .....	57
4.1.1.3.	Abrigo meteorológico.....	58
4.1.1.4.	Instrumentación .....	59
4.2.	Estación hidrométrica .....	69
4.2.1.	Instrumentos para medir nivel.....	70
4.3.	Estaciones utilizadas para el estudio de la precipitación .....	74
4.4.	Estaciones utilizadas para el estudio de caudal .....	76
4.5.	Inventario de la instrumentación y equipos.....	77
5.	CONTROL DE DATOS E ÍNDICES DE CAMBIO CLIMÁTICO .....	95
5.1.	Software RClimDex .....	95
5.2.	Control de calidad de datos .....	97
5.2.1.	Procesamiento de la información.....	97

5.2.2.	Corrección de datos .....	102
5.3.	Rangos y saltos de tiempo en los datos.....	103
5.4.	Determinación de índices de cambio climático .....	106
5.5.	Código de índices del modelo RClimDex.....	108
6.	ANÁLISIS Y RESULTADOS .....	115
6.1.	Precipitación.....	115
6.1.1.	Estaciones para estudio de precipitación .....	115
6.1.2.	Índices de precipitación .....	118
6.1.3.	Tendencia de la precipitación.....	120
6.1.3.1.	Tendencia de la precipitación total al año .....	120
6.1.3.2.	Tendencia de las precipitaciones extremas.....	122
6.1.3.3.	Tendencia de los días secos consecutivos.....	122
6.2.	Caudal.....	123
6.2.1.	Estaciones para estudio de caudal.....	123
6.2.2.	Índices de caudal .....	125
6.2.3.	Tendencia del caudal .....	126
6.2.3.1.	Tendencia del caudal medio anual.....	126
6.2.3.2.	Tendencia de caudal extremo .....	129
6.3.	Eventos extremos y cambio climático .....	129
	CONCLUSIONES.....	133
	RECOMENDACIONES .....	135
	BIBLIOGRAFÍA.....	137
	APÉNDICES.....	139

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1.	Ciclo hidrológico .....	9
2.	Mapa ubicación geográfica parte alta de la cuenca río Chixoy .....	18
3.	Mapa fisiográfico parte alta de la cuenta río Chixoy.....	20
4.	Mapa geológico parte alta de la cuenta río Chixoy .....	24
5.	Mapa de delimitación parte alta de la cuenca río Chixoy .....	27
6.	Mapa del cauce principal parte alta de la cuenca río Chixoy .....	29
7.	Orden de corrientes parte alta de la cuenca río Chixoy .....	36
8.	Gráfica de Log Nu <i>versus</i> U.....	38
9.	Mapa de pendientes parte alta cuenca del río Chixoy.....	45
10.	Perfil del cauce principal hasta estación Chisiguán .....	46
11.	Mapa de elevación parte alta cuenca del río Chixoy.....	48
12.	Curvas hipsométricas características del ciclo de erosión .....	49
13.	Curva hipsométrica parte alta cuenca del río Chixoy .....	50
14.	Mapa de ríos parte alta de la cuenca río Chixoy .....	52
15.	Mapa de uso del suelo parte alta de la cuenca río Chixoy .....	54
16.	Parcela meteorológica.....	58
17.	Abrigo meteorológico .....	59
18.	Pluviómetro .....	60
19.	Pluviómetro estación telemétrica satelital .....	61
20.	Pluviógrafo .....	62
21.	Mecanismo de registro de precipitación pluviógrafo .....	63
22.	Termómetro de máxima y mínima.....	64
23.	Heliógrafo.....	65

24.	Tanque de evaporación .....	66
25.	Anemómetro .....	67
26.	Anemógrafo estación telemétrica satelital .....	68
27.	Vista aguas abajo estación hidrométrica .....	70
28.	Limnímetros de escala graduada.....	71
29.	Limnógrafo.....	72
30.	Limnógrafo y cable vía para aforo aéreo .....	72
31.	Gráfica de registro de limnógrafo.....	73
32.	Plataforma inicial de software RClimdex.....	96
33.	Formato de datos para el archivo inicial .....	99
34.	Selección de procedimiento software RClimdex.....	100
35.	Validación de datos.....	100
36.	Parámetros para el control de datos .....	101
37.	Series de precipitación diaria, estación Comitancillo .....	104
38.	Series de caudales, estación Chisiguán .....	105
39.	Cálculo de índices de cambio climático .....	106
40.	Definición de parámetros, RClimDex .....	107
41.	Menú de índices RClimDex .....	107
42.	Precipitación total al año, estación Xequemeyá .....	111
43.	Mayor número de días secos consecutivos en un año, estación Xequemeyá.....	112
44.	Caudal medio anual, estación Serchil.....	113
45.	Caudal intenso, estación Chisiguán.....	114
46.	Precipitación media mensual, parte alta cuenca Chixoy.....	117
47.	Mapa de tendencia precipitación total anual.....	121
48.	Mapa de tendencia caudal medio anual .....	128
49.	Caudal diario extremo, estación Chisiguán.....	130
50.	Caudal medio mensual, estación Chisiguán .....	131

## TABLAS

I.	Clase de estación de registro.....	4
II.	Estaciones meteorológicas e hidrométricas para el estudio.....	5
III.	Ubicación del punto de control de estudio DEM.....	26
IV.	Área de la cuenca y perímetro de la cuenca para el estudio.....	28
V.	Longitud del cauce principal para la cuenca en estudio .....	28
VI.	Forma de la cuenca en función del coeficiente .....	31
VII.	Relación de forma para la cuenca de interés .....	31
VIII.	Relación de forma circular para la cuenca de interés.....	32
IX.	Relación de forma circular de la cuenca de interés del estudio .....	33
X.	Forma de la cuenca de acuerdo al índice de compacidad .....	33
XI.	Forma de la parte alta de la cuenca del río Chixoy .....	34
XII.	Orden de corrientes y longitud por orden de corrientes .....	37
XIII.	Determinación de la longitud media de corrientes .....	39
XIV.	Determinación de la longitud acumulada de corrientes.....	40
XV.	Determinación del radio de bifurcación y el radio de bifurcación medio de la cuenca .....	41
XVI.	Determinación del radio de longitud media .....	42
XVII.	Determinación de la densidad de corrientes .....	42
XVIII.	Determinación de la densidad de drenaje de la cuenca.....	43
XIX.	Clasificación de la pendiente en las cuencas hidrográficas .....	44
XX.	Pendiente de la cuenca Chixoy hasta estación Chisiguán.....	45
XXI.	Pendiente media del cauce principal de la cuenca .....	46
XXII.	Alturas características de la cuenca.....	47
XXIII.	Sólidos en suspensión, al punto de control de estudio.....	53
XXIV.	Estaciones meteorológicas utilizadas para analizar precipitación .....	75
XXV.	Estaciones hidrométricas utilizadas para analizar caudal .....	76
XXVI.	Información general estación meteorológica La Capellanía .....	78

XXVII.	Información general estación meteorológica Totoncapán .....	79
XXVIII.	Información general estación meteorológica Tierra Blanca .....	80
XXIX.	Información general estación meteorológica Quiché .....	81
XXX.	Información general estación meteorológica Xequemeyá .....	82
XXXI.	Información general estación meteorológica San Antonio Ilotenango ..	83
XXXII.	Información general estación meteorológica Nebaj .....	84
XXXIII.	Información general estación meteorológica Huehuetenango .....	85
XXXIV.	Información general estación meteorológica Comitancillo .....	86
XXXV.	Información general estación meteorológica El Paradillo .....	87
XXXVI.	Información general estación meteorológica Serchil.....	88
XXXVII.	Información general estación meteorológica Chuitinamit.....	89
XXXVIII.	Información general estación hidrométrica Serchil .....	90
XXXIX.	Información general estación limnimétrica La Estancia .....	91
XL.	Información general estación hidrométrica Pacaranat.....	92
XLI.	Información general estación hidrométrica El Paradillo .....	93
XLII.	Información general estación hidrométrica Chisiguán .....	94
XLIII.	Agrupación de índices de precipitación y eventos extremos .....	109
XLIV.	Estaciones para estudio de precipitación y cálculo de índices .....	116
XLV.	Resultados índices de precipitación.....	119
XLVI.	Estaciones para estudio de caudales y cálculo de índices .....	125
XLVII.	Resultado índices de caudal.....	126

## LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
<b>C</b>	Caudal
<b><math>\sigma</math></b>	Desviación estándar
<b>CH<sub>4</sub></b>	Gas metano
<b>°C</b>	Grados celsius
<b>km</b>	Kilómetro
<b>km<sup>2</sup></b>	Kilómetro cuadrado
<b>m<sup>3</sup></b>	Metro cúbico
<b>m<sup>3</sup>/año</b>	Metro cúbico por año
<b>msnm</b>	Metros sobre el nivel del mar
<b>mm</b>	Milímetro
<b>mm/año</b>	Milímetros por año
<b>mm/día</b>	Milímetros por día
<b>NA</b>	No disponible en el lenguaje de RCLimDex
<b>P</b>	Precipitación
<b>(S)</b>	<i>Slope</i> o pendiente de las rectas en las gráficas de tendencia.
<b>T</b>	Temperatura
<b>Tmax</b>	Temperatura máxima
<b>Tmin</b>	Temperatura mínima





## GLOSARIO

<b>CMNUCC</b>	Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático.
<b>EGEE</b>	Empresa de Generación de Energía Eléctrica.
<b>IDEAM</b>	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia.
<b>INDE</b>	Instituto Nacional de Electrificación.
<b>Insivumeh</b>	Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología.
<b>IPCC</b>	Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático.
<b>MAGA</b>	Ministerio de Agricultura Ganadería y Alimentación.
<b>MARN</b>	Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales.
<b>OMM</b>	Organización Meteorológica Mundial.
<b>Software</b>	Conjunto de programas y reglas informáticas que permiten ejecutar tareas en una computadora.



## **RESUMEN**

El estudio de investigación presenta un análisis de los principales componentes o variables del ciclo hidrológico, mediante la integración de información hidrometeorológica y datos característicos de la parte alta de la cuenca del río Chixoy.

Inicialmente se realizó la caracterización morfométrica de la cuenca en estudio.

Se recopiló información de la red de estaciones del INDE e Insivumeh, destacando series con longitudes de registro de hasta 44 años para la precipitación y de hasta 45 años para los caudales; información que pasó por procesos de control de calidad para su uso en el cálculo de índices y tendencias para establecer el comportamiento de estabilidad, aumento o disminución de las variables estudiadas.

Durante el desarrollo del estudio se analizó, principalmente la precipitación como elemento que influye en el clima de la zona de interés y su efecto en el comportamiento del caudal de los principales tributarios de la parte alta de la cuenca.



## **OBJETIVOS**

### **General**

Determinar la variabilidad de la precipitación y caudal en la parte alta de la cuenca del río Chixoy, hasta la estación hidrométrica Chisiguán.

### **Específicos**

1. Identificar la tendencia de la precipitación y caudal, como componentes del ciclo hidrológico del área estudiada.
2. Identificar si la variabilidad hidrometeorológica observada es inusual, y si la misma puede deberse a los efectos del cambio climático.
3. Determinar las principales características morfométricas de la parte alta de cuenca del río Chixoy.
4. Realizar un inventario de la red de monitoreo hidrometeorológico de la cuenca en estudio.



## JUSTIFICACIÓN

En Guatemala se estima que ha existido impacto en el régimen de lluvias, tal como lo menciona el Gabinete Específico del Agua (2009), citado en el Plan Sectorial Multianual de Ambiente y Agua 2001-2013. A nivel país, en los últimos 14 años se han observado eventos hidrometeorológicos extremos, como el huracán Mitch (1998), el ciclón tropical Stan (2005) y la tormenta tropical Agatha (2010), además se han presentado sequías prolongadas o canículas más largas; eventos adversos que han tenido efectos dañinos en la mayor parte del territorio nacional.

Por lo anterior, es necesario contar con información del comportamiento de los componentes principales del ciclo hidrológico del área estudiada, para reducir el riesgo u orientar las actividades relacionadas a la agricultura, planificación hidrológica, aprovechamiento hidroeléctrico, diseño de obras hidráulicas, ordenamiento territorial y el manejo de cuencas, entre otras; como identificar posibles efectos del cambio climático en el área analizada.





## INTRODUCCIÓN

Dadas las características de relieve y biodiversidad de Guatemala, el territorio está dividido en 5 provincias geológicas, 11 regiones fisiográficas, 14 regiones climáticas, 8 regiones hidrológicas y 3 regiones hidrográficas; estas características le confieren al territorio una variedad de microclimas propios de cada región. De acuerdo con el Atlas Hidrológico (Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología, 2005) las regiones hidrográficas la constituyen las vertientes: océano Pacífico, el golfo de Honduras (o mar Caribe) y el golfo de México (u océano Atlántico).

Cada vertiente tiene características particulares, por ejemplo, la vertiente del golfo de México, posee el mayor potencial hidráulico del país y es atravesada por los ríos más caudalosos del territorio nacional, como los ríos Chixoy y Usumacinta.

Hidrográficamente, la cuenca del río Chixoy drena a la vertiente del golfo de México, constituyendo parte de la cuenca del río Salinas o Usumacinta. Por las características hidrológicas, topográficas, geológicas, entre otras, la cuenca incluye la central hidroeléctrica Chixoy, considerada como una de las obras más importantes de la ingeniería del siglo XX en Guatemala y el principal proyecto de generación de energía renovable del país; el cual aprovecha un área de 5 500 km<sup>2</sup> hasta el sitio de la presa Pueblo Viejo (Instituto Nacional de Electrificación, 2012) de un área total de 12 150 km<sup>2</sup> de toda la cuenca.

El estudio consiste en realizar un análisis de la precipitación y caudal, como parte de los componentes del ciclo hidrológico, como su tendencia dentro

del área que corresponde a la parte alta de la cuenca del río Chixoy, hasta el punto donde se encuentra la estación hidrométrica Chisiguán (2 200 km<sup>2</sup> aproximadamente), además, identificar el comportamiento que presentan los componentes o si muestran variaciones que repercutan en la cobertura y volumen de lluvias, disminución de caudales, cambio en la frecuencia de lluvias. Lo anterior, dada la necesidad de disponer de información actualizada de la zona e identificar un potencial efecto del cambio climático, ya que Guatemala se ubica dentro de las primeras diez naciones a nivel mundial más vulnerables a esta modificación del clima (Índice del Riesgo Climático Global, 2015).

Se realiza la caracterización morfométrica de la cuenca y se identifica claramente la red de estaciones hidrometeorológicas.

Se han desarrollado estudios sobre la variabilidad de los recursos hídricos en el país. El presente estudio enfoca el análisis de la variabilidad de precipitación y caudal en una zona más específica y particular, como la parte alta de la cuenca del río Chixoy.

# 1. METODOLOGÍA

La metodología que se utilizó para desarrollar el análisis de la variabilidad hidrometeorológica en la parte alta de la cuenca del río Chixoy se divide en tres etapas, las cuales se describen a continuación:

## 1.1. Etapa preparatoria

En esta se realizó la delimitación de la parte alta de la cuenca del río Chixoy, mediante la utilización de hojas cartográficas físicas y digitales a diferentes escalas. También el uso de paquetes computacionales como ArcGIS, AutoCAD, entre otros.

Se ubicaron las estaciones hidrométricas y meteorológicas que se utilizaron para este análisis, describiendo sus principales características y condiciones. Las estaciones que se consideraron son: Tonicapán, Xequemeyá, Tierra Blanca, Serchil, El Paradillo, San Antonio Ilotenango, Huehuetenango, Chuitinamit, Nebaj (estaciones meteorológicas -ME-), Serchil, El Paradillo, Pacaranat, Chisiguán (estaciones hidrométricas -HI-), La Capellanía, Comitancillo, Santa Cruz del Quiché (pluviométricas -PL-) y estación La Estancia (limnimétrica -LM-). Únicamente las estaciones meteorológicas de Huehuetenango, Chuitinamit y Nebaj pertenecen a la red del Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología – Insivumeh- y las estaciones restantes a la red hidrometeorológica del Instituto Nacional de Electrificación (INDE) operadas por el Departamento de Hidrología de la Empresa de Generación de Energía Eléctrica (EGEE).

Se obtuvieron las series de registro de los parámetros utilizados para desarrollar el estudio, con base al año hidrológico de Guatemala, que corresponde a los meses de mayo a abril, siendo estas: series de precipitación diaria y series de caudales diarios.

Previo al análisis de las series, se estableció el porcentaje de datos faltantes de las estaciones meteorológicas, pluviométricas, hidrométricas y limnimétricas; resultando un porcentaje de datos faltantes promedio de 2,79 % para las series de precipitación diaria y 1,67 % para las series de caudales diarios, por lo que se consideró que el porcentaje de los datos faltantes de las series indicadas no es relevante para utilizar un procedimiento de relleno o estimación de datos faltantes. Luego de lo anterior, se realizó el proceso de control de calidad de datos por medio de la desviación estándar o desviación típica ( $\sigma$ ) como una medida de centralización o dispersión para variables de razón (ratio o cociente) y de intervalo, utilizando para el efecto el módulo de control de calidad interno del software RClimDex versión 3.2.0.

Obtención de los registros limnimétricos y de caudal de las estaciones hidrométricas que fueron analizadas con su respectivo procedimiento de control de calidad de datos mediante el módulo de control de calidad interno del Software RClimdex.

Se realizó la caracterización morfométrica de la parte alta de la cuenca del río Chixoy, incluyendo la delimitación de la red de drenaje, orden de las corrientes y tipo de cauces, entre otros y se elaboraron mapas temáticos de ubicación, localización de estaciones meteorológicas e hidrométricas, ríos, fisiográfico, geológico, división político-administrativa, uso de la tierra, entre otros, de la parte alta de la cuenca del río Chixoy.

## 1.2. Etapa de campo

Consistió en un recorrido de reconocimiento a las estaciones de interés utilizadas, como también, identificar generalidades biofísicas del área de estudio, realizando principalmente lo siguiente:

- Localización e identificación de las estaciones de control hidrometeorológico utilizadas.
- Entrevista con los lectores de las estaciones meteorológicas e hidrométricas que se encontraban disponibles al momento de la visita, para conocer el procedimiento de toma y registro de datos, tiempo de laborar como lector, conocer las rutinas de mantenimiento y visita de personal técnico especializado, actividades adicionales, entre otros.
- Inspección general del estado actual del equipo e instrumentación instalada en las estaciones meteorológicas e hidrométricas, también la condición de la infraestructura existente. Lo anterior, juntamente con personal técnico especializado del Departamento de Hidrología del INDE para las estaciones de su red hidrometeorológica.
- Identificar las principales rutas de acceso a las estaciones meteorológicas e hidrométricas para elaborar sus mapas de ubicación y referencia de acceso.
- Identificar riesgos de vandalismo, destrucción, modificación por procesos de urbanización, u otros asociados con los cambios de entorno, en las instalaciones de las estaciones meteorológicas e hidrométricas visitadas.

- Archivo fotográfico de estaciones meteorológicas e hidrométricas de las que se contó con autorización.
- Levantamiento, mediante uso de equipo de posicionamiento global o GPS (por sus siglas en inglés), de las coordenadas de posición de cada una de las estaciones utilizadas en el estudio, con la finalidad de comparar la información con los datos facilitados.
- Se realizó, juntamente con personal técnico especializado del Departamento de Hidrología del INDE, una medición hidrométrica con el método de sección-velocidad mediante vadeo en el río Chixoy, en la estación hidrométrica Chisiguán (estación de control), con la finalidad de estimar el caudal del río al momento de la visita.

Tabla I. **Clase de estación de registro**

PL= Pluviométrica
ME= Meteorológica
HI= Hidrométrica
LI= Limnimétrica

Fuente: elaboración propia.

Tabla II. **Estaciones meteorológicas e hidrométricas para el estudio**

<b>No.</b>	<b>Estación</b>	<b>Institución</b>	<b>Clase</b>	<b>Latitud</b>	<b>Longitud</b>	<b>Altitud (msnm)</b>
1	La Capellanía	INDE	PL	15°24'41"	91°26'06"	3 150
2	Totonicapán	INDE	ME	14°54'28"	91°22'27"	2 405
3	Tierra Blanca	INDE	ME	15°06'49"	91°30'25"	2 325
4	Santa Cruz del Quiché	INDE	PL	15°01'33"	91°09'32"	2 010
5	Xequemeyá	INDE	ME	15°04'49"	91°21'59"	2 002
6	San Antonio Ilostenango	INDE	ME	15°03'17"	91°13'26"	1 960
7	Nebaj	Insivumeh	ME	15°23'53"	91°08'32"	1 906
8	Huehuetenango	Insivumeh	ME	15°19'02"	91°30'11"	1 870
9	Comitancillo	INDE	PL	15°13'43"	91°14'22"	1 775
10	El Paradillo	INDE	ME	15°15'31"	91°19'01"	1 745
11	Serchil	INDE	ME	15°14'10"	91°24'28"	1 635
12	Serchil	INDE	HI	15°14'07"	91°24'25"	1 630
13	La Estancia	INDE	LI	15°20'50"	91°16'26"	1 585
14	Pacaranat	INDE	HI	15°14'53"	91°18'50"	1 505
15	El Paradillo	INDE	HI	15°15'57"	91°19'31"	1 455
16	Chuitinamit	Insivumeh	ME	15°17'18"	91°05'10"	1 180
17	Chisiguán	INDE	PL	15°17'42"	91°04'16"	1 175

Fuente: elaboración propia, recorrido de estaciones.

### 1.3. Etapa de análisis

En esta se procesó y analizó toda la información recopilada y disponible que se obtuvo en la etapa preliminar y de campo, para su aplicación en este estudio. De lo anterior se realizó, entre otros:

- Clasificación de las series de tiempo de precipitación de las estaciones meteorológicas, considerando principalmente las series de mayor longitud (años de registro).
- Ploteo de las series de tiempo de precipitación diaria, mensual y anual de las estaciones involucradas para este estudio, buscando obtener el régimen de la lluvia.
- Evaluación de la variabilidad de la lluvia anual con base a los valores acumulados anuales de la parte alta de la cuenca del río Chixoy.
- Se estableció la tendencia de la precipitación y de los caudales mediante la aplicación de del software RClindex.
- Análisis de caudales extremos mediante métodos estadísticos y software.
- Para facilitar la interpretación de los datos obtenidos, luego del análisis estadístico, se elaboraron tablas donde se marca la tendencia al incremento o disminución, tanto para la precipitación como para los caudales.



## **2. MARCO TEÓRICO**

### **2.1. Conceptos básicos**

A continuación se presenta una serie de conceptos relacionados con el estudio, siendo estos:

#### **2.1.1. Cuenca hidrográfica**

Según Aparicio (1992), una cuenca es una zona de la superficie terrestre donde (si fuera impermeable) las gotas de lluvia que caen sobre ella tienden a ser drenadas por el sistema de corrientes hacia un mismo punto de salida.

De acuerdo a Chow (1994) la divisoria de aguas es una línea que separa la superficie cuyo drenaje fluye hacia un río dado de las superficies de tierra cuyos desagües fluyen hacia otros ríos.

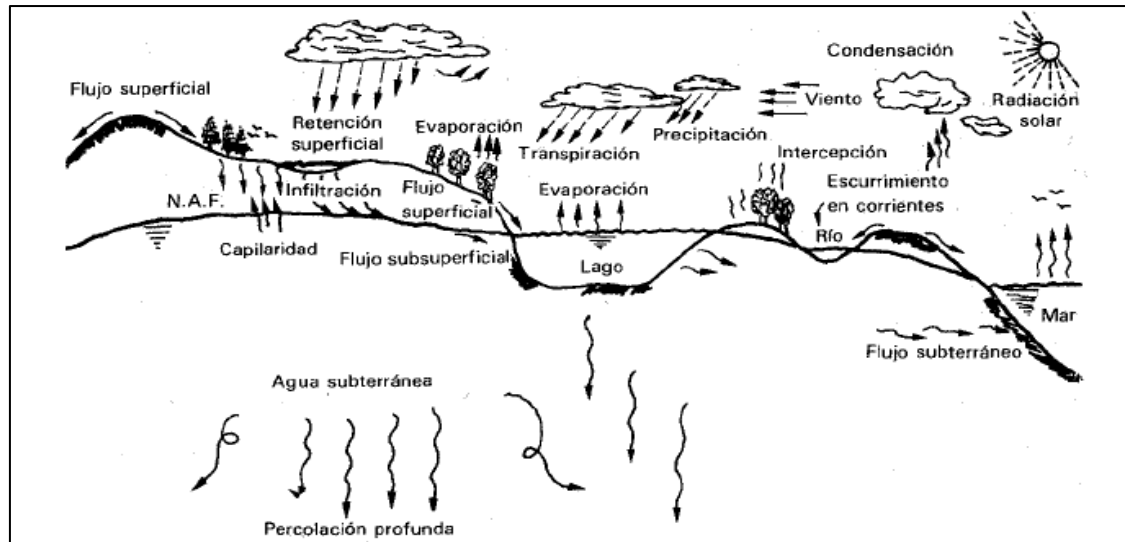
De acuerdo a Aparicio (1992) el ciclo hidrológico, visto a nivel de una cuenca, se puede esquematizar como un estímulo, constituido por la precipitación, al que la cuenca responde mediante el escurrimiento en su salida. Entre el estímulo y la respuesta ocurren varios fenómenos que condicionan la relación entre uno y otra, y que están controladas por las características geomorfológicas de la cuenca y su urbanización.

### **2.1.2. Ciclo hidrológico**

Según Aparicio (1992) el ciclo hidrológico es el concepto fundamental de la hidrología, siendo la cuenca hidrográfica la unidad básica de su estudio. Como todo ciclo, no tiene principio ni fin, y su descripción puede comenzar en cualquier punto.

De acuerdo con Chow (1994), el agua se evapora desde los océanos y desde la superficie terrestre para volverse parte de la atmósfera; el vapor de agua se transporta y se eleva en la atmósfera hasta que se condensa y precipita sobre la superficie terrestre o los océanos; el agua precipitada puede ser interceptada por la vegetación, convertirse en flujo superficial sobre el suelo, infiltrarse en él, correr a través del suelo como flujo subsuperficial y descargar en los ríos como escorrentía superficial. La mayor parte del agua interceptada y de escorrentía superficial regresa a la atmósfera mediante la evaporación. El agua infiltrada puede percolar profundamente para recargar el agua subterránea de donde emerge en manantiales o se desliza hacia ríos para formar la escorrentía superficial, y finalmente fluye hacia el mar o se evapora en la atmósfera a medida que el ciclo hidrológico continúa

Figura 1. **Ciclo hidrológico**



Fuente: APARICIO, F. *Fundamentos de hidrología de superficie*. p.17.

Según Linsley (1977) El ciclo hidrológico posee cuatro componentes que son de interés para el hidrólogo, los cuales son: precipitación, escorrentía superficial, evaporación y transpiración y agua subterránea.

Los elementos necesarios para la formación de precipitaciones son:

- Humedad atmosférica
- Radiación solar
- Mecanismos de enfriamiento del aire
- Presencia de núcleos higroscópicos para que haya condensación

Según Fuentes (2013), la importancia del ciclo hidrológico radica en que el agua es un tema actual en cualquier sociedad, por dos razones fundamentales:

- El agua es parte de los procesos naturales de la tierra y es el eje primordial en el desarrollo de la sociedad.
- La presión sobre los recursos naturales será cada vez mayor, debido al aumento constante de la población y sus requerimientos de un mejor nivel de vida. Las consecuencias que pueden resultar, y que se están observando son: problemas de escasez, tanto en cantidad como en calidad y aumento de la vulnerabilidad de la sociedad y sus bienes ante la ocurrencia de eventos extremos.

De acuerdo a Bateman (2007) lo más importante es tener en cuenta la interrelación del hombre con la naturaleza y su influencia en el ciclo del agua.

Según Chow (1994) la hidrología de una región está determinada por sus patrones de clima, topografía, la geología y la vegetación. También, a medida que la civilización progresa, las actividades humanas invaden gradualmente el medio ambiente natural del agua, alterando el equilibrio dinámico del ciclo hidrológico e iniciando nuevos procesos y eventos.

## **2.2. Cambio climático**

Se define como una variación significativa en cualquier estado medio del clima o en su variabilidad, el cual persiste durante un período prolongado (normalmente décadas o más). Puede deberse a procesos naturales internos o externos, forzados o cambios persistentes antropogénicos en la composición de la atmósfera o en el uso de la tierra.

La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) en su artículo 1, párrafo 2, lo define como: un cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante periodos de tiempo comparables.

### **2.2.1. Causas del cambio climático**

El Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales (2007) indica que existen factores que pueden producir cambios en el clima, los que se clasifican como:

- Factores externos: en los que el agente se encuentra fuera del sistema climático, como cambios en la energía solar, cambios debidos a la relación astronómica entre la Tierra y el Sol y cambios en la superficie terrestre como resultado de los movimientos de los continentes.
- Factores internos: en los que la alteración inicial se halla dentro del sistema climático. Se encuentran causas naturales, como el efecto natural de invernadero y erupciones volcánicas, también se mencionan causas antropogénicas, siendo la principal el uso de combustibles fósiles.

### **2.2.2. Efectos del cambio climático**

- Trastornos: alteración en los patrones de lluvia, más sequía en lugares áridos, inundaciones y derrumbes, cambio de temperatura en suelo y aire, aumento del nivel de los mares.

- Ambiente: reducción de las fuentes de agua dulce, alteración de ecosistemas, pérdida de especies de flora y fauna, devastación por tormentas y huracanes.
- Impacto humano: inseguridad alimentaria, riesgo de enfermedades infecciosas, aumento de la pobreza, incumplimiento de las metas del milenio.

Es un hecho que los impactos de los eventos extremos, tanto lluviosos como secos, comprometen el desarrollo, pues se produce disminución de la capacidad productiva de las tierras, pérdida de cosechas, más obstrucciones en los cuerpos de agua, pérdidas de vidas humanas y daños en la infraestructura vial, hidroeléctrica, de riego, de acueductos y alcantarillados. Las poblaciones de zonas marginales, debido a su condición y la ubicación de sus asentamientos, son las más vulnerables y, en consecuencia, serían las más directamente afectadas (Asociación Mundial para el Agua, 2011).

### **2.3. Variabilidad climática**

Según el documento cambio climático 2007 informe de síntesis, del grupo intergubernamental sobre el cambio climático (IPCC), la variabilidad climática se refiere a variaciones en las condiciones climáticas medias y otras estadísticas del clima (como las desviaciones típicas, los fenómenos extremos, etc.) en todas las escalas temporales y espaciales que se extienden más allá de la escala de un fenómeno meteorológico en particular. La variabilidad puede deberse a procesos naturales internos que ocurren dentro del sistema climático (variabilidad interna), o a variaciones en el forzamiento externo natural o antropogénico (variabilidad externa).

El clima presenta fluctuaciones a escalas relativamente cortas que es lo que se conoce como variabilidad climática, la cual está asociada con el registro de datos por encima o por debajo de las normales climatológicas. La diferencia registrada entre la variable analizada con respecto a la normal climatológica se conoce como anomalía.

La determinación de la variabilidad climática se logra mediante la determinación de las anomalías, las cuales se hacen evidentes cuando los valores de las variables climatológicas (precipitación, escorrentía, temperatura, presión atmosférica, humedad, entre otros), fluctúan por encima o por debajo de sus valores promedios.

Las escalas temporales más significativas en que se presenta este tipo de variación están dadas en orden mensual, estacional, anual y en décadas (también se pueden dar en intervalos temporales más largos), presentando fenómenos asociados para cada uno.

## **2.4. Conceptos asociados al análisis de eventos hidrometeorológicos**

Dentro de los conceptos que relacionan la precipitación y su efecto en los caudales, como elementos de un evento hidrometeorológico, se pueden mencionar:

### **2.4.1. Frecuencia y probabilidad**

De acuerdo a Linsley (1977) la frecuencia es el número de casos en una clase, cuando los eventos son clasificados de acuerdo a diferencias en uno o más atributos. La probabilidad es una base matemática para la predicción, la cual para un conjunto exhaustivo de resultados, es la relación entre el número

de resultados que producen un evento particular y el número posible de resultados.

#### **2.4.2. Período de retorno**

Según Linsley (1977) define como el número de años que transcurren en promedio para que un evento sea igualado o excedido.

#### **2.4.3. Riesgo y confiabilidad**

De acuerdo a Monsalve (1999) el riesgo (R) es definido como la probabilidad que la avenida para la cual se diseña una obra, sea excedida. El riesgo es equivalente a la probabilidad de excedencia. La confiabilidad (C) es el complemento del riesgo,  $C= 1-R$ .

#### **2.4.4. Tiempo de concentración**

Es definido como el lapso que le toma a una gota de agua, que cae en el punto más lejano de la cuenca, alcanzar la salida de esta. Existen diversas metodologías para su estimación, las cuales en su mayoría utilizan parámetros geomorfológicos de la cuenca.

#### **2.4.5. Crecidas**

Según Monsalve (1999) define como una elevación del nivel dentro del lecho del cauce. En general, es un fenómeno de ocurrencia de caudales relativamente grandes. Lluvias muy intensas provocan crecidas en pequeñas cuencas, las lluvias de menor intensidad, pero de duración y cubrimiento grande provocan crecidas en grandes cuencas.



#### **2.4.6. Análisis de frecuencia**

El análisis de frecuencia es una herramienta utilizada para, predecir el comportamiento futuro de los caudales en un sitio de interés, a partir de la información histórica de caudales. Es un método basado en procedimientos estadísticos que permite calcular la magnitud del caudal asociado a un período de retorno. Su confiabilidad depende de la longitud y calidad de la serie histórica, además de la incertidumbre propia de la distribución de probabilidades seleccionada.

Según Chow (1994) la magnitud de un evento extremo está inversamente relacionada con su frecuencia de ocurrencia, es decir, eventos muy severos ocurren con menor frecuencia que eventos más moderados. El objetivo del análisis de frecuencia de información hidrológica es relacionar la magnitud de los eventos extremos con su frecuencia de ocurrencia mediante el uso de distribuciones de probabilidad.



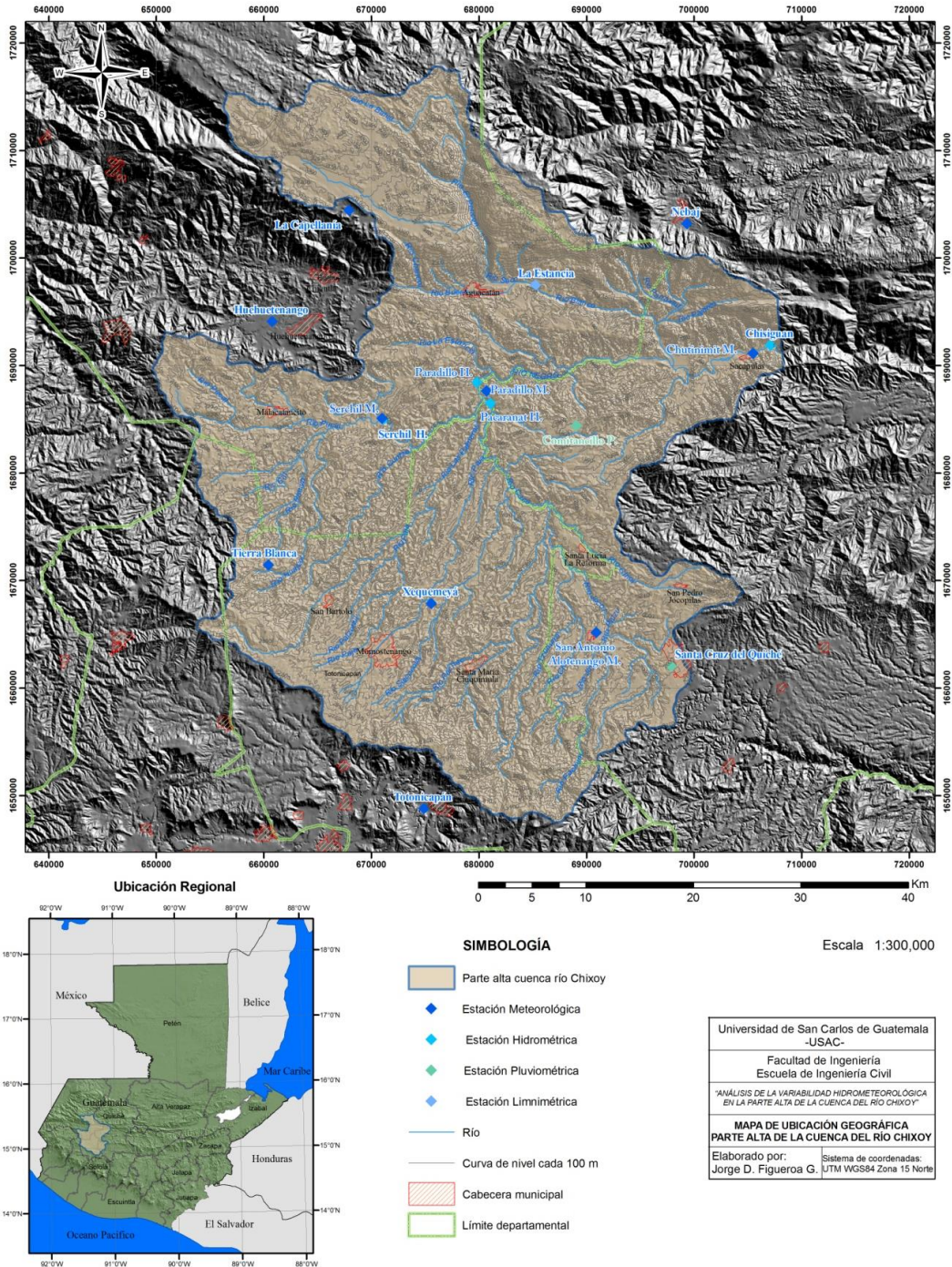
### **3. DESCRIPCIÓN BIOFÍSICA DE PARTE ALTA DE LA CUENCA DEL RÍO CHIXOY**

#### **3.1. Ubicación geográfica**

La parte alta de la cuenca del río Chixoy se ubica en la zona nor-central de la República de Guatemala, entre los departamentos de Huehuetenango, Quetzaltenango, Quiché y Totonicapán. Su área se distribuye bajo la jurisdicción de 20 municipios: Aguacatán, Chiantla, Huehuetenango, Malacatancito, San Sebastián Huehuetenango, Todos Santos Cuchumatán, San Carlos Sija, San Bartolo Aguas Calientes, Momostenango, Totonicapán, Santa Lucía La Reforma, Santa María Chiquimula, San Pedro Jocopilas, Sacapulas, Santa Cruz del Quiché, San Antonio Ilostenango, Patzité, Cunén, Nebaj.

La extensión territorial de la parte alta de la cuenca del río Chixoy, se estima en 2 200 km<sup>2</sup> hasta la estación hidrométrica Chisiguán, que se ha definido como uno de los puntos de control para este estudio. Incluye además varios de los principales ríos tributarios del río Negro o Chixoy.

Figura 2. Mapa ubicación geográfica parte alta de la cuenca río Chixoy



Fuente: elaboración propia, empleando ArcGis.

## **3.2. Región fisiográfica**

Según las formas de relieve y sus rasgos generales, como resultado de complejos procesos geológicos, la parte alta de la cuenca del río Chixoy se ubica dentro de la siguiente región y subregión fisiográfica:

### **3.2.1. Región**

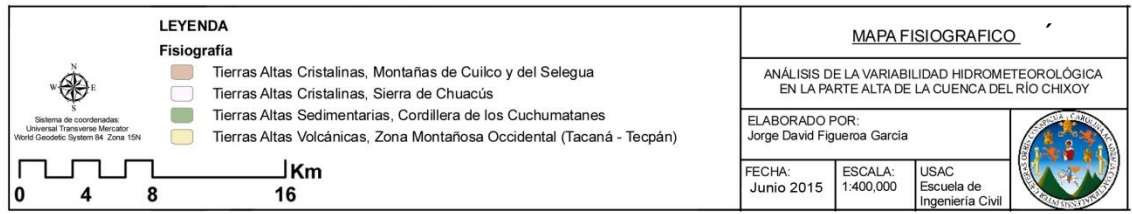
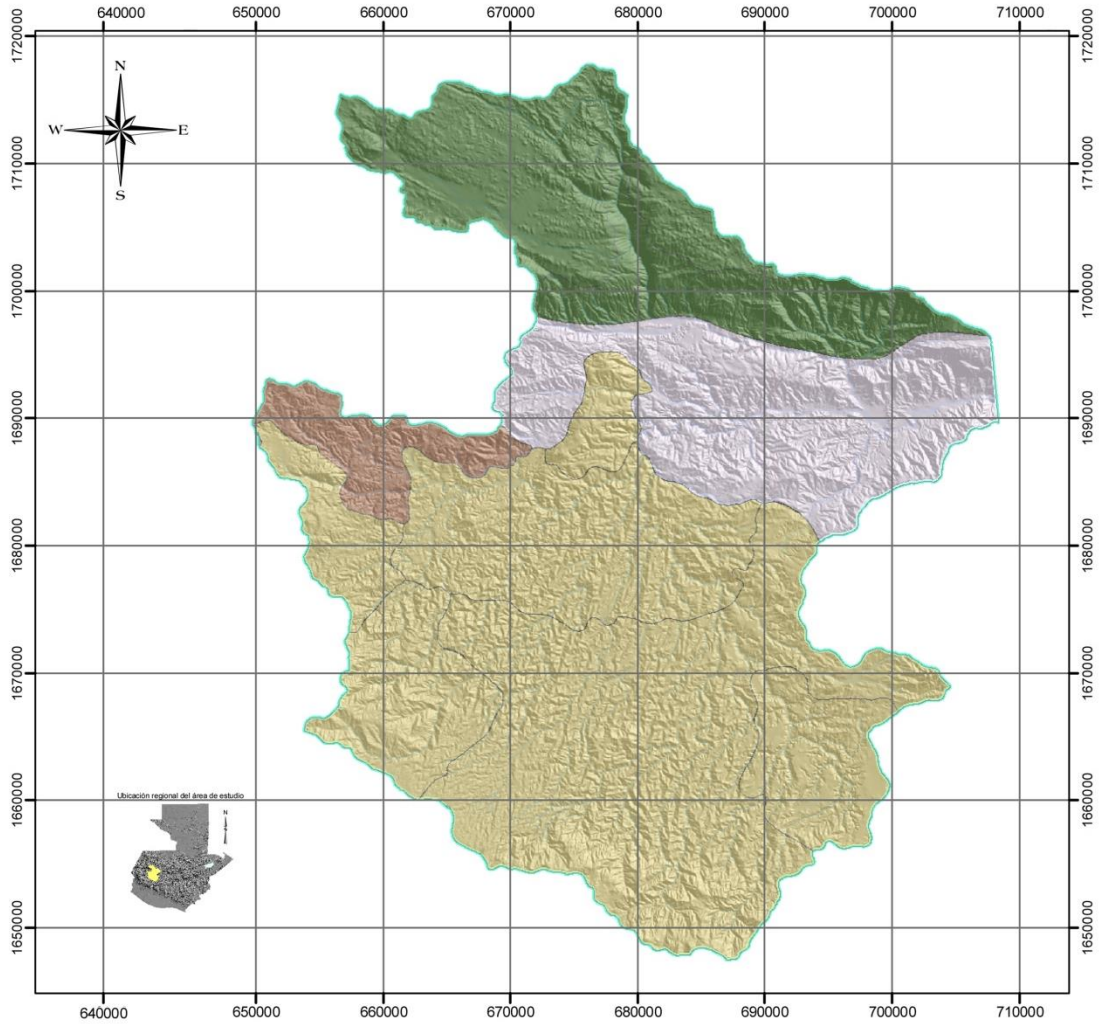
Según Alvarado y Herrera (2000), la parte alta de la cuenca del río Chixoy se ubica en la región denominada Tierras Altas Cristalinas, que está constituida por serpentinitas, gneises metamórficos y esquistos, apareciendo algunas pequeñas áreas de material plutónico, principalmente granito, que forman una región distinta tanto de los estratos sedimentarios del norte, como las regiones volcánicas del sur.

El patrón de drenaje a través de la región es muy ilustrativo, ya que el curso del río Chixoy o Negro está controlado por las diversas fallas existentes.

### **3.2.2. Subregión**

A esta zona le corresponde la subregión de la sierra de Chuacús que se localiza a partir de los municipios de Cunén, San Andrés Sajcabajá del departamento de Quiché, hasta Purulhá, Salamá y Rabinal del departamento de Baja Verapaz y parte del departamento de El Progreso; tiene alturas que van desde los 800 a los 2 500 msnm. Se observa un drenaje superficial subdendrítico, paralelo y subparalelo; hay presencia de rocas más antiguas (del paleozoico); otras intrusivas, metamórficas, sedimentarias y carbonatos. En algunas partes, hay depósitos pomáceos del cuaternario, aunque su edad geológica se atribuye al terciario.

Figura 3. **Mapa fisiográfico parte alta de la cuenta río Chixoy**



Fuente: elaboración propia, empleando ArcGis.

### **3.3. Región climática**

En la parte alta de la cuenca, el clima es semifrío, semiseco (sin incluir variaciones locales), y presenta también un invierno seco con variaciones no extremas de temperatura.

La lluvia de la parte alta de la cuenca se estima en 1 200 mm. Las barreras montañosas de la zona tienen una influencia determinante en las características climáticas de la cuenca del río Chixoy en general, y en especial en lo que concierne a la lluvia.

La cuenca del río Chixoy se encuentra atravesada en el camino de los principales vientos portadores de humedad, que son los alisios que soplan del noreste la mayor parte del año e invierten su dirección ocasionalmente durante el período seco e inicios del período húmedo.

A pesar de que la cuenca del río Chixoy se encuentra en el camino de los principales vientos portadores de humedad, no se recibe toda la lluvia que esta situación hace suponer. La razón es que la cuenca está rodeada de barreras montañosas, sobre las cuales esta humedad es descargada antes de llegar a la cuenca propiamente dicha.

### **3.4. Región hidrográfica e hidrológica**

Hidrográficamente, la cuenca del río Chixoy drena a la vertiente del golfo de México, constituyendo la parte alta de la cuenca del río Salinas o Usumacinta. De acuerdo con el Atlas Hidrológico (2005), publicado por el Insivumeh, la cuenca se identifica con el numeral 3,7.



Hidrológicamente pertenece a la región VIII, caracterizada como de mediana disponibilidad de escurrimiento superficial.

La parte alta de la cuenca colinda al norte con la cuenca del río Ixcán y río Xacbal, al este con la cuenca media del río Chixoy y río Motagua, al oeste con las cuencas del río Selegua y Nentón.

### **3.5. Geología**

La formación de suelos depende básicamente de la vegetación, del clima y de la dinámica geológica que exista, por lo tanto, el origen y formación de los mismos a través del tiempo por medio de la meteorización, ha determinado las formaciones terrestres en la parte alta de la cuenca, principalmente aluviales y coluviales (materiales de montaña), depositados en forma de valles rellenados y terrazas. Además existen formaciones rocosas, mediante la presencia de rocas sedimentarias, ígneas y metamórficas.

En las zonas estructuro-formacionales del área se pueden diferenciar cuatro pisos estructurales, formados a través de distintos mecanismos tectónicos y formas particulares, dados por diferencias litológicas y fallas tectónicas. Esta estructura está formada por:

- Un basamento paleozoico, catalogado como el piso más antiguo y presenta áreas con metamorfismo intenso. Estas se localizan en los municipios de Malacatancito y San Pedro Jocopilas.
- Las formaciones mesozoicas yacen sobre el basamento paleozoico. Estas se caracterizan por afloramientos de rocas y fallas de gravedad,

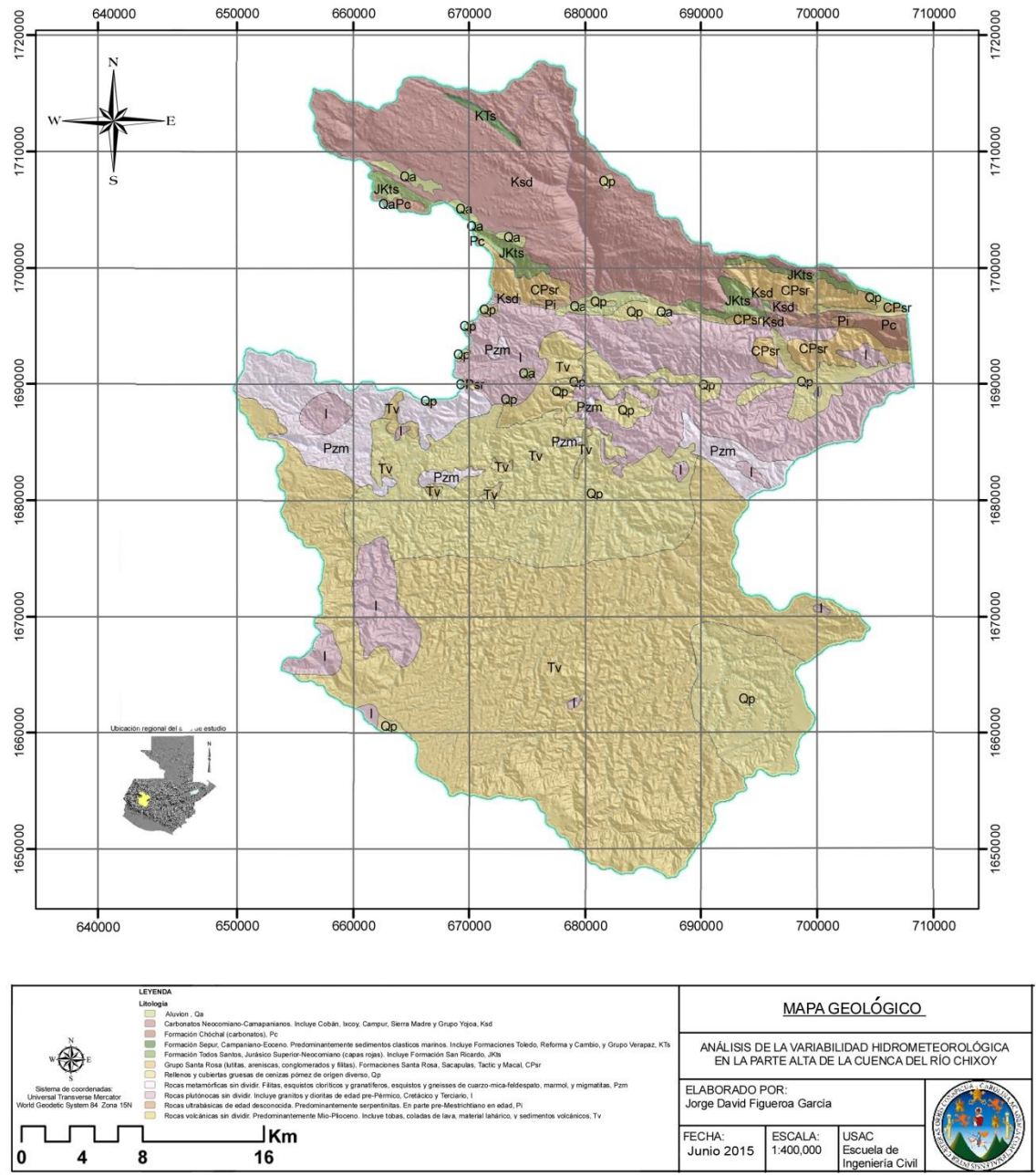


que van del este al oeste y del sureste al noreste. La longitud de estas varía de 2 a 40 km.

- Las formaciones terciarias se caracterizan, en general, por un fallamiento moderado, aunque la falla principal que atraviesa la cuenca es de tipo vertical, denominada gran falla del Polochic, la cual divide la formación mesozoica de la terciaria. Esta falla se orienta de este a oeste, por los municipios de Cunén, Sacapulas, Aguacatán, Chiantla y Huehuetenango.
- Las formaciones cuaternarias poseen un mecanismo principal de formación de cizallamiento, causado por la distensión y levantamiento de la gran falla del Polochic. Se localiza principalmente en los municipios de Aguacatán y Chiantla.

La actividad tectónica en la cuenca está dada por un desplazamiento continuo de las placas tectónicas del Caribe y Norte América. En el país se definen tres sistemas de fallas de tipo transcurrente: Polochic, Motagua y Jocotán. Datos históricos de sismicidad, demuestran que la falla del Polochic es la más activa de Guatemala, caracterizada por sismos de poca profundidad (5-40 km), de magnitudes hasta de 7,6 grados en la escala de Richter. Esta falla en la cuenca se ubica paralela a la cordillera de los Cuchumatanes, con orientación este-oeste. En su recorrido ha dado lugar a valles, sobre los cuales se han asentado las poblaciones de Sacapulas, Aguacatán, Chiantla y Huehuetenango. Además, en esta misma área existen pequeñas fallas de tipo normal o secundario, que provocan daños alineados por la dislocación del fallamiento. Debido a este sistema activo de fallas, el área norte de la parte alta de la cuenca ha sufrido una serie de fases erosivas fuertes en toda la pendiente de la línea de falla.

Figura 4. Mapa geológico parte alta de la cuenca río Chixoy



Fuente: elaboración propia, empleando ArcGis.

### **3.6. Geomorfología**

El área que conforma la parte alta de la cuenca se caracteriza por tener un relieve juvenil con una morfología abrupta, ángulos elevados de talud, valles profundos en V y drenaje consecuente controlado estructuralmente. Las unidades geomorfológicas de la zona son variadas en características; la más grande es la que presenta una topografía accidentada en donde las elevaciones mayores corresponden a la cordillera de los Cuchumatanes con elevaciones de más de 3 000 msnm y que influye sobre la subcuenca del río Blanco, otras zonas montañosas son las cercanas a Momostenango con elevaciones de más de 2 800 msnm. Es principalmente en esta unidad donde se llevan a cabo los procesos geomórficos que ocasionan la erosión y el transporte de sedimentos sea mayor.

### **3.7. Caracterización morfométrica**

Para la caracterización morfométrica se utilizó un modelo de elevación digital, DEM por sus siglas en inglés, para el área de interés; esto con el fin de obtener mejores resultados en el procesamiento de los datos. El DEM utilizado tiene una resolución de 20 metros pixel, obtenido de la base digital del Ministerio de Agricultura Ganadería y Alimentación (MAGA).

A continuación se presenta la tabla III con la ubicación del punto de control de la cuenca de interés para este estudio:

Tabla III. **Ubicación del punto de control de estudio DEM**

ID	Punto	Río Chixoy	Geográfica	
			Latitud	Longitud
1	A	hasta estación Chisiguán	15°17'42" N	91°04'16" O

Fuente: elaboración propia.

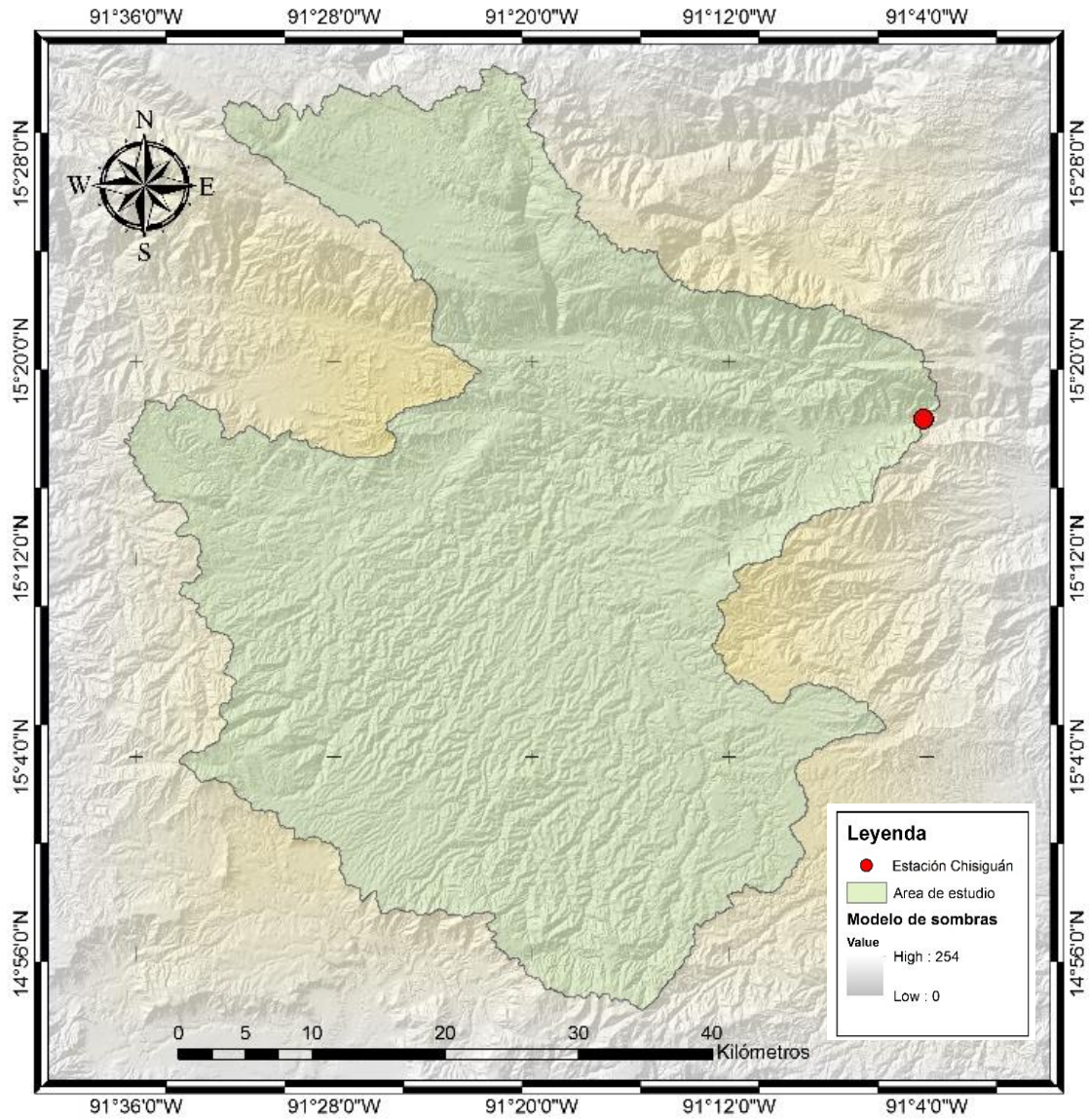
Para poder ubicar el punto de control sobre las hojas cartográficas, se realizó el cambio de proyección de geográficas a Guatemala Transversal Mercator (GTM), proyección única para Guatemala, recomendada por el Instituto Geográfico Nacional (IGN).

El punto de interés se encontraba bajo el sistema de coordenadas geográficas con datum WGS 84, estas se cambiaron a GTM con datum WGS 84, con el fin de acoplar el punto a la cartografía digital de Guatemala y realizar todos los procesos correspondientes mediante sistemas de información geográfica (SIG).

### **3.7.1. Delimitación del parteaguas de la cuenca**

El parteaguas de una cuenca identifica aquella zona cuya escorrentía superficial fluye hacia un solo punto de salida. La delimitación del parteaguas se llevó a cabo uniendo los puntos de mayor altitud o nivel topográfico que separan la cuenca en estudio de las cuencas vecinas a esta.

Figura 5. Mapa de delimitación parte alta de la cuenca río Chixoy



Fuente: elaboración propia, empleando ArcGis y modelo de elevación digital.

### 3.7.2. Área de la cuenca (Ak) y perímetro (Pk)

El área de la cuenca consiste en aquella que se encuentra encerrada dentro del parteaguas delimitado. Y el perímetro, consiste en la longitud del parteaguas que rodea la cuenca.

Tabla IV. **Área de la cuenca y perímetro de la cuenca para el estudio**

Punto de control	Área			Perímetro	
	m <sup>2</sup>	Ha	km <sup>2</sup>	m	km
Punto A	2196 402 688,62	219 640,27	2 196,4	440 094,12	440,09

Fuente: elaboración propia.

### 3.7.3. Longitud del cauce principal

Se le llama cauce principal a aquel que pasa por la salida o punto de control de la cuenca, generalmente tiene su origen en un manantial que se ubica en la parte alta.

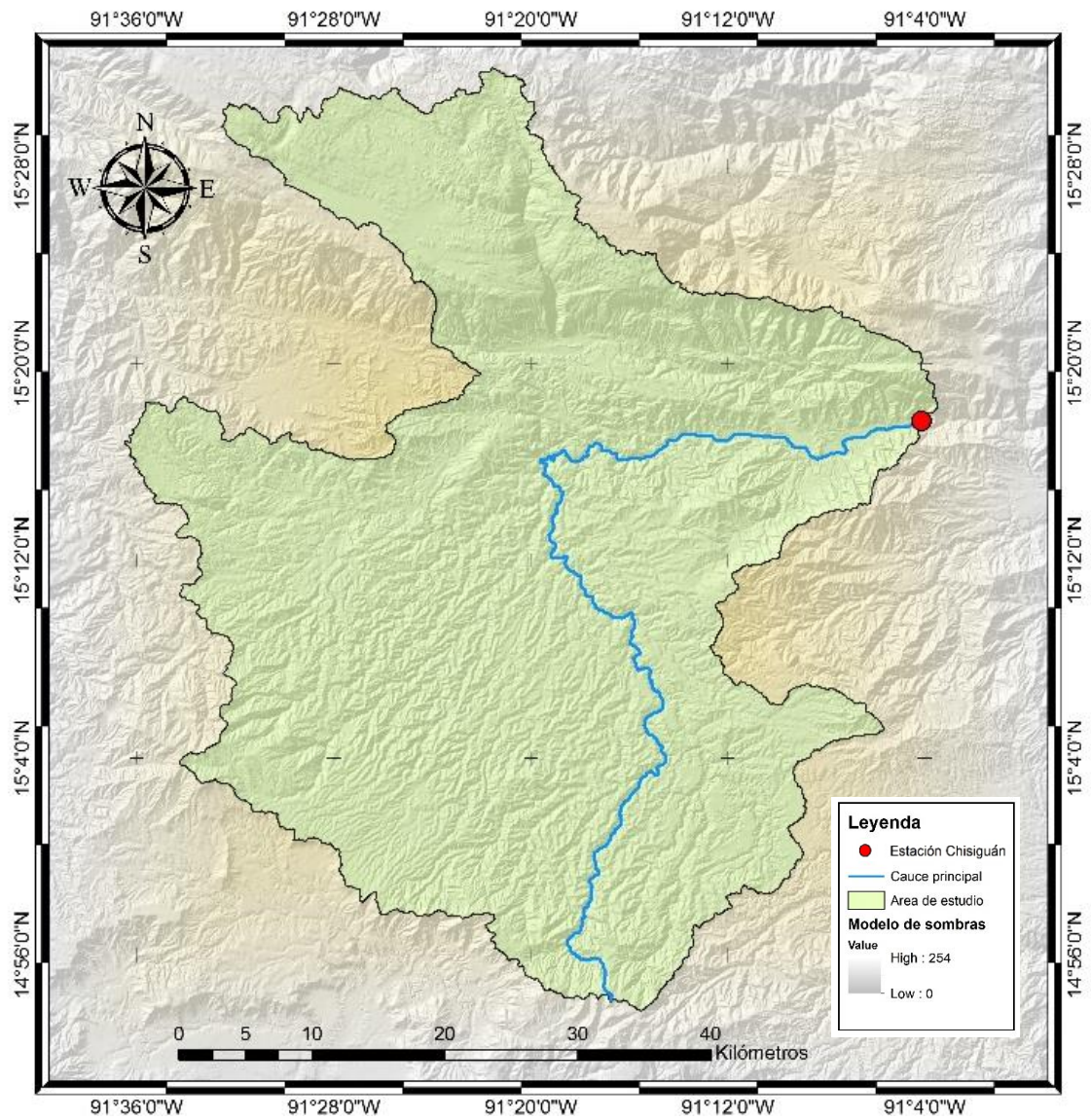
Tabla V. **Longitud del cauce principal para la cuenca en estudio**

Punto de control	Cauce principal	
	m	km
Punto A	98 994,15	99

Fuente: elaboración propia.



Figura 6. **Mapa del cauce principal parte alta de la cuenca río Chixoy**



Fuente: elaboración propia, empleando ArcGis y modelo de elevación digital.

#### **3.7.4. Forma de la cuenca**

La forma de la cuenca está relacionada con la rapidez, así la cuenca drena la escorrentía superficial producto de los eventos de precipitación o lluvia, a su vez esto se encuentra relacionado con el tiempo de concentración de la cuenca.

La forma de la cuenca se puede determinar por medio de índices los cuales establecen cuán circular es; mientras más se acerque la forma de la cuenca a un círculo mayor será su capacidad de drenaje dado que la escorrentía superficial llegará más rápidamente hacia el punto de control o de salida de la cuenca, dando como resultado caudales mayores si se comparan con los de una cuenca de igual área, pero cuya forma sea más alargada.

Los coeficientes utilizados para determinar la forma de la cuenca fueron la relación de forma, la relación circular y el índice de compacidad.

#### **3.7.5. Relación de la forma (Rf)**

Definido por Horton como la relación entre el área de la cuenca y el cuadrado de la longitud del cauce principal se determina por medio de la siguiente ecuación:

$$Rf = \frac{Ak}{Lc^2}$$

Donde

Ak = área de la cuenca

Lc = longitud del cauce principal



Dependiendo de los valores de la relación o coeficiente de forma, la cuenca puede clasificarse según se muestra en la tabla VI.

Tabla VI. **Forma de la cuenca en función del coeficiente**

<b>R<sub>f</sub></b>	<b>Forma</b>
0,73	Circular
1,00	Cuadrada con salida en el punto medio de los lados
0,50	Cuadrada con salida en una esquina
0,40 < R <sub>f</sub> < 0,50	Ovalada
R <sub>f</sub> < 0,30	Cuenca alargada

Fuente: elaboración propia.

Tabla VII. **Relación de forma para la cuenca de interés**

<b>Punto de control</b>	Ak	Lc <sup>2</sup>	Rf
	km <sup>2</sup>	km	
Punto A	2 196,4	99	0,224

Fuente: elaboración propia.

De la relación anterior, la parte alta de la cuenca del río Chixoy, hasta la estación de control Chisiguán, es alargada, ya que su valor es menor a 0,3.

### 3.7.6. **Relación de la forma circular (R<sub>c</sub>)**

Es el cociente del área de la cuenca entre el área de un círculo cuyo perímetro sea igual al de la misma; si el valor del coeficiente es cercano a uno,

la forma de la cuenca es circular y si su valor es 0,785 se dice que la cuenca tiene una forma cuadrada. Esta relación se expresa de la siguiente forma:

$$R_c = \frac{A_k}{A_c}$$

Donde

$A_k$  = área de la cuenca

$A_c$  = área de una circunferencia de perímetro igual al de la cuenca

Tabla VIII. **Relación de forma circular para la cuenca de interés**

Punto de control	$A_k$	$P_k$	$A_c$	$R_c$
	km <sup>2</sup>	km	km <sup>2</sup>	
Punto A	2 196,4	440,09	1 5412,5	0,1425

Fuente: elaboración propia.

### 3.7.7. Radio de elongación ( $R_e$ )

Es la relación entre el diámetro de una circunferencia de área igual al de la cuenca en estudio y la longitud del cauce principal o de mayor longitud.

$$R_e = \frac{\emptyset CA}{L_c}$$

Donde

$\emptyset CA$  = diámetro de una circunferencia de área igual al de la cuenca

$L_c$  = longitud del cauce principal

Tabla IX. **Relación de forma circular de la cuenca de interés del estudio**

Punto de control	Ak	Lc	$\varphi_c$	Re
	km <sup>2</sup>	km	km	
Punto A	2 196,4	99	52,88	0,53

Fuente: elaboración propia.

### 3.7.8. Índice de compacidad o de gravelius ( $K_c$ )

Es la relación entre el perímetro de la cuenca y el perímetro de un círculo con igual área que la de la cuenca. La clasificación de la forma de la cuenca de acuerdo a este índice se muestra en la tabla IX, el índice puede tener además, valores en el orden de 3 cuando se trata de cuencas muy alargadas.

Tabla X. **Forma de la cuenca de acuerdo al índice de compacidad**

$K_c$	Forma
$K_c \leq 1,00$	Circular
$1,00 < K_c < 1,25$	Casi redonda a oval redonda
$1,25 < K_c < 1,50$	Oval redonda a oval oblonga
$1,50 < K_c < 1,75$	Oval oblonga a rectangular
$3 > K_c > 1,75$	Alargada
$K_c > 3$	Muy alargada

Fuente: elaboración propia.

La expresión para determinar el valor del índice de compacidad de una cuenca es la siguiente:

$$K_c = \frac{P_k}{P_c} = \frac{P_k}{\sqrt{4 \cdot \pi \cdot A_k}}$$

Donde

P<sub>k</sub> = perímetro de la cuenca

A<sub>k</sub> = área de la cuenca

P<sub>c</sub> = perímetro de un círculo con un área igual al área de la cuenca

Tabla XI. **Forma de la parte alta de la cuenca del río Chixoy**

Área (km <sup>2</sup> )	Perímetro (km)	Índice de compacidad
2 196,4	440,09	2,64

Fuente: elaboración propia.

De acuerdo a los valores mostrados en la tabla X se concluye que al tener el índice un valor cercano a tres, la cuenca bajo estudio tiene una forma rectangular alargada; lo cual es acorde a los dos índices calculados con anterioridad para determinar la forma de la cuenca.

### **3.8. Caracterización biofísica**

Se refiere a describir los tipos de cauces en la cuenca, según su cantidad, temporalidad y características particulares, según los siguientes parámetros:

#### **3.8.1. Red fluvial**

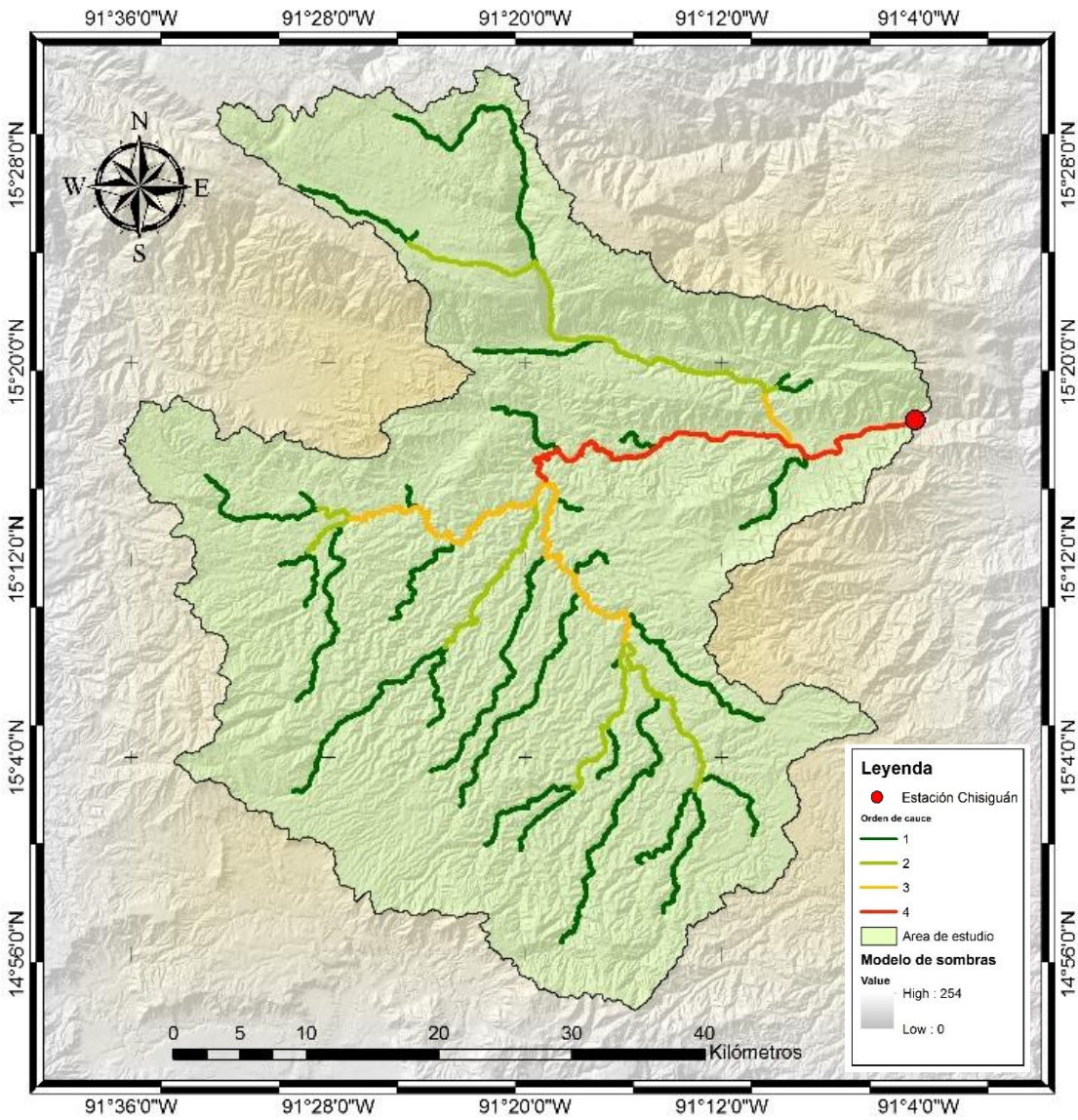
Se estableció la existencia, dentro de la cuenca, de cauces permanentes, intermitentes y efímeros, así como la cantidad correspondiente a cada tipo de cauce identificado. Los cauces permanentes son aquellos que conducen agua

todo el tiempo (tienen aporte de las aguas subterráneas), los intermitentes aquellos que lo hacen durante determinado tiempo (durante la época lluviosa debido a que el nivel freático sube) y los efímeros (aquellos que conducen agua inmediatamente después de eventos de lluvia).

El orden de las corrientes determina cuan ramificados son los cauces de una cuenca, para determinar el orden de la cuenca en estudio se utilizó el método de Horton-Strahler por ser uno de los más utilizados y presentar mayor facilidad respecto a otras metodologías.

De acuerdo a Ven Te Chow, el método funciona de la siguiente forma: a los cauces que no tienen tributarios se les asigna un orden de corriente uno (generalmente cauces intermitentes), cuando dos cauces de orden 1 se unen forman un cauce de orden 2 aguas abajo; en general, cuando dos canales de orden  $i$  se unen, resulta un canal de orden  $i + 1$ . Cuando un tributario de orden bajo se une con un tributario de orden mayor, el tributario resultante hacia aguas abajo retiene el mayor de los dos órdenes. El orden de la cuenca de drenaje es el del río a su salida, el mayor orden en la cuenca.

Figura 7. Orden de corrientes parte alta de la cuenca río Chixoy



Fuente: elaboración propia, empleando ArcGis y modelo de elevación digital.

Tabla XII. **Orden de corrientes y longitud por orden de corrientes**

<b>Orden de corrientes (u)</b>	<b>Número de corrientes (Nu)</b>	<b>Longitud de corrientes (Lu en km)</b>
1	32	293,37
2	7	92,5
3	3	48,1
4	1	37,7

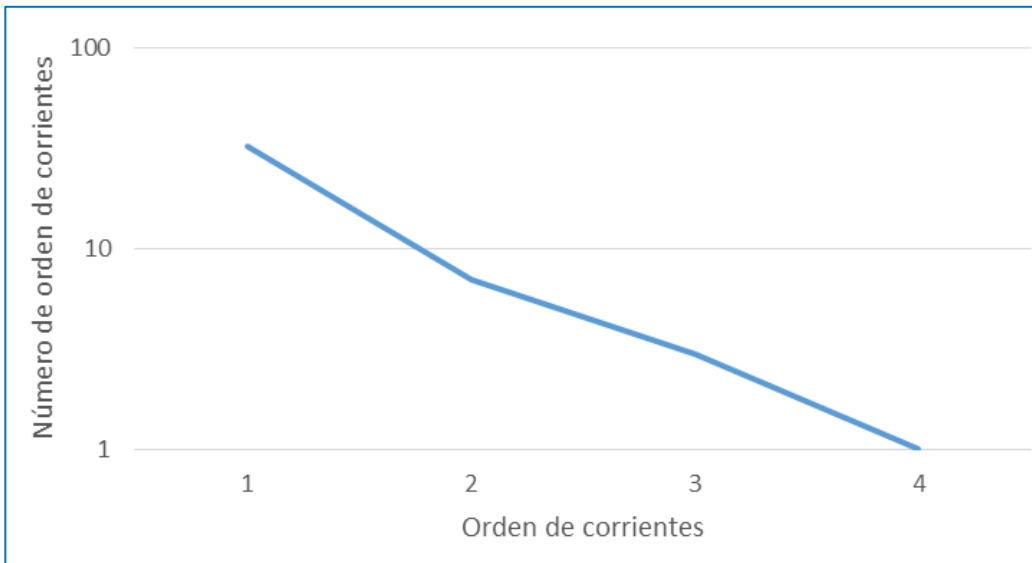
Fuente: elaboración propia.

Por lo tanto la parte alta de cuenca Chixoy hasta la estación Chisiguán es una cuenca de orden 4.

### **3.8.2. Número de corrientes y orden de corrientes**

Esta gráfica se traza para revisar si se asignó correctamente el orden a las corrientes de la cuenca y debe tener una pendiente negativa; esto se debe a que conforme el orden de las corrientes aumenta, la cuenca se vuelve menos ramificada, por lo tanto debe haber un mayor número de corrientes de orden 1 que de orden 2 y así sucesivamente. La figura 8 muestra la gráfica para la cuenca en estudio.

Figura 8. Gráfica de Log Nu versus U



Fuente: elaboración propia.

### 3.8.3. Longitud media de corrientes (Lu)

La longitud media de corrientes es aquella longitud que, en promedio, tienen las corrientes dependiendo de su orden. Se obtiene dividiendo la longitud total de corrientes de determinado orden entre la cantidad de corrientes; la expresión para determinar su valor es la siguiente:

$$\bar{Lu} = \frac{\sum Lu_i}{Nu}$$

Donde

Lu = longitud de corriente

Nu = número de corrientes de orden u



Tabla XIII. **Determinación de la longitud media de corrientes**

Orden de corrientes (u)	Número de corrientes (Nu)	Longitud de corriente (Lu)	Longitud media de corriente ( $\bar{Lu}$ )
1	32	293 373,5 m	9 167,92 m
2	7	92 502,6 m	13 214,65 m
3	3	48 100,0 m	16 033,33 m
4	1	37 713,3 m	37 713,3 m
<b>Total</b>	<b>43</b>	<b>471 689,4 m</b>	<b>10 969,52 m</b>

Fuente: elaboración propia.

La columna de longitud media de corrientes ( $\bar{Lu}$ ) indica la longitud promedio dependiendo del orden asignado en el inciso anterior; al dividir la longitud total que se obtiene sumando todas las longitudes (Lu) entre el total de corrientes de la cuenca (43 corrientes) se tiene que en promedio los cauces tienen una longitud de 10 969,52 metros (10,97 km).

#### 3.8.4. Longitud acumulada de corrientes

Es la longitud que se obtiene al sumar todas las longitudes de los diferentes órdenes de corrientes, también puede obtenerse como se muestra en la siguiente expresión:

$$La = \sum \bar{Lu} * Nu$$

Donde:

$\bar{Lu}$  = longitud media de corriente

Nu = número de orden de corriente

Tabla XIV. **Determinación de la longitud acumulada de corrientes**

<b>Número de corrientes (Nu)</b>	<b>Longitud media de corriente (<math>\overline{Lu}</math>)</b>	<b>Longitud acumulada de corrientes (La)</b>
43	10 969,52 m	471 689,4 m

Fuente: elaboración propia.

La longitud acumulada de corrientes para la cuenca es de 471 689,4 metros (471,6 km) que son el total de cauces permanentes, intermitentes y efímeros.

### **3.8.5. Radio de bifurcación medio (Rb)**

Es la relación entre el número de corrientes de un orden dado (u) y el del orden superior siguiente (u+1), la ecuación para determinar el radio de bifurcación entre órdenes de corrientes es la siguiente:

$$Rb_i = \frac{Nu}{N(u + 1)}$$

Donde

Nu = número de corrientes de orden u

N (u+1) = número de corrientes de orden superior

Al promedio de radio de bifurcación se le denomina radio de bifurcación medio y se calcula con la siguiente expresión:

$$Rb = \frac{\sum Rb_i}{n}$$

Tabla XV. **Determinación del radio de bifurcación y el radio de bifurcación medio de la cuenca**

Orden de corrientes (u)	Número de corrientes (Nu)	Rb <sub>i</sub>
1	32	--
2	7	32/7 = 4,57
3	3	7/3 = 2,33
4	1	3/1 = 3
	<b>Rb</b>	<b>(4,57 + 2,33 + 3)/3 = 3,3</b>

Fuente: elaboración propia.

Para la cuenca del río Chixoy hasta la estación Chisiguán tiene un radio de bifurcación de 4,57 para corrientes de orden 2, esto indica que hay en promedio 4,57 corrientes de orden 1 por cada una de orden 2; para los diferentes órdenes de corrientes el radio de bifurcación se indica en la tabla XV. El radio de bifurcación medio tiene un valor de 3,3 para toda la cuenca, lo que indica que en promedio por cada corriente de orden inferior se tienen 3,3 corrientes de orden superior.

### 3.8.6. Radio de longitud media (RI)

Es el promedio de la relación entre la longitud de corrientes de orden superior (u) y la del orden inferior (u-1), la ecuación para calcularla es la siguiente:

$$\bar{RI} = \frac{\sum \frac{L_u}{L_{(u-1)}}}{n}$$

Donde

L<sub>u</sub> = longitud de corriente

L (u-1) = longitud de corriente de orden inferior

Tabla XVI. **Determinación del radio de longitud media**

Orden de corrientes (u)	Longitud media de corriente ( $\bar{L}_u$ )	Radio de longitud media ( $R_{I_i}$ )
1	293 373,5 m	--
2	92 502,6 m	$92\ 502,6 / 293\ 373,5 = 0,315$
3	48 100 m	$48\ 100 / 92\ 502,6 = 0,52$
4	37 713,3 m	$37,713,3 / 48\ 100 = 0,78$
<b>Radio de longitud media (<math>\bar{R}_I</math>)</b>		<b><math>(0,315 + 0,52 + 0,78)/3 = 0,54</math></b>

Fuente: elaboración propia.

Se obtuvo un radio de longitud media de 0,54 km, lo cual significa que se tienen en promedio 0,54 km de cauce de orden superior por cada kilómetro de cauce de orden inferior; en la tabla XVI también se observa el radio de longitud media por cada orden de corriente de la cuenca.

### 3.8.7. Frecuencia o densidad de corrientes ( $F_c$ )

Es la cantidad de corrientes o cauces que existen en la cuenca por unidad de área, en el caso de la cuenca en estudio se utilizó como unidad de área el kilómetro cuadrado. La tabla XVII muestra los datos utilizados para calcular la densidad de corrientes y el valor obtenido (0,02 corrientes/km<sup>2</sup>), este valor puede considerarse como una densidad de corrientes baja, lo cual puede significar una respuesta tardía de la cuenca ante eventos de lluvia.

Tabla XVII. **Determinación de la densidad de corrientes**

Número total de corrientes	Área de la cuenca (km <sup>2</sup> )	Densidad de corrientes (corrientes/km <sup>2</sup> )
43	2 196,4	$43/2\ 196,4 = 0,02$

Fuente: elaboración propia.

Una cuenca con densidad de corrientes mayor tendrá una respuesta rápida ante eventos de lluvia debido a que, por tener mayor concentración de cauces por unidad de área, la escorrentía superficial llegará más rápido al punto de control y, por lo tanto tendrá caudales pico o de crecida mayores que si dicha cuenca tuviera una densidad de corrientes menor.

### 3.8.8. Densidad de drenaje (D)

Son los kilómetros de cauce o corriente que hay en la cuenca por unidad de área; al igual que la densidad de corrientes, las cuencas con densidad de drenaje bajas tendrán caudales de crecida menores si se comparan con cuencas similares, pero con mayor densidad de drenaje. La ecuación utilizada para calcular la densidad de drenaje de una cuenca es la siguiente:

$$D = \frac{L_a}{A_k}$$

Donde

$L_a$  = longitud acumulada de corrientes

$A_k$  = área de la cuenca

Tabla XVIII. **Determinación de la densidad de drenaje de la cuenca**

Longitud acumulada de corrientes (km)	Área de la cuenca (km <sup>2</sup> )	Densidad de drenaje (km/km <sup>2</sup> )
471,7	2 196,4	0,22

Fuente: elaboración propia.

Al tener la cuenca una densidad de drenaje baja se concluye, al igual que en el inciso anterior, que la cuenca tiene una respuesta tardía ante eventos de lluvia debido a que la escorrentía superficial debe viajar mucho más antes de llegar a un cauce que conduzca hacia el punto de control o de salida de la cuenca.

### 3.8.9. Pendiente media de la cuenca

Es la pendiente que, en promedio, la superficie de la cuenca tiene, de acuerdo a la pendiente media de la cuenca el terreno puede clasificarse como se muestra en la tabla XIX:

Tabla XIX. **Clasificación de la pendiente en las cuencas hidrográficas**

<b>Pendiente (%)</b>	<b>Tipo de terreno</b>
2	Plano
5	Suave
10	Accidentado medio
15	Accidentado
25	Fuertemente accidentado
50	Escarpado
> 50	Muy escarpado

Fuente: elaboración propia.

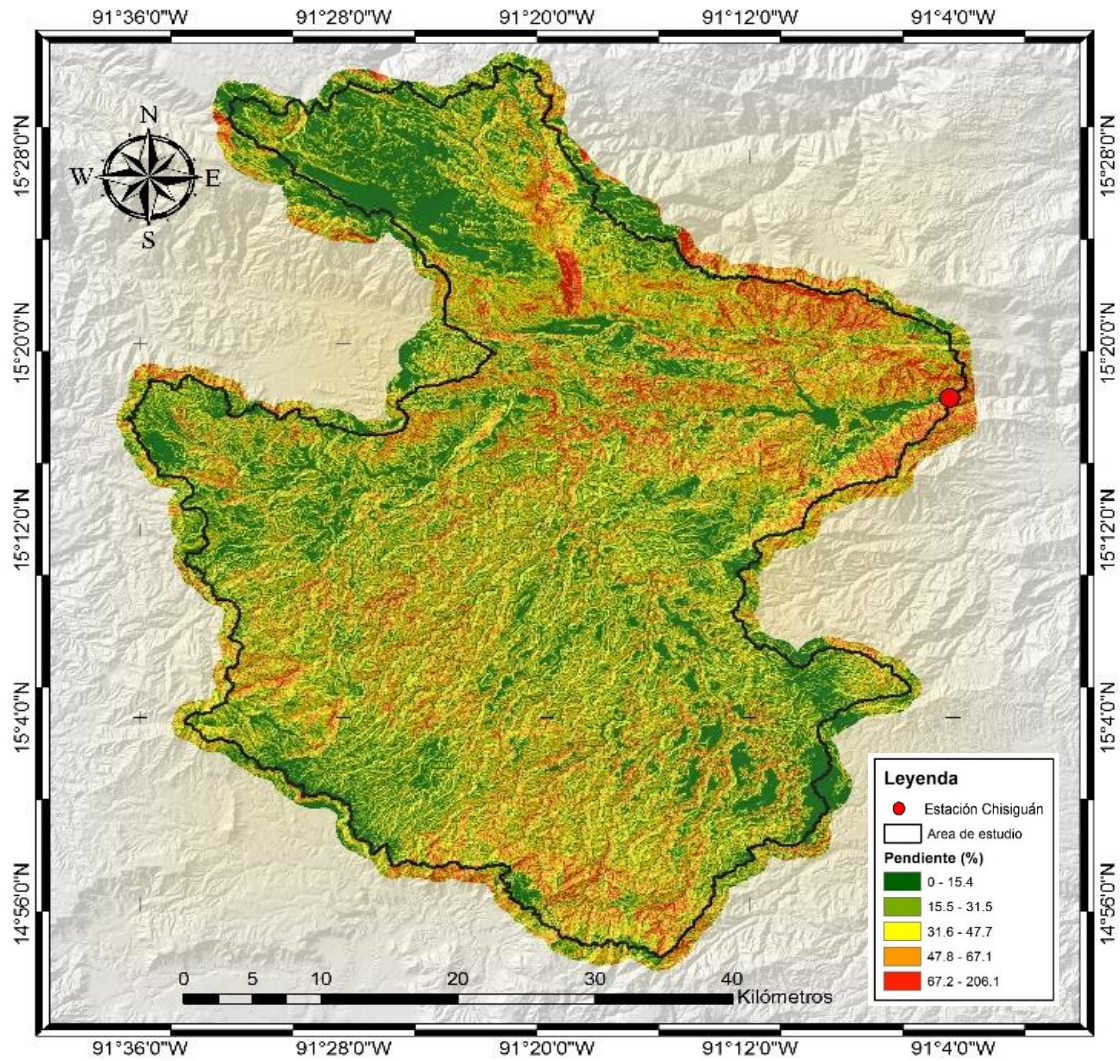
De acuerdo a lo obtenido para la parte alta de la cuenca, por medio de sistemas de información geográfica, las pendientes de la cuenca van de un mínimo de 0 % a un máximo de 178 % (terreno plano a muy escarpado), teniendo una pendiente media de 33 % según la tabla XIX (terreno fuertemente accidentado a escarpado).

Tabla XX. Pendiente de la cuenca Chixoy hasta estación Chisiguán

Cuenca	Pendiente (%)			
	Mínima	Máxima	Media	Desviación estándar
Área de estudio	0	178	33	20

Fuente: elaboración propia.

Figura 9. Mapa de pendientes parte alta cuenca del río Chixoy



Fuente: elaboración propia, empleando ArcGis y modelo de elevación digital.

### 3.8.10. Pendiente media del cauce principal (Scp)

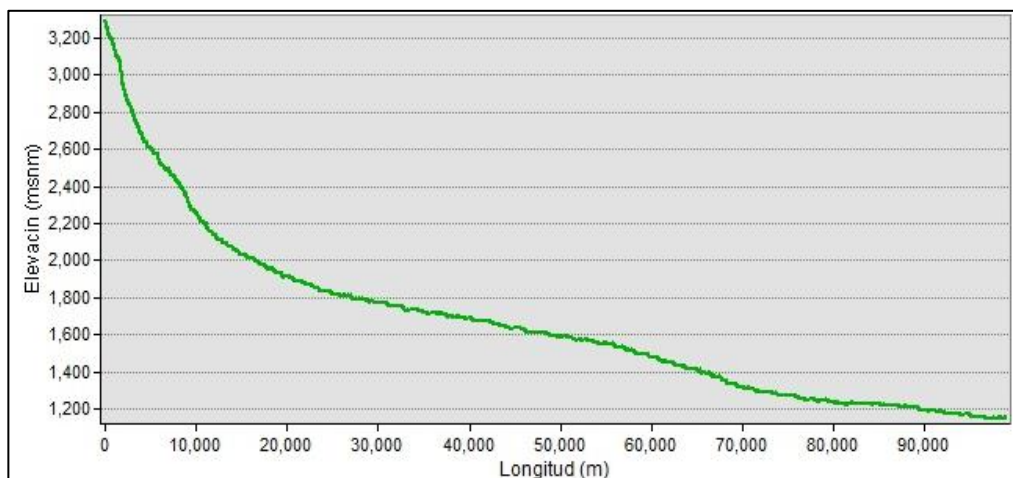
Por medio de sistemas de información geográfica se calculó la pendiente existente entre tramos uniformes del cauce principal de la cuenca, posterior a ello se calculó el promedio de las pendientes entre tramos dando como resultado una pendiente media del cauce principal del 10,7%; siendo la pendiente máxima del cauce del 67,5% y la mínima 0%. De manera complementaria se adjunta en la figura 10 el perfil del cauce principal.

Tabla XXI. Pendiente media del cauce principal de la cuenca

Cauce	Pendiente (%)			
	Mínima	Máxima	Media	Desviación estándar
Área de estudio	0	67,5	10,7	8

Fuente: elaboración propia.

Figura 10. Perfil del cauce principal hasta estación Chisiguán



Fuente: elaboración propia.



### 3.8.11. Elevación máxima, media y mínima de la cuenca

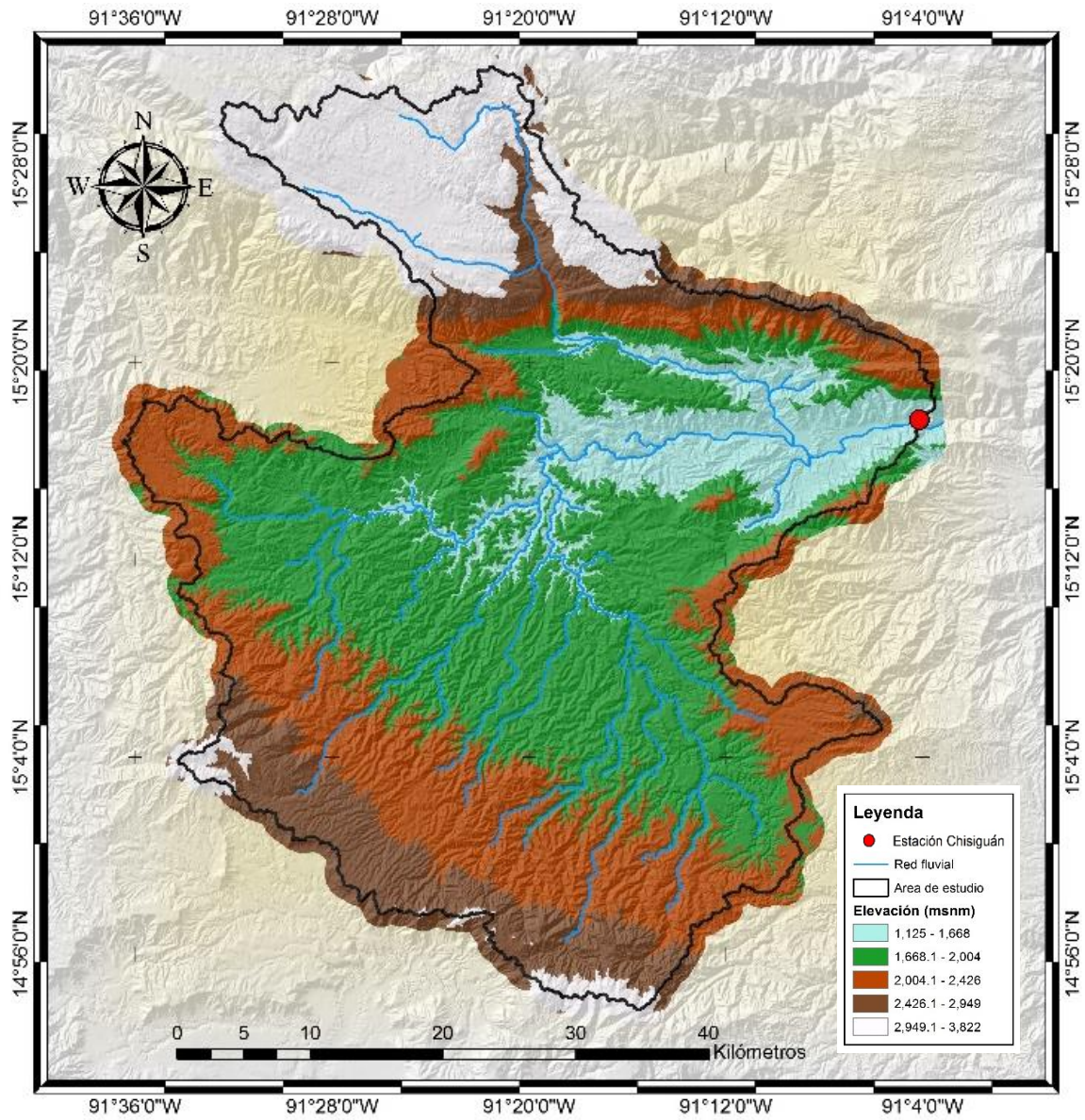
Se trata de las principales alturas en la cuenca, para la cuenca en estudio las alturas mínima y máxima se relacionan con el perfil del cauce principal del inciso previo. La altura media de la cuenca representa la elevación en la cual el área aguas arriba de dicho punto es la misma área que la que se ubica aguas abajo (50 % del área de la cuenca). Los valores de estas alturas pueden observarse en la siguiente tabla.

Tabla XXII. **Alturas características de la cuenca**

Cuenca	Elevación (msnm)			
	Mínima	Máxima	Media	Desviación estándar
<b>Área de estudio</b>	1 146	3 821	2 140,17	517

Fuente: elaboración propia.

Figura 11. Mapa de elevación parte alta cuenca del río Chixoy

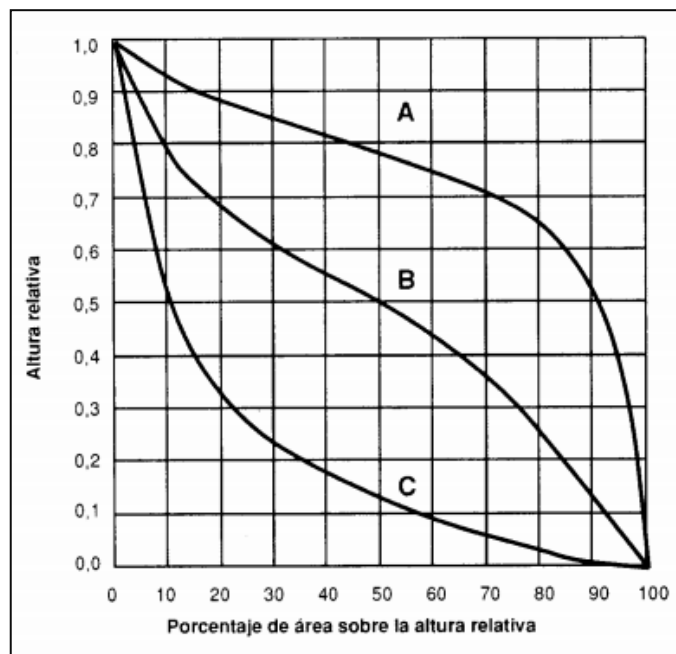


Fuente: elaboración propia, empleando ArgGis y modelo de elevación digital.

### 3.8.12. Curva hipsométrica

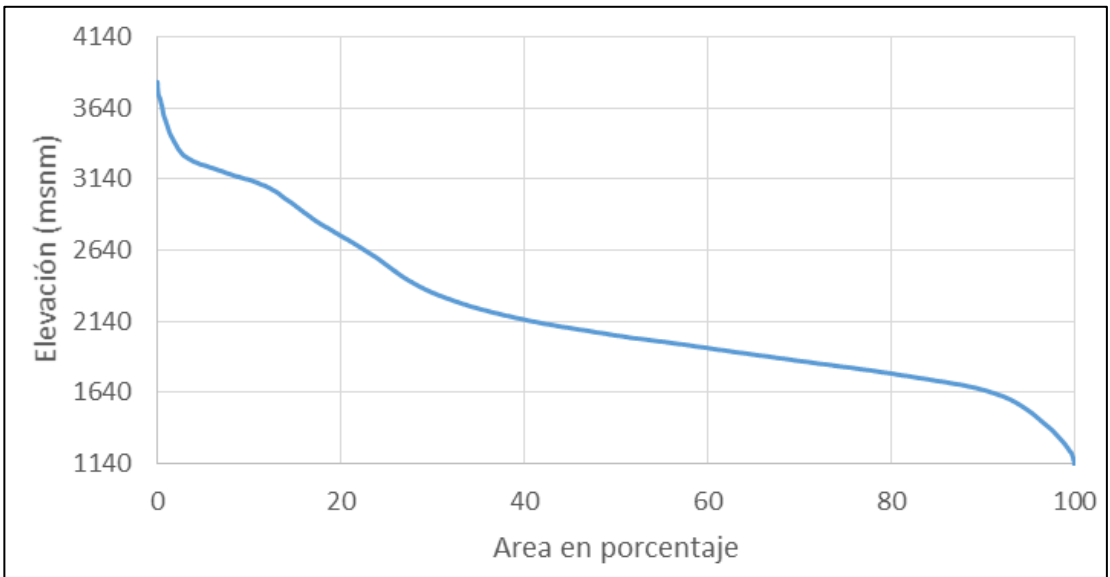
Representa el porcentaje de área de la cuenca que se ubica aguas arriba de cada altura o elevación. La curva hipsométrica, también es de utilidad para determinar el valor de la altura media del apartado anterior, al ubicar la coordenada vertical correspondiente al 50 % del área. Otra de sus funciones es determinar el comportamiento del cauce en cuanto a la deposición de sedimentos y la erosión de la cuenca, como también clasificar el comportamiento de la cuenca en función de la forma de la curva (cuencas jóvenes con gran capacidad erosiva, cuencas en fase de madurez o de equilibrio y cuencas en etapa de vejez, las cuales se denominan también cuencas sedimentarias).

Figura 12. **Curvas hipsométricas características del ciclo de erosión**



Fuente: LLAMAS, J., *Hidrología general*.p.36.

Figura 13. **Curva hipsométrica parte alta cuenca del río Chixoy**



Fuente: elaboración propia.

La curva hipsométrica obtenida mediante un modelo de elevación digital (DEM a cada 20 m) se muestra en la figura 13; al comparar la curva con los criterios de madurez de la figura anterior, la cuenca del río Chixoy hasta la estación Chisiguan se puede clasificar como una cuenca sedimentaria.

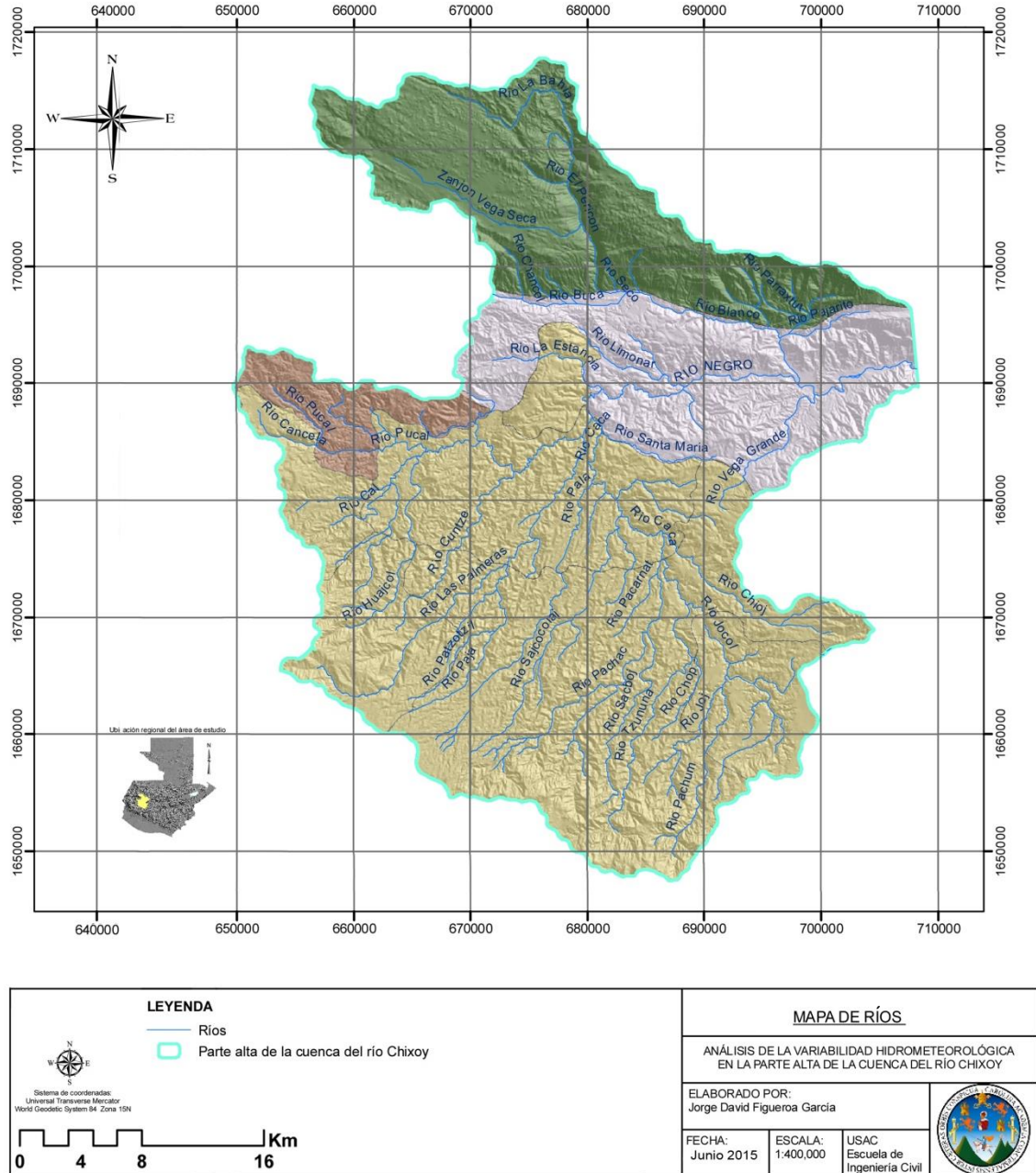
### **3.8.13. Patrón de drenaje**

La red hidrográfica del río Chixoy se encuentra sumamente controlada por fallas estructurales, en pocos casos es debido a la influencia directa de la litología. El control estructural se manifiesta en el alineamiento de las quebradas y los cambios bruscos y ángulos de las corrientes.

Los tributarios de la parte sur del río Negro presentan una dirección hacia el noreste, el ordenamiento del drenaje es variado desde un patrón subdendrítico (las corrientes o tributarios del río principal se unen a él en ángulos agudos, esto pone de manifiesto un incipiente control estructural y el efecto de laderas muy empinadas sobre las cuales se desarrollan los ríos tributarios) consecuente hasta un patrón paralelo (se caracteriza por contar con corrientes principales y tributarios paralelos. Se presentan generalmente donde existen pendientes pronunciadas o controles estructurales que conducen a corrientes paralelas o casi paralelas regularmente espaciadas). Los ríos más grandes siguen el curso de las fallas principales del sistema de fallas del Polochic (al este), por ejemplo, los ríos Blanco, Negro y Carchelá. Los afluentes que caen a estos ríos lo hacen en ángulo recto y forman ordenamiento del drenaje de tipo subparalelo.

Únicamente las partes más altas de la margen izquierda del río Negro muestran una influencia litológica en el drenaje.

Figura 14. Mapa de ríos parte alta de la cuenca río Chixoy



Fuente: elaboración propia, empleando ArcGis.

### 3.8.14. Tipo de cauce y transporte de sedimentos

Según el consorcio LAMI en el año 1980 se obtuvieron, en la estación hidrométrica Chisiguán, 2 465 782 ton/año de sedimentos para un área de 2 245 kilómetros cuadrados. Sin embargo, información generada posteriormente por Ing. Arturo Acajábón en 1988 y Ernest Pemberton en 1989 ambos del INDE, obtuvieron los siguientes resultados de los sedimentos en suspensión de las áreas en estudio:

Tabla XXIII. **Sólidos en suspensión, al punto de control de estudio**

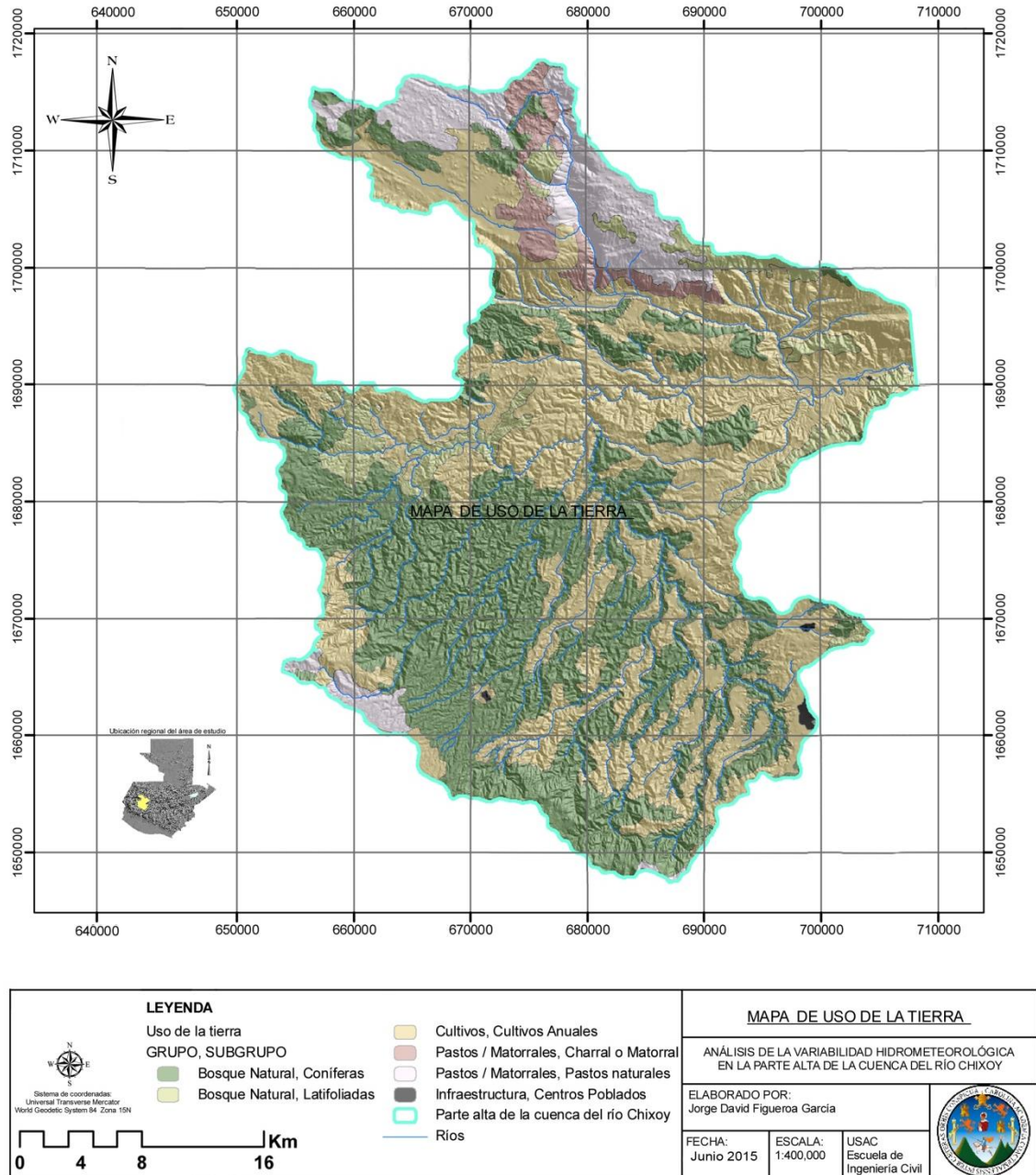
<b>Estación</b>	<b>Área (km<sup>2</sup>)</b>	<b>Años de registro</b>	<b>Sólidos en suspensión (ton/km<sup>2</sup>/año)</b>
Paradillo	1 363	1977-1987	818
Chisiguán	2 245	1969-1984	608
Chisiguán	2 245	1969-1987	623

Fuente: Caracterización embalse Chixoy, INDE 2012.

Los valores de sólidos en suspensión para el punto de control de la estación Chisiguán indicados anteriormente, representaban 1 398 635 ton/año, cantidad que seguramente aumentó, principalmente por la erosión de los suelos, debido a la pérdida de cobertura forestal y cambios en el uso del suelo.



Figura 15. Mapa de uso del suelo parte alta de la cuenca río Chixoy



Fuente: elaboración propia, empleando ArcGis.



### **3.9. Zona de vida**

Las zonas de vida predominantes en la parte alta de la cuenca del río Chixoy, de acuerdo a la clasificación de zonas de vida de Guatemala a nivel de reconocimiento realizado por De La Cruz (1982), son las siguientes:

- Bosque húmedo subtropical templado (bh-St)
- Bosque seco subtropical (bs-S)
- Bosque húmedo montano subtropical (bh-M)



## **4. ESTACIONES DE OBSERVACIÓN**

### **4.1. Estación meteorológica**

Según la Organización Meteorológica Mundial son sitios en donde se pueden realizar observaciones y mediciones puntuales de los diferentes elementos del tiempo y clima, utilizando instrumentos apropiados y con el fin de establecer el comportamiento atmosférico en las diferentes regiones del planeta.

#### **4.1.1. Componentes de una estación meteorológica**

Las partes e instrumentación que integran una estación meteorológica, dependiendo su clase y variables medidas pueden ser:

##### **4.1.1.1. Terreno circundante**

Debe ser plano y libre de obstrucciones y obstáculos que los rodean. El suelo debe estar cubierto y debe ser circulado por una malla metálica.

##### **4.1.1.2. Parcela meteorológica**

Porción de terreno rectangular o cuadrado que está destinado para la protección de los instrumentos al aire libre y también en él está integrado un abrigo meteorológico.

Figura 16. Parcela meteorológica



Fuente: estación San Antonio Ilotenango, Quiché, mayo 2015.

#### 4.1.1.3. Abrigo meteorológico

Su función es proteger los instrumentos más sensibles como los termómetros, sicrómetros, termohigrógrafos, evaporímetros, higrómetros, termógrafos e hidrógrafos. Tiene que estar construido de tal forma que, permita la libre circulación del aire para mantener la temperatura. Las paredes y puertas deben estar formadas por dobles persianas, para impedir el acceso de la radiación solar, el techo exterior deber ser inclinado para dejar escurrir el agua de lluvia.

Figura 17. **Abrigo meteorológico**



Fuente: estación Xequemeyá, Momostenango, Totonicapán, mayo 2015.

#### **4.1.1.4. Instrumentación**

Son los equipos e instrumentación para medir las variables meteorológicas y están distribuidos dentro de la parcela meteorológica, pudiendo mencionar:

- **Pluviómetro:** consiste en un cilindro cuya boca receptora tiene un área de 200 centímetros cuadrados, por un anillo de bronce con borde biselado, en la parte superior unido al borde biselado cuyo fondo tiene forma de embudo y ocupa aproximadamente la mitad del cilindro. El agua



recogida va a través del embudo a una vasija de boca estrecha llamada colector, y para evitar la evaporación por calentamiento, está aislada del cilindro exterior. Para la medición del agua recolectada en el pluviómetro se utiliza una probeta de vidrio o de plástico graduado con una escala de milímetros o pulgadas.

Figura 18. **Pluviómetro**



Fuente: estación Serchil, Malacatancito, Huehuetenango, mayo 2015.

Para el caso de las estaciones meteorológicas de Totonicapán, Tierra Blanca, Xequemeyá y El Paradillo (red INDE), además de contar con pluviómetro convencional, estas disponen de pluviómetro digital, como parte de los instrumentos de las estaciones telemétricas satelitales instaladas dentro de la parcela meteorológica.

Figura 19. **Pluviómetro estación telemétrica satelital**



Fuente: estación Totonicapán, mayo 2015.

- Pluviógrafo: instrumento para registrar y medir la precipitación de manera ininterrumpida. Los registros pueden definir la cantidad de precipitación, el tiempo que esta utilizó, con lo cual se puede analizar la distribución de la lluvia en el tiempo, para así calcular la intensidad de lluvia.

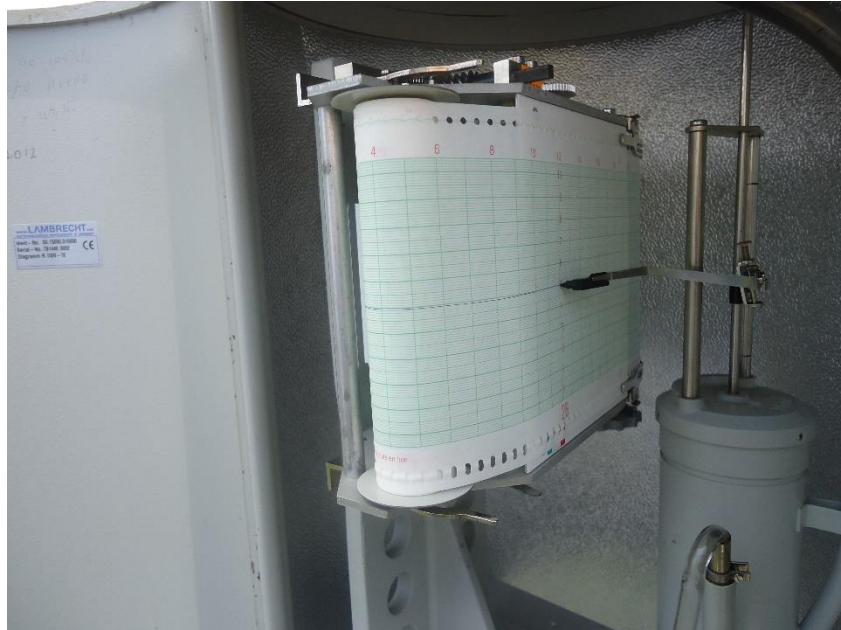
Figura 20. **Pluviógrafo**



Fuente: estación Serchil, Malacatancito, Huehuetenango, mayo 2015.



Figura 21. **Mecanismo de registro de precipitación pluviógrafo**



Fuente: estación Totonicapán, mayo 2015.

- Termómetro de máxima: permite conocer la temperatura más alta presentada en un día o en período determinado de tiempo. Se presenta dos o tres horas después del mediodía, cuando el suelo ha absorbido durante varias horas la radiación solar.
- Termómetro de mínima: permite conocer la temperatura más baja presentada en dos observaciones. Por la noche y madrugada, la ausencia de radiación solar directa la pérdida de calor debido a la radiación terrestre se traduce en un descenso de la temperatura de la superficie del globo; tal enfriamiento en noches con cielo despejado puede provocar la formación de heladas y nieblas, por el contrario en noches con el cielo cubierto las temperaturas mínimas son más altas.

Figura 22. **Termómetro de máxima y mínima**



Fuente: estación San Antonio Ilotenango, Quiché, mayo 2015.

- Heliógrafo: instrumento que se utiliza para medir la duración del brillo solar (es el tiempo durante el cual el sol brilla en el cielo durante un tiempo determinado en horas, días, meses), integrado por una esfera de cristal que actúa como lente convergente en todas direcciones. El foco se forma sobre una banda de registro de cartulina que se dispone curvada concéntricamente con la esfera; cuando el sol brilla, quema la cartulina dejando marcado sobre la banda un surco en la salida hasta la puesta del sol.

Figura 23. **Heliógrafo**



Fuente: estación San Antonio Ilontenango, Quiché, mayo 2015.

- Tanque de evaporación: es un cilindro de 25,4 centímetros de profundidad y 120,7 centímetros de diámetro construidos de hierro galvanizado o de otro material resistente a la corrosión. El nivel del agua se mide mediante un milímetro de punta, este medidor en un vástago con tornillo graduado en milímetros que va roscado en un soporte de tres patas con una tuerca de ajuste micrómetro, que define las décimas de milímetro.

Figura 24. **Tanque de evaporación**



Fuente: estación San Antonio Ilotenango, Quiché, mayo 2015.

- Anemómetro: constituido por un molinete de tres o cuatro brazos, con eje vertical; cada brazo de la cruz lleva en su extremo una cazoleta semiesférica o cónica, preferiblemente hueca, dispuesta de modo que su borde circular se encuentra en un plano vertical, siendo el brazo su diámetro horizontal. Las cazoletas deben presentar su concavidad dirigida a un mismo sentido, a través de sus engranajes actúa un contador de vueltas que marca el recorrido total del viento.



Figura 25. **Anemómetro**



Fuente: estación La Capellanía, Chiantla, Huehuetenango, mayo 2015.

- Anemógrafo: constituido por un anemómetro de cazoleta y una veleta que van conectados a un mecanismo de velocidad y dirección de viento. Para el caso de las estaciones meteorológicas utilizadas en el estudio, las estaciones de Totonicapán, Tierra Blanca, Xequemeyá, El Paradillo, Huehuetenango y Nebaj, poseen anemógrafo, las dos últimas (red Insivumeh) con instrumento convencional y en las primeras cuatro (red INDE) el instrumento es parte del equipo de la estación telemétrica satelital instalada dentro de la parcela meteorológica.

Figura 26. **Anemógrafo estación telemétrica satelital**



Fuente: estación Xequemeyá, Momostenango, Totonicapán, mayo 2015.

## 4.2. Estación hidrométrica

Las estaciones hidrométricas consisten, esencialmente, en una o varias reglas graduadas (escalas o limnímetros) colocadas escalonadamente en una sección de río, arroyo, laguna o embalse, perfectamente verticales y niveladas entre sí y con referencia a un plano fijo.

Donde es posible (por la topografía del lugar, la existencia de infraestructura y accesos mínimos) se colocan además, instrumentos automáticos de registro continuo (limnógrafos).

La automatización de las estaciones permite tener una mayor continuidad de datos y reducir errores por factores humanos, pero en cambio requiere mayor especialización en la instalación, operación y mantenimiento de los instrumentos.

El nivel de agua de ríos, lagos y embalses se usa directamente para la predicción de crecidas, para la delimitación de zonas con riesgo de inundación y para el diseño de estructuras en cursos o masas de agua o cerca de ellas. Cuando se relaciona con los caudales de las corrientes o con el volumen de almacenamiento de embalses y lagos, el nivel de agua se utiliza como base para determinar el caudal o el volumen de agua almacenada.

El sitio seleccionado para la observación del nivel de agua deberá responder a la finalidad de las observaciones y a la accesibilidad del sitio. Las condiciones hidráulicas son un factor importante en la selección de sitios en corrientes, particularmente en lugares donde se utiliza el nivel de agua para calcular registros de caudal (*Guía de Prácticas Hidrológicas*, Organización Meteorológica Mundial, 1994).

Figura 27. **Vista aguas abajo estación hidrométrica**



Fuente: estación hidrométrica Pacaranat, Santa Lucía La Reforma Tonicapán, mayo 2015.

#### **4.2.1. Instrumentos para medir nivel**

- Limnómetro: en hidrometría práctica se emplean varios tipos de limnómetros para las mediciones del nivel. Los más utilizados son de escala vertical graduada y los de escala inclinada o de rampa.



Figura 28. **Limnímetros de escala graduada**



Fuente: estación Serchil, Malacatancito, Huehuetenango, mayo 2015.

- **Limnógrafo:** son equipos que se utilizan para el registro continuo del nivel de los ríos, lagos, entre otros; se pueden clasificar según el sistema de funcionamiento o el sistema de registro. Una instalación corrientemente usada consiste en un pozo de amortiguación conectado a la corriente por medio de tuberías, con un flotador instalado en el pozo y conectado a la rueda de un registrador mediante una cadenilla o una cinta perforada. En ríos con alta velocidad puede ser necesario instalar tubos estáticos al final de la tubería de toma para evitar el descenso del nivel de agua en el pozo.

Figura 29. **Limnógrafo**



Fuente: estación Serchil, Malacatancito, Huehuetenango, mayo 2015.

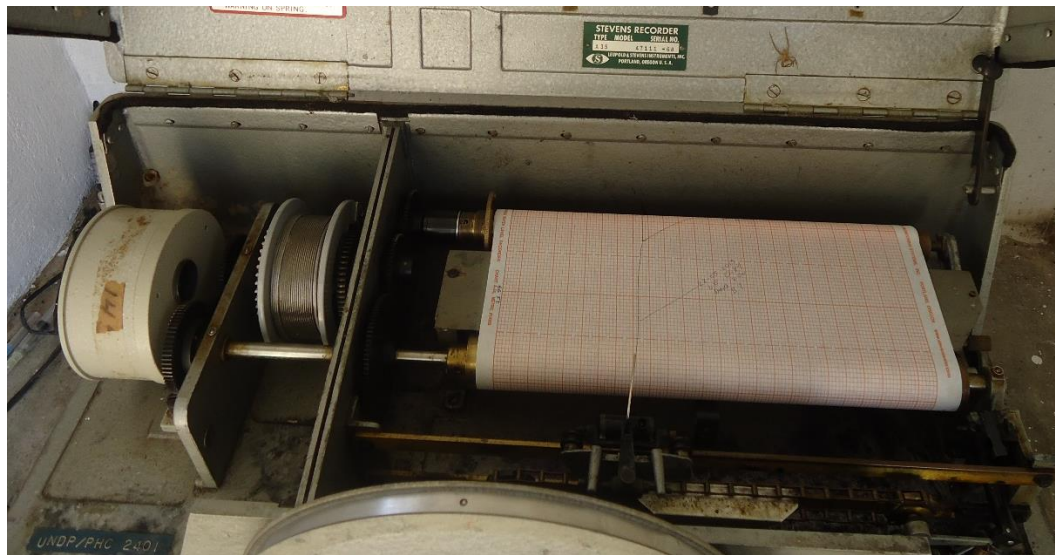
Figura 30. **Limnógrafo y cable vía para aforo aéreo**



Fuente: estación Serchil, Malacatancito, Huehuetenango, mayo 2015.

El nivel del río se registra, habitualmente, por medio de registradores gráficos (analógicos). Las escalas de tiempo y de nivel para una estación en particular dependerán del rango de variación en el nivel, de la sensibilidad de la relación nivel/caudal y de las características de escorrentía de la cuenca. Los valores del nivel pueden convertirse de la forma analógica a la numérica mediante dispositivos electrónicos, algunos de los cuales son operados manualmente para producir, sobre cintas de papel o cintas magnéticas, las coordenadas X y Y del registro del nivel.

Figura 31. **Gráfica de registro de limnógrafo**



Fuente: estación Chisiguán, Sacapulas, Quiché, mayo 2015.

### **4.3. Estaciones utilizadas para el estudio de la precipitación**

Para analizar el comportamiento de la precipitación se utilizó la información de las estaciones meteorológicas indicadas en la tabla XXIV.

Cabe mencionar que el porcentaje de datos faltantes diarios de precipitación en promedio es de 2,79 % para estas estaciones, por lo que no se consideró la necesidad de utilizar métodos numérico-estadísticos para completar los datos faltantes al inferir como no relevantes los porcentajes en cada estación. Los datos faltantes en los registros, regularmente se presentan en los meses donde la ausencia de lluvia es típica o cuando los equipos de registro han estado en mantenimiento.

La longitud de las series de precipitación diaria se muestra en la tabla XXIII, destacando que las series tienen longitudes que van desde los 22 hasta los 44 años de registro.

Tabla XXIV. **Estaciones meteorológicas utilizadas para analizar precipitación**

<b>No.</b>	<b>Estación</b>	<b>Institución</b>	<b>Inicio</b>	<b>Final</b>	<b>Longitud (años)</b>	<b>Porcentaje (%) datos faltantes</b>
1	La Capellanía	INDE	1985	2014	29	1,81
2	Totonicapán	INDE	1981	2014	33	4,25
3	Tierra Blanca	INDE	1992	2014	22	1,81
4	Santa Cruz del Quiché	INDE	1980	2014	34	2,54
5	Xequemeyá	INDE	1979	2014	35	3,86
6	San Antonio Ilotenango	INDE	1978	2014	36	2,05
7	Nebaj	Insivumeh	1970	2014	44	3,84
8	Huehuetenango	Insivumeh	1790	2014	44	2,37
9	Comitancillo	INDE	1979	2014	35	1,80
10	El Paradillo	INDE	1979	2014	35	3,37
11	Serchil	INDE	1992	2014	22	2,59
12	Chuitinamit	Insivumeh	1970	2014	44	3,23

Fuente: elaboración propia.

#### 4.4. Estaciones utilizadas para el estudio de caudal

Para analizar el comportamiento de los caudales, se utilizó la información de las estaciones listadas en la tabla XXV, que para el efecto, corresponde a los datos de caudales diarios.

Tabla XXV. Estaciones hidrométricas utilizadas para analizar caudal

No.	Estación	Institución	Inicio	Final	Longitud (años)	Porcentaje (%) datos faltantes
1	Serchil	INDE	1991	2014	23	1,36
2	La Estancia	INDE	1992	2014	22	2,62
3	Pacaranat	INDE	1991	2014	23	1,71
4	El Paradillo	INDE	1976	2006	30	0,40
5	Chisiguán	INDE	1969	2014	45	2,25

Fuente: elaboración propia.

Para el caso de los caudales diarios, el porcentaje de datos faltantes en promedio es de 1,67 % para estas estaciones, por lo que no se consideró la necesidad de utilizar métodos numérico-estadísticos para completar los datos faltantes al inferir como no relevantes los porcentajes en cada estación.

#### **4.5. Inventario de la instrumentación y equipos**

Como se indicó en el apartado 1.2, etapa de campo, se realizó una visita a las estaciones utilizadas en este estudio para establecer el estado del equipo e instrumentación instalada mediante una inspección general, como también la condición de la infraestructura existente. La visita se realizó juntamente con personal técnico especializado de las instituciones a cargo de las redes meteorológicas y en la mayoría de casos participó el personal lector.

De lo anteriormente descrito, la información general recopilada en el recorrido a las estaciones ubicadas en el área de influencia de la parte alta de la cuenca del río Chixoy, se muestra en las tablas siguientes, destacando la longitud de las series de registro de la precipitación:

Tabla XXVI. **Información general estación meteorológica La Capellanía**

No.	Estación	Institución	Clase	Latitud	Longitud	Altitud (msnm)	Registro (años)	Fecha
1	La Capellanía	INDE	ME	15° 14' 38"	91° 26' 00"	3 135	29	27/05/2015
<b>Departamento:</b> Huehuetenango		<b>Municipio:</b> Chiantla			<b>aldea, cantón, caserío:</b> aldea La Capellanía, cantón Las Minas			
<b>Lector:</b>		Jesús Estéban Fabián G.						
Item	Equipo instalado						F	NF
a	Pluviómetro marca Wilh Lambrecht						x	
b	Anemómetro marca Wilh Lambrecht						x	
c								
<p><b>OBSERVACIONES:</b>                      No hay elementos cercanos a las instalaciones que generen obstrucción o modifiquen el comportamiento de las variables medidas. No se observan daños por vandalismo o deterioro de los equipos por falta de mantenimiento. La infraestructura en general se encuentra en buenas condiciones. Los técnicos del Departamento de Hidrología del INDE realizan visitas periódicas (mensuales) a lectores para recolectar registros y revisar condición de equipos. El personal lector demuestra experiencia en la realización de sus actividades.                      F = funcional                      NF = no funcional</p>								

Fuente: elaboración propia.



Tabla XXVII. Información general estación meteorológica Totonicapán

No.	Estación	Institución	Clase	Latitud	Longitud	Altitud (msnm)	Registro (años)	Fecha	
2	Totonicapán	INDE	ME	14°54'28"	91°22'27"	2 405	33	26/05/2015	
<b>Departamento:</b> Totonicapán		<b>Municipio:</b> Totonicapán		<b>aldea, cantón, caserío:</b> cantón Xantun, paraje Pujacar					
<b>Lector:</b>		Julia Tzul Zapeta							
Item	Equipo instalado							F	NF
a	Pluviómetro marca Wilh Lambrecht							x	
b	Pluviógrafo (gráfica mensual) marca Wilh Lambrecht							x	
c	Abrigo meteorológico tipo C (clasificación INDE) con:								
	Termómetro de temperatura máxima marca R. Fuess							x	
	Termómetro de temperatura mínima marca Wilh Lambrecht							x	
d	Estación telemétrica marca Macrometer con:								
	Pluviómetro							x	
	Anemógrafo							x	
	Sensor horas de sol							x	
	Sensor de humerad relativa							x	
	Sensor de humedad del suelo							x	
<p><b>OBSERVACIONES:</b>                      Riesgo de modificación del entorno de la estación meteorológica por incremento de infraestructura habitacional y su posible efecto en las variables medidas. No se observan daños por vandalismo o deterioro de los equipos por falta de mantenimiento. La infraestructura en general se encuentra en buenas condiciones. Los técnicos del Departamento de Hidrología del INDE realizan visitas periódicas (mensuales) a lectores para recolectar registros y revisar condición de equipos. El personal lector demuestra experiencia en la realización de sus actividades.</p> <p>F = funcional                      NF = no funcional</p>									

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVIII. Información general estación meteorológica Tierra Blanca

No.	Estación	Institución	Clase	Latitud	Longitud	Altitud (msnm)	Registro (años)	Fecha	
3	Tierra Blanca	INDE	ME	15°06'49"	91°30'25"	2 325	22	26/05/2015	
<b>Departamento:</b> Totonicapán		<b>Municipio:</b> San Bartolo Aguas Calientes			<b>aldea, cantón, caserío:</b> aldea Tierra Blanca				
<b>Lector:</b>		Paula Xiloj Chan							
Item	Equipo instalado							F	NF
a	Pluviómetro marca Wilh Lambrecht							x	
b	Pluviógrafo (gráfica mensual) marca Wilh Lambrecht							x	
c	Abrigo meteorológico tipo C (clasificación INDE) con:								
	Termómetro de temperatura máxima marca R. Fuess							x	
	Termómetro de temperatura mínima marca Wilh Lambrecht							x	
d	Estación telemétrica marca Macrometer con:								
	Pluviómetro							x	
	Anemógrafo							x	
	Sensor horas de sol							x	
	Sensor de humerad relativa							x	
	Sensor de humedad del suelo							x	
<p><b>OBSERVACIONES:</b>                      No hay elementos cercanos a las instalaciones que generen obstrucción o modifiquen el comportamiento de las variables medidas. No se observan daños por vandalismo o deterioro de los equipos por falta de mantenimiento. La infraestructura en general se encuentra en buenas condiciones. Los técnicos del Departamento de Hidrología del INDE realizan visitas periódicas (mensuales) a lectores para recolectar registros y revisar condición de equipos. El personal lector demuestra experiencia en la realización de sus actividades.</p> <p>F = funcional                      NF = no funcional</p>									

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIX. **Información general estación meteorológica Quiché**

No.	Estación	Institución	Clase	Latitud	Longitud	Altitud (msnm)	Registro (años)	Fecha	
4	Quiché	INDE	PL	15°01'33"	91°09'32"	2 010	34	28/05/2015	
<b>Departamento:</b> Quiché		<b>Municipio:</b> Santa Cruz del Quiché			<b>aldea, cantón, caserío:</b> área urbana				
<b>Lector:</b> Personal operativo subestación INDE									
Item	Equipo instalado							F	NF
a	Pluviómetro marca Wilh Lambrecht							x	
<p><b>OBSERVACIONES:</b>                      Riesgo de interferencia por crecimiento y cercanía de árbol lo que puede modificar el comportamiento de las variables medidas. No se observan daños por vandalismo o deterioro de los equipos por falta de mantenimiento. La infraestructura en general se encuentra en buenas condiciones. Los Técnicos del Departamento de Hidrología del INDE realizan visitas periódicas (mensuales) a lectores para recolectar registros y revisar condición de equipos. El personal lector demuestra experiencia en la realización de sus actividades. El equipo está dentro de las instalaciones de la subestación eléctrica Quiché (ETCEE).                      F = funcional                      NF = no funcional</p>									

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXX. **Información general estación meteorológica Xequemeyá**

No.	Estación	Institución	Clase	Latitud	Longitud	Altitud (msnm)	Registro (años)	Fecha	
5	Xequemeyá	INDE	ME	15°04'49"	91°21'59"	2 002	35	26/05/2015	
<b>Departamento:</b> Totonicapán		<b>Municipio:</b> Momostenango			<b>aldea, cantón, caserío:</b> aldea Xequemeyá				
<b>Lector:</b>		Estela Cuyuch Juárez							
Item	Equipo instalado							F	NF
a	Pluviómetro marca Wilh Lambrecht							x	
b	Pluviógrafo (gráfica mensual) marca Wilh Lambrecht							x	
c	Abrigo meteorológico tipo B (clasificación INDE) con:								
	Termómetro de temperatura máxima marca Sato							x	
	Termómetro de temperatura mínima marca Sato							x	
d	Estación telemétrica marca Macrometer con:								
	Pluviómetro							x	
	Anemógrafo							x	
	Sensor horas de sol							x	
	Sensor de humerad relativa							x	
	Sensor de humedad del suelo							x	
<p><b>OBSERVACIONES:</b>                      No hay elementos cercanos a las instalaciones que generen obstrucción o modifiquen el comportamiento de las variables medidas. No se observan daños por vandalismo o deterioro de los equipos por falta de mantenimiento. La infraestructura en general se encuentra en buenas condiciones. Los técnicos del Departamento de Hidrología del INDE realizan visitas periódicas (mensuales) a lectores para recolectar registros y revisar condición de equipos. El personal lector demuestra experiencia en la realización de sus actividades. La parcela meteorológica fue reubicada de un lugar cercano al actual para tener mayor amplitud y mejor distribución de los equipos.</p> <p>F = funcional                      NF = no funcional</p>									

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXI. **Información general estación meteorológica San Antonio Ilotenango**

No.	Estación	Institución	Clase	Latitud	Longitud	Altitud (msnm)	Registro (años)	Fecha	
6	San Antonio Ilotenango	INDE	ME	15°03'17"	91°13'26"	1 960	36	28/05/2015	
<b>Departamento:</b> Quiché		<b>Municipio:</b> San Antonio Ilotenango			<b>aldea, cantón, caserío:</b> área urbana				
<b>Lector:</b> Elena Yat Simaj									
Item	Equipo instalado							F	NF
a	Pluviómetro marca Wilh Lambrecht							x	
b	Tanque de evaporación							x	
c	Heliógrafo marca Bologna Siap								
d	Abrigo meteorológico tipo C (clasificación INDE) con:								
	Termómetro de temperatura máxima marca R. Fuess							x	
	Termómetro de temperatura mínima marca R. Fuess							x	
e	Anemómetro marca Wilh Lambrecht							x	
<p><b>OBSERVACIONES:</b>                      No hay elementos cercanos a las instalaciones que generen obstrucción o modifiquen el comportamiento de las variables medidas. No se observan daños por vandalismo o deterioro de los equipos por falta de mantenimiento. La infraestructura en general se encuentra en buenas condiciones. Los técnicos del Departamento de Hidrología del INDE realizan visitas periódicas (mensuales) a lectores para recolectar registros y revisar condición de equipos. El personal lector demuestra experiencia en la realización de sus actividades. La puerta del abrigo meteorológico fue reemplazada y es recomendable reducir la apertura del área de ventilación.</p> <p>F = funcional                      NF = no funcional</p>									

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXII. **Información general estación meteorológica Nebaj**

No.	Estación	Institución	Clase	Latitud	Longitud	Altitud (msnm)	Registro (años)	Fecha	
7	Nebaj	INSIVUMEH	ME	15°23'53"	91°08'32"	1 906	44	30/05/2015	
<b>Departamento:</b> Quiché		<b>Municipio:</b> Nebaj		<b>aldea, cantón, caserío:</b> área urbana					
<b>Lector:</b> personal de Insivumeh									
Item	Equipo instalado							F	NF
a	Pluviómetro							x	
b	Abrigo meteorológico con:								
	Termómetro de temperatura máxima							x	
	Termómetro de temperatura mínima							x	
	Evaporación piche (sombra)							x	
c	Anemógrafo							x	
<p>OBSERVACIONES:</p> <p>No hay elementos cercanos a las instalaciones que generen obstrucción o modifiquen el comportamiento de las variables medidas. No se observan daños por vandalismo o deterioro de los equipos por falta de mantenimiento. La infraestructura en general se encuentra en buenas condiciones.</p> <p>F = funcional NF = no funcional</p>									

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXIII. **Información general estación meteorológica  
Huehuetenango**

No.	Estación	Institución	Clase	Latitud	Longitud	Altitud (msnm)	Registro (años)	Fecha	
8	Huehuetenango	INSIVUMEH	ME	15°19'02"	91°30'11"	1 870	44	27/05/2015	
<b>Departamento:</b> Huehuetenango		<b>Municipio:</b> Huehuetenango			<b>aldea, cantón, caserío:</b> área urbana				
<b>Lector:</b> personal Insivumeh									
Item	Equipo instalado							F	NF
a	Pluviómetro							x	
b	Abrigo meteorológico con:								
	Termómetro de temperatura máxima							x	
	Termómetro de temperatura mínima							x	
c	Heliógrafo							x	
d	Anemógrafo							x	
<b>OBSERVACIONES:</b> No hay elementos cercanos a las instalaciones que generen obstrucción o modifiquen el comportamiento de las variables medidas. No se observan daños por vandalismo o deterioro de los equipos por falta de mantenimiento. La infraestructura en general se encuentra en buenas condiciones. Estación se ubica dentro de las instalaciones de la pista de aterrizaje de Huehuetenango. F = funcional NF = no funcional									

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXIV. **Información general estación meteorológica  
Comitancillo**

No.	Estación	Institución	Clase	Latitud	Longitud	Altitud (msnm)	Registro (años)	Fecha	
9	Comitancillo	INDE	PL	15°13'43"	91°14'22"	1 775	35	27/05/2015	
<b>Departamento:</b> Quiché		<b>Municipio:</b> San Pedro Jocopilas			<b>aldea, cantón, caserío:</b> aldea Comitancillo				
<b>Lector:</b>		José Francisco Santiagos Díaz							
Item	Equipo instalado							F	NF
a	Pluviómetro marca Wilh Lambrecht							x	
<p><b>OBSERVACIONES:</b>                      No hay elementos cercanos a las instalaciones que generen obstrucción o modifiquen el comportamiento de las variables medidas. No se observan daños por vandalismo o deterioro de los equipos por falta de mantenimiento. La infraestructura en general se encuentra en buenas condiciones. Los técnicos del Departamento de Hidrología del INDE realizan visitas periódicas (mensuales) a lectores para recolectar registros y revisar condición de equipos. El personal lector demuestra experiencia en la realización de sus actividades. La estación pluviométrica fue trasladada cerca de su ubicación inicial para su mejor control y resguardo.</p> <p>F = funcional                      NF = no funcional</p>									

Fuente: elaboración propia.



Tabla XXXV. Información general estación meteorológica El Paradillo

No.	Estación	Institución	Clase	Latitud	Longitud	Altitud (msnm)	Registro (años)	Fecha	
10	El Paradillo	INDE	ME	15°15'31"	91°19'01"	1745	35	26/05/2015	
<b>Departamento:</b> Quiché		<b>Municipio:</b> San Pedro Jocopilas		<b>aldea, cantón, caserío:</b> aldea Santa María, caserío El Paradillo					
<b>Lector:</b> Jorge Joel Gutiérrez G.									
Item	Equipo instalado							F	NF
a	Pluviómetro marca Wilh Lambrecht							x	
b	Pluviógrafo marca Wilh Lambrecht							x	
c	Abrigo meteorológico tipo B (clasificación INDE) con:								
	Termómetro de temperatura máxima							x	
	Termómetro de temperatura mínima							x	
	Higrotermógrafo marca Wilh Lambrecht							x	
d	Heliógrafo marca Wilh Lambrecht								
e	Estación telemétrica marca Automata con:								
	Pluviómetro							x	
	Anemógrafo							x	
	Sensor horas de sol							x	
	Sensor de humerad relativa							x	
	Sensor de humedad del suelo							x	
<b>OBSERVACIONES:</b> No hay elementos cercanos a las instalaciones que generen obstrucción o modifiquen el comportamiento de las variables medidas. No se observan daños por vandalismo o deterioro de los equipos por falta de mantenimiento. La infraestructura en general se encuentra en buenas condiciones. Los técnicos del Departamento de Hidrología del INDE realizan visitas periódicas (mensuales) a lectores para recolectar registros y revisar condición de equipos. El personal lector demuestra experiencia en la realización de sus actividades. F = funcional NF = no funcional									

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXVI. **Información general estación meteorológica Serchil**

No.	Estación	Institución	Clase	Latitud	Longitud	Altitud (msnm)	Registro (años)	Fecha	
11	Serchil	INDE	ME	15°14'10"	91°24'28"	1 635	22	27/05/2015	
<b>Departamento:</b> Huehuetenango		<b>Municipio:</b> Malacatancito		<b>aldea, cantón, caserío:</b> aldea Cancabal, caserío Serchil					
<b>Lector:</b> Atilano Noé Méndez M.									
Item	Equipo instalado							F	NF
a	Pluviómetro marca Wilh Lambrecht							x	
b	Pluviógrafo (grafica diaria) marca Wilh Lambrecht							x	
c	Abrigo meteorológico tipo C (clasificación INDE) con:								
	Termómetro de temperatura máxima marca Sato							x	
	Termómetro de temperatura mínima marca Sato							x	
<p><b>OBSERVACIONES:</b>                      No hay elementos cercanos a las instalaciones que generen obstrucción o modifiquen el comportamiento de las variables medidas. No se observan daños por vandalismo o deterioro de los equipos por falta de mantenimiento. La infraestructura en general se encuentra en buenas condiciones. Los técnicos del Departamento de Hidrología del INDE realizan visitas periódicas (mensuales) a lectores para recolectar registros y revisar condición de equipos. El personal lector demuestra experiencia en la realización de sus actividades.</p> <p>F = funcional                      NF = no funcional</p>									

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXVII. Información general estación meteorológica Chuitinamit

No.	Estación	Institución	Clase	Latitud	Longitud	Altitud (msnm)	Registro (años)	Fecha	
12	Chuitinamit	INSIVUMEH	ME	15°17'18"	91°05'10"	1 180	44	28/05/2015	
<b>Departamento:</b> Quiché		<b>Municipio:</b> Sacapulas		<b>aldea, cantón, caserío:</b> área urbana					
<b>Lector:</b> personal Insivumeh									
Item	Equipo instalado							F	NF
a	Pluviómetro							x	
b	Abrigo meteorológico con:								
	Termómetro de temperatura máxima							x	
	Termómetro de temperatura mínima							x	
c	Anemómetro							x	
<p>OBSERVACIONES:</p> <p>No hay elementos cercanos a las instalaciones que generen obstrucción o modifiquen el comportamiento de las variables medidas. No se observan daños por vandalismo o deterioro de los equipos por falta de mantenimiento. La infraestructura en general se encuentra en buenas condiciones.</p> <p>F = funcional NF = no funcional</p>									

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXVIII. **Información general estación hidrométrica Serchil**

No.	Estación	Institución	Clase	Latitud	Longitud	Altitud (msnm)	Registro (años)	Fecha
1-H	Serchil	INDE	HI	15°14'07"	91°24'25"	1 630	23	27/05/2015
<b>Departamento:</b> Huehuetenango		<b>Municipio:</b> Malacatancito		<b>aldea, cantón, caserío:</b> Aldea Cancabal, caserío Serchil				
<b>Lector:</b> Roderico Rafael Méndez M.								
Item	Equipo instalado						F	NF
a	Limnigrafo (gáfica mensual) marca Leopold Stevens						x	
b	6 escalas graduadas en centímetros, cada una de 0-1m						x	
c	Cable vía y canasta para aforo aéreo						x	
<p><b>OBSERVACIONES:</b>                      No hay elementos cercanos a la sección de aforo que generen obstrucción o modifiquen el comportamiento de las variable medida. No se observan daños por vandalismo o deterioro de los equipos por falta de mantenimiento. La infraestructura en general se encuentra en buenas condiciones. Los técnicos del Departamento de Hidrología del INDE realizan visitas periódicas (mensuales) a lectores para recolectar registros y revisar condición de equipos. El personal lector demuestra experiencia en la realización de sus actividades.</p> <p>F = funcional                      NF = no funcional</p>								

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXIX. Información general estación limnimétrica La Estancia

No.	Estación	Institución	Clase	Latitud	Longitud	Altitud (msnm)	Registro (años)	Fecha	
2-H	La Estancia	INDE	LI	15°20'50"	91°16'26"	1 585	22	27/05/2015	
<b>Departamento:</b> Huehuetenango		<b>Municipio:</b> Aguacatán		<b>aldea, cantón, caserío:</b> aldea Río Blanco La Estancia					
<b>Lector:</b> Gaspar Mendoza V.									
Item	Equipo instalado							F	NF
a	2 Escalas graduadas en centímetros, cada una de 0-1 m							x	
<p><b>OBSERVACIONES:</b>                      No hay elementos cercanos a la sección de aforo que generen obstrucción o modifiquen el comportamiento de las variable medida. No se observan daños por vandalismo o deterioro de las escalas. La infraestructura y sección de aforo se encuentra en buenas condiciones. Los técnicos del Departamento de Hidrología del INDE realizan visitas periódicas (mensuales) a lectores para recolectar registros y revisar condición de equipos. El personal lector demuestra experiencia en la realización de sus actividades.</p> <p>F = funcional                      NF = no funcional</p>									

Fuente: elaboración propia.

Tabla XL. **Información general estación hidrométrica Pacaranat**

No.	Estación	Institución	Clase	Latitud	Longitud	Altitud (msnm)	Registro (años)	Fecha	
3-H	Pacaranat	INDE	HI	15°14'53"	91°18'50"	1 505	23	27/05/2015	
<b>Departamento:</b> Totoncapán		<b>Municipio:</b> Santa Lucía La Reforma			<b>aldea, cantón, caserío:</b> aldea El Tambor				
<b>Lector:</b> Roderico Rafael Méndez M.									
Item	Equipo instalado							F	NF
a	Limnigrafo (gáfica mensual) marca Leopold Stevens							x	
b	4 escalas graduadas en centímetros, cada una de 0-1m							x	
c	Cable vía y canasta para aforo aéreo							x	
<p><b>OBSERVACIONES:</b>                      No hay elementos cercanos a la sección de aforo que generen obstrucción o modifiquen el comportamiento de las variable medida. No se observan daños por vandalismo o deterioro de los equipos por falta de mantenimiento. La infraestructura en general se encuentra en buenas condiciones. Los técnicos del Departamento de Hidrología del INDE realizan visitas periódicas (mensuales) a lectores para recolectar registros y revisar condición de equipos. El personal lector demuestra experiencia en la realización de sus actividades.</p> <p>F = funcional                      NF = no funcional</p>									

Fuente: elaboración propia.

Tabla XLI. **Información general estación hidrométrica El Paradillo**

No.	Estación	Institución	Clase	Latitud	Longitud	Altitud (msnm)	Registro (años)	Fecha	
4-H	El Paradillo	INDE	HI	15°15'57"	91°19'31"	1 455	30	27/05/2015	
<b>Departamento:</b> Quiché		<b>Municipio:</b> San Pedro Jocopilas		<b>aldea, cantón, caserío:</b> aldea Santa María, caserío El Paradillo					
<b>Lector:</b> María Isabel Mérida C.									
Item	Equipo instalado							F	NF
a	Limnigrafo (gáfica mensual) marca Leopold Stevens							x	
b	5 Escalas graduadas en centímetros, cada una de 0-1m							x	
c	Cable vía y canasta para aforo aéreo								x
<b>OBSERVACIONES:</b> No hay elementos cercanos a la sección de aforo que generen obstrucción o modifiquen el comportamiento de las variable medida. A partir del año 2007 fue retirado el limnigrafo de la caseta de la estación, lo anterior por socabamiento de sección de aforo y pérdida de anclaje de cable vía debido a pavimentación de ruta. Actualmente la lectura de sección se realiza mediante escalas graduadas instaladas posteriormente. Los técnicos del Departamento de Hidrología del INDE realizan visitas periódicas (mensuales) a lectores para recolectar registros y revisar condición de F = funcional NF = no funcional									

Fuente: elaboración propia.

Tabla XLII. **Información general estación hidrométrica Chisiguan**

No.	Estación	Institución	Clase	Latitud	Longitud	Altitud (msnm)	Registro (años)	Fecha	
5-H	Chisiguan	INDE	HI	15°17'42"	91°04'16"	1 175	45	28/05/2015	
<b>Departamento:</b> Quiché		<b>Municipio:</b> Sacapulas			<b>aldea, cantón, caserío:</b> caserío Chisiguan				
<b>Lector:</b> Bonifacio Tojin G.									
Item	Equipo instalado							F	NF
a	Limnigrafo (gáfica mensual) marca Leopold Stevens							x	
b	6 Escalas graduadas en centímetros, cada una de 0-1m							x	
c	Cable vía y canasta para aforo aéreo							x	
<p><b>OBSERVACIONES:</b>                      No hay elementos cercanos a la sección de aforo que generen obstrucción o modifiquen el comportamiento de las variable medida. No se observan daños por vandalismo o deterioro de los equipos por falta de mantenimiento. La infraestructura en general se encuentra en buenas condiciones. Los técnicos del Departamento de Hidrología del INDE realizan visitas periódicas (mensuales) a lectores para recolectar registros y revisar condición de equipos. El personal lector demuestra experiencia en la realización de sus actividades. Se está haciendo común el riego por bombeo aguas arriba de estación.</p> <p>F = funcional                      NF = no funcional</p>									

Fuente: elaboración propia.



## **5. CONTROL DE DATOS E ÍNDICES DE CAMBIO CLIMÁTICO**

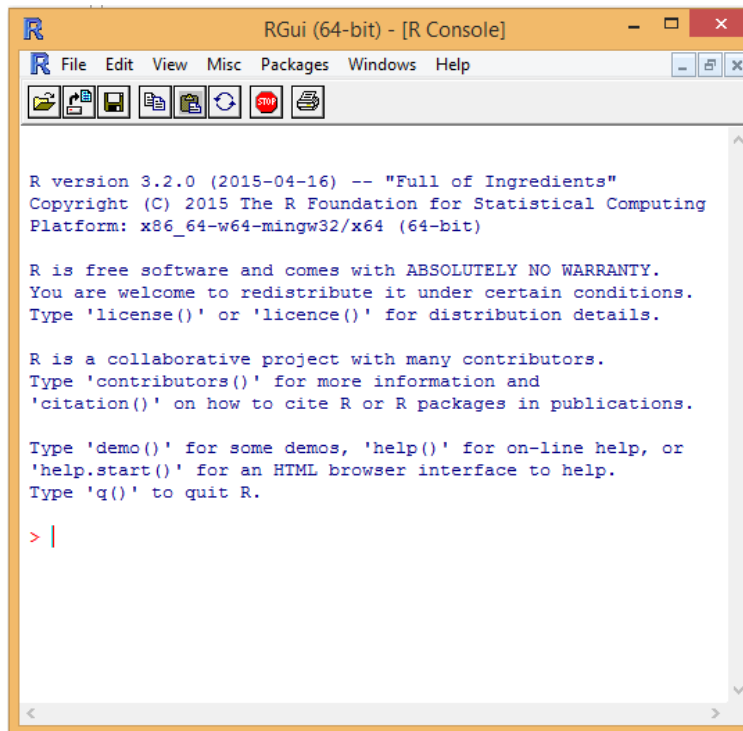
En este capítulo se describe el proceso de control de calidad (CC) realizado mediante el módulo de control de datos del software RClimDex y posteriormente determinar los índices de cambio climático.

Uno de los principales objetivos de construir índices de extremos climáticos es para usarlos en estudios de monitoreo y detección de cambios climáticos. Para el análisis de los caudales, también se utilizó este software con las variantes necesarias para evaluar y calcular la tendencia y comportamiento de los mismos.

### **5.1. Software RClimDex**

Para la determinación de los indicadores o índices del cambio climático se utilizó el software RCLIMDEX. Inicialmente este programa fue desarrollado como ClimDex, basado en Microsoft Excel. El paquete computacional es de fácil utilización y permite el cálculo de numerosos índices de extremos climáticos. Fue desarrollado por Byron Gleason del National Climate Data Centre (NCDC) de NOAA, National Oceanic and Atmospheric Administration, por sus siglas en inglés (Nota técnica del IDEAM Colombia, noviembre 2011).

Figura 32. **Plataforma inicial de software RClimdex**



Fuente: elaboración propia, empleando RClimDex.

Posteriormente se implementó el programa en la plataforma R y surgió el paquete RClimDex. Este programa evalúa y calcula 27 índices básicos recomendados por el Equipo de Expertos de CCI/CLIVAR para “Climate Change Detection Monitoring and Índices” (ETCCDMI), así como también otros índices de temperatura y precipitación con límites definidos por el usuario.

## **5.2. Control de calidad de datos**

Las estaciones indicadas en las tablas XXIII y XXIV, inicialmente se sometieron a un control de calidad previo (CC). Para la etapa de control de calidad, se buscó identificar los valores extremos de precipitación mediante la desviación estándar. Lo anterior fue realizado por el módulo de control de datos del software RClimdex. Como criterio de calidad de datos, todos los valores extremos superiores a  $\pm 3\sigma$  de la media u *outliers*, serían evaluados con un control de calidad más detallado de los datos, para luego ser evaluados nuevamente por el paquete de control de calidad del software RClimdex.

Los pasos a seguir para realizar el control de calidad de datos mediante el módulo del software RClimdex y luego utilizarlos para evaluar los índices de cambio climático mediante RClimdex, son los siguientes:

### **5.2.1. Procesamiento de la información**

Los datos de precipitación y caudales, de las estaciones utilizadas en el estudio, se sistematizan de tal manera que cumplan las características requeridas por el modelo, en cuanto a los formatos de entrada de los archivos utilizados en el software RClimdex. Los requisitos de cada archivo son los siguientes:

- La primera columna debe ser el año de registro.
- La segunda columna corresponde al mes.
- La tercera columna indica el día.

- La cuarta columna es el dato de precipitación o caudal, con un decimal. Los faltantes deben ser llenados con el número –99,9, el cual es un valor indiferente para el programa y por ende no altera los resultados.
- La quinta y sexta columna corresponden a los datos de temperatura máxima y mínima respectivamente. Para efectos del presente estudio, las columnas correspondientes a los valores de temperatura máxima y mínima se llenaron con el número -99,9.
- Para el caso de los caudales, los datos de la primera a la tercera columna son los mismos (año, mes, día) y en la cuarta columna se cambia el valor de precipitación por el valor de caudal diario. La quinta y sexta columna se rellenan con el valor de -99,9 y con ello cumplir con la estructura de archivo requerida por el software.
- El archivo de 6 columnas antes indicadas, se debe grabar en formato de texto de extensión TXT, indicada como: Text (tab delimited).

Figura 33. Formato de datos para el archivo inicial

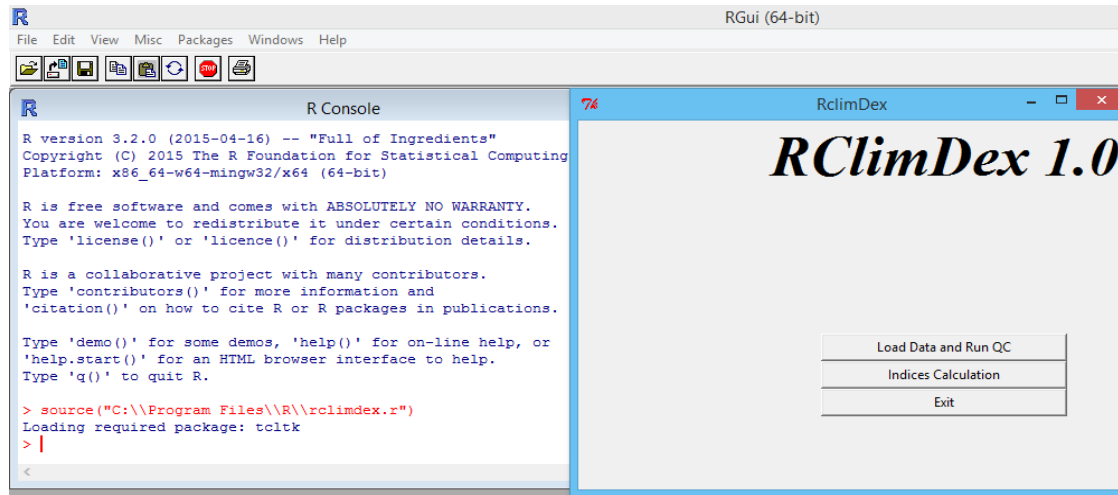
Archivo	Edición	Formato	Ver	Ayuda	
1986	9	11	0	24	15
1986	9	12	7.7	21.5	14.5
1986	9	13	11.2	20	15
1986	9	14	0	26	13
1986	9	15	0.9	23.5	9
1986	9	16	0.7	19	14
1986	9	17	24.9	18.5	14
1986	9	18	0	22	15
1986	9	19	0	22	12.5
1986	9	20	10	22.5	13.5
1986	9	21	11.2	24.5	13
1986	9	22	0	23	12
1986	9	23	0	23	11.5
1986	9	24	5.5	24.5	12.5
1986	9	25	1.6	24.5	13
1986	9	26	10.4	24	13
1986	9	27	18.4	22	15.5
1986	9	28	6.5	19.5	15.5
1986	9	29	6.3	20.5	15
1986	9	30	0	21.5	14
1986	9	31	-99.9	-99.9	-99.9
1986	10	1	14.7	23.5	14
1986	10	2	0	24	12.5
1986	10	3	23.5	24	12.5
1986	10	4	0	24.5	12

Fuente: elaboración propia a partir de Word Office .txt.

Las columnas se ordenan de izquierda a derecha en la siguiente secuencia: año, mes, día, PRCP o CAU, TMAX, TMIN. Unidades de PRCP= milímetros (mm), unidades de CAU= metros cúbicos sobre segundo (m<sup>3</sup>/s).

Inicialmente se debe proveer al *software* de un archivo de control llamado rclimindex.r, el cual permite cargar los datos tabulados y ordenados de las estaciones, siempre que cumplan el formato y secuencia indicado; lo anterior para poder ver la ventana de selección del procedimiento de control de calidad (CC o QC) para el software RClimdex.

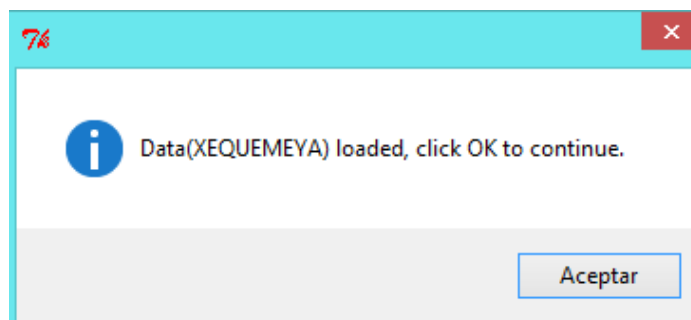
Figura 34. Selección de procedimiento software RClimDex



Fuente: elaboración propia, empleando RClimDex.

Seleccionar la opción “Load Data and Run QC” y se busca el archivo .TXT, que se generó a partir de los datos obtenidos de cada estación. Si el archivo de datos cumple con el formato y secuencia correcto, el software validará la carga de datos mediante el siguiente aviso:

Figura 35. Validación de datos

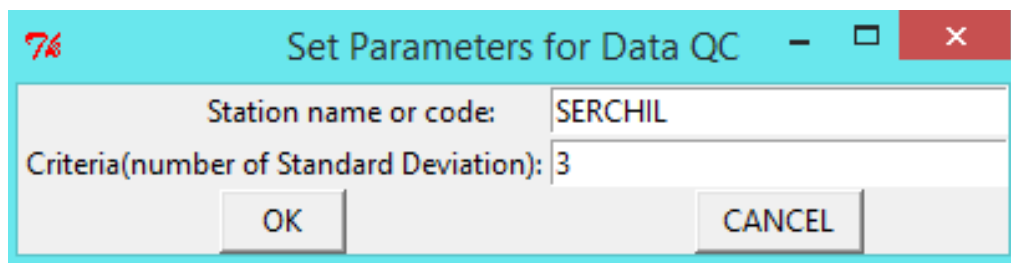


Fuente: elaboración propia, empleando RClimDex.

El software solicita algunos datos que el usuario debe proporcionar, como los siguientes:

- El nombre o código de la estación a analizar.
- La cantidad de desviaciones estándar que se requieran en dicho análisis, para realizar el control de datos.

Figura 36. **Parámetros para el control de datos**



The image shows a Windows-style dialog box titled "Set Parameters for Data QC". It has a red title bar with a close button (X) on the right. The dialog contains two input fields: "Station name or code:" with the text "SERCHIL" entered, and "Criteria(number of Standard Deviation):" with the number "3" entered. At the bottom, there are two buttons: "OK" and "CANCEL".

Fuente: elaboración propia, empleando RClimDex.

El software solicitará confirmar las carpetas en las cuales serán archivados los resultados del análisis, tanto valores a corregir como gráficas que servirán para establecer un criterio al realizar el control de calidad (CC), corrigiendo datos, si fuera necesario.

El procedimiento anterior se repitió con todas las estaciones utilizadas en el presente estudio para analizar la precipitación y caudales.

Para que los resultados sean lo más precisos posible, la información climática utilizada para un análisis de largo plazo y particularmente los análisis de cambio climático, las series deben ser lo más confiables posible. Es importante detectar los posibles saltos o no homogeneidades que presente la serie así como la posible causa de los mismos. Una serie temporal climática se define como homogénea cuando las variaciones detectadas son causadas únicamente por variaciones del tiempo y del clima.

Las no homogeneidades en las series climáticas son generalmente causadas por cambios en la ubicación de la estación, cambios en el instrumental, así como cambios en las rutinas de observación, entre algunas de las causas. Uno de los mayores inconvenientes en este tipo de análisis, es que se dispone de poca información histórica que permita identificar si la causa puntual de los saltos es de origen artificial o climático.

### **5.2.2. Corrección de datos**

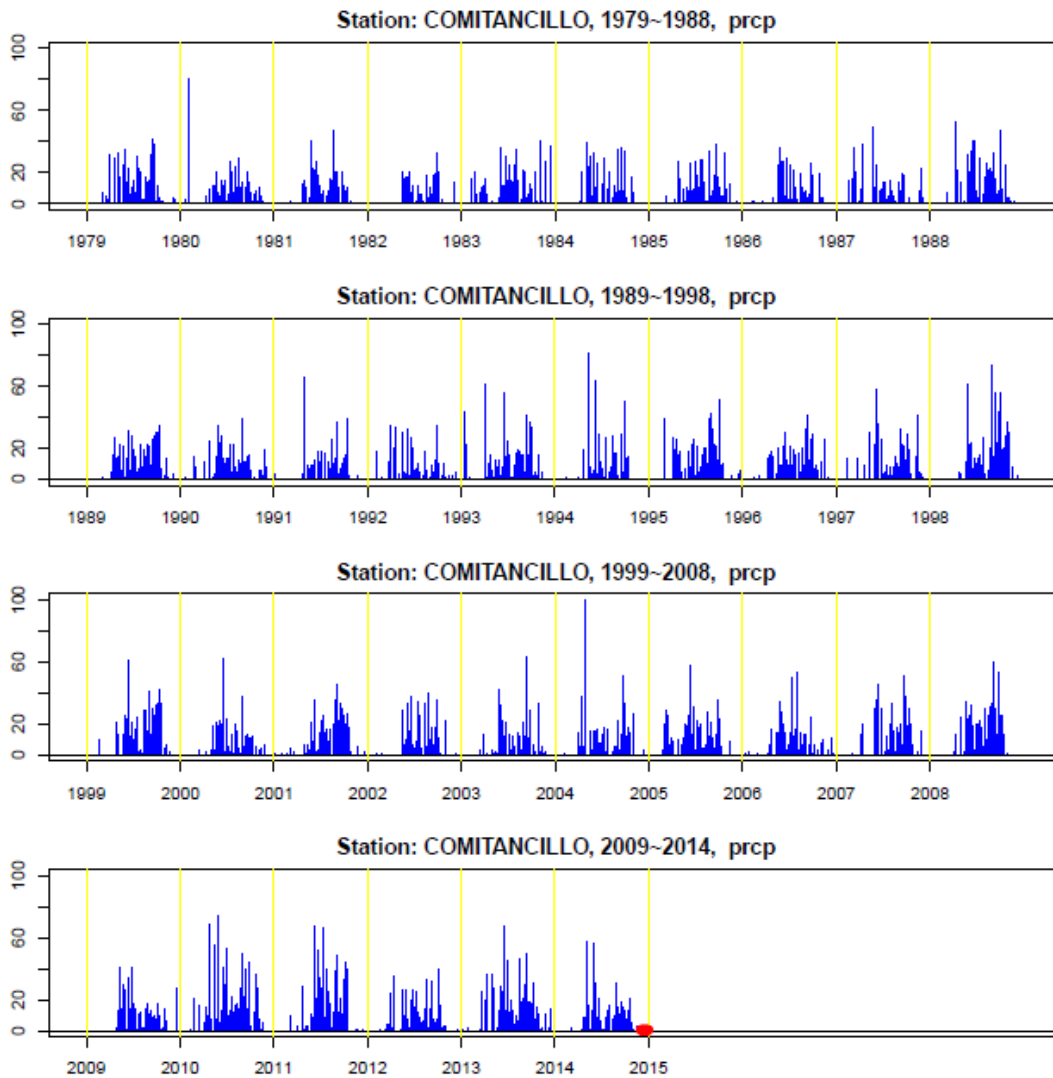
Se identifican valores extremos *outliers* en precipitaciones y caudales diarios. Los valores extremos o fuera de rango, son valores diarios que se encuentran fuera de un límite de la desviación estándar que fue establecida por el operador del software.



### **5.3. Rangos y saltos de tiempo en los datos**

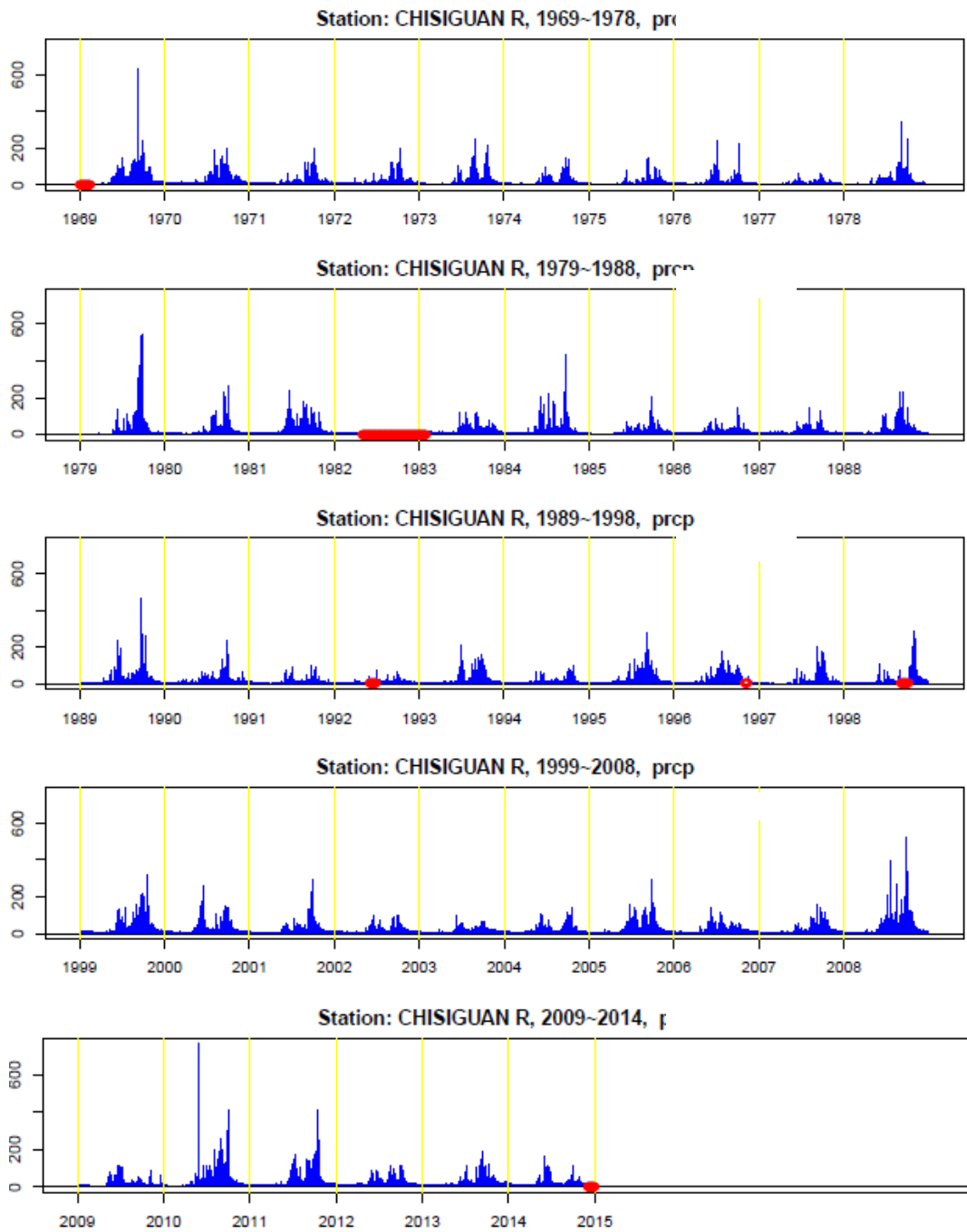
Como los datos pasaron por un control de calidad, a continuación se presentan algunos gráficos de precipitación y caudales donde se observa el rango de variación en los que actúan los datos y los saltos de tiempo de datos faltantes (círculos o líneas de color rojo), mismos que no se tabularon o registraron en su momento, ya sea por periodos de mantenimiento, desperfectos en los equipos de medición, ausencia de personal lector o hasta por el conflicto armado interno.

Figura 37. **Series de precipitación diaria, estación Comitancillo**



Fuente: elaboración propia, empleando RClimDex.

Figura 38. Series de caudales, estación Chisiguan



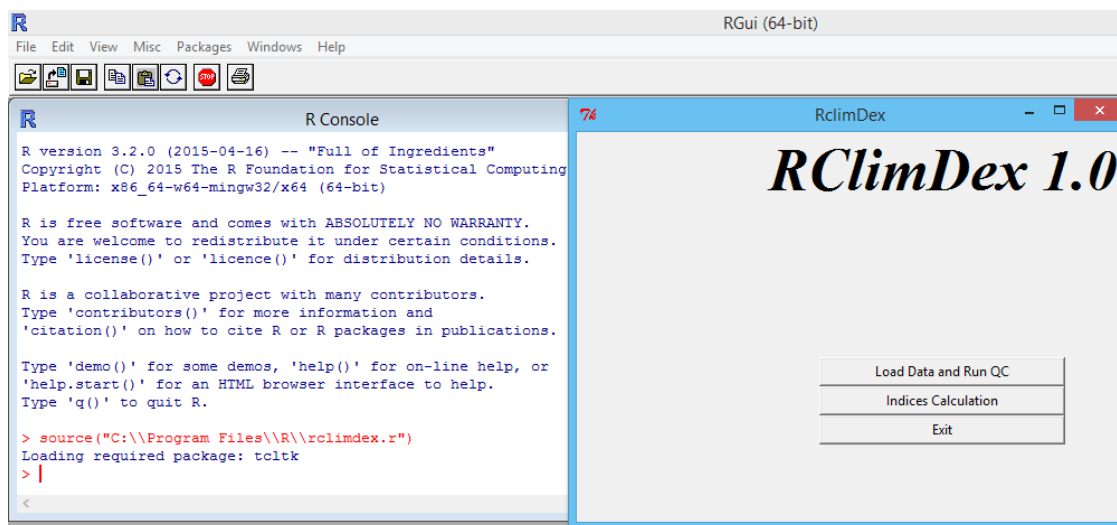
Fuente: elaboración propia, empleando RClimDex.

## 5.4. Determinación de índices de cambio climático

Para calcular los índices extremos de cambio climático, se corre el programa Rclimdex, cargando el archivo .TXT que contiene los datos de precipitación o caudal de cada estación meteorológica, siempre cumpliendo con el formato y estructura requeridos.

Luego se selecciona la opción *Indices Calculation* como se muestra en la siguiente figura 39:

Figura 39. Cálculo de índices de cambio climático



Fuente: elaboración propia, empleando RclimDex.

El usuario debe completar los datos o parámetros requeridos por el software Rclimdex y continuar con el proceso, como se muestra a continuación:

Figura 40. Definición de parámetros, RClimDex

Parameter	Value
First year of base period	1979
Last year of base period	2014
Latitude of this station location	0
Longitude of this station location	0
User defined upper threshold of daily maximum temperature	25
User defined lower threshold of daily maximum temperature	0
User defined upper threshold of daily minimum temperature	20
User defined lower threshold of daily minimum temperature	0
User defined daily precipitation threshold	25

Fuente: elaboración propia, empleando RClimDex.

Completados los datos, se selecciona cuáles serán los índices que son de interés para el estudio.

Figura 41. Menú de índices RClimDex

Index	Selected
SU25, FD0, TR20, ID0	<input checked="" type="checkbox"/>
User Defined SU, FD, TR, ID	<input checked="" type="checkbox"/>
GSL, growing season length	<input checked="" type="checkbox"/>
TXx, TXn, TNx, TNn	<input checked="" type="checkbox"/>
TX10p, TX90p, TN10p, TN90p	<input checked="" type="checkbox"/>
WSDI	<input checked="" type="checkbox"/>
CSDI	<input checked="" type="checkbox"/>
DTR	<input checked="" type="checkbox"/>
Rx1day	<input checked="" type="checkbox"/>
Rx5day	<input checked="" type="checkbox"/>
SDII	<input checked="" type="checkbox"/>
R10mm	<input checked="" type="checkbox"/>
R20mm	<input checked="" type="checkbox"/>
Rnmm	<input checked="" type="checkbox"/>
CDD, CWD	<input checked="" type="checkbox"/>
R95p, R99p, PRCP TOT	<input checked="" type="checkbox"/>

Fuente: elaboración propia, empleando RClimDex.

## **5.5. Código de índices del modelo RClimDex**

Para analizar los diferentes índices que el modelo presenta, es importante conocer el código que maneja el software RClimdex. Por lo anterior, se presenta la tabla XLII que presenta el total de los índices agrupados según las variables de interés.

Es importante indicar que para efecto de análisis de este estudio en particular, se utilizaron los índices CDD, CWD, PRCTOT, R20mm, R40mm y R95P para precipitación. Aplicando las variantes necesarias al modelo, fueron calculados y analizados los índices SDII y R95P para los caudales.

Es de hacer notar que el modelo RcliDex, también calcula índices de cambio climático relacionados con la temperatura máxima y mínima, sin embargo las series de temperatura de las estaciones utilizadas en este estudio tienen diferentes longitudes de tiempo y no coinciden con las series de precipitación y caudales utilizadas, por lo que los índices asociados a la temperatura no fueron calculados.

Tabla XLIII. **Agrupación de índices de precipitación y eventos extremos**

<b>Indicador (Unidad)</b>	<b>Detalle</b>	<b>Agrupación</b>
<b>CDD (Días)</b>	Mayor número de días secos consecutivos en un año.	<b>Asociados al comportamiento de la precipitación y eventos extremos de lluvia</b>
<b>CWD (Días)</b>	Mayor número de días húmedos consecutivos en un año.	
<b>PRCTOT (mm)</b>	Precipitación total al año.	
<b>R10mm (Días)</b>	Número de días en un año con lluvia mayor a 10 mm.	
<b>R20mm (Días)</b>	Número de días en un año con lluvia mayor a 20 mm.	
<b>R40mm (Días)</b>	Número de días en un año con lluvia mayor a 40 mm.	
<b>R95P (mm)</b>	Número de días en un año con lluvia mayor al percentil 95 para los días húmedos (Prec. > 1,0 mm).	
<b>R99P (mm)</b>	Número de días en un año con lluvia mayor al percentil 99 para los días húmedos (Prec. > 1,0 mm).	
<b>RX1day (mm)</b>	Máximo anual de precipitación en 1 día.	
<b>RX5day (mm)</b>	Máximo anual de precipitación en 5 día.	
<b>SDII (mm/día)</b>	Precipitación total anual/días con lluvia al año (Prec. > 1,0 mm).	

Fuente: elaboración propia, empleando RCLimDex.

La serie de índices resultantes son almacenados en un subdirectorío titulado índices, en formato excel. Para propósitos de visualización, se grafican series anuales, junto con tendencias calculadas por regresión lineal de mínimos cuadrados (línea sólida) y regresión lineal con ponderamientos locales (línea punteada).

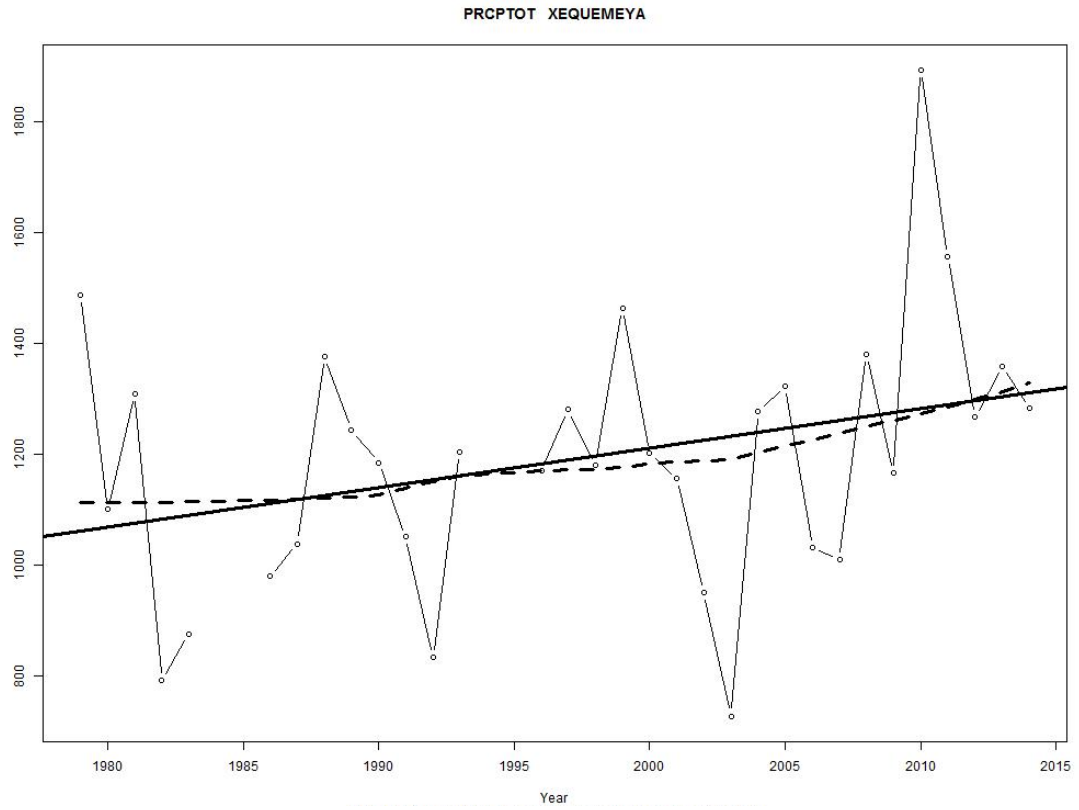
Las estadísticas del ajuste de la curva de tendencia lineal se muestran en la parte inferior de estos gráficos.

Se destaca el p-value que indica si la serie es estadísticamente significativa ( $p\text{-value} < 0,05$ ) o no, y la tendencia estimada (slope estimate), la cual define el valor de cambio del indicador y se utilizará para verificar de cuanto ha sido la variabilidad que se ha suscitado en la precipitación y caudales respecto al tiempo de la toma de datos.

Como referencia de los índices de cambio climático de precipitación y caudales calculados por el software, se presenta a continuación algunas gráficas de las estaciones utilizadas. Los principales índices calculados para cada estación y que corresponden a la precipitación y caudal, se incluirán dentro del apéndice de este documento.

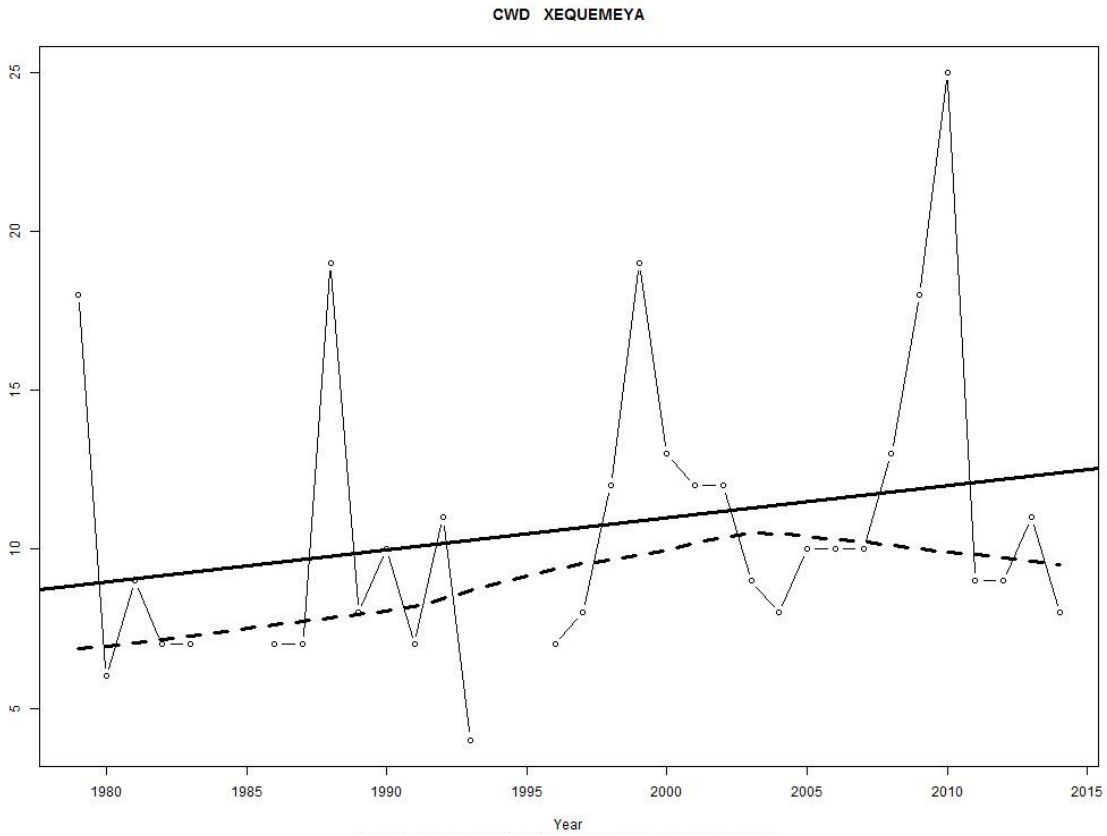


Figura 42. Precipitación total al año, estación Xequemeyá



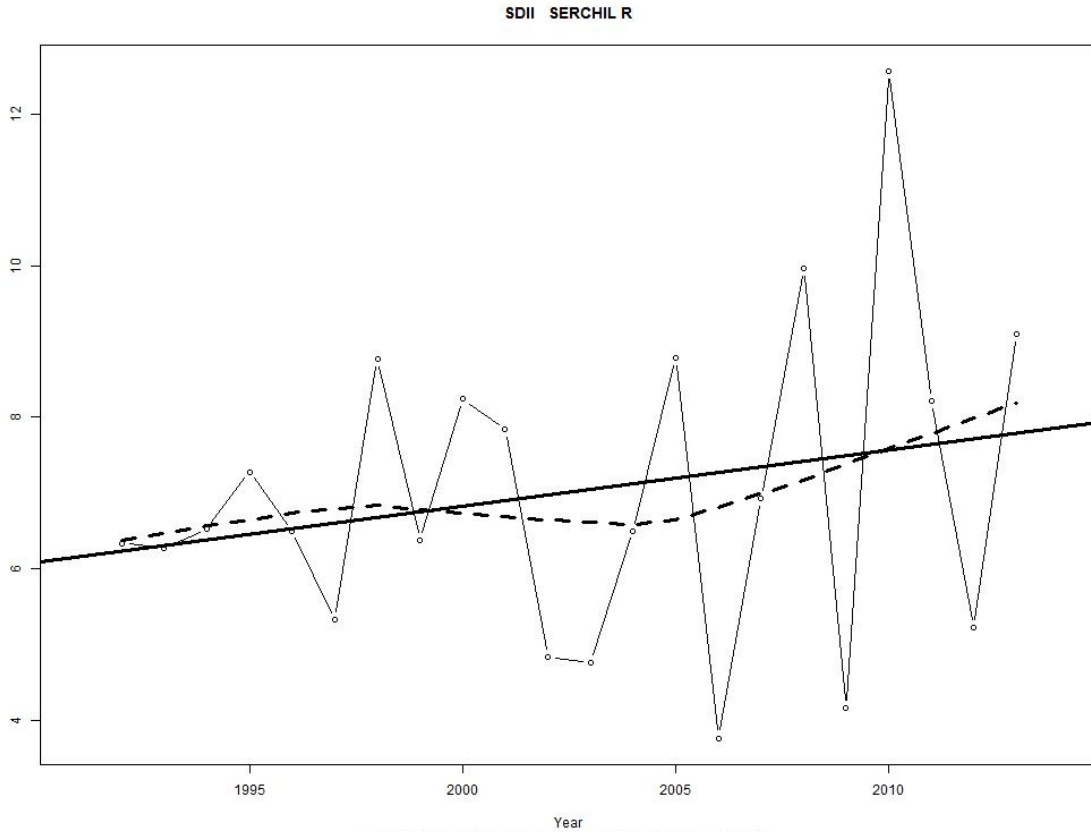
Fuente: elaboración propia, empleando RClimDex

Figura 43. **Mayor número de días secos consecutivos en un año, estación Xequemeyá**



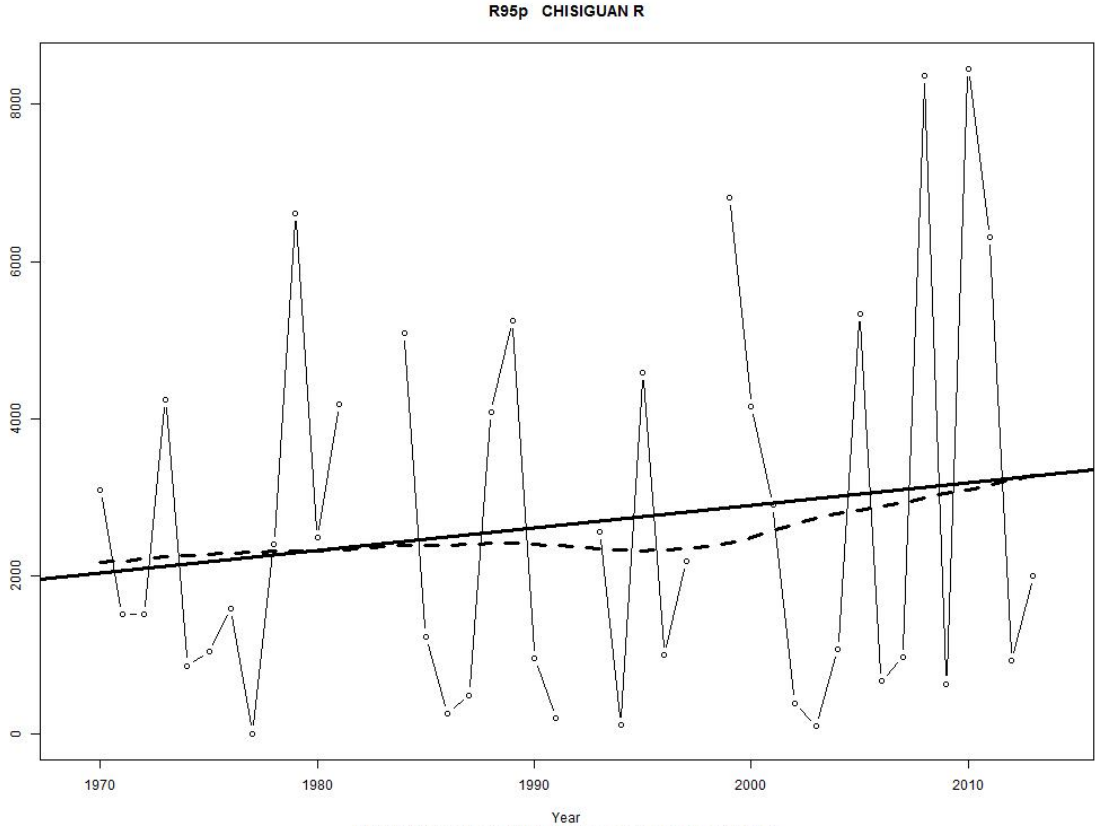
Fuente: elaboración propia, empleando RClmDex.

Figura 44. Caudal medio anual, estación Serchil



Fuente: elaboración propia, con empleando RClimDex.

Figura 45. Caudal intenso, estación Chisiguán



Fuente: elaboración propia, empleando RClimDex.

## **6. ANÁLISIS Y RESULTADOS**

En el presente capítulo, luego de realizar el proceso de control y calidad de los datos y cálculo de los índices de cambio climático, se analiza el comportamiento de la precipitación y caudales en la parte alta de la cuenca del río Chixoy mediante análisis gráfico y de tendencia de los índices, buscando establecer su comportamiento y estimar su variabilidad.

### **6.1. Precipitación**

Se genera precipitación por la condensación del vapor sobre la superficie terrestre que resulta en la caída de agua sólida o líquida, cantidad que fue registrada y medida en la red de estaciones meteorológicas del estudio.

#### **6.1.1. Estaciones para estudio de precipitación**

El estudio del comportamiento de la precipitación y cálculo de sus índices, se basa en información de 12 estaciones meteorológicas listadas en la tabla XLV, que están distribuidas dentro y en la periferia de la parte alta de la cuenca del río Chixoy.

Destaca principalmente la longitud y consistencia de las series de precipitación diaria que van desde los 22 a los 44 años de registro, ubicadas en altitudes desde los 3 150 a los 1 180 metros sobre el nivel del mar, que cuentan con personal lector de experiencia en la toma de registros y con instrumentación y equipo en buenas condiciones, lo que aumenta el grado de confiabilidad en los resultados del análisis.

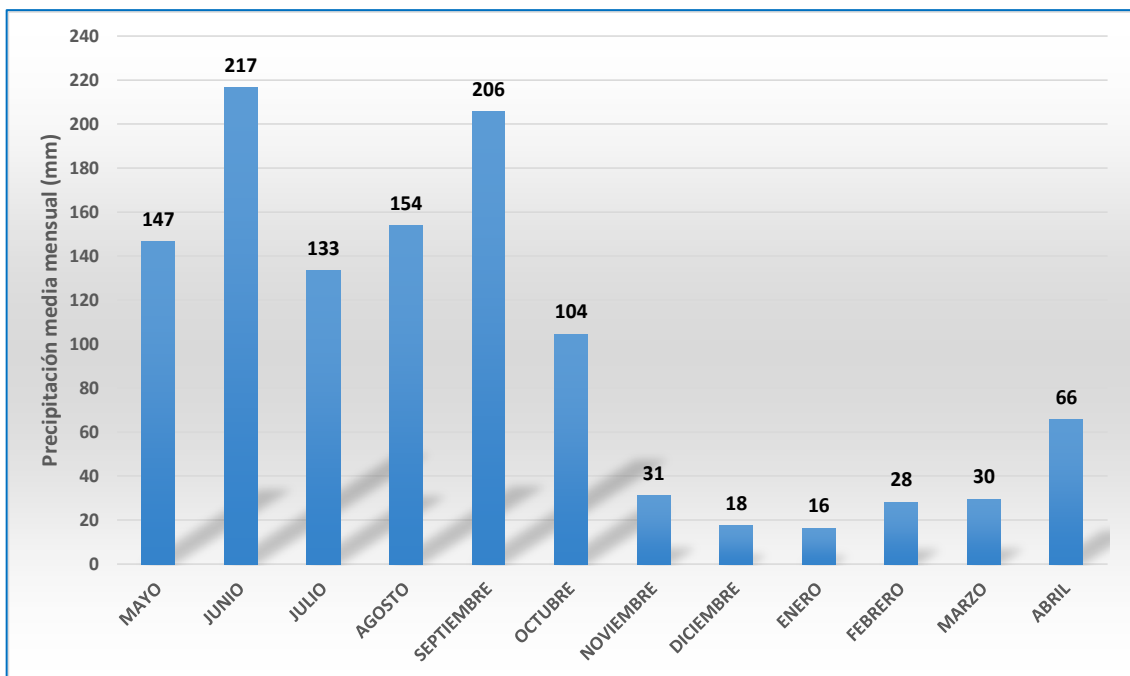
Tabla XLIV. **Estaciones para estudio de precipitación y cálculo de índices**

<b>No.</b>	<b>Estación</b>	<b>Institución</b>	<b>Latitud</b>	<b>Longitud</b>	<b>Altitud (msnm)</b>	<b>Años registro</b>
1	La Capellanía	INDE	15°24'41"	91°26'06"	3 150	29
2	Totonicapán	INDE	14°54'28"	91°22'27"	2 405	33
3	Tierra Blanca	INDE	15°06'49"	91°30'25"	2 325	22
4	Santa Cruz del Quiché	INDE	15°01'33"	91°09'32"	2 010	34
5	Xequemeyá	INDE	15°04'49"	91°21'59"	2 002	35
6	San Antonio Ilotenango	INDE	15°03'17"	91°13'26"	1 960	36
7	Nebaj	Insivumeh	15°23'53"	91°08'32"	1 906	44
8	Huehuetenango	Insivumeh	15°19'02"	91°30'11"	1 870	44
9	Comitancillo	INDE	15°13'43"	91°14'22"	1 775	35
10	El Paradillo	INDE	15°15'31"	91°19'01"	1 745	35
11	Serchil	INDE	15°14'10"	91°24'28"	1 635	22
12	Chuitinamit	Insivumeh	15°17'18"	91°05'10"	1 180	44

Fuente: elaboración propia.

La precipitación media mensual se indica en gráfico de la figura 46, donde se observa el patrón de la lluvia mensual para el periodo del año hidrológico, considerando las estaciones analizadas en este estudio. De igual manera, el gráfico indicado define claramente la época de invierno o lluviosa y la época de verano o seca para la parte alta de la cuenca del río Chixoy. La época de invierno comprende los meses de mayo a octubre y para la época de verano lo comprende los meses de noviembre a abril. También se identifican los meses de mayor acumulación de lluvia, siendo estos junio y septiembre y un descenso para los meses de julio y agosto por el efecto de la canícula que regularmente se presenta en esa época. En cuanto a la época de verano, los meses con mayor déficit de lluvia son los de diciembre y enero.

Figura 46. **Precipitación media mensual, parte alta cuenca Chixoy**



Fuente: elaboración propia.

### **6.1.2. Índices de precipitación**

Como fue indicado, el objetivo de este estudio es analizar el comportamiento de la precipitación en la parte alta de la cuenca del río Chixoy y si este se asocia a los efectos del cambio climático, por lo que en la tabla XLVI se muestran los resultados de los índices calculados mediante el software RClimDex para cada estación y su tendencia; donde el símbolo (+) significa que la precipitación presenta una tendencia positiva, es decir un incremento, y el símbolo (–) significa tendencia negativa o disminución en la precipitación.



Tabla XLV. Resultados índices de precipitación

Estación	Mayor número de días secos consecutivos en un año		Mayor número de días húmedos consecutivos en un año		Precipitación total al año	Días en un año con lluvia mayor a 20 mm		Número de días en un año con lluvia mayor a 40 mm		Días en un año con lluvia mayor al percentil 95		
		Tendencia		Tendencia			Tendencia		Tendencia		Tendencia	
Capellanía	-0,07	(-)	0,44	(+)	18,82	(+)	0,40	(+)	0,13	(+)	8,55	(+)
Totonicapán	0,46	(+)	-0,12	(-)	5,33	(+)	0,13	(+)	0,06	(+)	4,67	(+)
Tierra Blanca	0,88	(+)	0,02	(+)	12,82	(+)	0,37	(+)	0,13	(+)	5,94	(+)
Quiché	0,14	(+)	-0,07	(-)	1,40	(+)	0,07	(+)	0,02	(+)	2,43	(+)
Xequemeyá	-0,48	(-)	0,10	(+)	7,12	(+)	0,08	(+)	0,05	(+)	3,22	(+)
Ilotenango	0,78	(+)	-0,21	(-)	4,37	(+)	0,05	(+)	0,03	(+)	5,50	(+)
Nebaj	-0,05	(-)	0,17	(+)	3,83	(+)	0,07	(+)	0,05	(+)	2,17	(+)
Huehuetenango	0,66	(+)	0,04	(+)	5,30	(+)	0,10	(+)	0,04	(+)	1,93	(+)
Comitancillo	0,19	(+)	-0,03	(+)	7,08	(+)	0,13	(+)	0,08	(+)	5,99	(+)
El Paradillo	1,85	(+)	0,02	(+)	6,31	(+)	0,21	(+)	0,02	(+)	2,41	(+)
Serchil	-0,16	(-)	0,08	(+)	9,23	(+)	0,14	(+)	0,11	(+)	6,10	(+)
Chuitinamit	0,04	(+)	-0,11	(-)	5,91	(+)	0,13	(+)	0,02	(+)	2,75	(+)

Fuente: elaboración propia.

### **6.1.3. Tendencia de la precipitación**

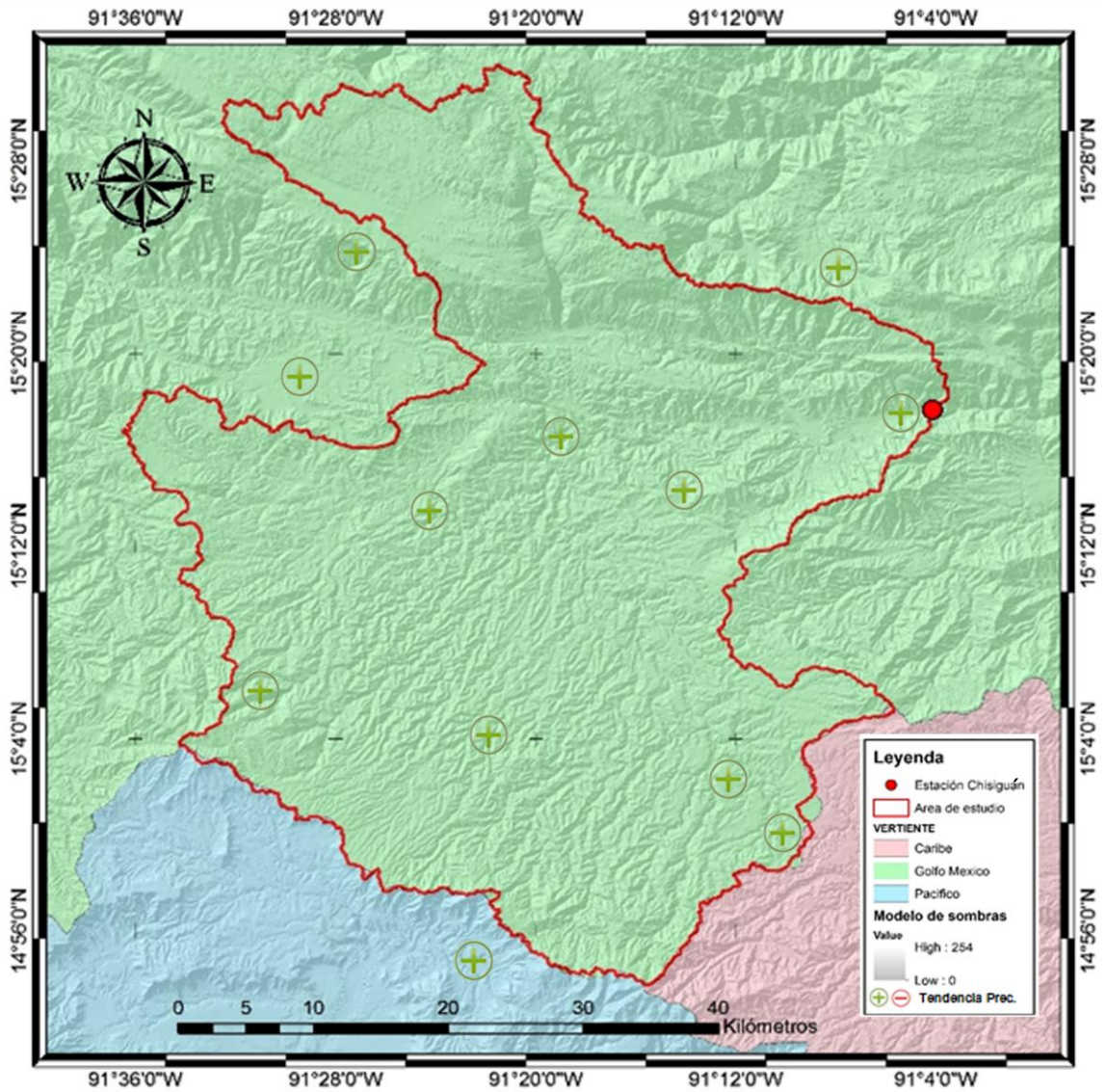
La tendencia se analizó considerando que puede ser positiva o negativa y que la misma puede reflejar trastornos en el clima ya sea por la ocurrencia de eventos con acumulados de precipitación considerables o por la influencia de periodos deficitarios.

#### **6.1.3.1. Tendencia de la precipitación total al año**

De acuerdo al indicador relacionado con la precipitación total al año, esta variable presenta el siguiente comportamiento:

- Se aprecia claramente el incremento (+) en la tendencia de la lluvia anual y que la misma es significativa en toda la parte alta de la cuenca del río Chixoy, área que ha sido influenciada por la trayectoria de los principales eventos meteorológicos extremos de la última década, dentro de los que pueden mencionar la tormenta tropical Agatha en el 2010 y cuyo efecto se aprecia directamente en las gráficas del índice de precipitación total anual, que según los datos de precipitación acumulada, es el año más húmedo registrado hasta el momento.
- Se evidencia que las regiones con mayor incremento en la tendencia de la precipitación anual son las de La Capellanía, Tierra Blanca y Serchil, situación que puede estar relacionada con las características orográficas y de recurso forestal de la zona, con precipitaciones acumuladas que presentan un incremento anual promedio en la última década (años 2005 al 2014) de 100 mm en comparación con la década anterior (años 1995 al 2004).

Figura 47. Mapa de tendencia precipitación total anual



Fuente: elaboración propia, empleando ArcGis y modelo de elevación digital.

### **6.1.3.2. Tendencia de las precipitaciones extremas**

De acuerdo al indicador relacionado con las precipitaciones extremas, esta variable presenta el siguiente comportamiento:

- El comportamiento de las precipitaciones de intensidad alta es similar al de la precipitación total anual, es decir, toda la parte alta de la cuenca tiene una tendencia de incremento al efecto de eventos de tipo extremo.
- Las regiones con mayor efecto de eventos extremos son las ubicadas dentro del área de influencia de las estaciones de La Capellanía, Serchil, Comitancillo y Tierra Blanca. El comportamiento de incremento descrito anteriormente, se refleja principalmente en las regiones cercanas a las estaciones que están ubicadas y distribuidas en el centro y sur de la parte alta de la cuenca del río Chixoy.
- El comportamiento de incremento de precipitaciones extremas y su efecto en los caudales, tiene relación directa con el periodo de retorno de estos eventos, por lo que la cantidad de años en que se repitan o puedan ser excedidos, puede reducirse.

### **6.1.3.3. Tendencia de los días secos consecutivos**

De acuerdo al indicador relacionado con los días secos consecutivos, esta variable presenta el siguiente comportamiento:

- Del total de estaciones utilizadas en el estudio, se aprecia que el 66% presenta un incremento en la tendencia de días secos consecutivos, situación que puede deberse a la ampliación de los periodos de veranillo o canícula que se presenta en los meses de julio y agosto con frecuencia de ocurrencia anual, como también la ampliación de los períodos de verano.
- La tendencia más marcada en el incremento de los días secos consecutivos se da en región de El Paradillo, posiblemente por la reducción de la cobertura boscosa que es notoria, y por el cambio del uso del suelo a actividades agrícolas, situación que se apreció durante el recorrido realizado en la fase de campo.

## **6.2. Caudal**

La acumulación de escorrentía, producto de la precipitación en la parte alta de la cuenca del río Chixoy, genera un volumen de agua que circula por el cauce de un río, volumen que fue registrado y medido en la red de estaciones hidrométricas del estudio.

### **6.2.1. Estaciones para estudio de caudal**

El estudio del comportamiento del caudal y cálculo de sus índices, se basa en información de 5 estaciones hidrométricas listadas en la tabla XLVII, que están distribuidas en los principales tributarios de la parte alta de la cuenca del río Chixoy.

Destaca, principalmente, la longitud y consistencia de las series de caudales diarios que van desde los 22 a los 45 años de registro, ubicadas en

altitudes desde los 1 630 a los 1 175 metros sobre el nivel del mar, que cuentan con personal lector de experiencia en la toma de registros y con instrumentación y equipo en buenas condiciones, lo que aumenta el grado de confiabilidad en los resultados del análisis.

Importante indicar que, dentro del grupo de estaciones hidrométricas, la estación Chisiguán, fue construida entre los años 1967 y 1968 como parte de las estaciones iniciales para analizar el comportamiento del recurso hídrico en la cuenca del río Chixoy y como una de las estaciones más importantes para el posterior diseño de la Central Hidroeléctrica Chixoy. Ahora es utilizada para el monitoreo continuo del comportamiento de los caudales de aporte al embalse de regulación anual de dicha central.

Como fue indicado, la estación hidrométrica Chisiguán, representa el punto final de control para analizar el comportamiento de los caudales útiles que resultan de la precipitación que se distribuye en aproximadamente 2 200 km<sup>2</sup> de área.

Tabla XLVI. **Estaciones para estudio de caudales y cálculo de índices**

No.	Estación	Institución	Latitud	Longitud	Altitud (msnm)	Años registro
1	Serchil	INDE	15°14'07"	91°24'25"	1 630	23
2	La Estancia	INDE	15°20'50"	91°16'26"	1 585	22
3	Pacaranat	INDE	15°14'53"	91°18'50"	1 505	23
4	El Paradillo	INDE	15°15'57"	91°19'31"	1 455	30
5	Chisiguán	INDE	15°17'42"	91°04'16"	1 175	45

Fuente: elaboración propia.

### 6.2.2. Índices de caudal

El objetivo de este estudio, también consiste en analizar el comportamiento de los caudales de los principales tributarios de la parte alta de la cuenca del río Chixoy y si este se asocia a los efectos del cambio climático, por lo que en la tabla XLVIII se muestran los resultados de los índices calculados mediante el software RClimDex para cada estación hidrométrica y su tendencia; donde el símbolo (+) significa que los caudales presentan una tendencia positiva, es decir, un incremento, y el símbolo (-) significa tendencia negativa o disminución en los caudales.

Tabla XLVII. **Resultado índices de caudal**

Estación	Altitud (msnm)	Años registro	Caudal medio anual	Tendencia	Días en un año con caudales mayores al percentil 95	Tendencia
Serchil	1 630	23	0,07	(+)	11,71	(+)
La Estancia	1 585	22	0,28	(+)	66,05	(+)
Pacaranat	1 505	23	0,13	(+)	26,46	(+)
El Paradillo	1 455	30	0,02	(+)	17,38	(+)
Chisiguán	1 175	45	0,18	(+)	28,78	(+)

Fuente: elaboración propia.

### 6.2.3. **Tendencia del caudal**

La tendencia se analizó considerando que puede ser positiva o negativa y que la misma puede reflejar trastornos en el clima, ya sea por la ocurrencia de caudales medios diarios en aumento o relacionados con eventos extremos.

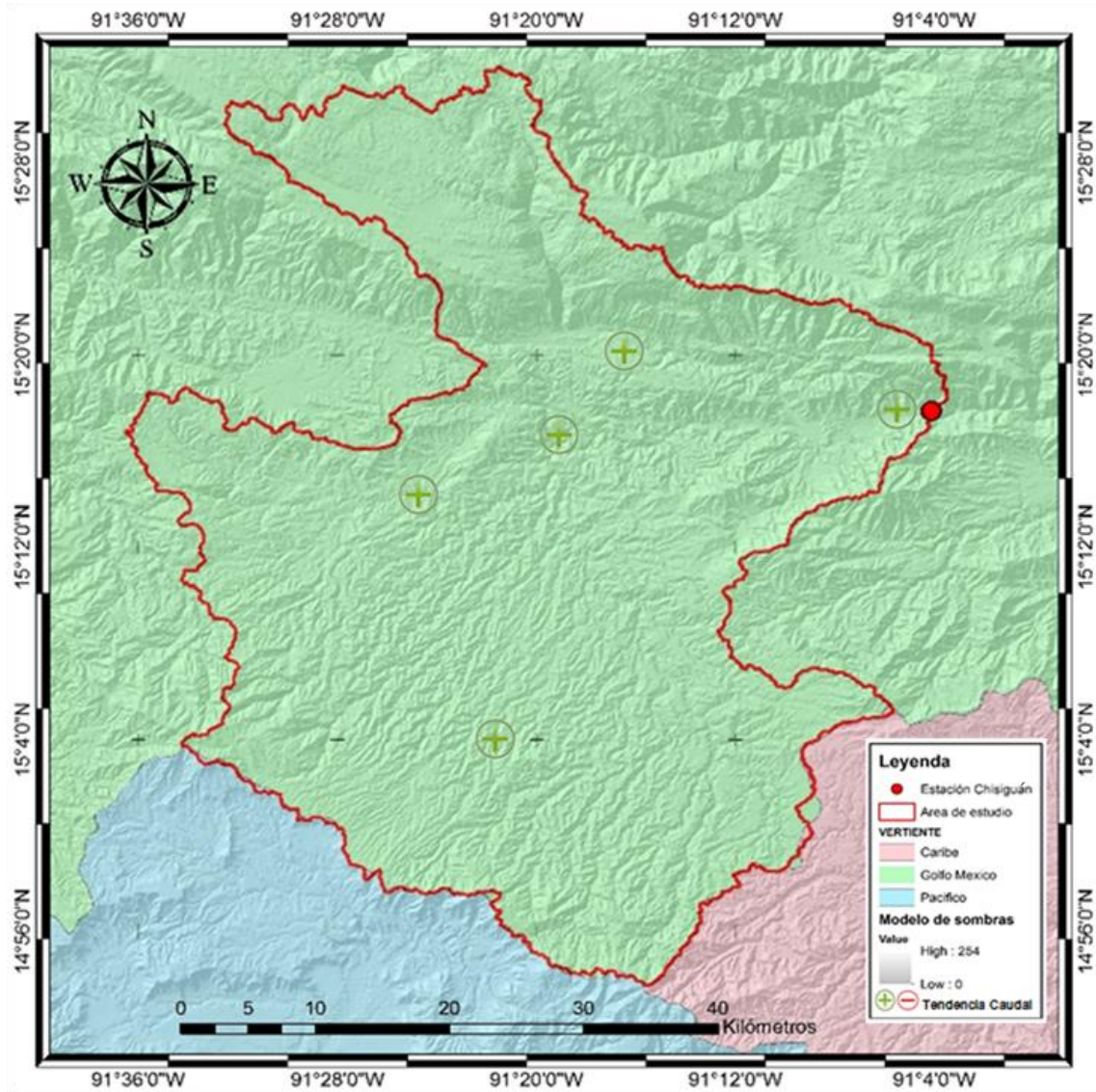
#### 6.2.3.1. **Tendencia del caudal medio anual**

De acuerdo al indicador relacionado con los caudales medios, esta variable presenta el siguiente comportamiento:



- Se aprecia claramente el incremento (+) en la tendencia del caudal medio y que la misma es significativa para todas las estaciones hidrométricas distribuidas en la parte alta de la cuenca del río Chixoy. Lo anterior presenta correlación con el incremento de tendencia de la precipitación total anual indicada en su momento.
- Se identifica que la región con mayor incremento en la tendencia del caudal medio es la región noroeste de la parte alta de la cuenca del río Chixoy y medida en la estación limnimétrica La Estancia, independiente de la magnitud del caudal; situación que es consistente con el incremento en la tendencia de la precipitación registrada en la zona donde se ubica la estación meteorológica La Capellanía. El comportamiento anterior se da de similar forma en la región suroeste de la parte alta de la cuenca, por el incremento en la tendencia del caudal medio de la estación hidrométrica Serchil, resultante del incremento en la precipitación registrada en la zona donde se ubica la estación meteorológica Tierra Blanca.

Figura 48. Mapa de tendencia caudal medio anual



Fuente: elaboración propia, empleando ArcGis y modelo de elevación digital.

### **6.2.3.2. Tendencia de caudal extremo**

De acuerdo al indicador relacionado con los caudales extremos, ésta variable presenta el siguiente comportamiento:

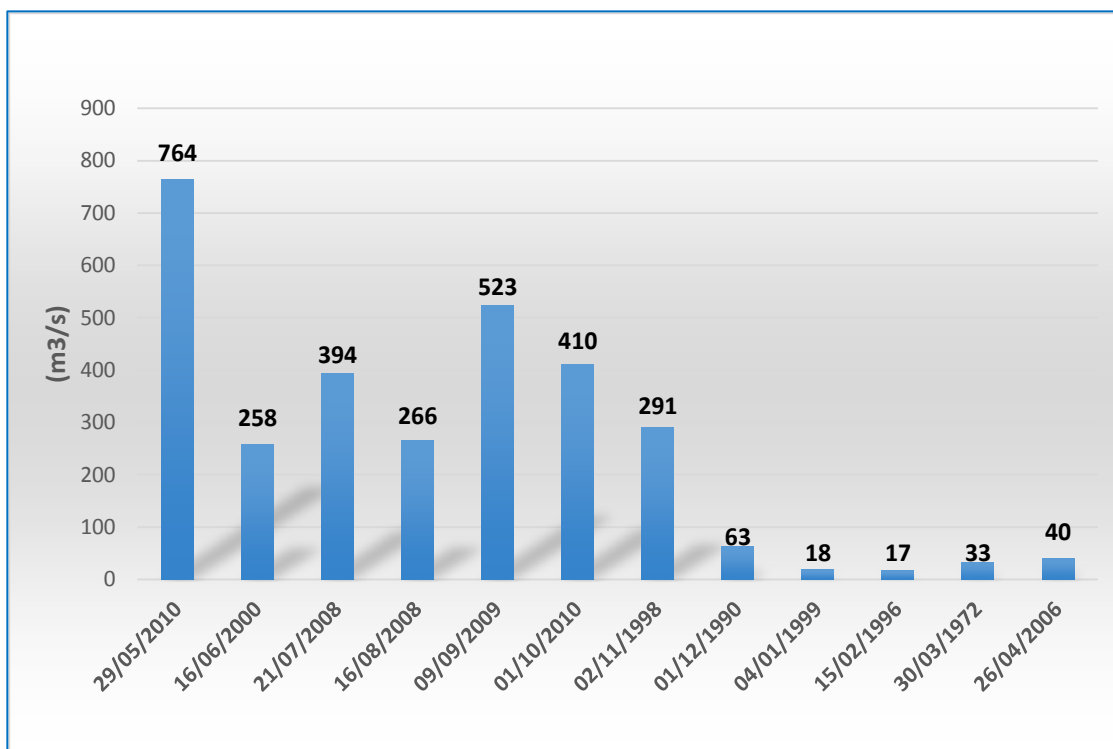
- Se establece un incremento importante en la tendencia de caudales extremos en todos los puntos de control de la parte alta de la cuenca del río Chixoy, esto directamente relacionado con el incremento en la ocurrencia de eventos climáticos extremos, situación que es consistente con el incremento de precipitaciones de intensidad alta. Es importante indicar que el incremento en la ocurrencia de caudales extremos trae consigo un mayor arrastre de sedimentos que son depositados en los márgenes de los cauces o finalmente en el embalse de la hidroeléctrica.
- La región noreste de la parte alta de la cuenca, es la que presenta mayor incremento en la tendencia y presencia de caudales extremos; lo anterior por el incremento en la ocurrencia de eventos extremos y también puede deberse al cambio en el uso del suelo, ya que pasó de una cobertura boscosa natural de baja densidad, a un uso directo de pastoreo y agrícola de cultivos anuales, lo que facilita el escurrimiento superficial y reduce los tiempos de concentración.

### **6.3. Eventos extremos y cambio climático**

Como evidencia de un posible efecto del cambio climático en el incremento o consecución de caudales extremos para la parte alta de la cuenca del río Chixoy, se identifica mediante análisis de registros hidrometeorológicos, un incremento importante en la ocurrencia de precipitaciones y caudales extremos en las últimas décadas.

Lo indicado en el párrafo anterior, se identifica en la gráfica de la figura 49 donde se establece que el 50 % de los caudales diarios extremos registrados en la estación hidrométrica Chisiguán durante un periodo de 45 años se presentaron en la última década y donde el 66 % de esos caudales máximos extremos se dieron durante los inviernos de 3 años consecutivos (2008-2010). El caudal diario extremo y mayor de todos corresponde al caudal medio diario registrado para la tormenta tropical Agatha.

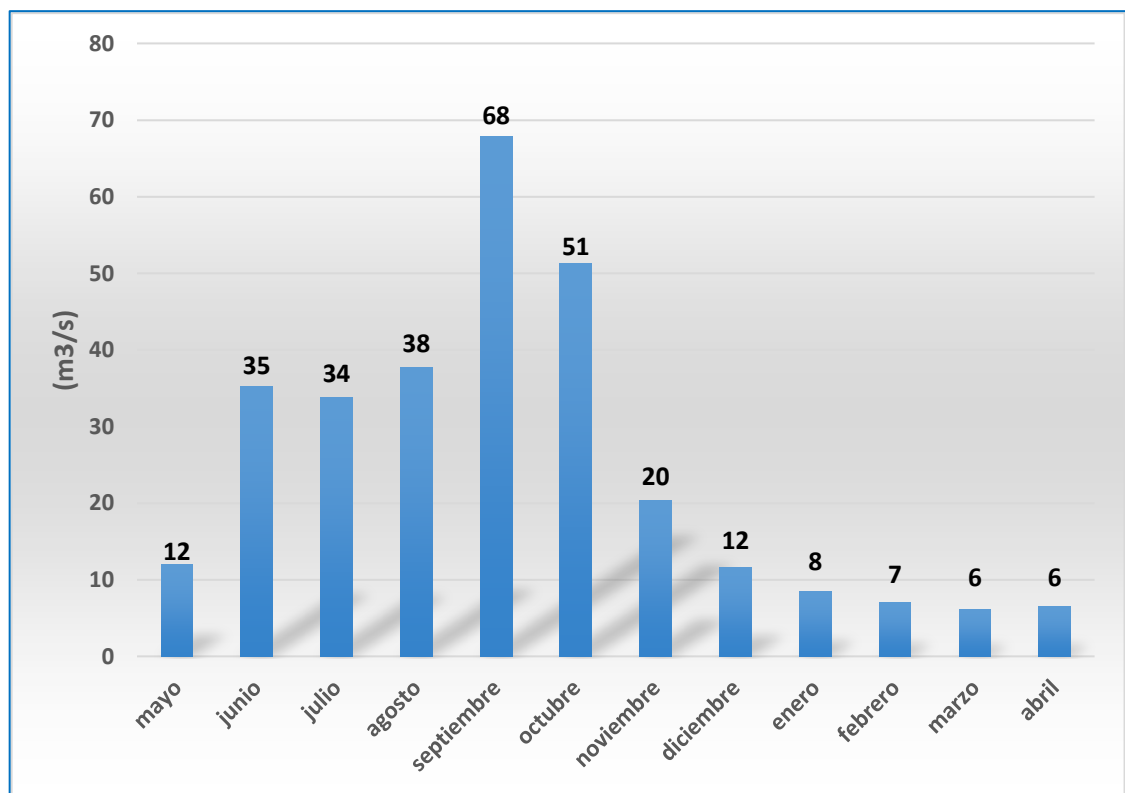
Figura 49. **Caudal diario extremo, estación Chisiguán**



Fuente: elaboración propia.

Durante el periodo de invierno y cuando los suelos ya presentan un porcentaje de saturación considerable, el escurrimiento superficial que resulta en caudal efectivo tiende a incrementarse; comportamiento que se identifica en el gráfico de la figura 50 donde se aprecia que se presenta el mayor caudal en el mes de septiembre a pesar que la precipitación media del mes de septiembre es similar a la del mes de julio.

Figura 50. Caudal medio mensual, estación Chisiguán



Fuente: elaboración propia.



## CONCLUSIONES

1. En relación al comportamiento de la precipitación acumulada, es evidente la tendencia al aumento generalizado de la precipitación en la parte alta de la cuenca del río Chixoy, donde destaca, principalmente, la zona de las estaciones La Capellanía, Tierra Blanca, Serchil y Xequemeyá, donde se observa de manera significativa el incremento en la tendencia. El mayor incremento se presenta en la parte suroeste del área de estudio.
2. Según los índices de precipitación intensa o extrema, se observa también el incremento de eventos de esa naturaleza en toda la parte alta de la cuenca, incremento que se da en zonas donde se presenta el mayor acumulado de lluvia como resultado, principalmente de eventos extremos de precipitación y no de lluvias con patrones regulares, haciendo más vulnerable la zona e incrementando el riesgo de desastres con efectos negativos en la infraestructura vial, cultivos, entre otros.
3. Se evidencia el incremento de los días secos consecutivos en la mayoría de las zonas cercanas a las estaciones de meteorológicas, situación que remarca la ampliación de los periodos de veranillo o canícula o la disminución del periodo de invierno. Lo anterior con efectos en la distribución y disminución de la disponibilidad del recurso hídrico.

4. El caudal medio, según su índice, presenta incremento en su tendencia y la misma es significativa en todas las estaciones hidrométricas distribuidas en la parte alta de la cuenca del río Chixoy, por lo que se espera que con el tiempo se presente mayor caudal medio, situación que coincide con el comportamiento de incremento de tendencia de la precipitación anual.
5. Se define un incremento importante en la tendencia de caudales extremos de los tributarios de la parte alta de la cuenca del río Chixoy con control hidrométrico, también relacionados con el comportamiento de incremento en la ocurrencia de eventos climáticos extremos.
6. Se establece que el 50 % de los caudales diarios extremos registrados en la estación hidrométrica Chisiguán a lo largo de 45 años, se presentaron en la última década y donde el 66 % de esos caudales máximos se dieron durante el invierno de 3 años consecutivos (2008-2010), siendo el máximo caudal el registrado por efectos de la precipitación de la tormenta tropical Agatha. Lo anterior como producto de la alteración de la dinámica climática de la precipitación.
7. La evidencia física y estadística del comportamiento de las variables que se analizaron, dan cuenta de la alteración de la variabilidad climática natural de la zona y de su dinámica, situación que se relaciona con los efectos propios del cambio climático.
8. Del análisis morfométrico, la parte alta de la cuenca del río Chixoy se clasifica como una cuenca sedimentaria.



## RECOMENDACIONES

1. Implementar nuevos puntos de control meteorológico e hidrométrico en la parte alta de la cuenca del río Chixoy para que se pueda estudiar con mayor detalle el cambio en el comportamiento de las variables climáticas y con ello orientar de mejor manera, actividades de manejo de cuencas, agrícolas, de infraestructura y aprovechamiento hidroeléctrico.
2. El crecimiento demográfico y la necesidad habitacional pueden ir modificando el entorno cercano de algunas estaciones meteorológicas, por lo que deben establecerse las medidas de mitigación necesarias para que no se afecte el patrón de registro y comportamiento de las variables medidas.
3. La mayor parte del personal técnico y lector encargado de la red de estaciones meteorológicas e hidrométricas es de edad avanzada, por lo que las entidades encargadas del mismo, deben considerar su renovación mediante procesos que faciliten el intercambio de experiencias, y que ello permita la continuidad de operación de la red y la calidad de información.
4. El personal lector de la red de estaciones, además de registrar el comportamiento de las variables, realiza actividades de limpieza, mantenimiento y resguardo de los equipos, por lo que se debe hacer un estudio de actualización salarial en función a las atribuciones que actualmente el personal desarrolla.

5. Realizar un estudio de cambio de uso del suelo, para planificar adecuadamente el crecimiento urbanístico y desarrollo agrícola.
6. Realizar un estudio de zonas de recarga hídrica para aprovechar al máximo los excedentes de lluvia que se presentan en época lluviosa.
7. Desarrollar planes de reforestación para amortiguar eventos extremos y erosión.

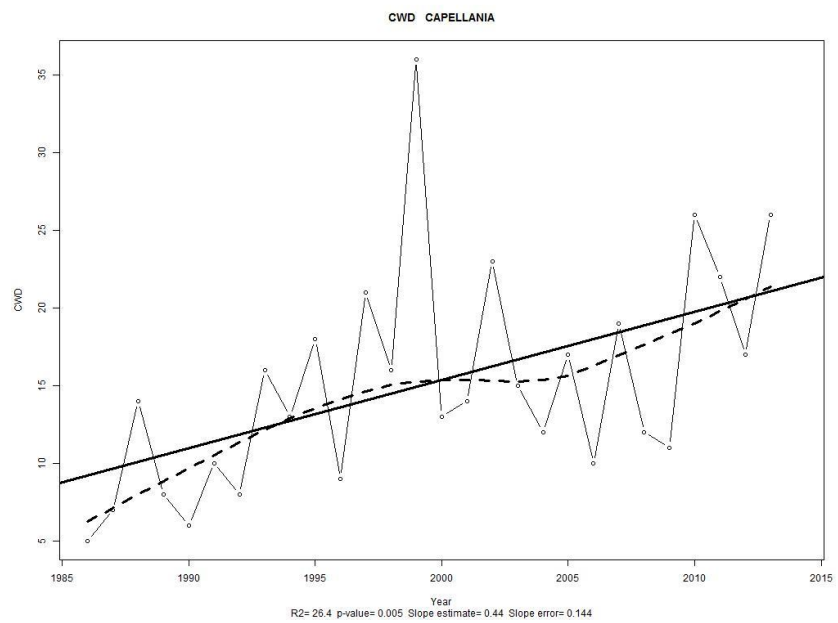
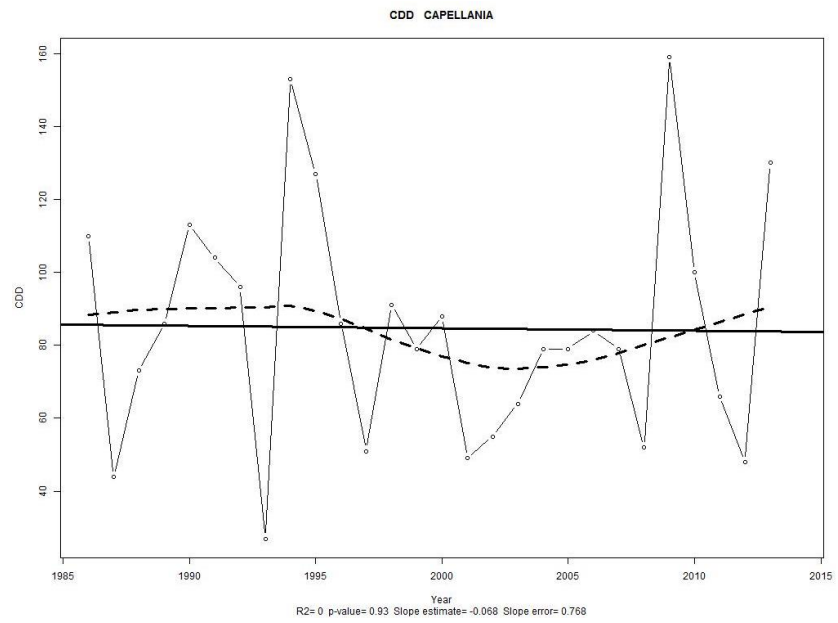
## BIBLIOGRAFÍA

1. APARICIO, F. *Fundamentos de hidrología de superficie*. México: Limusa, 1992. 302 p.
2. BATEMAN, Allen. *Hidrología básica y aplicada*. Barcelona: Grupo de investigación en transporte de sedimentos. 2007. 70 p.
3. CHEREQUE, WENDOR. *Hidrología para estudiantes de Ingeniería Civil*. 2a ed., Perú: Pontificia Universidad Católica del Perú, 1989. 223 p.
4. CHOW, Ven, MAIDMENT, David. *Hidrología aplicada*. Bogotá: McGraw-Hill Interamericana, Bogotá 1994. 584 p.
5. FUENTES, Juan. *Impacto hidrológico asociado al proceso de urbanización en la subcuenca del río Villalobos*. Antigua Guatemala, 2013. 163 p.
6. Instituto Nacional de Electrificación. *Caracterización del embalse Chixoy*. INDE: Guatemala. Departamento de Control Operativo, 2012. 79 p.
7. \_\_\_\_\_. *Estaciones meteorológicas e hidrométricas*. INDE: Guatemala. Departamento de Hidrología, 2013.
8. Instituto de Sismología Vulcanología Meteorología e Hidrología. Insivumeh: Guatemala. *Atlas Hidrológico*. 2005. 26 p.

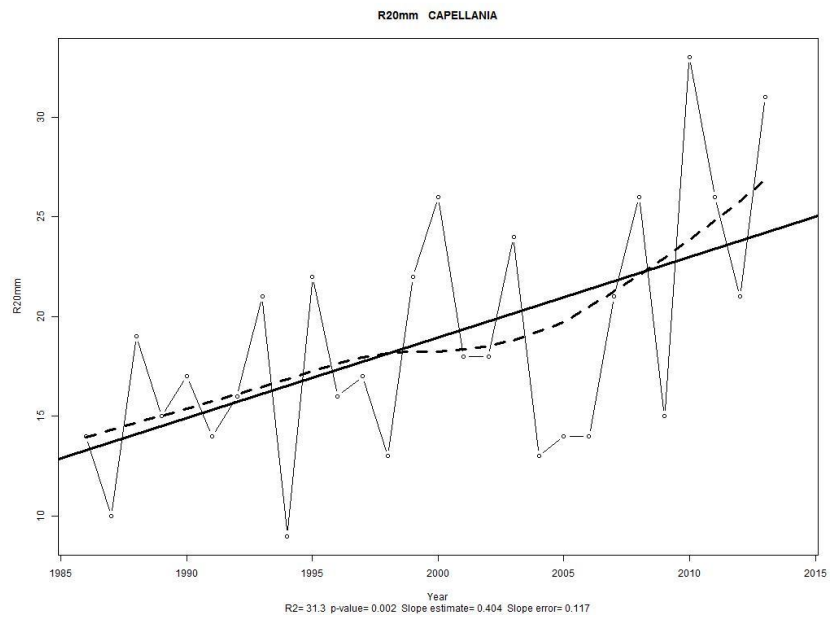
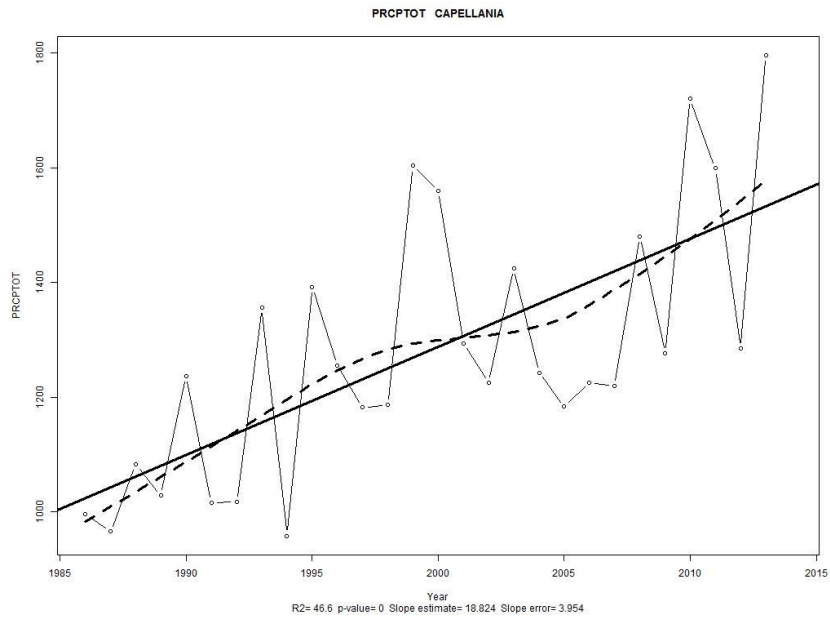
9. IPCC, 2007. *Cambio climático 2007: Informe de síntesis*. Ginebra, Suiza: 2008. 104 p.
10. LINSLEY Ray; KOHLER Max; PAULUS Joseph. *Hidrología para Ingenieros*. 2a. ed. Bogotá: McGraw-Hill Latinoamericana, 1977. 357 p.
11. LLAMAS, J. *Hidrología general principios y aplicaciones*. México: Universidad Autónoma de México, 1989. 302 p.
12. MAYORGA, R.; HURTADO G.; BENAVIDES, H. *Evidencias del cambio climático en Colombia.*, Colombia: IDEAM. 2011. 47 p.
13. Ministerio de Agricultura Ganadería y Alimentación. *Mapa fisiográfico-geomorfológico de la República de Guatemala: Unidad de políticas e información estratégica*. Guatemala: 2001. 109 p.
14. MONSALVE, G. *Hidrología en la ingeniería*. 2a. ed. México: Alfaomega, 1999. 384 p.
15. Organización Meteorológica Mundial. *Guía de prácticas hidrológicas*. 5a. ed. México. 1994. 781 p.
16. ONG Germanwatch. *Índice de riesgo climático global 2015*. Berlín. 2015. 8 p.

# APÉNDICES

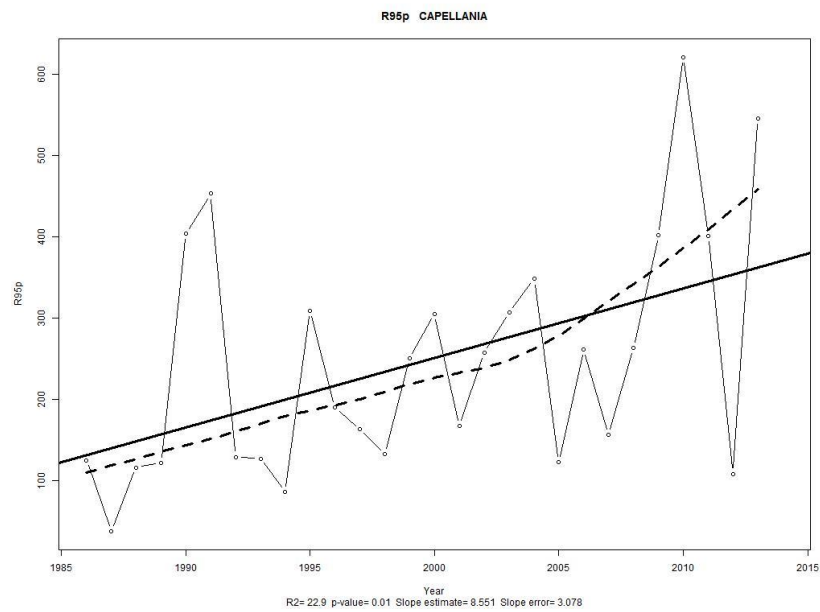
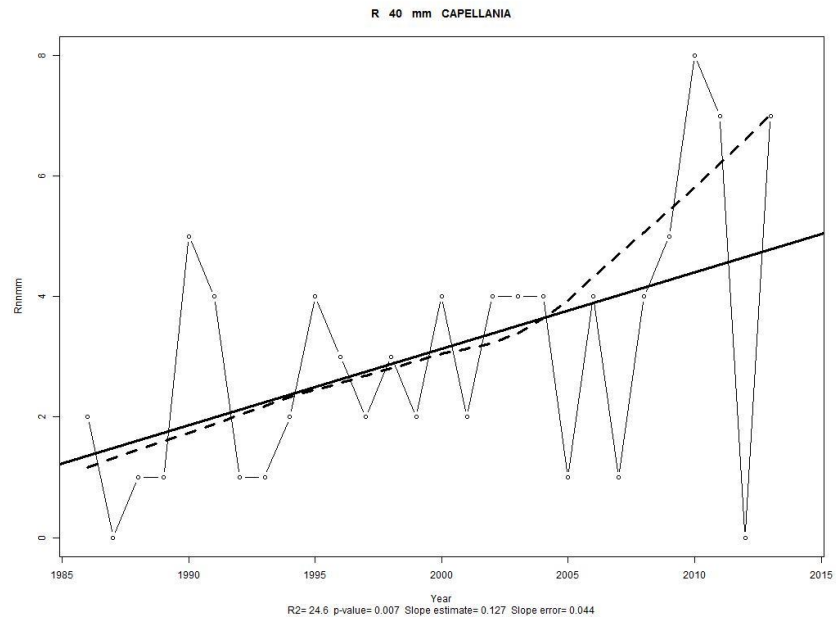
## Apéndice 1. Índices de precipitación, estación La Capellanía



Continuación del apéndice 1.

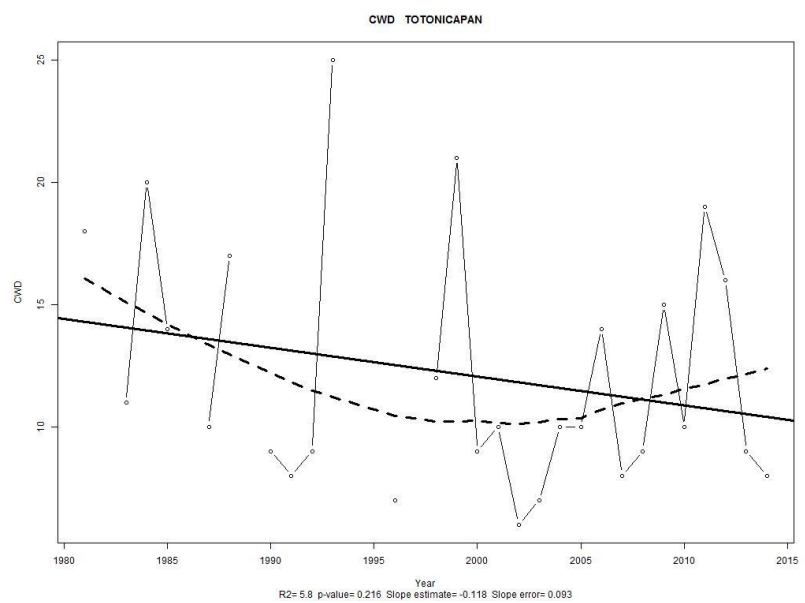
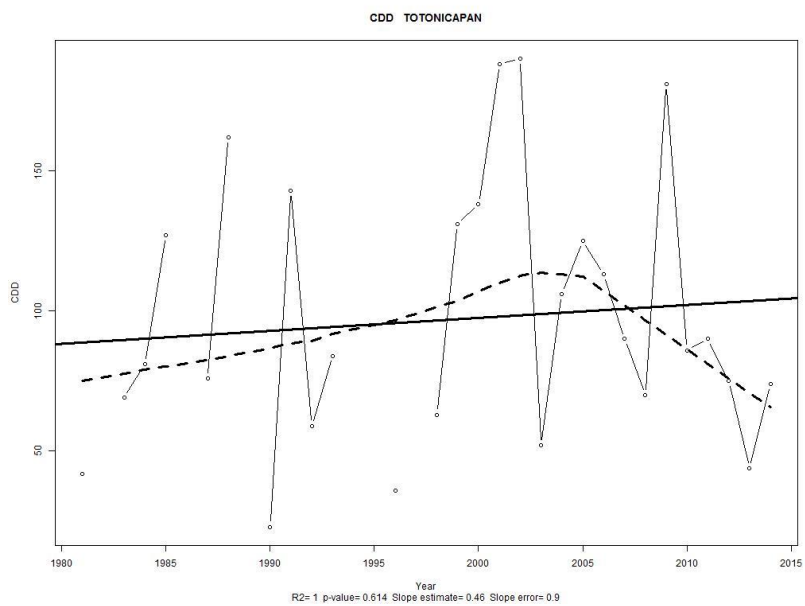


Continuación del apéndice 1.



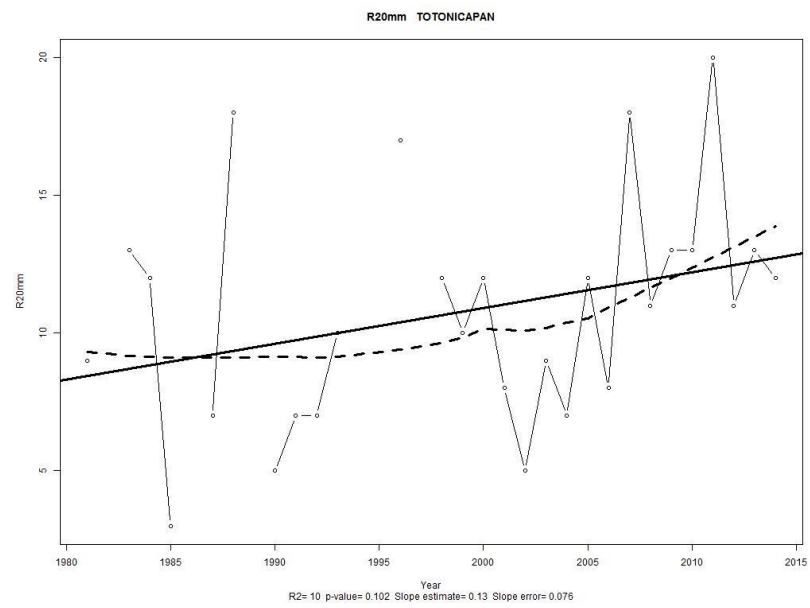
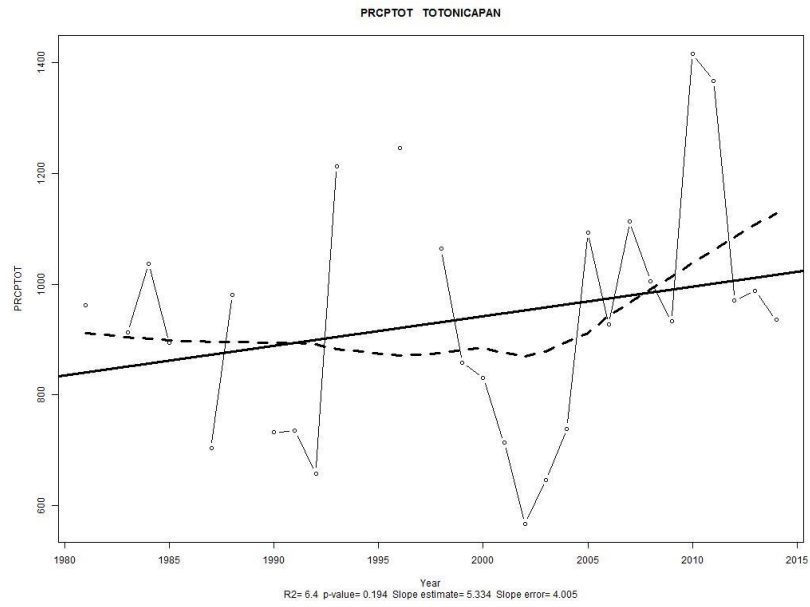
Fuente: elaboración propia, empleando RClimDex.

## Apéndice 2. Índices de precipitación, estación Tonicapán

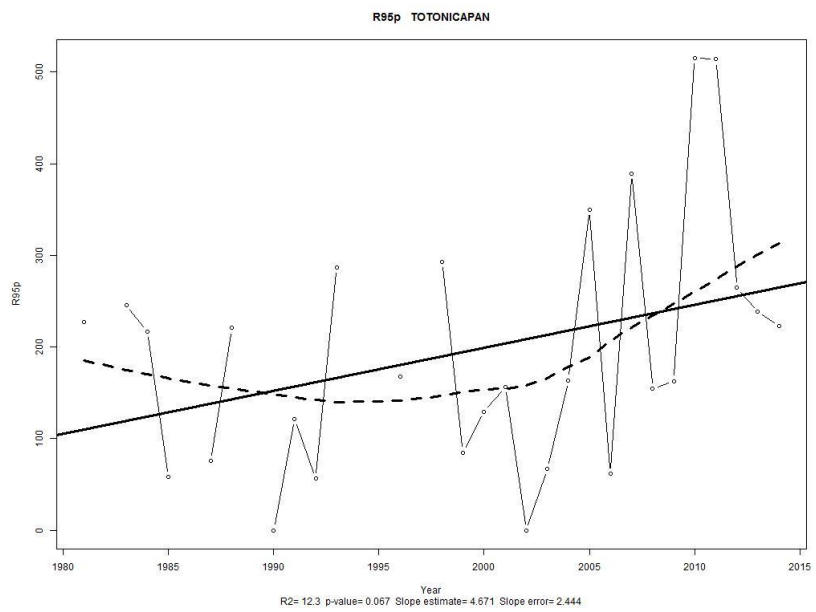
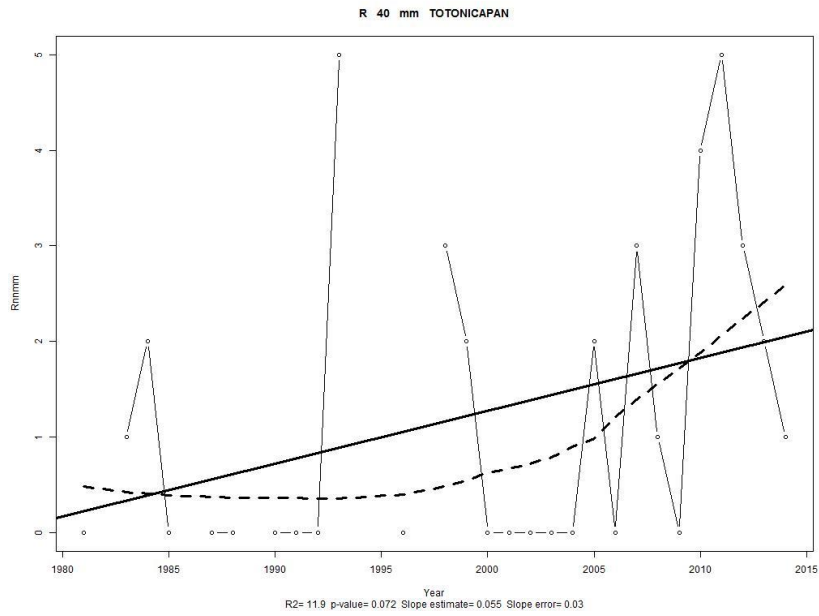




Continuación del apéndice 2.

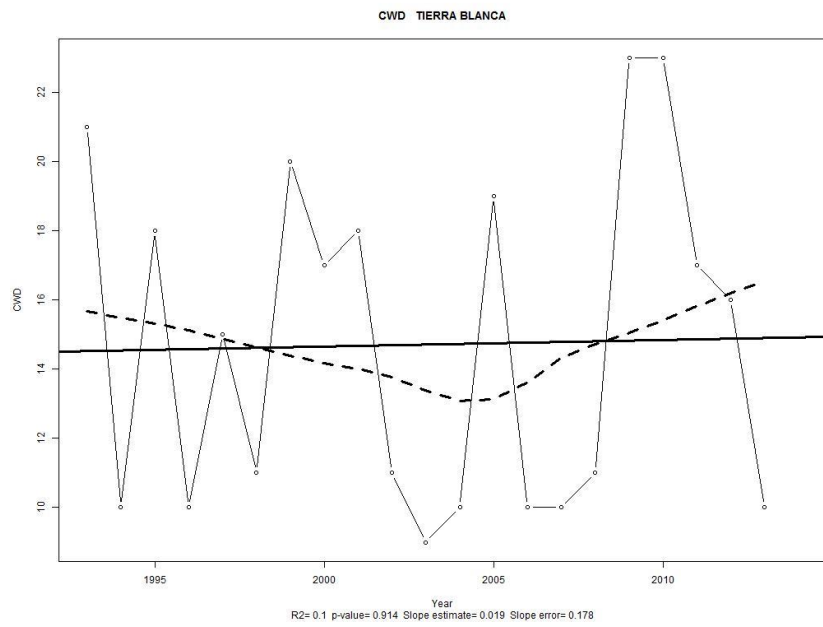
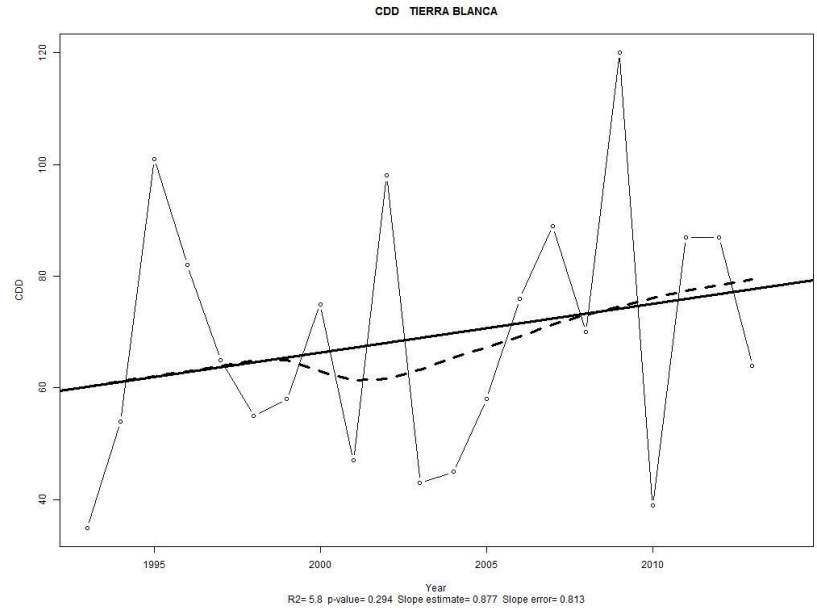


Continuación del apéndice 2.

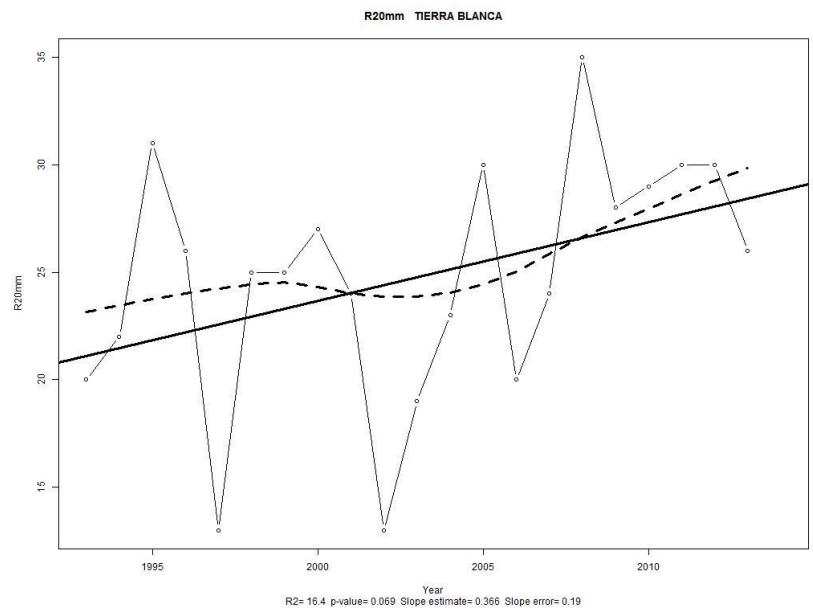
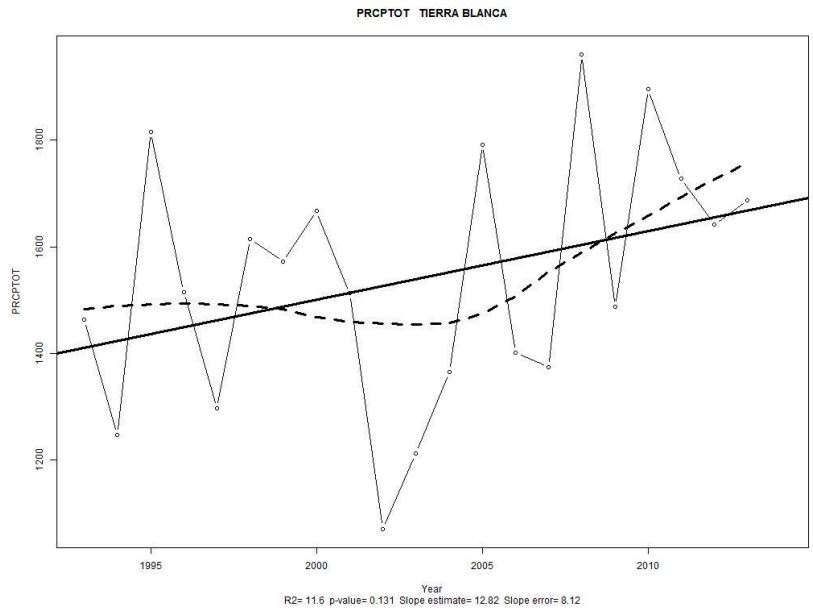


Fuente: elaboración propia, empleando RClimDex.

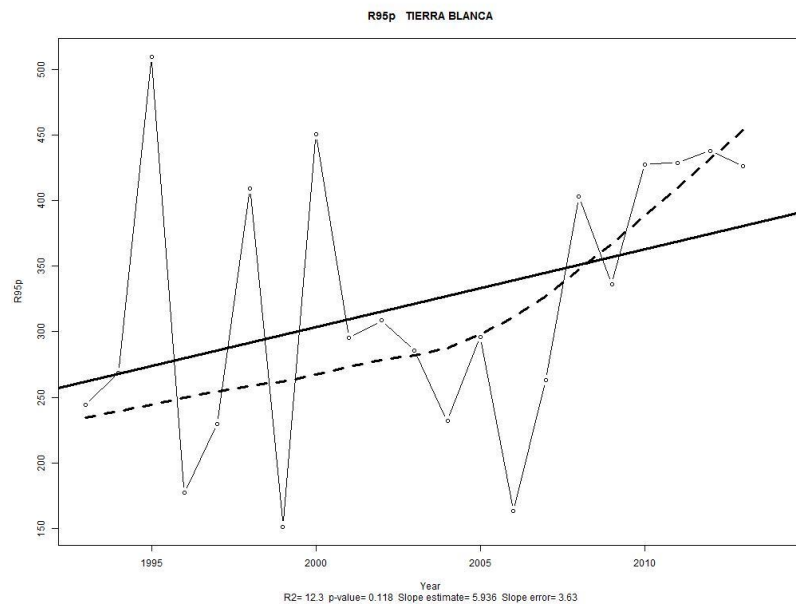
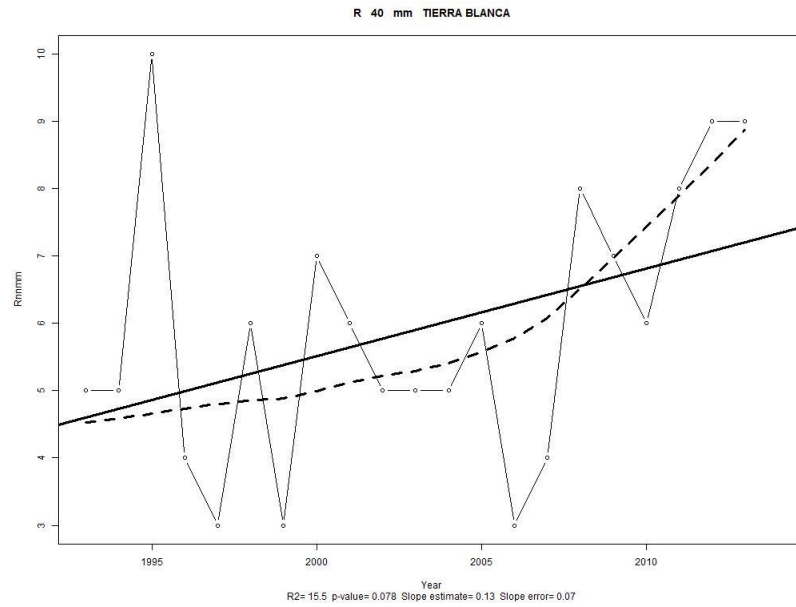
### Apéndice 3. Índices de precipitación, estación Tierra Blanca



Continuación del apéndice 3.

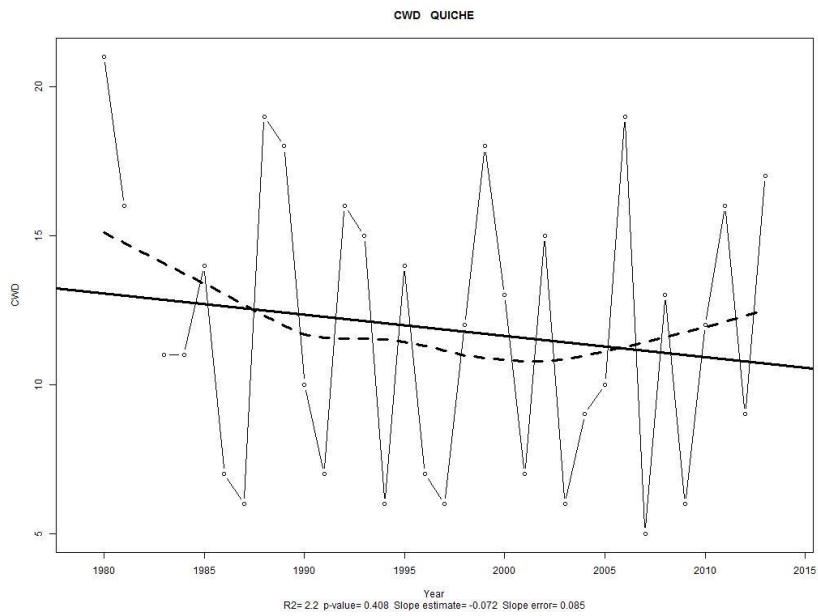
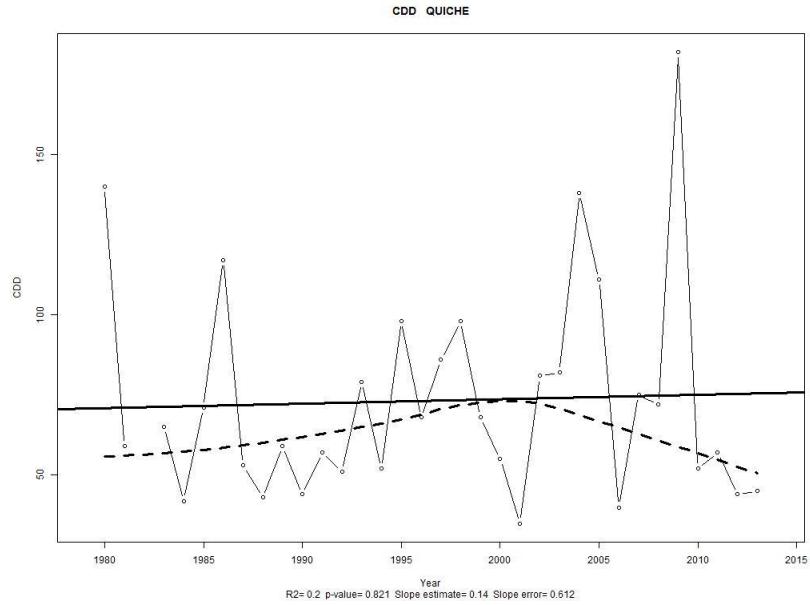


Continuación del apéndice 3.

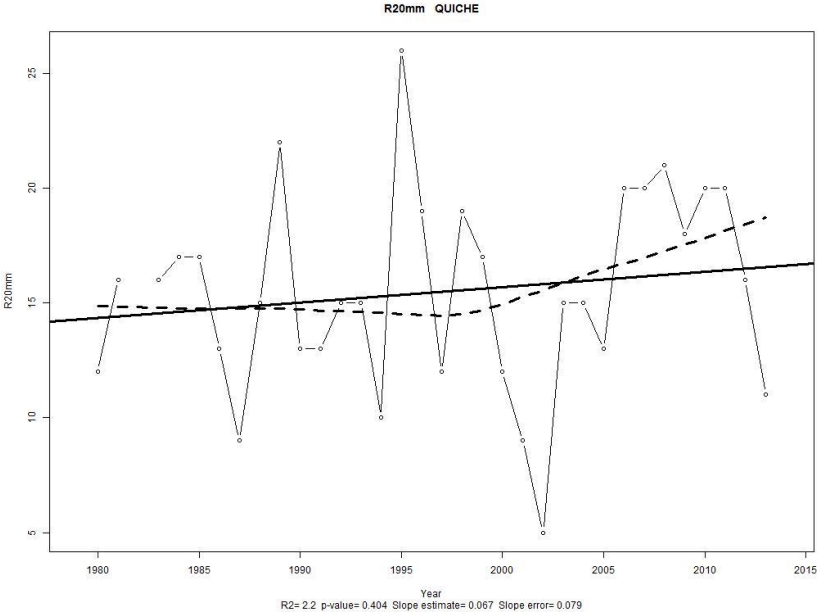
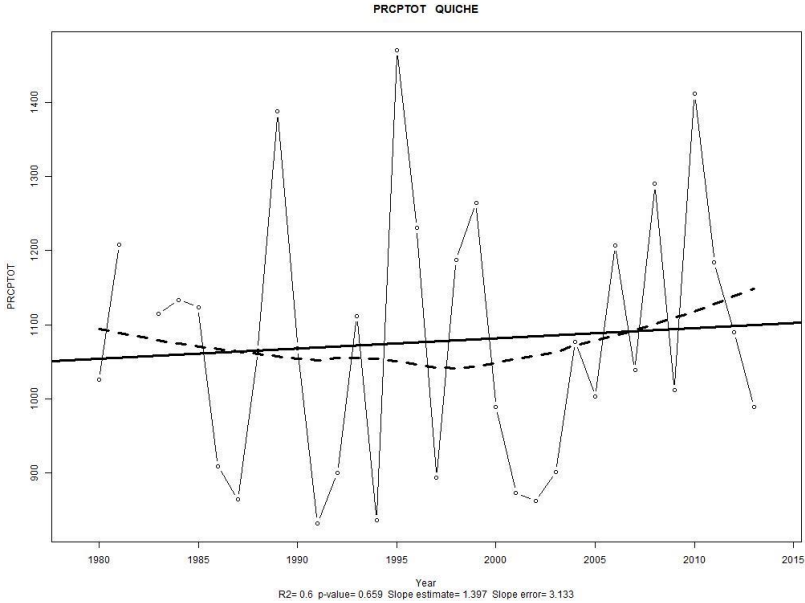


Fuente: elaboración propia, empleando RClimDex.

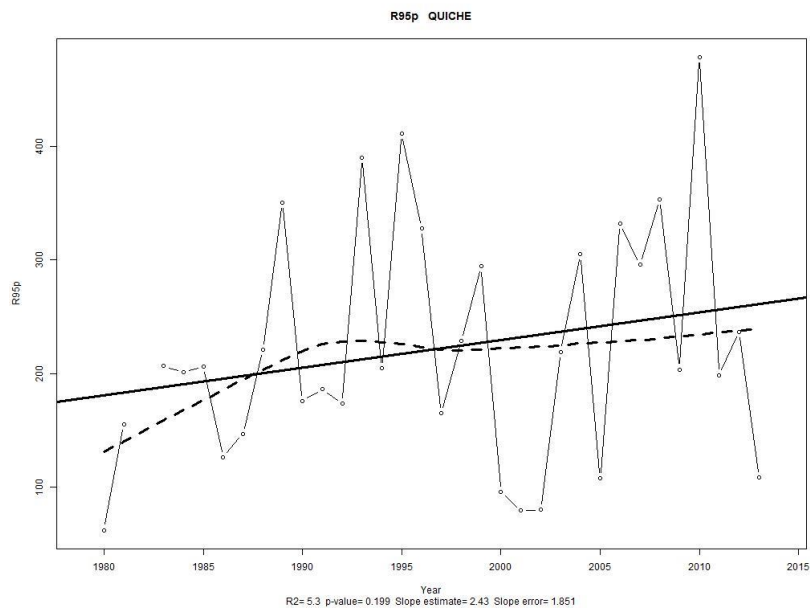
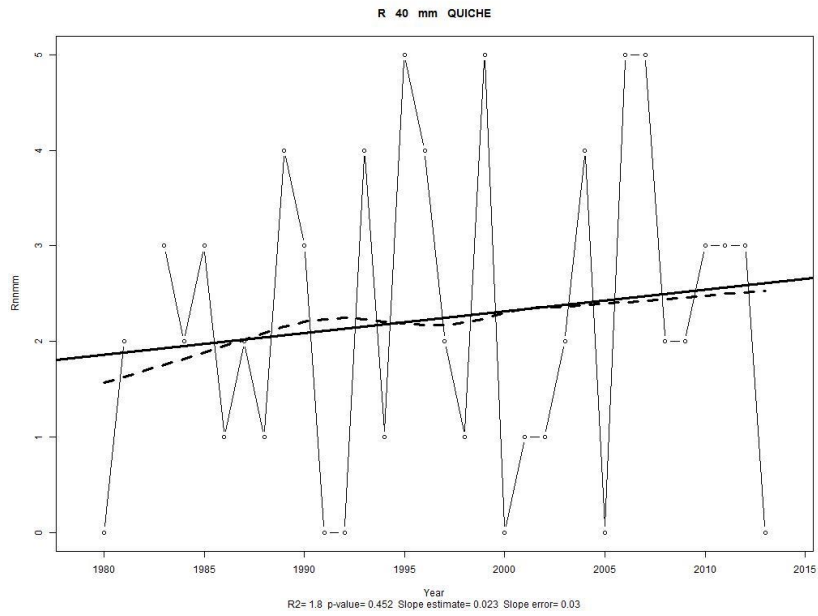
## Apéndice 4. Índices de precipitación, estación Santa Cruz



Continuación del apéndice 4.



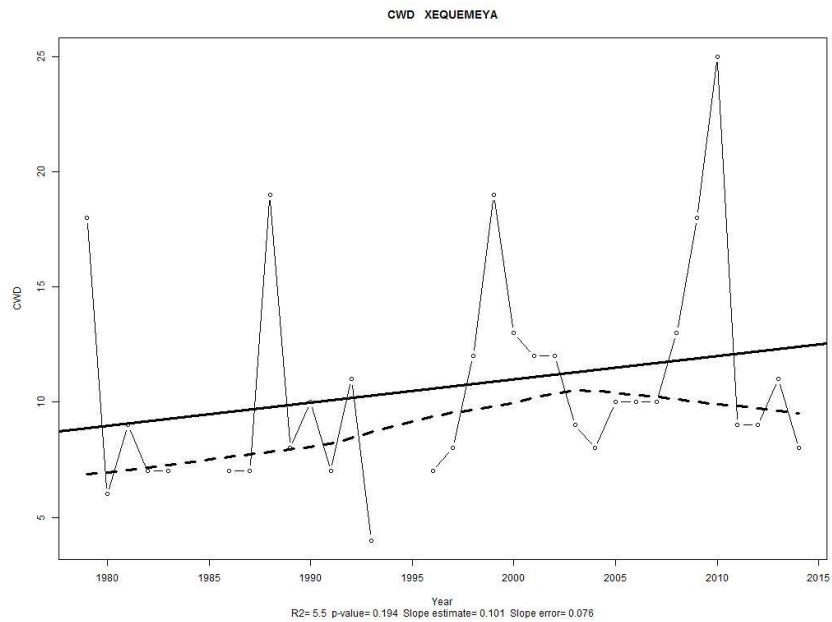
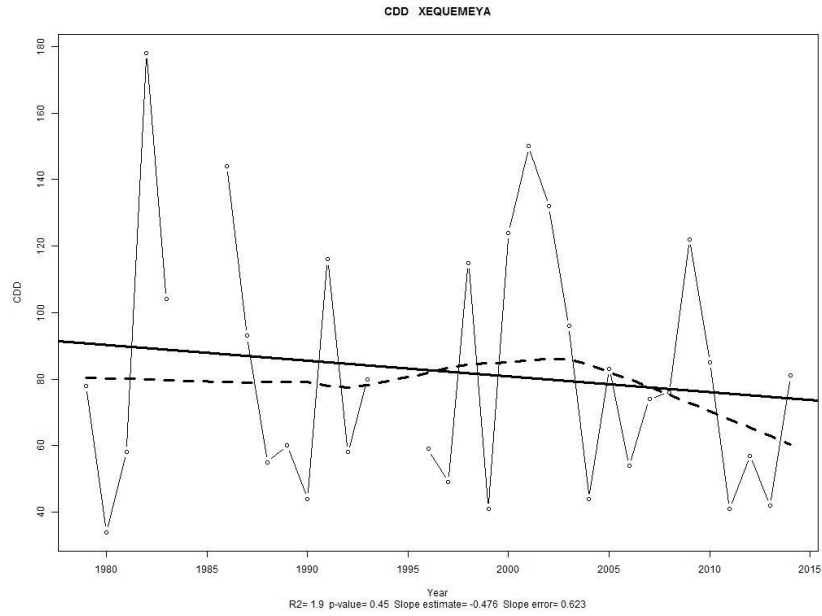
Continuación del apéndice 4.



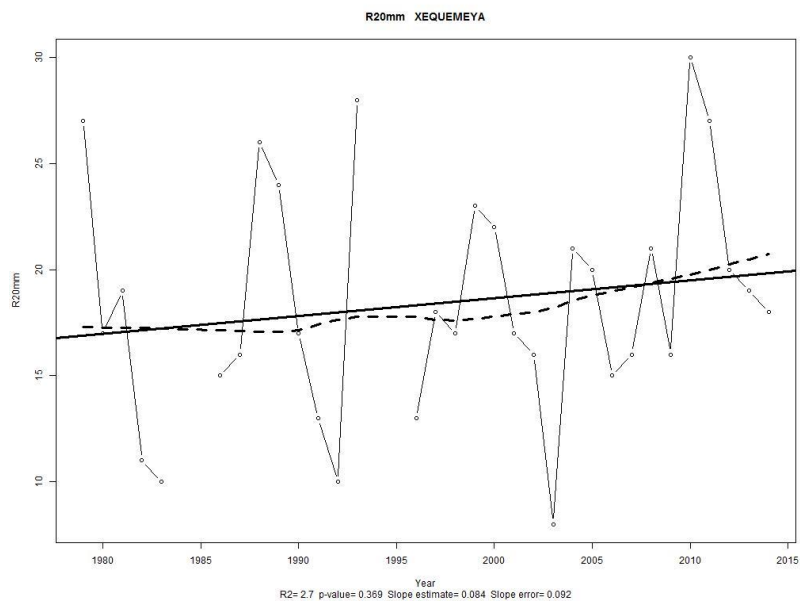
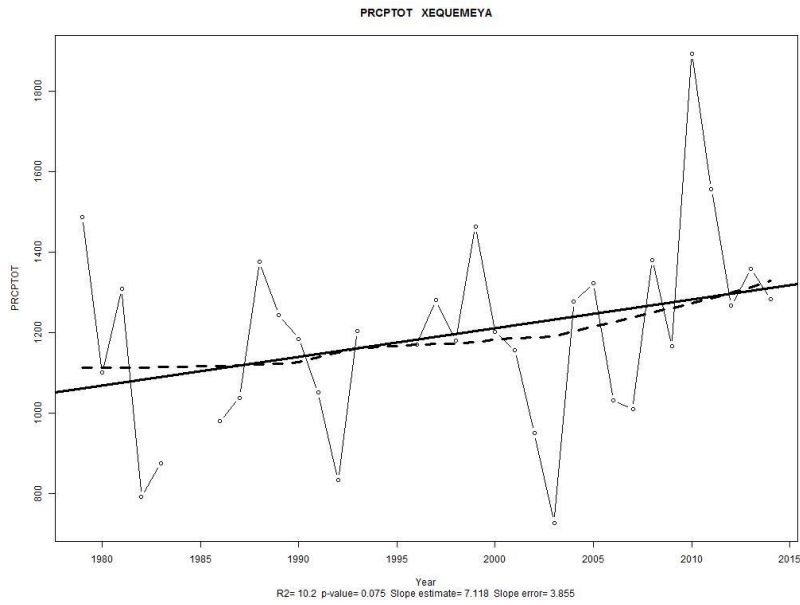
Fuente: elaboración propia, empleando RClimDex.



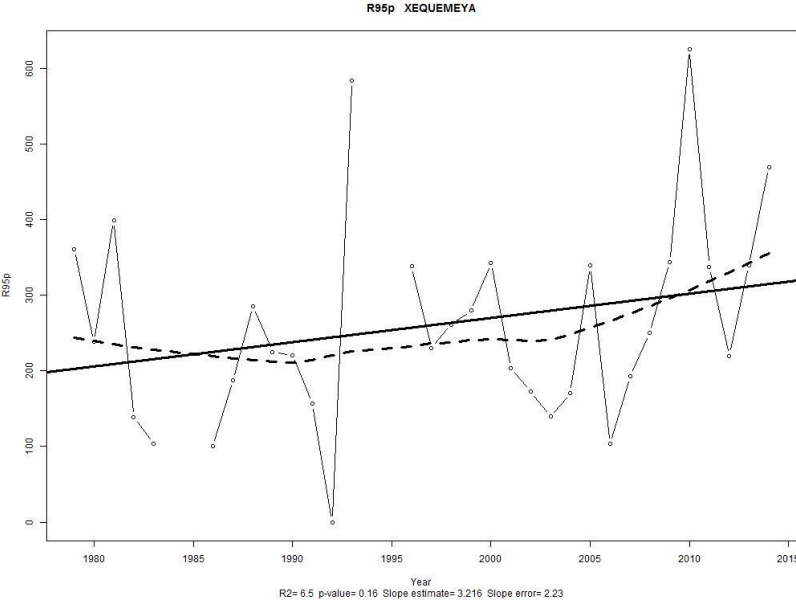
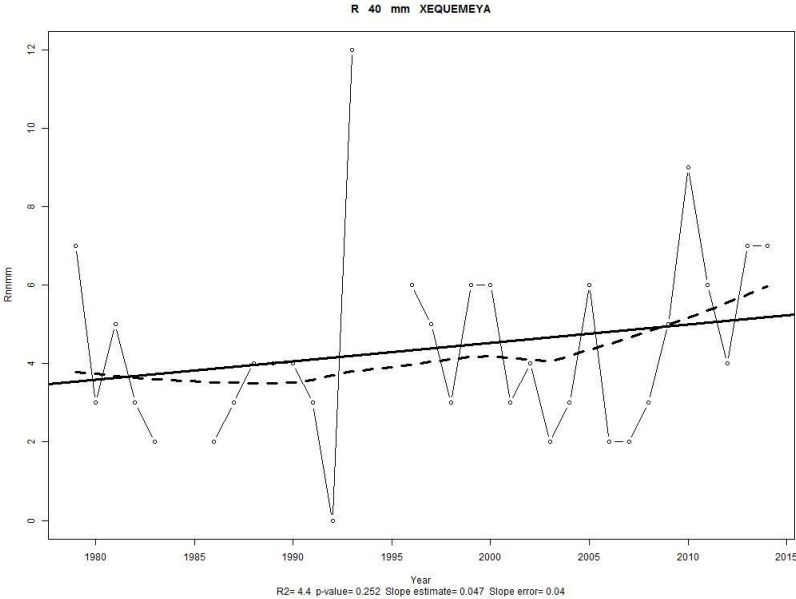
## Apéndice 5. Índices de precipitación, estación Xequemeyá



Continuación del apéndice 5.

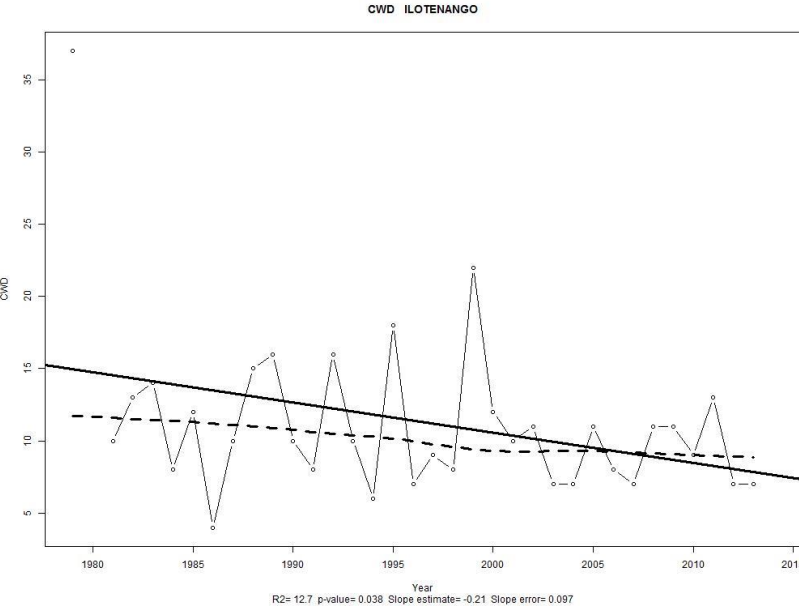
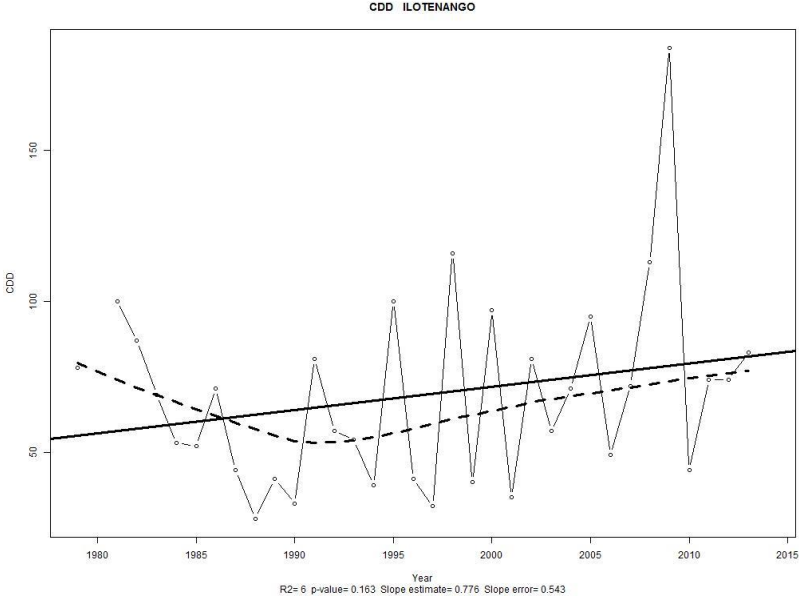


Continuación del apéndice 5.

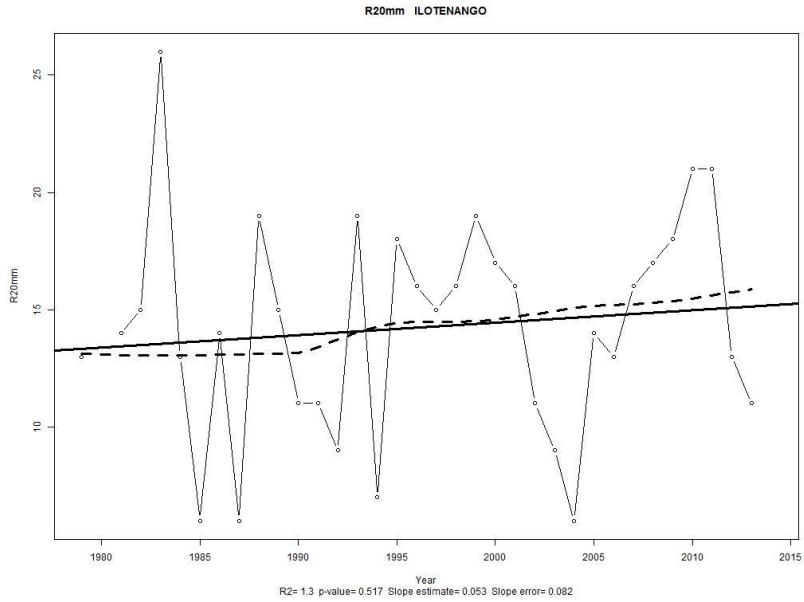
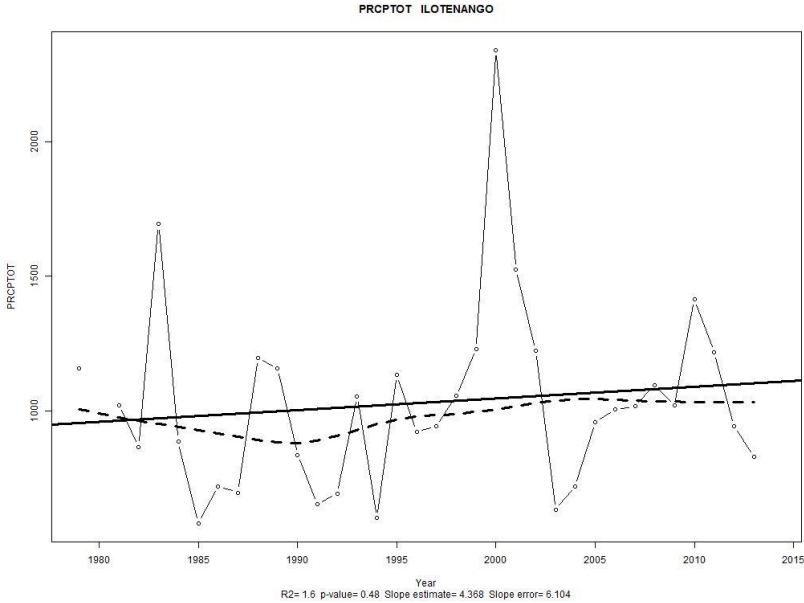


Fuente: elaboración propia, empleando RClmDex.

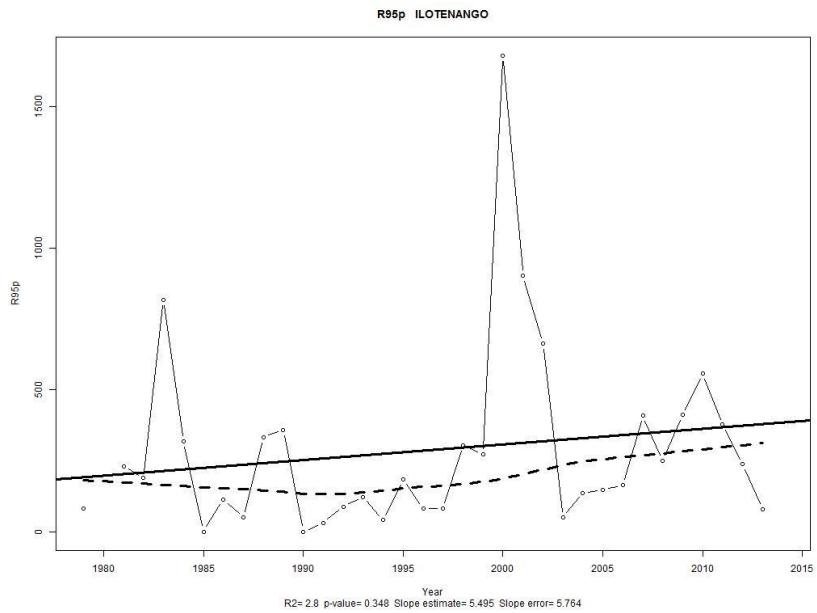
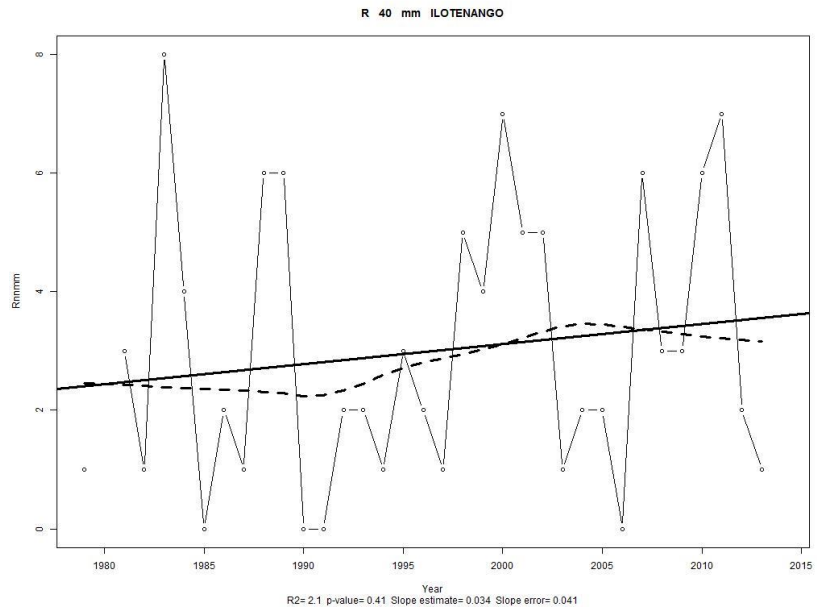
Apéndice 6. Índices de precipitación, estación San Antonio Ilotenango



Continuación del apéndice 6.

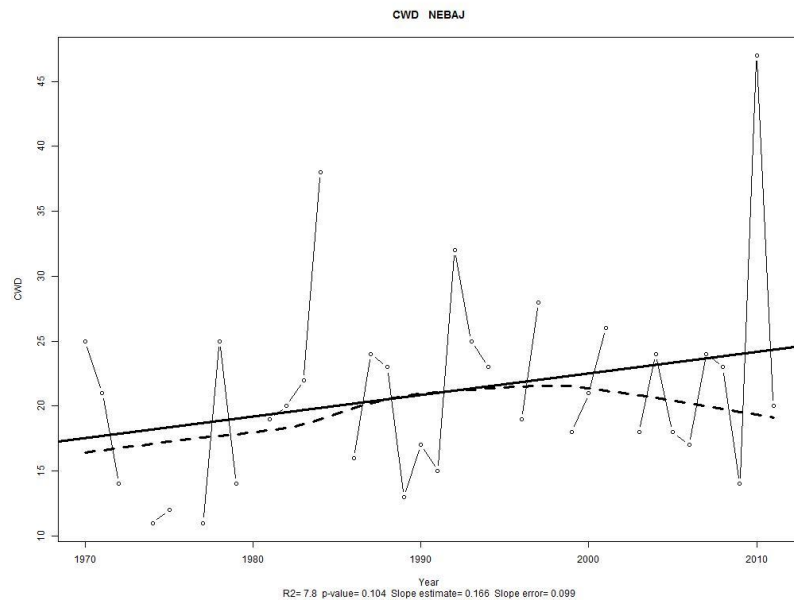
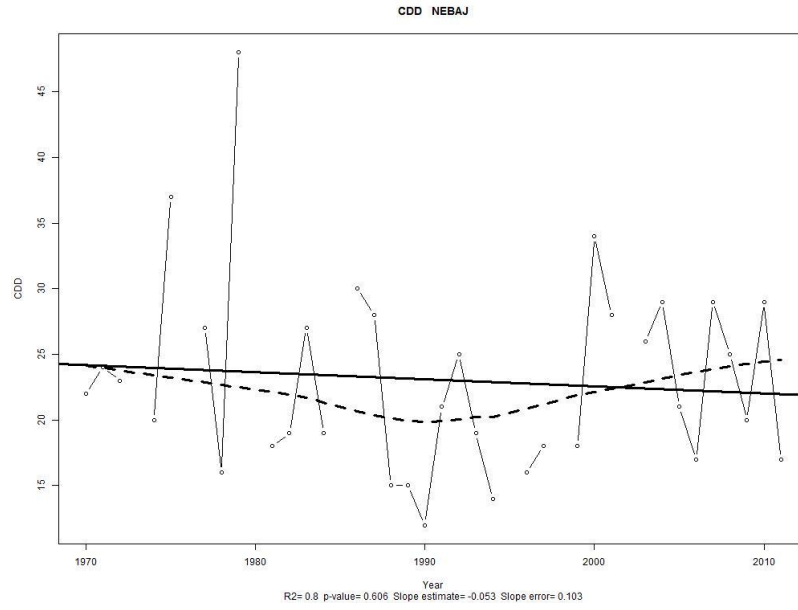


Continuación del apéndice 6.

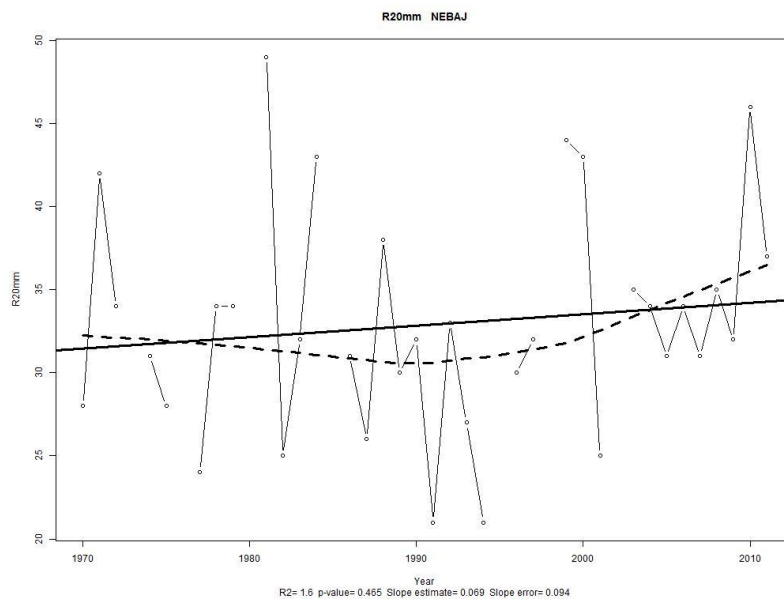
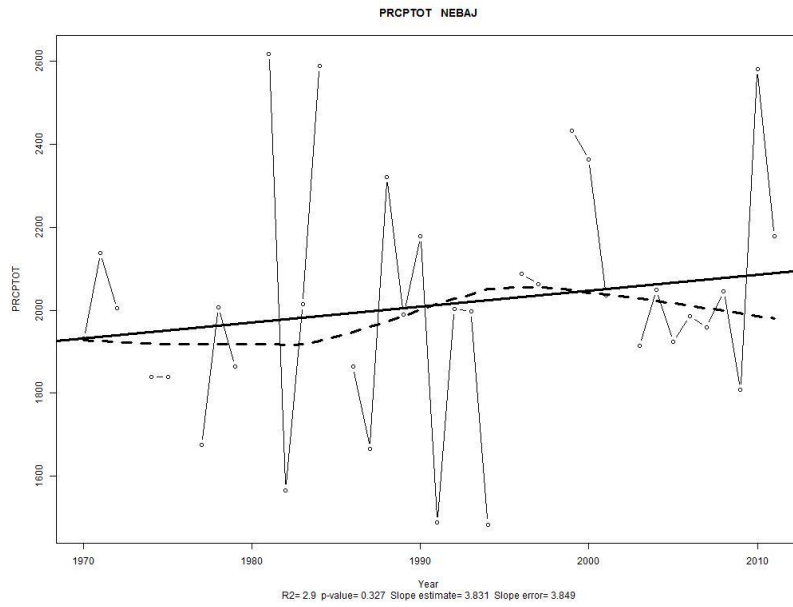


Fuente: elaboración propia, empleando RClimDex.

## Apéndice 7. Índices de precipitación, estación Nebaj

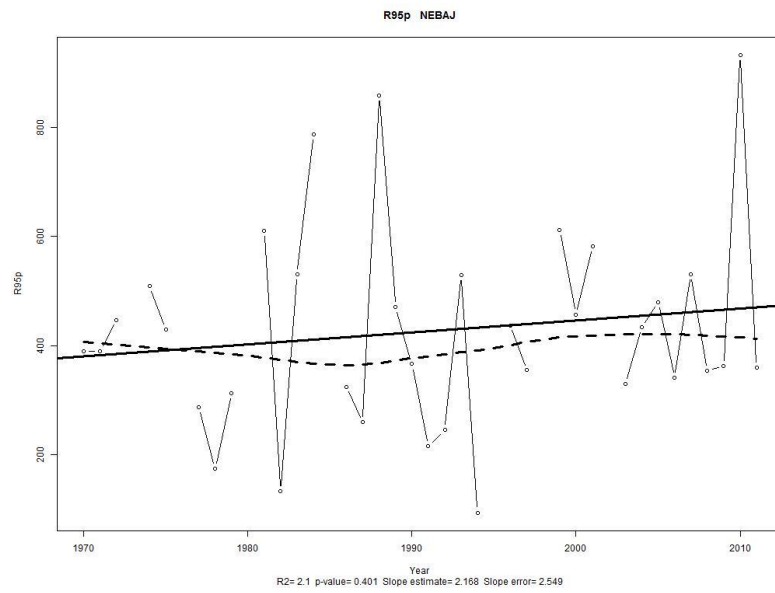
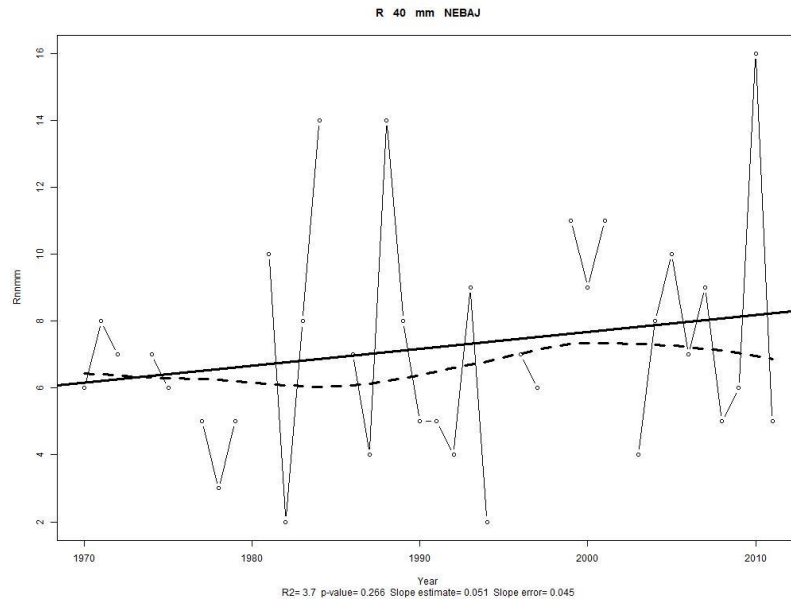


Continuación del apéndice 7.



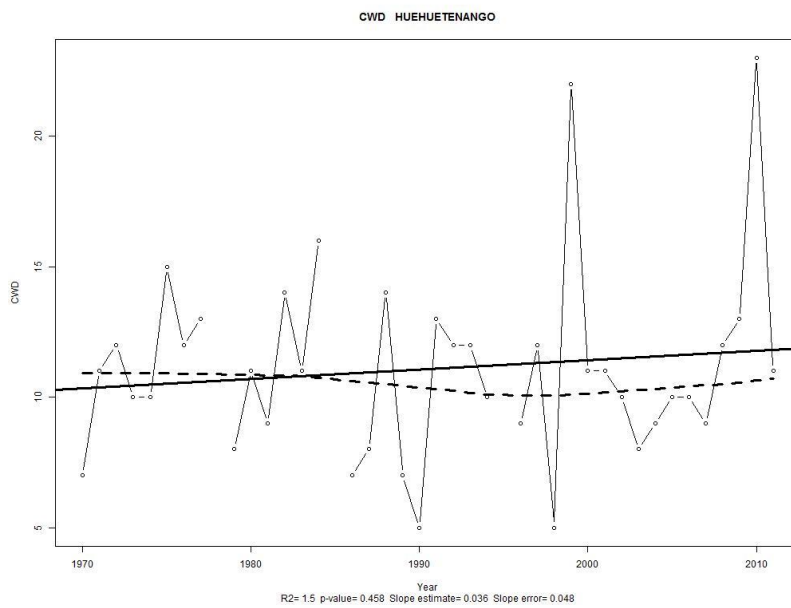
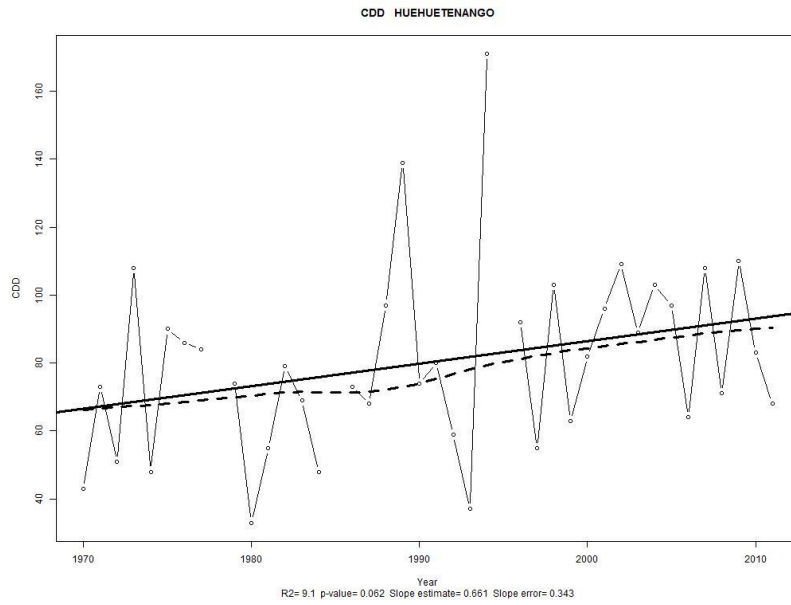


Continuación del apéndice 7.

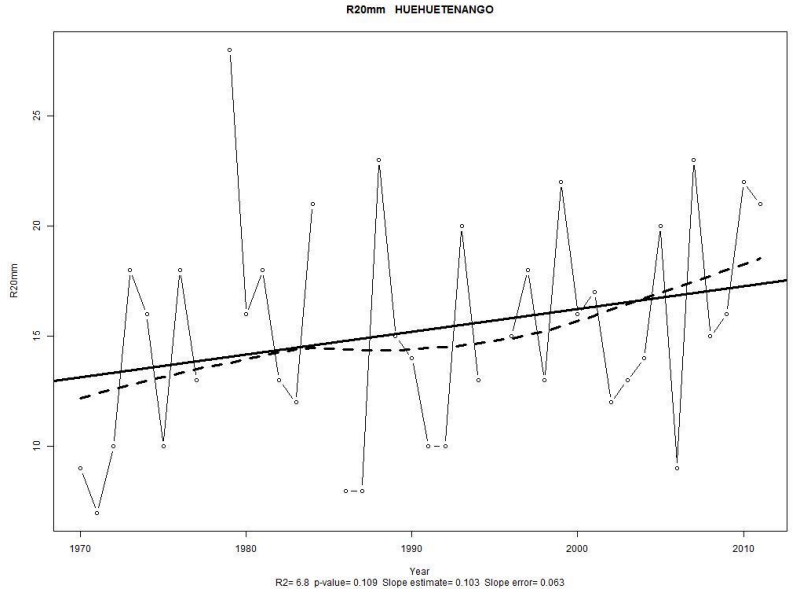
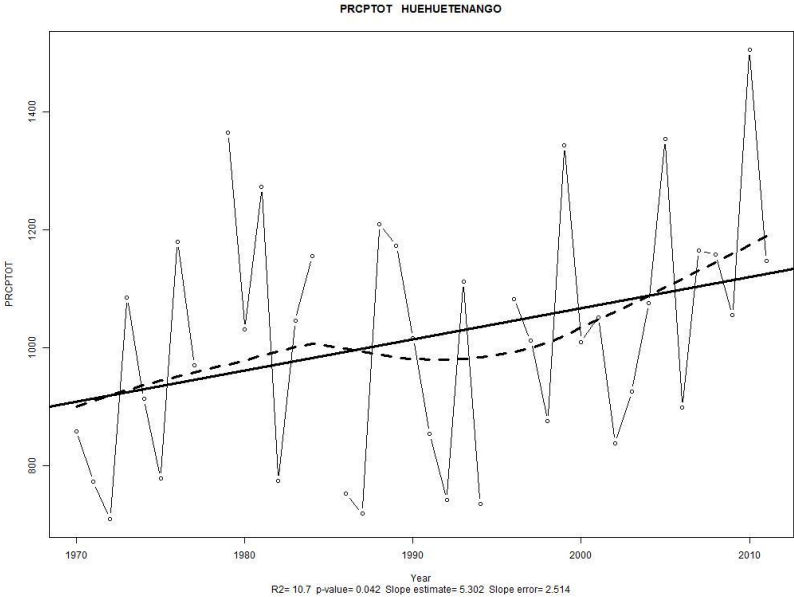


Fuente: elaboración propia, empleando RClimDex.

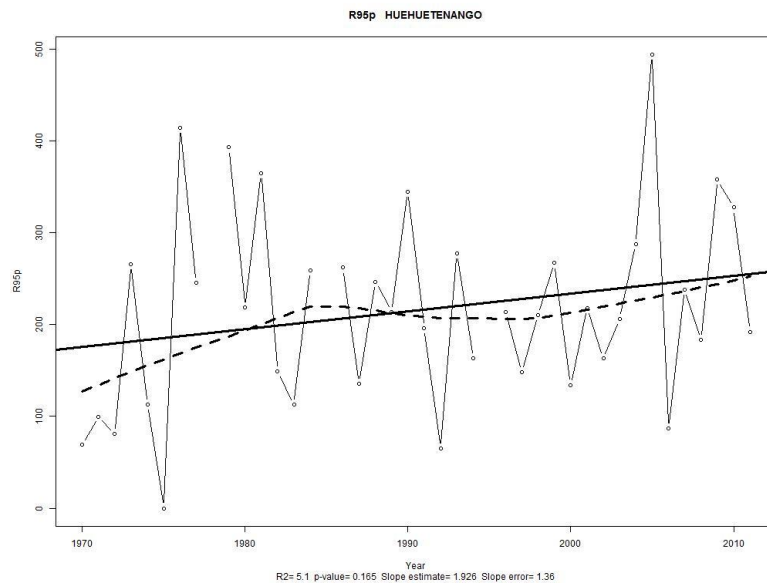
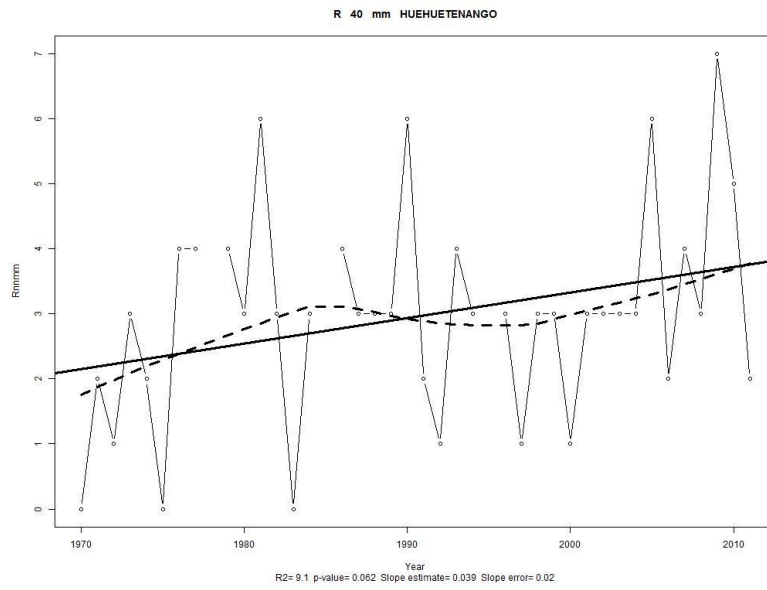
## Apéndice 8. Índices de precipitación, estación Huehuetenango



Continuación del apéndice 8.

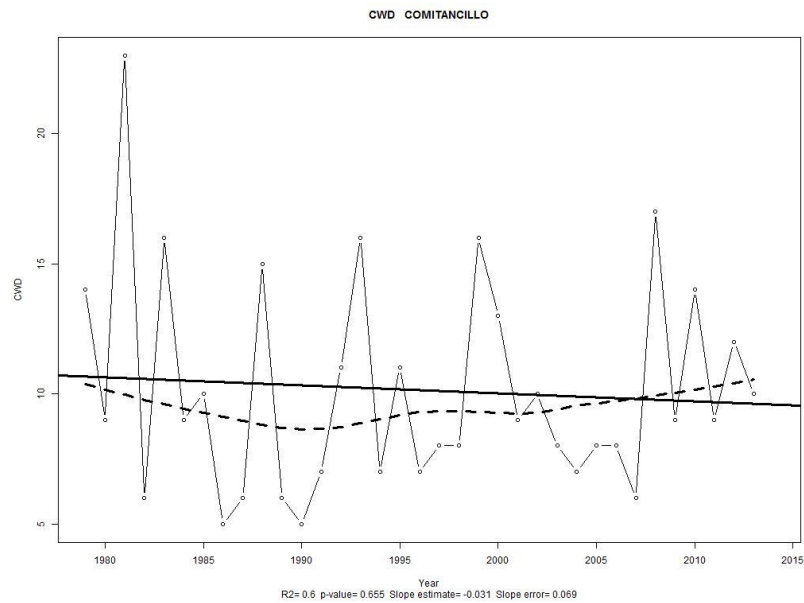
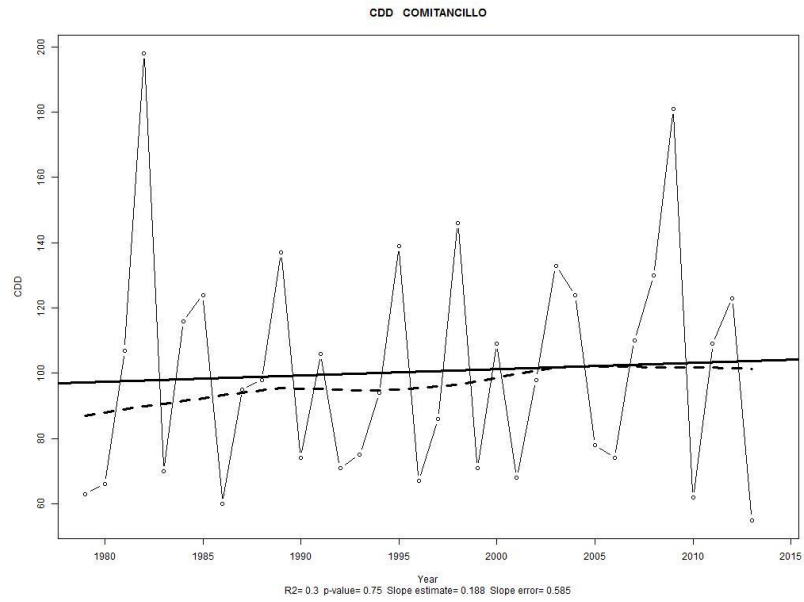


Continuación del apéndice 8.

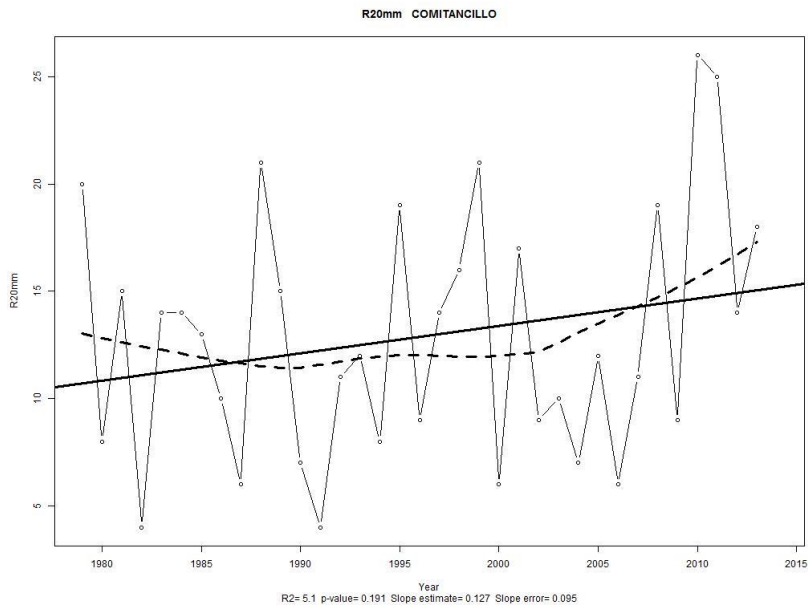
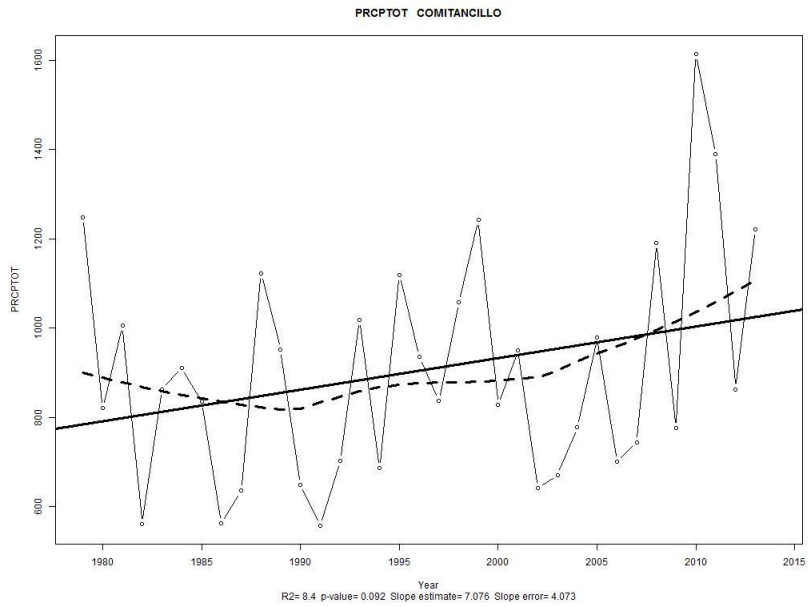


Fuente: elaboración propia, empleando RClimDex.

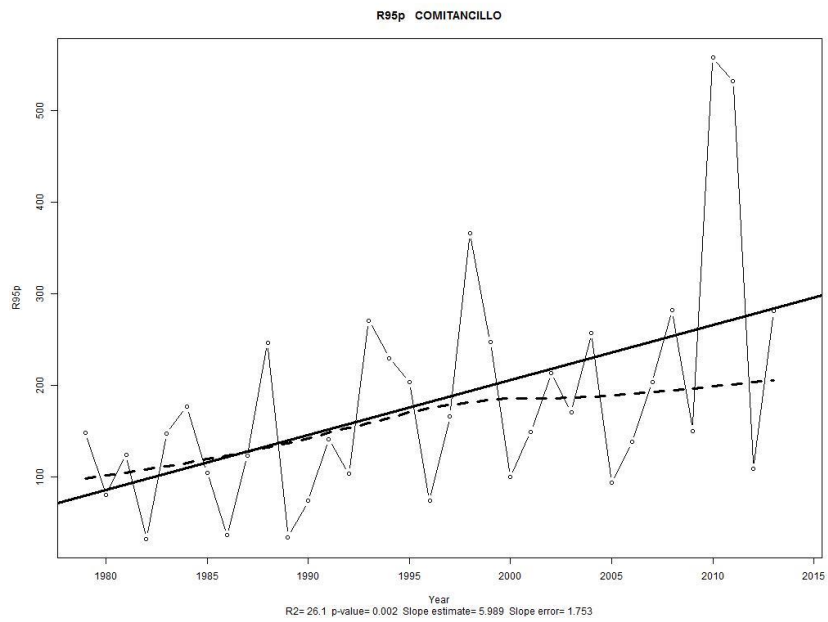
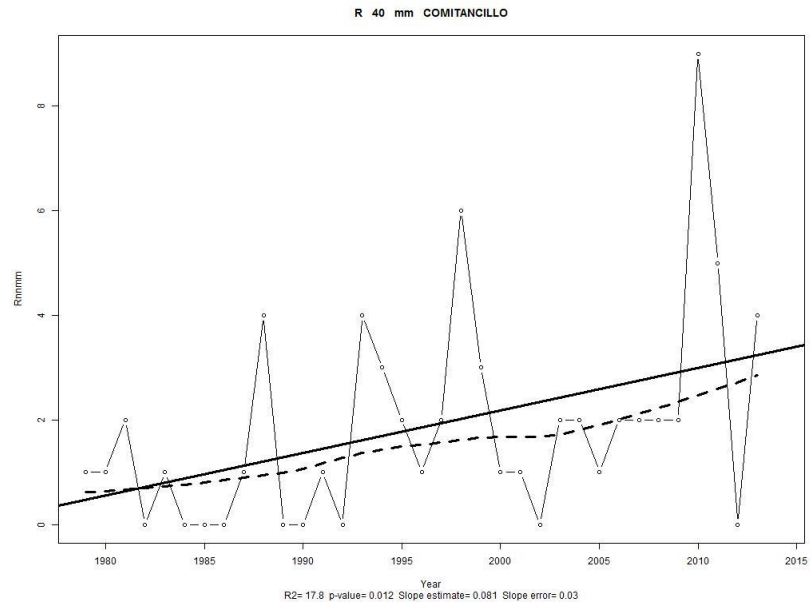
## Apéndice 9. Índices de precipitación, estación Comitancillo



Continuación del apéndice 9.

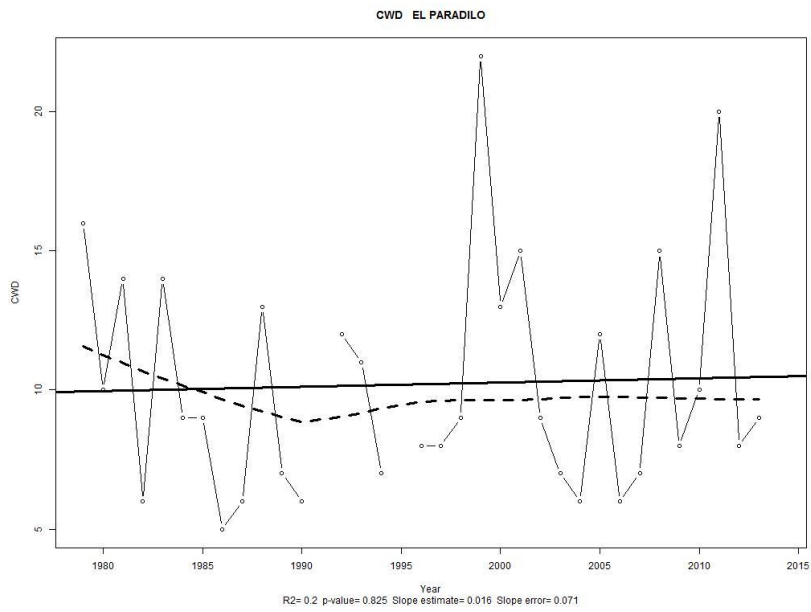
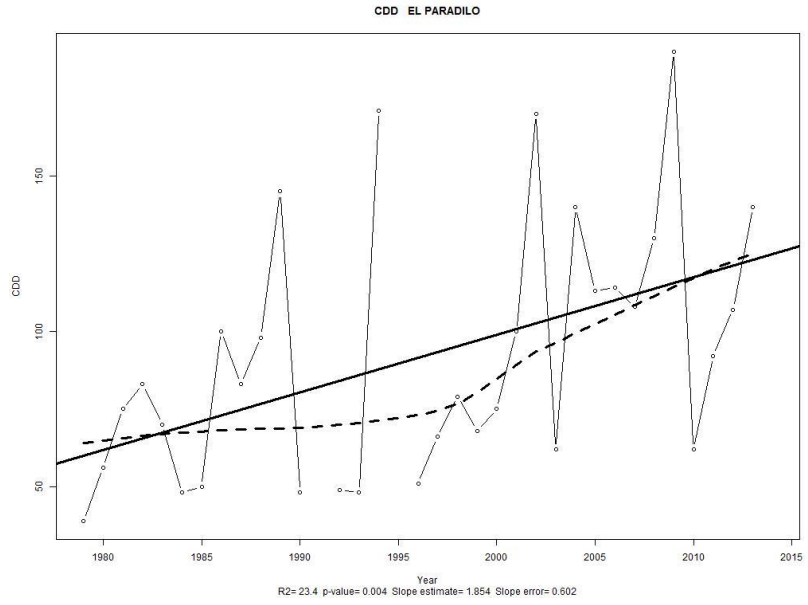


Continuación del apéndice 9.



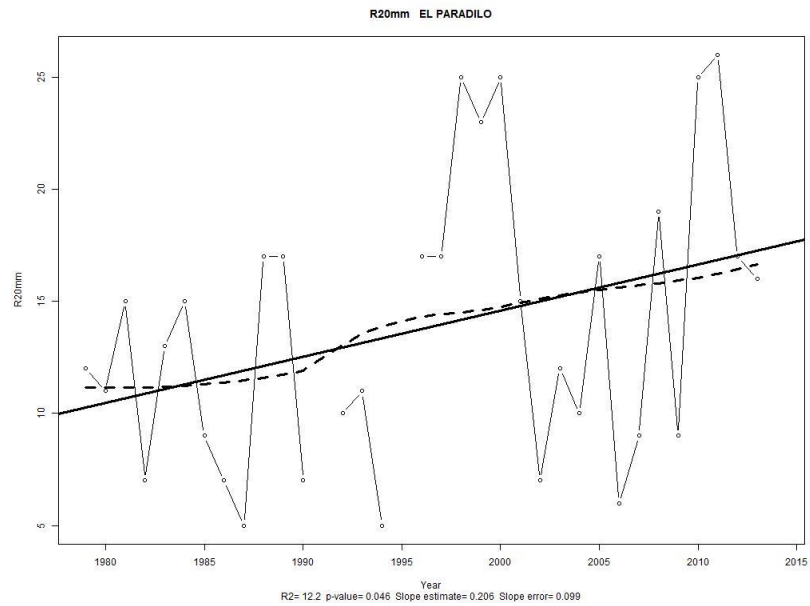
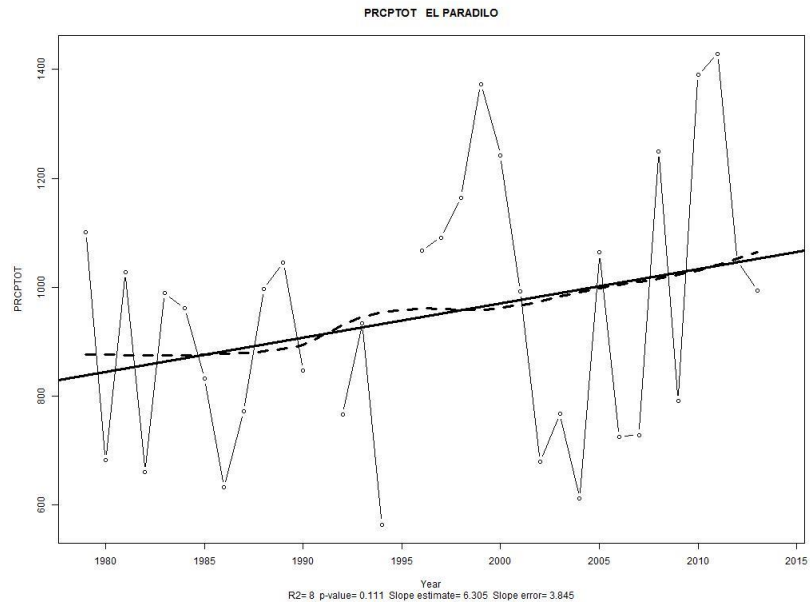
Fuente: elaboración propia, empleando RClimDex.

# Apéndice 10. Índices de precipitación, estación El Paradillo

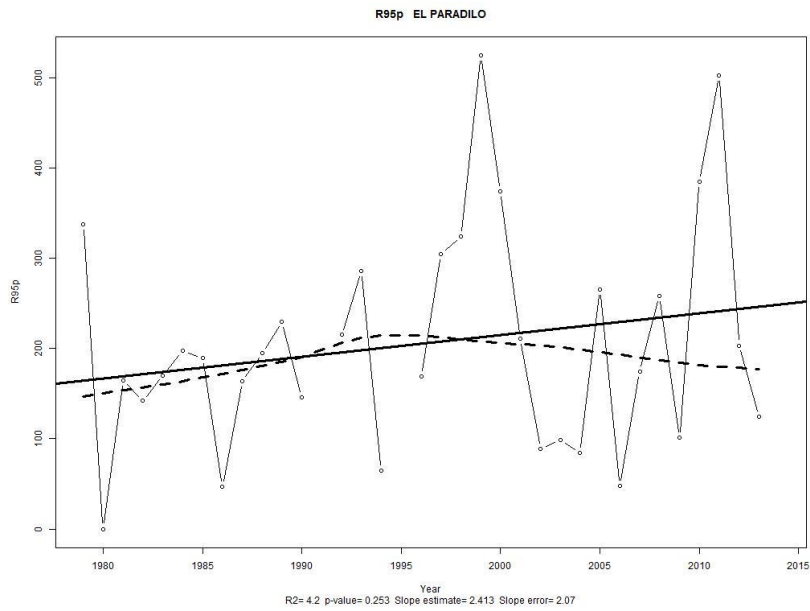
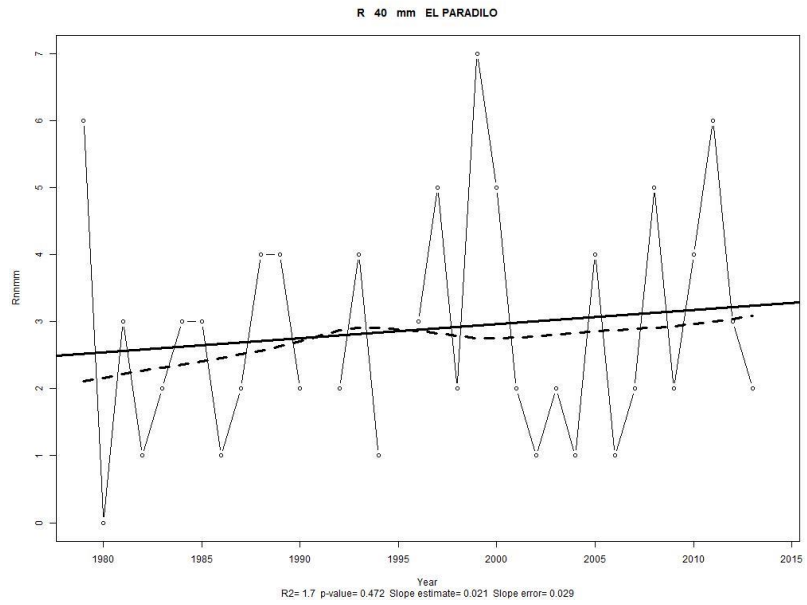




Continuación del apéndice 10.

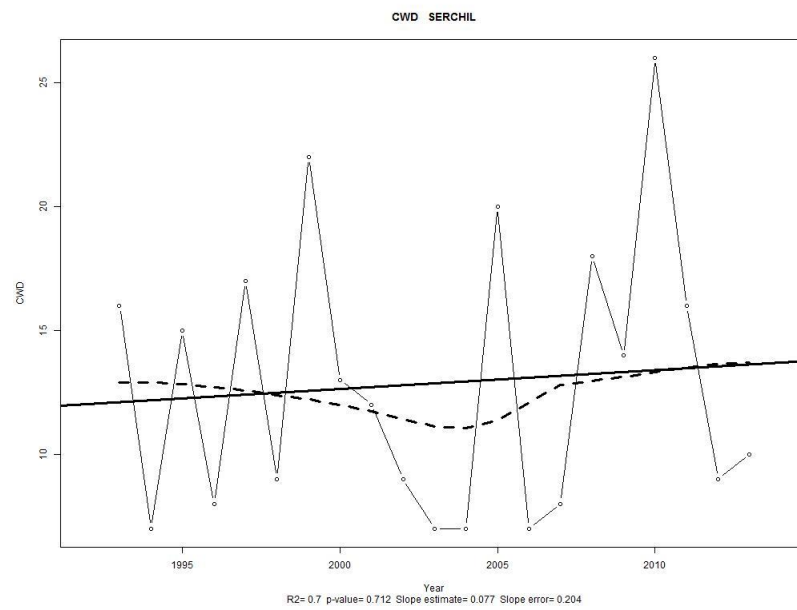
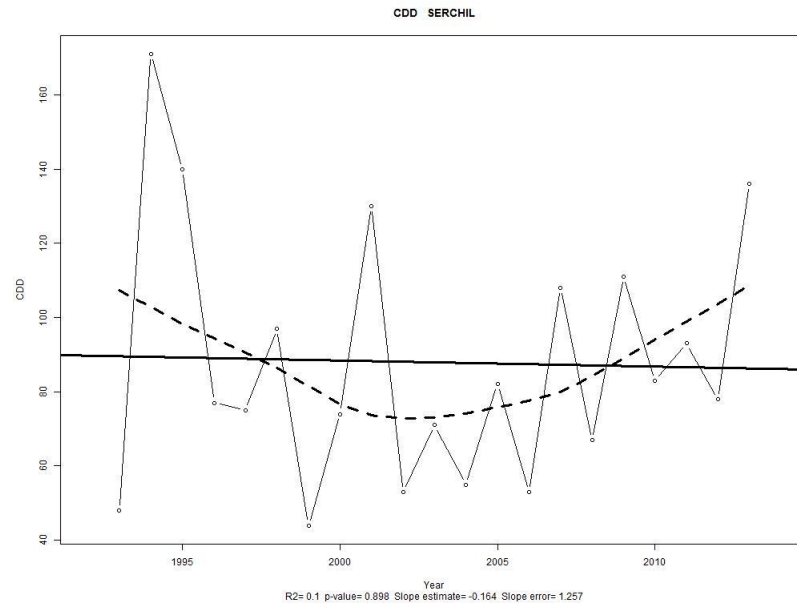


Continuación del apéndice 10.

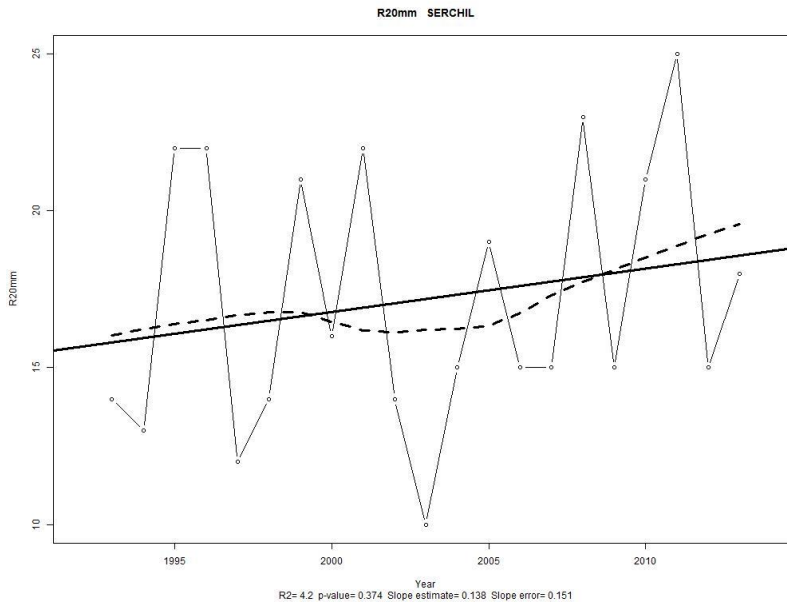
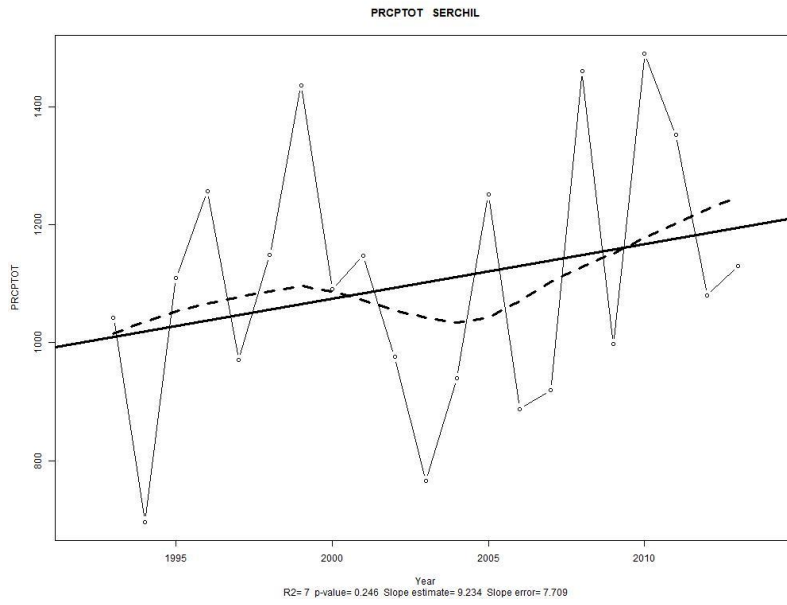


Fuente: elaboración propia, empleando RClimDex.

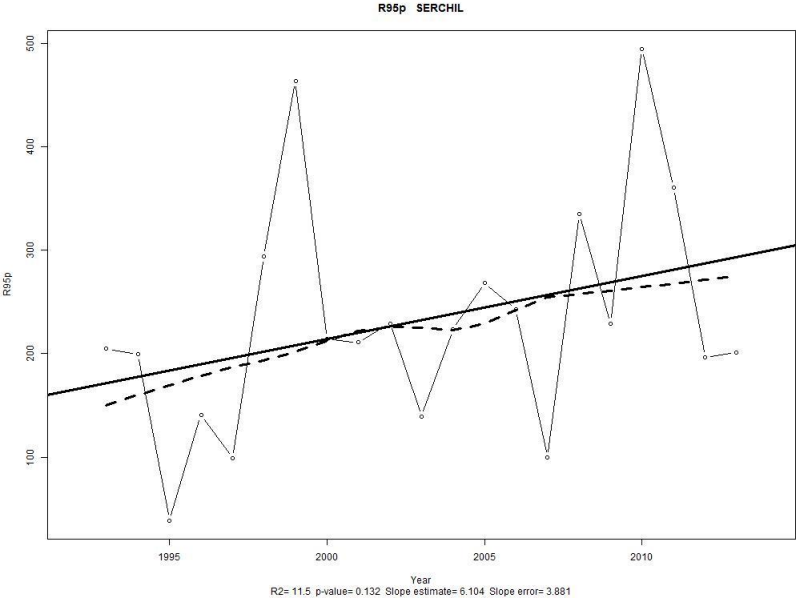
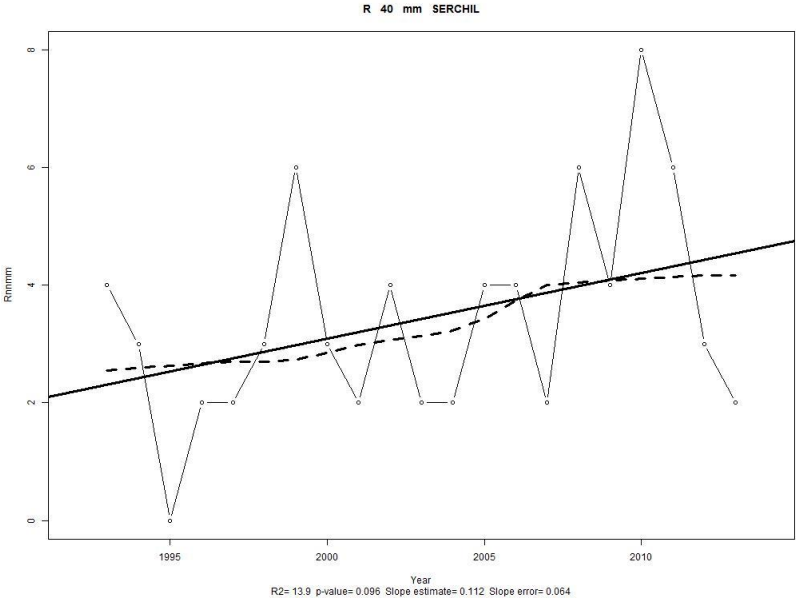
## Apéndice 11. Índices de precipitación, estación Serchil



Continuación del apéndice 11.

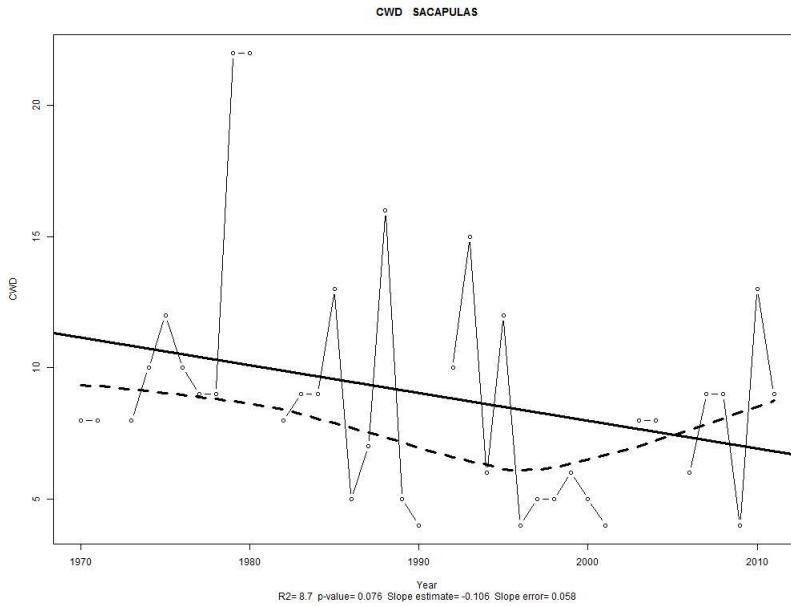
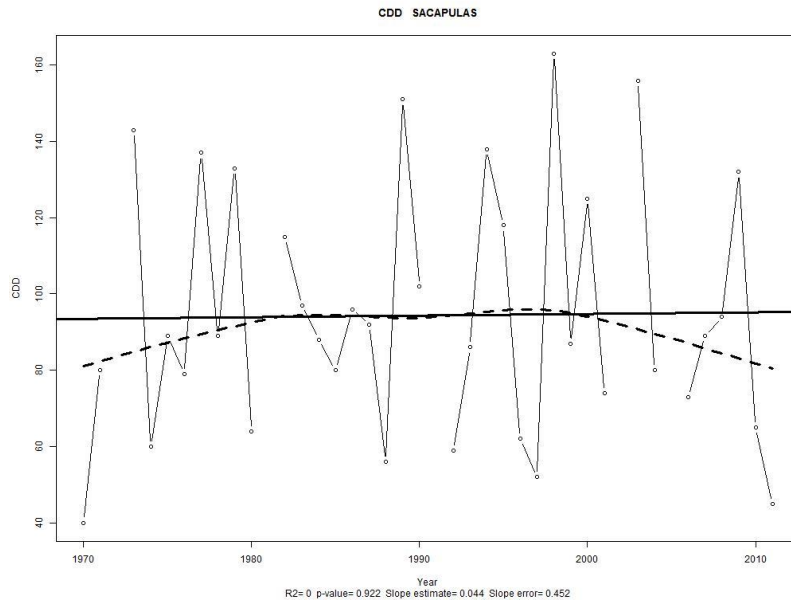


Continuación del apéndice 11.

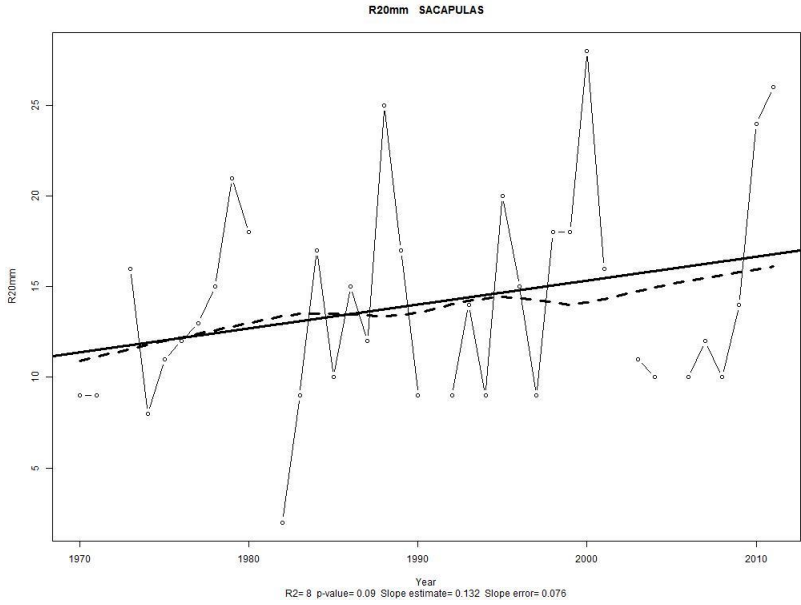
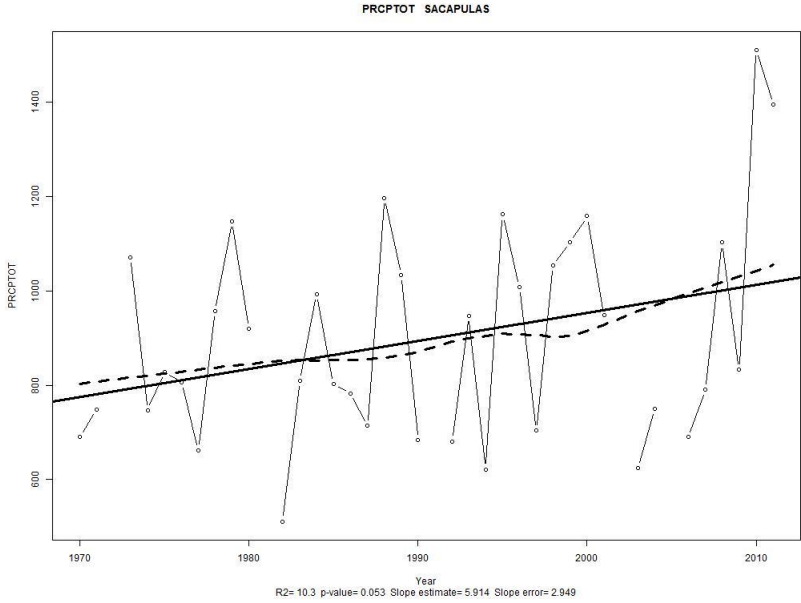


Fuente: elaboración propia, empleando RClimDex.

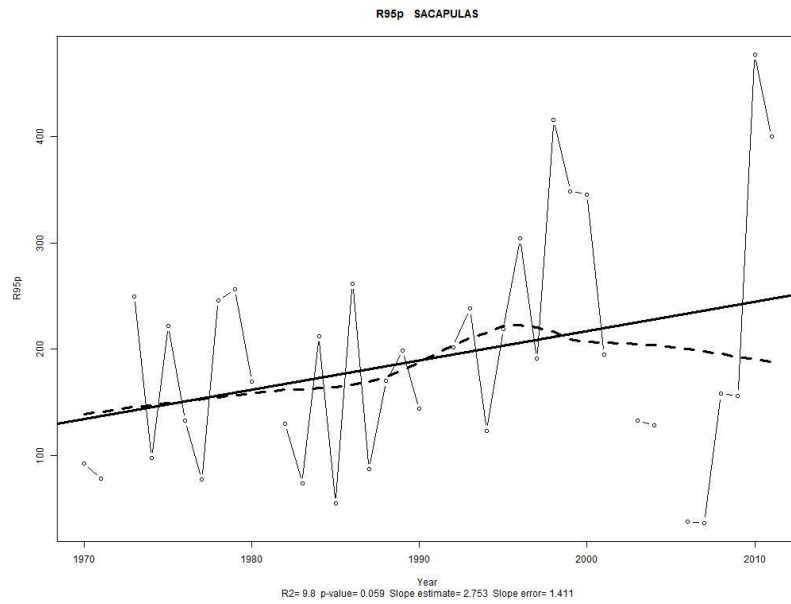
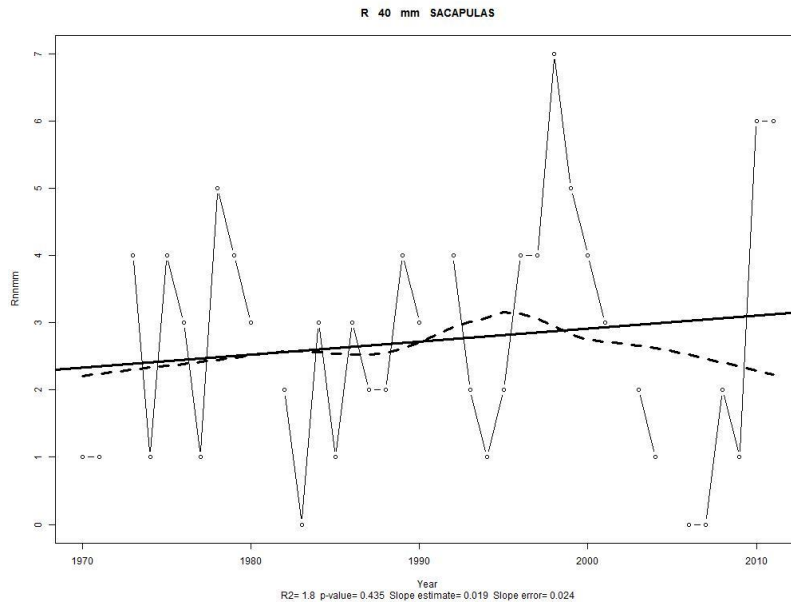
## Apéndice 12. Índices de precipitación, estación Chuitinamit



Continuación del apéndice 12.



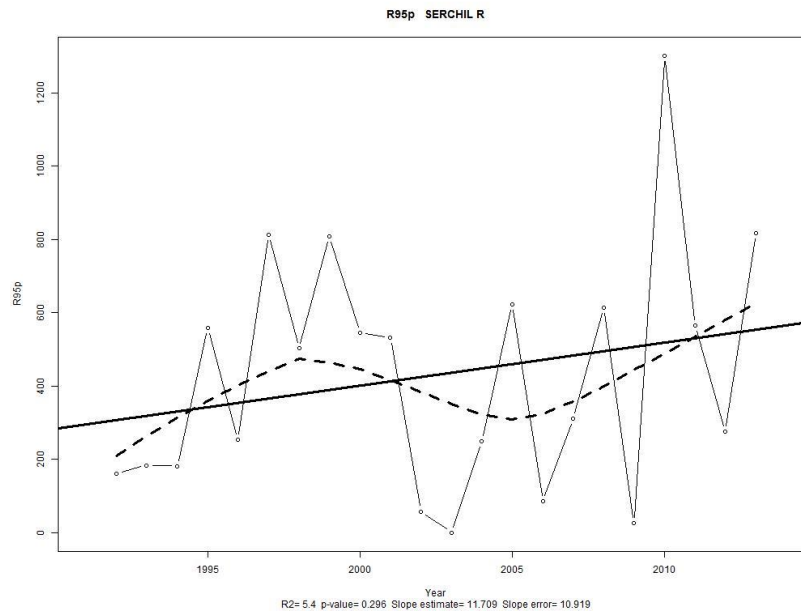
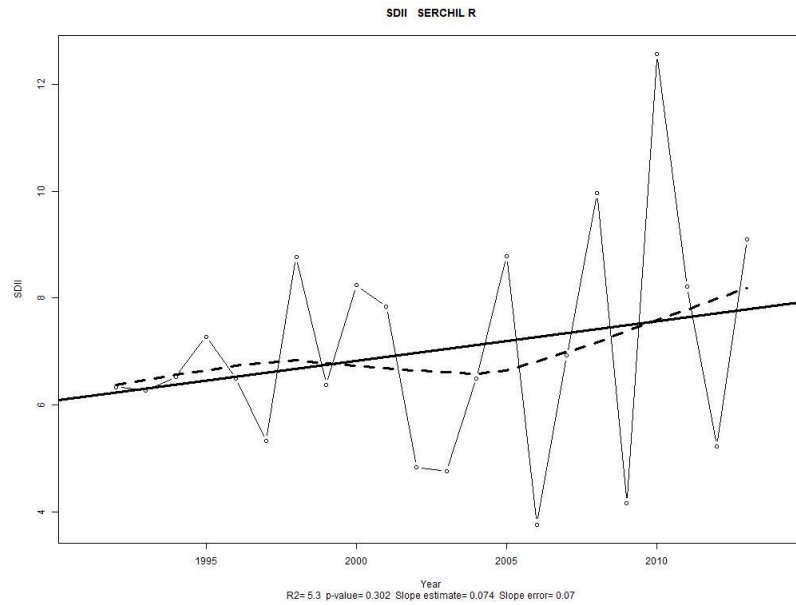
Continuación del apéndice 12.



Fuente: elaboración propia, empleando RClimDex.

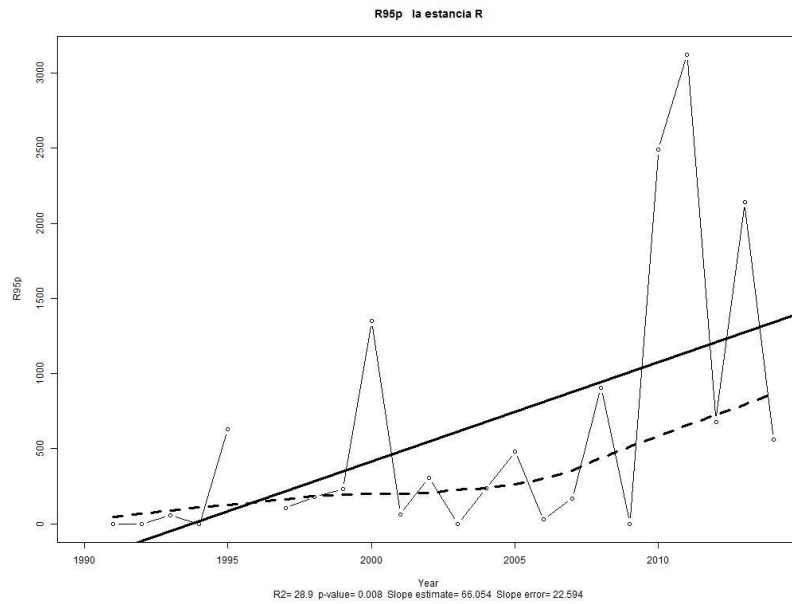
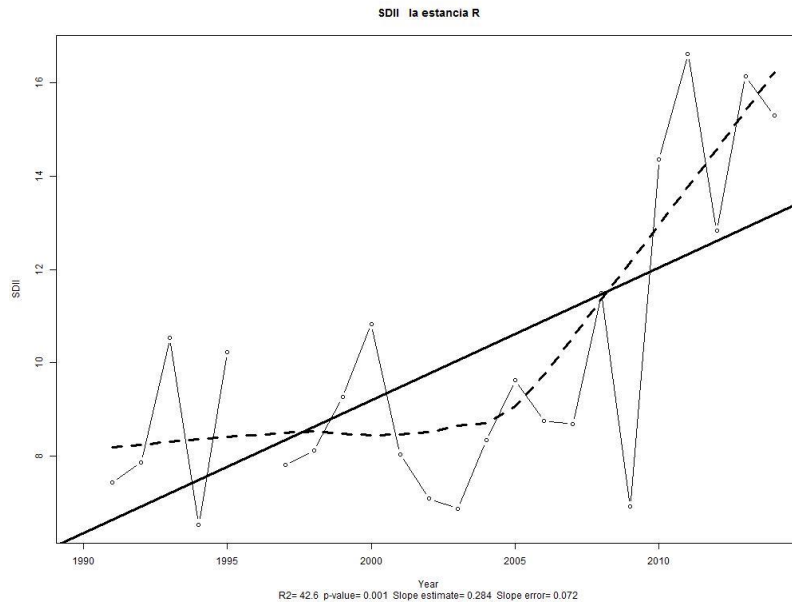


### Apéndice 13. Índices de caudal, estación Serchil



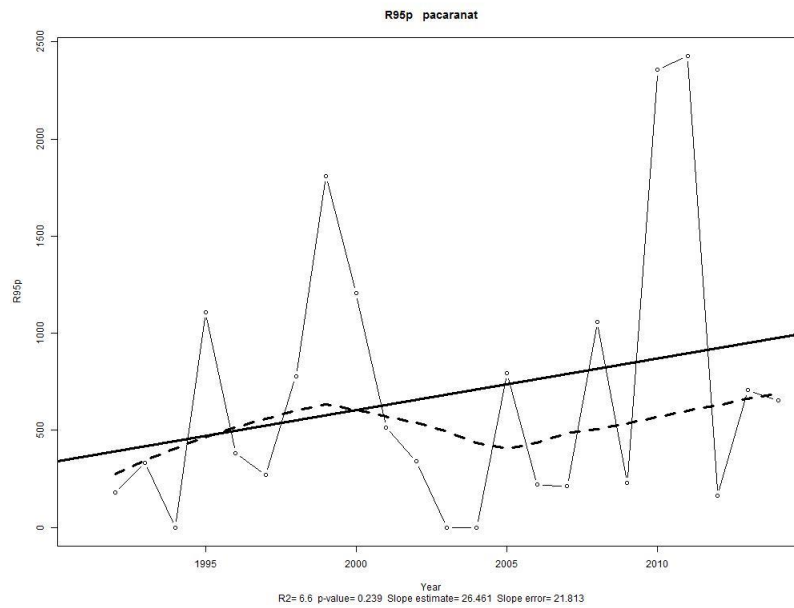
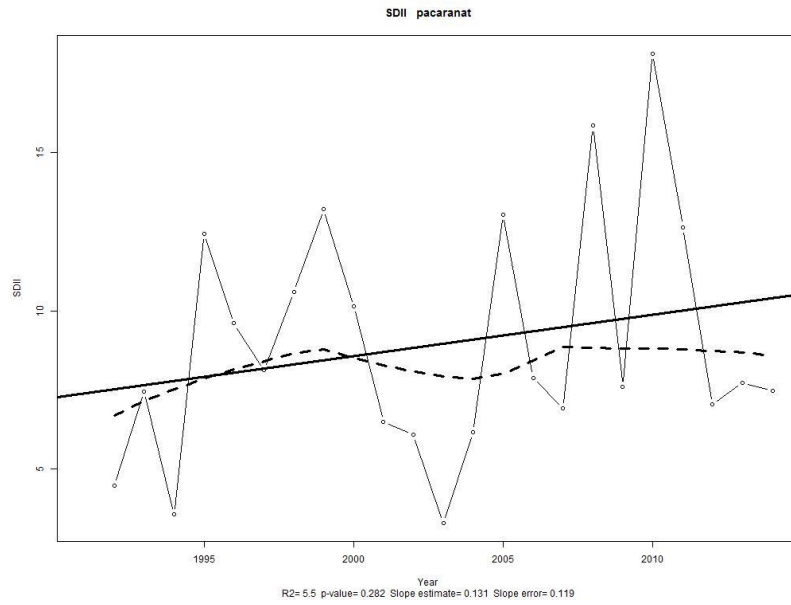
Fuente: elaboración propia, empleando RClimDex.

## Apéndice 14. Índices de caudal, estación La Estancia



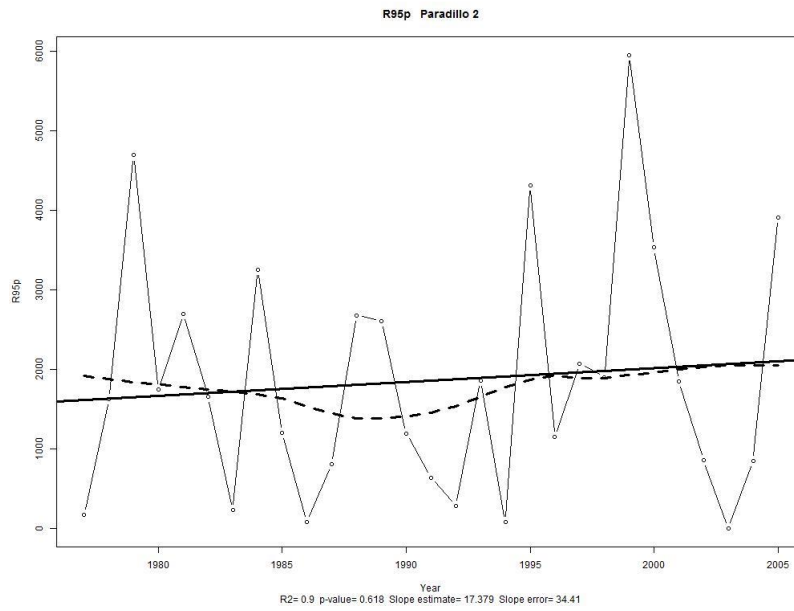
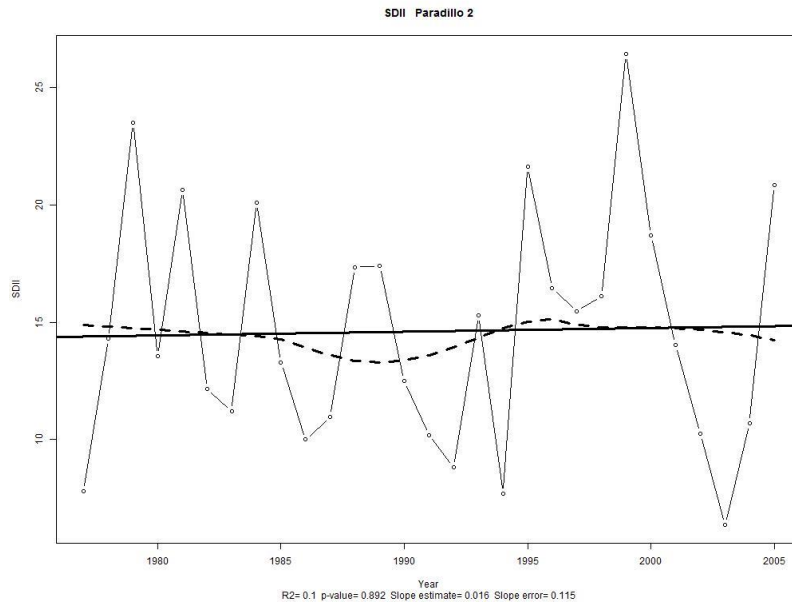
Fuente: elaboración propia, empleando RClimDex.

## Apéndice 15. Índices de caudal, estación Pacaranat



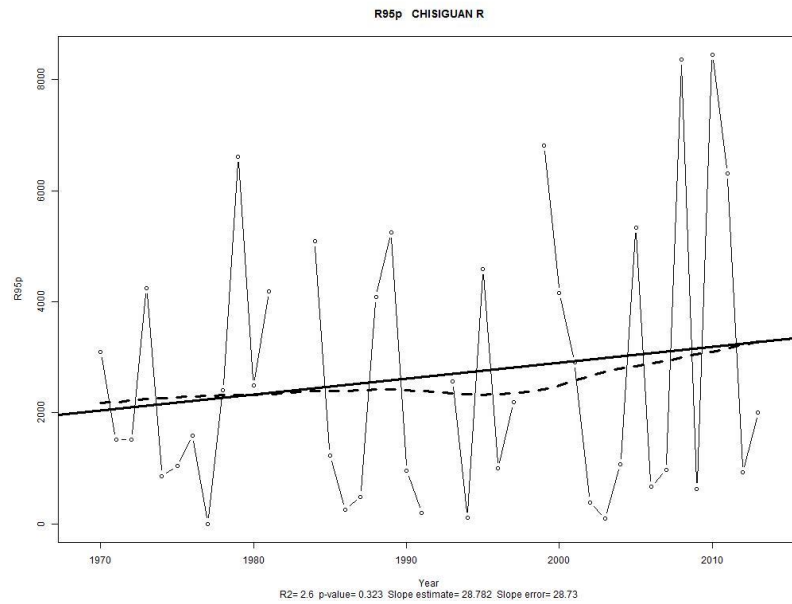
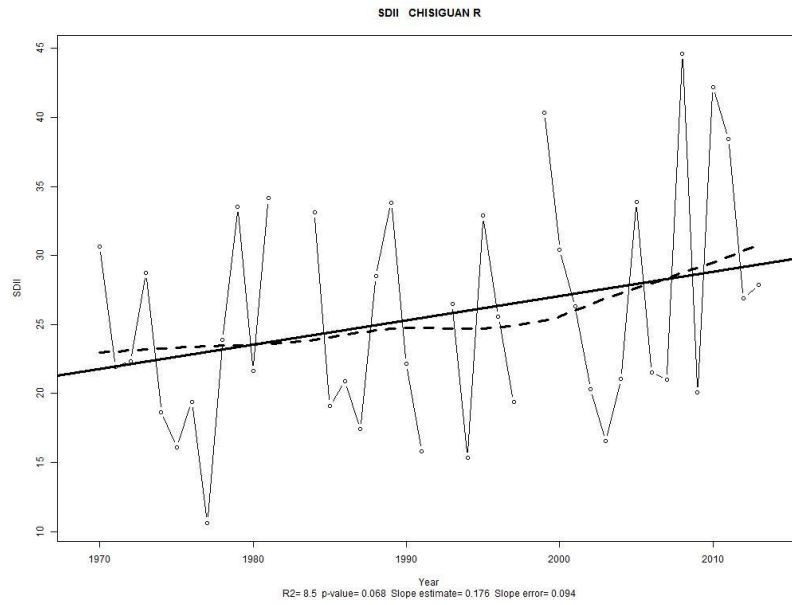
Fuente: elaboración propia, empleando RClmDex.

## Apéndice 16. Índices de caudal, estación El Paradillo



Fuente: elaboración propia, empleando RClimDex.

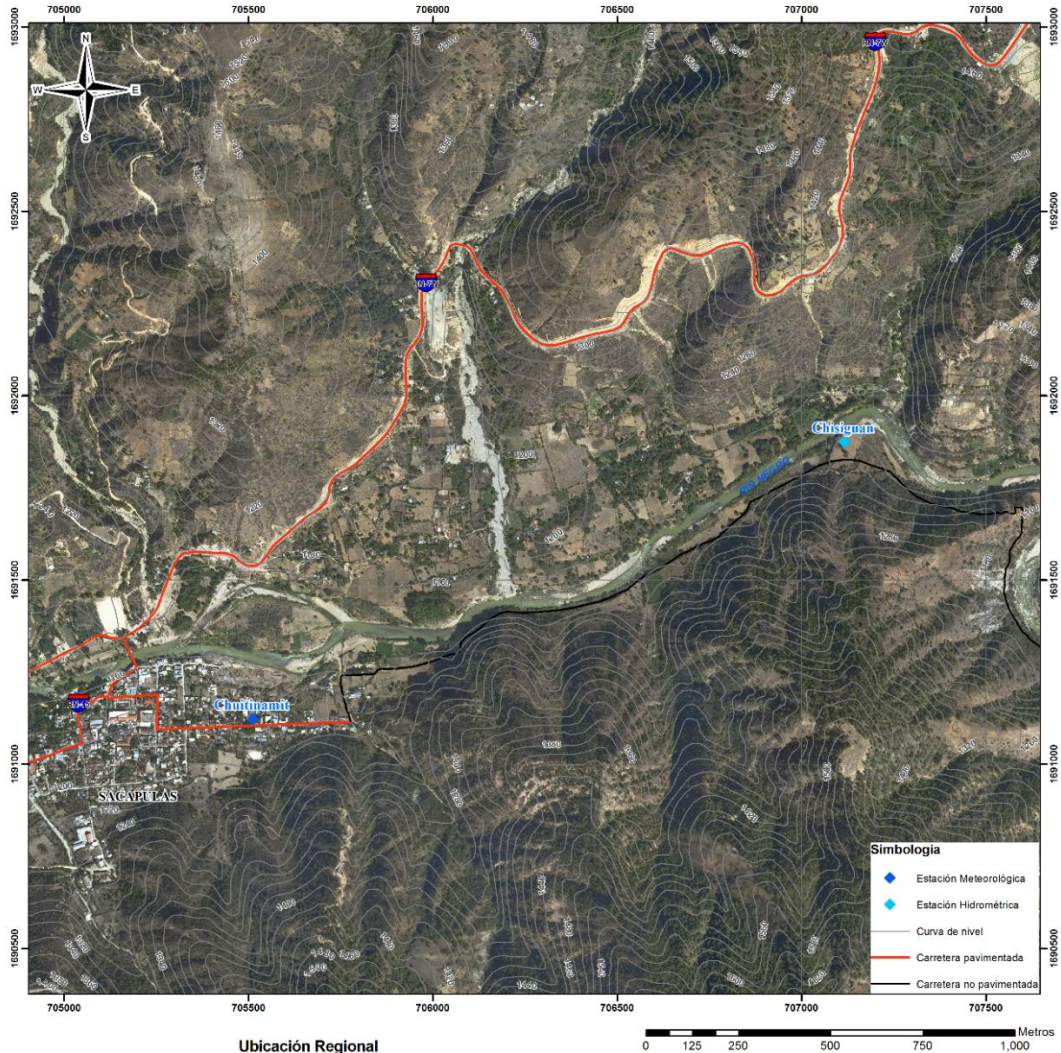
## Apéndice 17. Índices de caudal, estación Chisiguán



Fuente: elaboración propia, empleando RCLimDex.

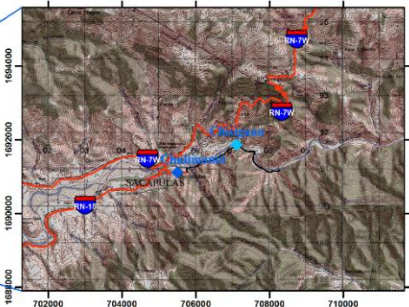
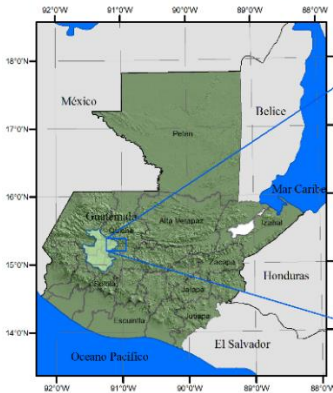
## Apéndice 18. Mapas de ubicación estaciones de estudio

**MAPA DE UBICACIÓN ESTACIONES METEOROLÓGICA "CHUITINAMIT" E HIDROMÉTRICA "CHISIGUÁN"**



**Ubicación Regional**

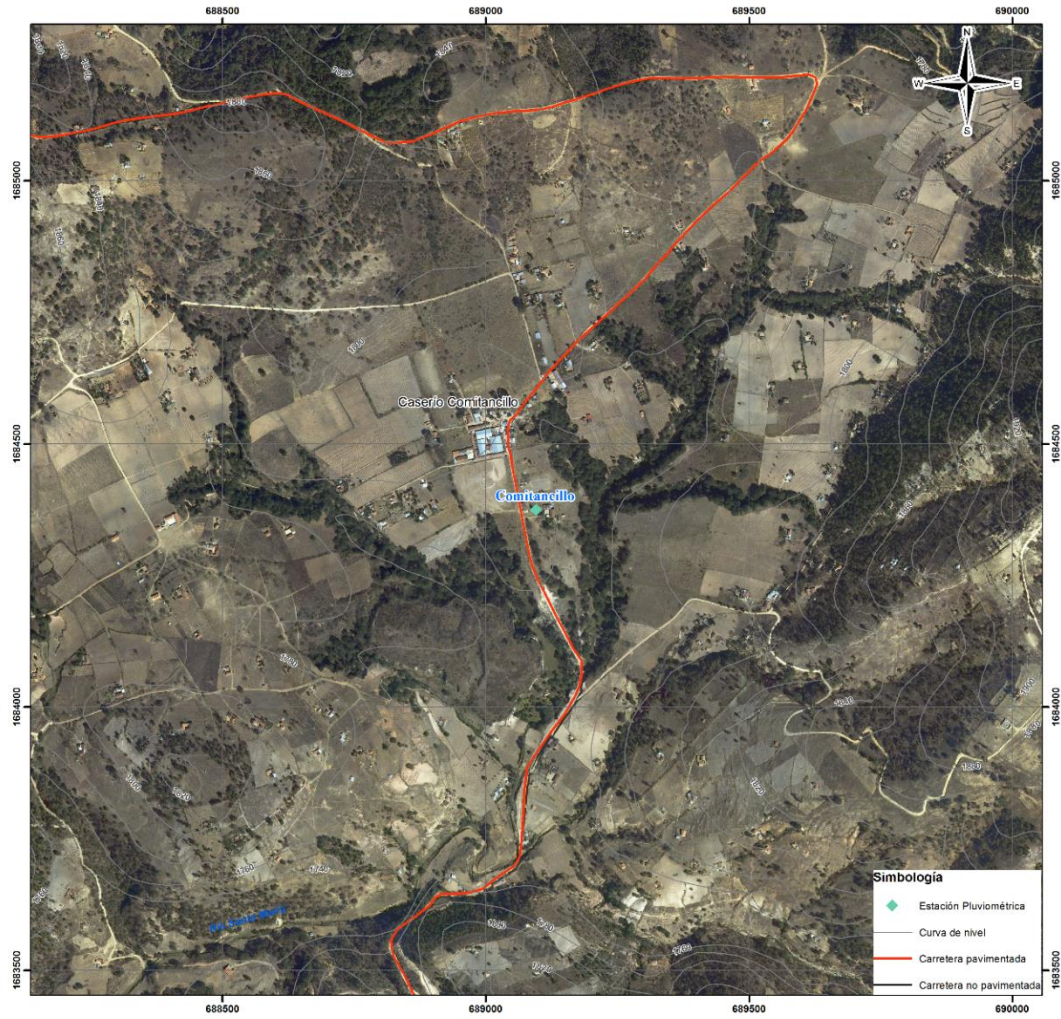
Escala 1:10,000



Universidad de San Carlos de Guatemala -USAC-		
Facultad de Ingeniería		
Escuela de Ingeniería Civil		
"ANÁLISIS DE LA VARIABILIDAD HIDROMETEOROLÓGICA EN LA PARTE ALTA DE LA CUENCA DEL RÍO CHIXOY"		
MAPA DE UBICACIÓN GEOGRÁFICA ESTACIONES METEOROLÓGICA "CHUITINAMIT" E HIDROMÉTRICA "CHISIGUAN"		
Departamento: Quiché	Municipio: Sacapulas	Casero: Chisiguan
Elaborado por: Jorge D. Figueroa G. Sistema de coordenadas: UTM WGS84 Zona 15 Norte		



**MAPA DE UBICACIÓN ESTACIÓN PLUVIOMÉTRICA "COMITANCILLO"**

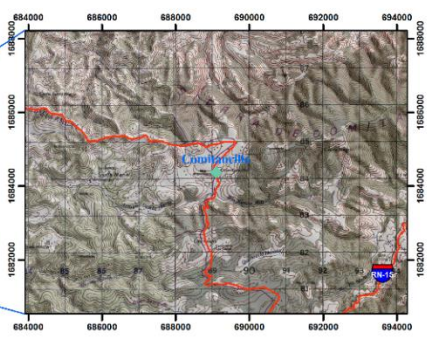


**Simbología**

- ◆ Estación Pluviométrica
- Curva de nivel
- Carretera pavimentada
- Carretera no pavimentada



**Ubicación Regional**

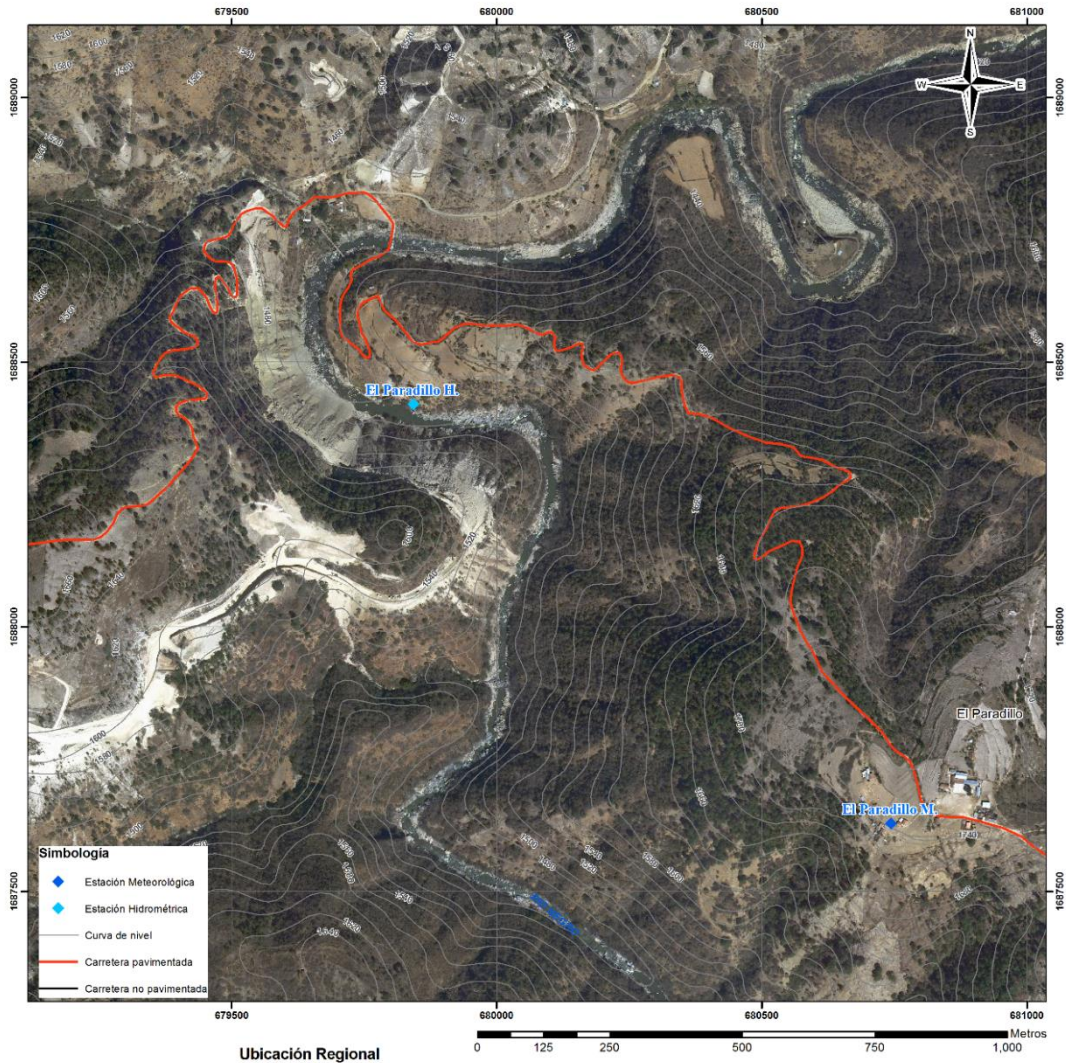


Escala 1:7,000

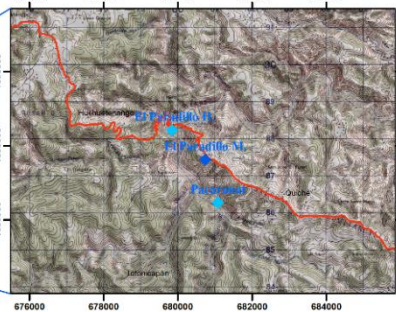
Universidad de San Carlos de Guatemala -USAC-		
Facultad de Ingeniería Escuela de Ingeniería Civil		
"ANÁLISIS DE LA VARIABILIDAD HIDROMETEOROLÓGICA EN LA PARTE ALTA DE LA CUENCA DEL RÍO CHIXOY"		
<b>MAPA DE UBICACIÓN GEOGRÁFICA ESTACIÓN PLUVIOMÉTRICA COMITANCILLO</b>		
Departamento: Quiché	Municipio: San Pedro Jocopilán	Caserío: Comitancillo
Elaborado por: Jorge D. Figueroa G.		Sistema de coordenadas: UTM WGS84 Zona 15 Norte



**MAPA DE UBICACIÓN ESTACIÓN METEOROLÓGICA Y ESTACIÓN HIDROMÉTRICA "EL PARADILLO"**



**Ubicación Regional**



Escala 1:7,000

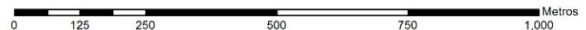
Universidad de San Carlos de Guatemala -USAC-		
Facultad de Ingeniería Escuela de Ingeniería Civil		
ANÁLISIS DE LA VARIABILIDAD HIDROMETEOROLÓGICA EN LA PARTE ALTA DE LA CUENCA DEL RÍO CHICHO		
MAPA DE UBICACIÓN GEOGRÁFICA ESTACIÓN METEOROLÓGICA Y ESTACIÓN HIDROMÉTRICA "EL PARADILLO"		
Departamento:	Municipio:	Aldea:
Quiché	San Pedro Jocopilas	Caserío El Paradiillo
Elaborado por:		Sistema de coordenadas:
Jorge D. Figueroa G.		UTM WGS84 Zona 15 Norte



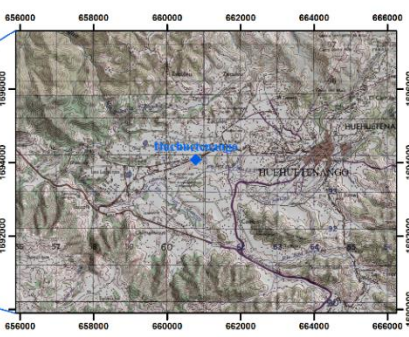
### MAPA DE UBICACIÓN ESTACIÓN METEOROLÓGICA "HUEHUETENANGO"



#### Ubicación Regional



Escala 1:7,000



Universidad de San Carlos de Guatemala -USAC-	
Facultad de Ingeniería Escuela de Ingeniería Civil	
"ANÁLISIS DE LA VARIABILIDAD HIDROMETEOROLÓGICA EN LA PARTE ALTA DE LA CUENCA DEL RÍO CHIXOY"	
MAPA DE UBICACIÓN GEOGRÁFICA ESTACIÓN METEOROLÓGICA "HUEHUETENANGO"	
Departamento: Huehuetenango	Municipio: Huehuetenango
Aldea: Zaculeu El Llano	
Elaborado por: Jorge D. Figueroa G.	
Sistema de coordenadas: UTM WGS84 Zona 15 Norte	



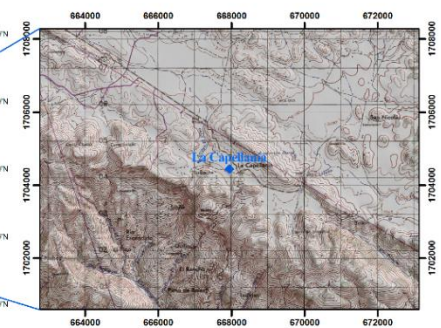
**MAPA DE UBICACIÓN ESTACION METEOROLÓGICA "LA CAPELLANÍA"**



**Simbología**

	Estación Meteorológica
	Curva de nivel
	Carretera pavimentada
	Carretera no pavimentada

**Ubicación Regional**

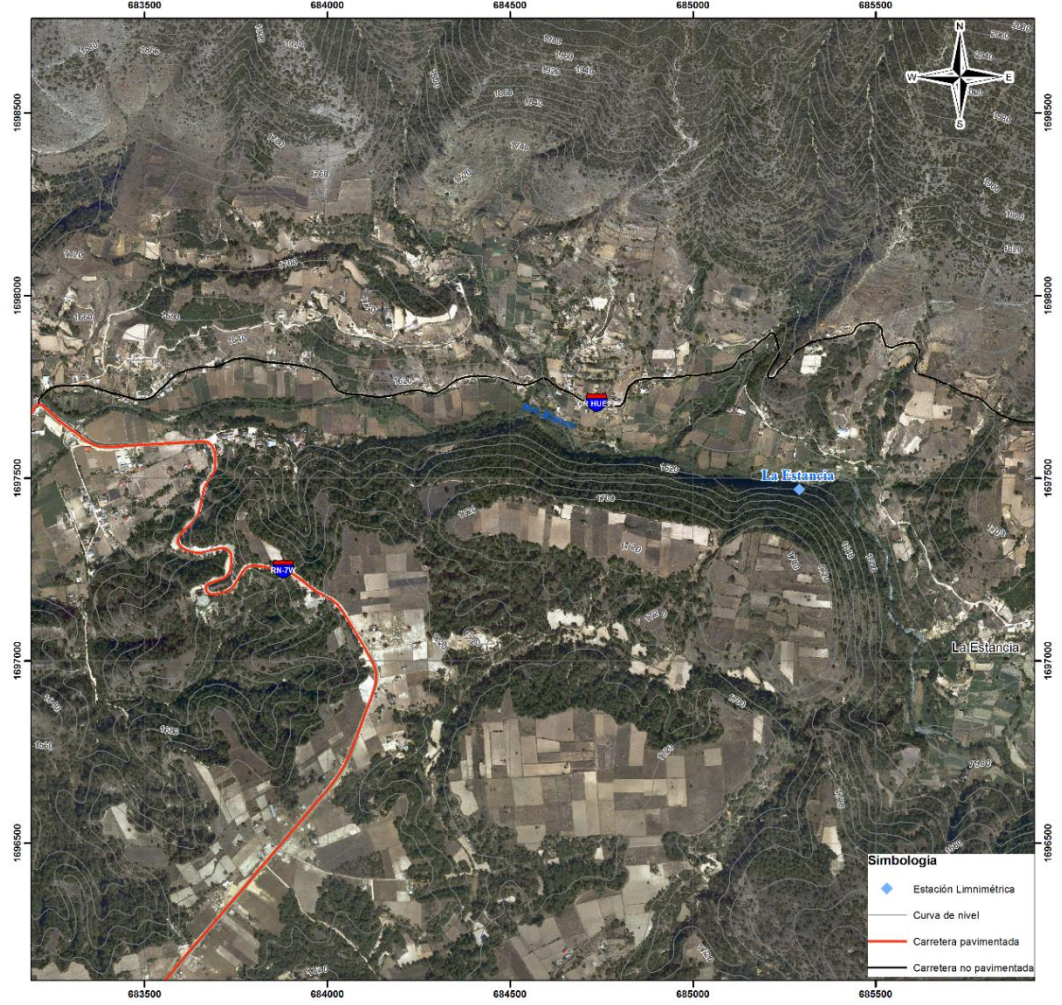


Escala 1:7,000

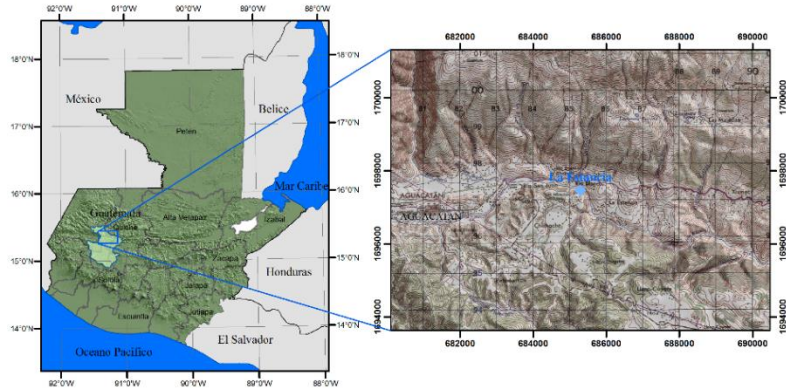
Universidad de San Carlos de Guatemala -USAC-		
Facultad de Ingeniería Escuela de Ingeniería Civil		
"ANÁLISIS DE LA VARIABILIDAD HIDROMETEOROLÓGICA EN LA PARTE ALTA DE LA CUENCA DEL RÍO CHIXOY"		
<b>MAPA DE UBICACIÓN GEOGRÁFICA ESTACION METEOROLÓGICA LA CAPELLANÍA</b>		
Departamento: Huehuetenango	Municipio: Chiantla	Aldea La Capellanía Canton Minas
Elaborado por: Jorge D. Figueroa G.		Sistema de coordenadas: UTM WGS84 Zona 15 Norte



**MAPA DE UBICACIÓN ESTACIÓN LIMNIMÉTRICA "LA ESTANCIA"**



**Ubicación Regional**



Universidad de San Carlos de Guatemala -USAC-		
Facultad de Ingeniería Escuela de Ingeniería Civil		
"ANÁLISIS DE LA VARIABILIDAD HIDROMETEOROLÓGICA EN LA PARTE ALTA DE LA CUENCA DEL RÍO CHIXOY"		
<b>MAPA DE UBICACIÓN GEOGRÁFICA                  ESTACIÓN LIMNIMÉTRICA LA ESTANCIA</b>		
Departamento: Huehuetenango	Municipio: Agucatan	Aldea: La Estancia
Elaborado por: Jorge D. Figueroa G.		Sistema de coordenadas: UTM WGS84 Zona 15 Norte

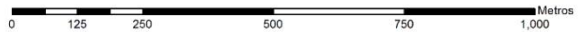


### MAPA DE UBICACIÓN ESTACIÓN METEOROLÓGICA "NEBAJ"

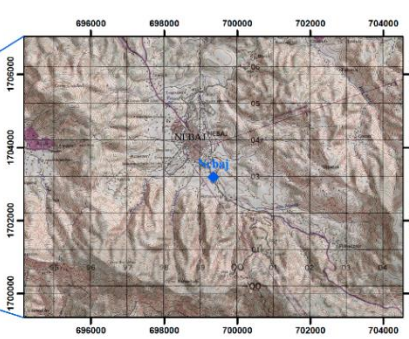


**Simbología**

- ◆ Estación Meteorológica
- Curva de nivel
- Carretera pavimentada
- Carretera no pavimentada



#### Ubicación Regional

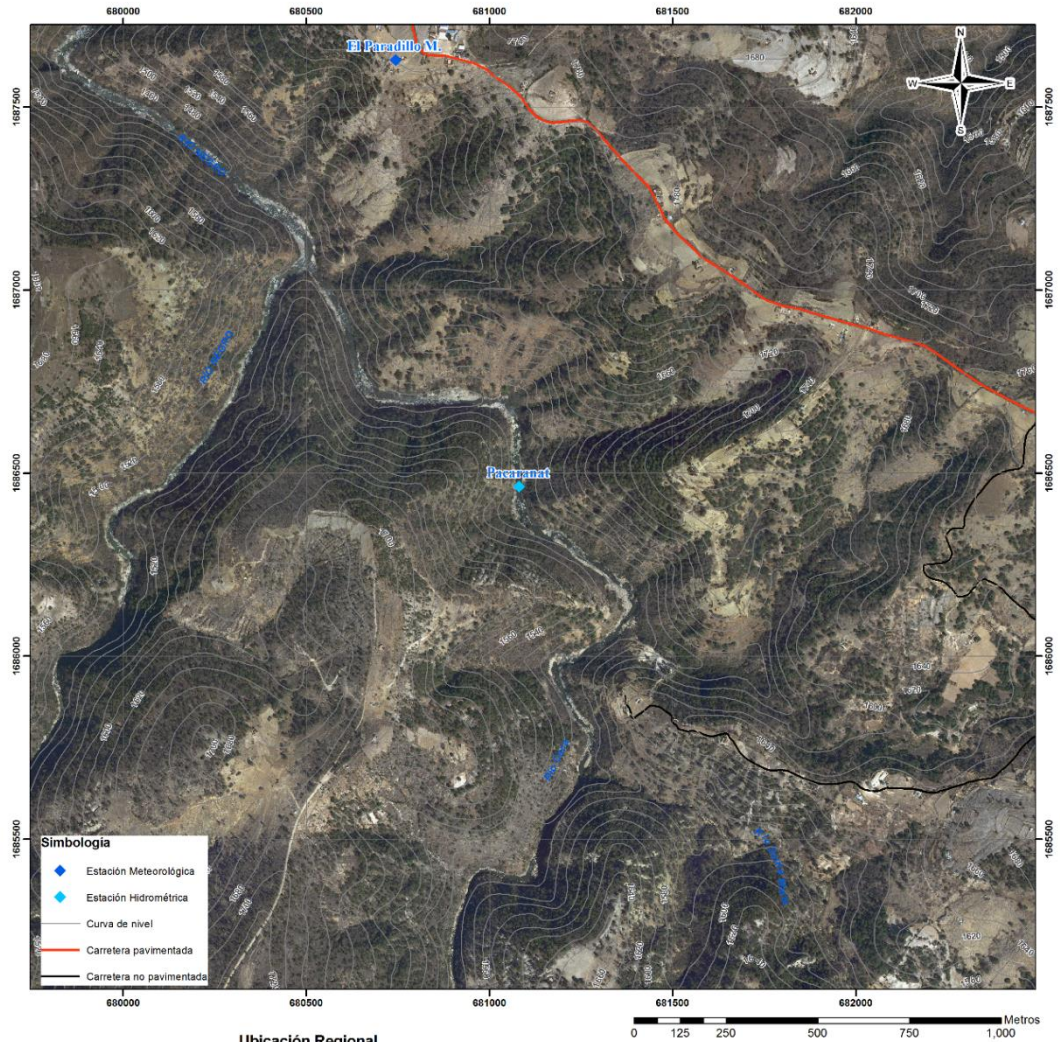


Escala 1:7,000

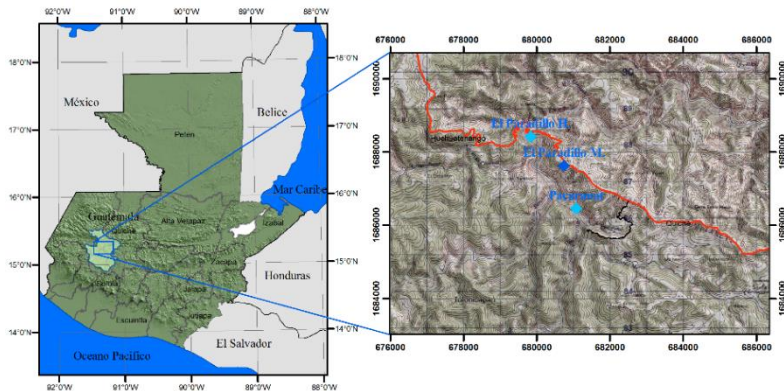
Universidad de San Carlos de Guatemala -USAC-		
Facultad de Ingeniería Escuela de Ingeniería Civil		
"ANÁLISIS DE LA VARIABILIDAD HIDROMETEOROLÓGICA EN LA PARTE ALTA DE LA CUENCA DEL RÍO CHIXOY"		
<b>MAPA DE UBICACIÓN GEOGRÁFICA ESTACIÓN METEOROLÓGICA "NEBAJ"</b>		
Departamento: Quiché	Municipio: Neabaj	Casero: Bicotz II
Elaborado por: Jorge D. Figueroa G. Sistema de coordenadas: UTM WGS84 Zona 15 Norte		



### MAPA DE UBICACIÓN ESTACIÓN HIDROMÉTRICA "PACARANAT"



### Ubicación Regional

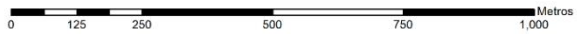
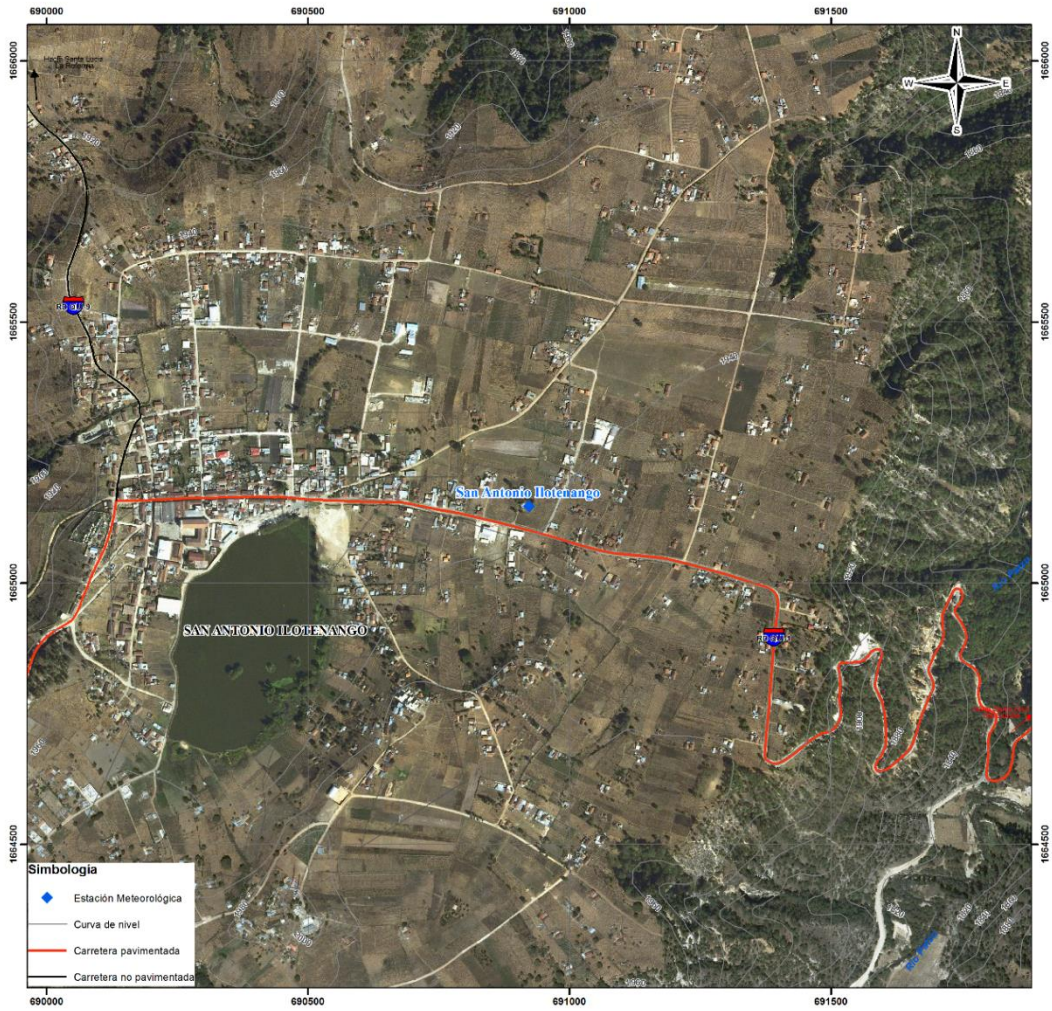


Escala 1:10,000

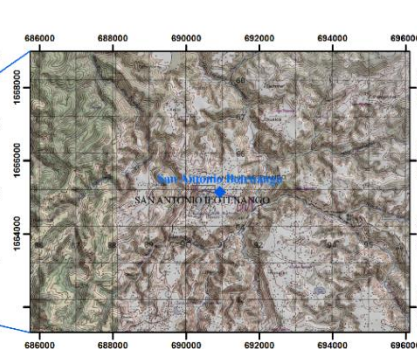
Universidad de San Carlos de Guatemala -USAC-		
Facultad de Ingeniería Escuela de Ingeniería Civil		
"ANÁLISIS DE LA VARIABILIDAD HIDROMETEOROLÓGICA EN LA PARTE ALTA DE LA CUENCA DEL RÍO CHENY"		
<b>MAPA DE UBICACIÓN GEOGRÁFICA ESTACIÓN HIDROMÉTRICA PACARANAT</b>		
Departamento: Totonicapán	Municipio: Santa Lucía La Reforma	Aldea: El Tambor
Elaborado por: Jorge D. Figueroa G.		Sistema de coordenadas: UTM WGS84 Zona 15 Norte



### MAPA DE UBICACIÓN ESTACIÓN METEOROLÓGICA "SAN ANTONIO ILOTENANGO"



#### Ubicación Regional



Escala 1:7,000

Universidad de San Carlos de Guatemala -USAC-	
Facultad de Ingeniería	
Escuela de Ingeniería Civil	
"ANÁLISIS DE LA VARIABILIDAD HIDROMETEOROLÓGICA EN LA PARTE ALTA DE LA CUENCA DEL RÍO CHIXOY"	
MAPA DE UBICACIÓN GEOGRÁFICA ESTACIÓN METEOROLÓGICA SAN ANTONIO ILOTENANGO	
Departamento: Quiché	Municipio: San Antonio Ilo Tenango
Aldea:	
Elaborado por: Jorge D. Figueroa G.	
Sistema de coordenadas: UTM WGS84 Zona 15 Norte	

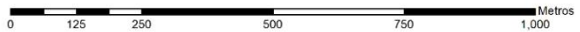


### MAPA DE UBICACIÓN ESTACIÓN PLUVIOMÉTRICA "SANTA CRUZ QUICHÉ"

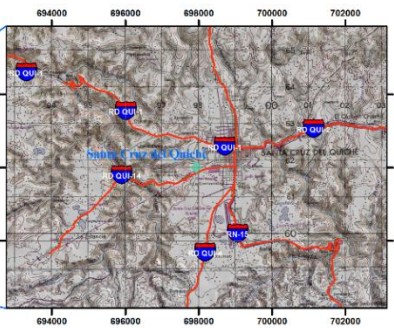


**Simbología**

- ◆ Estación Pluviométrica
- Curva de nivel
- Carretera pavimentada
- Carretera no pavimentada



#### Ubicación Regional

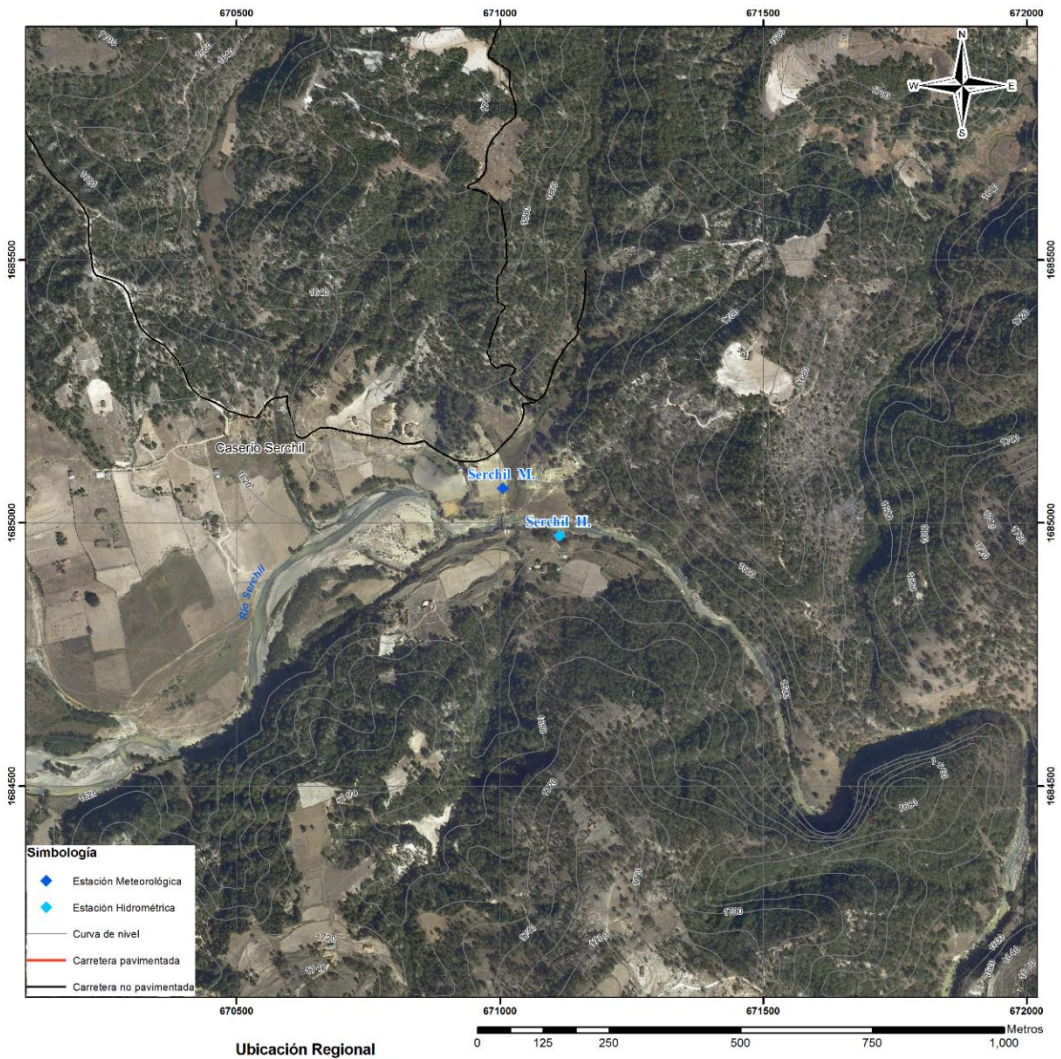


Escala 1:7,000

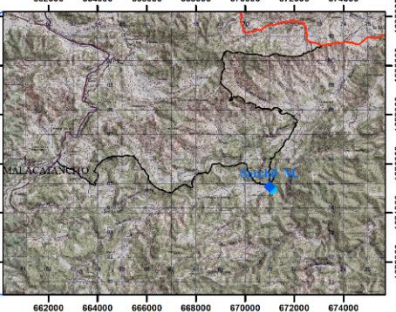
Universidad de San Carlos de Guatemala -USAC- Facultad de Ingeniería Escuela de Ingeniería Civil		
"ANÁLISIS DE LA VARIABILIDAD HIDROMETEOROLÓGICA EN LA PARTE ALTA DE LA CUENCA DEL RÍO CHIXOY"		
<b>MAPA DE UBICACIÓN GEOGRÁFICA                  ESTACIÓN PLUVIOMÉTRICA SANTA CRUZ QUICHÉ</b>		
Departamento: Quiché	Municipio: Santa Cruz	Aldea:
Elaborado por: Jorge D. Figueroa G.		Sistema de coordenadas: UTM WGS84 Zona 15 Norte



**MAPA DE UBICACIÓN ESTACIÓN METEOROLÓGICA Y ESTACIÓN HIDROMÉTRICA "SERCHIL"**



**Ubicación Regional**



Escala 1:7,000

Universidad de San Carlos de Guatemala -USAC-		
Facultad de Ingeniería Escuela de Ingeniería Civil		
"ANÁLISIS DE LA VARIABILIDAD HIDROMETEOROLÓGICA EN LA PARTE ALTA DE LA CUENCA DEL RÍO CHIXOY"		
MAPA DE UBICACIÓN GEOGRÁFICA ESTACIÓN METEOROLÓGICA Y ESTACIÓN HIDROMÉTRICA SERCHIL		
Departamento: Huehuetenango	Municipio: Malacantancho	Aldea/Cancabal: Caserio Serchil
Elaborado por: Jorge D. Figueroa G.		Sistema de coordenadas: UTM WGS84 Zona 15 Norte

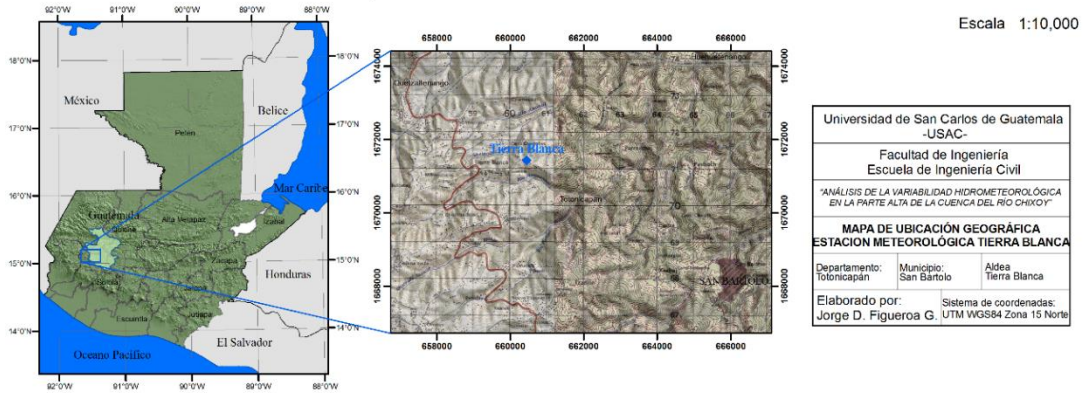


### MAPA DE UBICACIÓN ESTACION METEOROLÓGICA "TIERRA BLANCA"



Simbología	
	Estación Meteorológica
	Curva de nivel
	Carretera pavimentada
	Carretera no pavimentada

#### Ubicación Regional



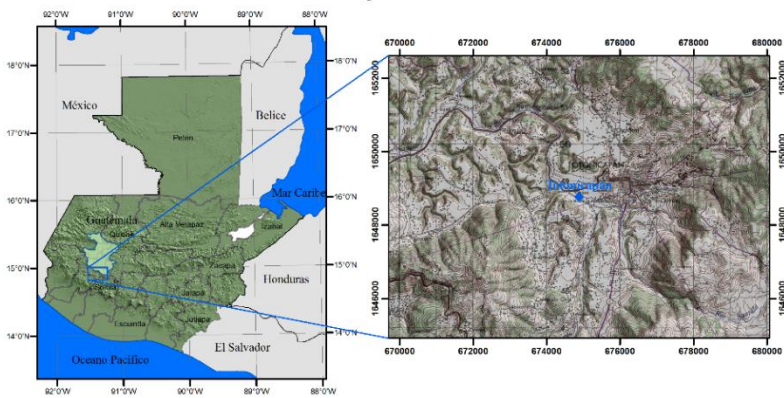
Universidad de San Carlos de Guatemala -USAC-		
Facultad de Ingeniería Escuela de Ingeniería Civil		
ANÁLISIS DE LA VARIABILIDAD HIDROMETEOROLÓGICA EN LA PARTE ALTA DE LA CUENCA DEL RÍO CHIXOY		
<b>MAPA DE UBICACIÓN GEOGRÁFICA ESTACION METEOROLÓGICA TIERRA BLANCA</b>		
Departamento: Toloncapán	Municipio: San Bartolo	Aldea: Tierra Blanca
Elaborado por: Jorge D. Figueroa G.		
Sistema de coordenadas: UTM WGS84 Zona 15 Norte		



**MAPA DE UBICACIÓN ESTACION METEOROLÓGICA "TOTONICAPÁN"**



**Ubicación Regional**



Escala 1:7,000

Universidad de San Carlos de Guatemala -USAC-		
Facultad de Ingeniería		
Escuela de Ingeniería Civil		
"ANÁLISIS DE LA VARIABILIDAD HIDROMETEOROLÓGICA EN LA PARTE ALTA DE LA CUENCA DEL RÍO CHIXOY"		
<b>MAPA DE UBICACIÓN GEOGRÁFICA ESTACION METEOROLÓGICA TOTONICAPÁN</b>		
Departamento: Totonicapán	Municipio: Totonicapán	Cantón Xantún, Paraje Fújar
Elaborado por: Jorge D. Figueroa G.		
Sistema de coordenadas: UTM WGS84 Zona 15 Norte		

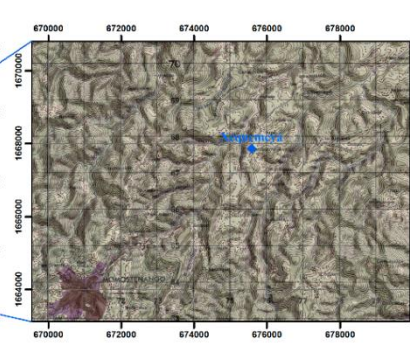


**MAPA DE UBICACIÓN ESTACION METEOROLÓGICA "XEQUEMEYÁ"**



**Ubicación Regional**

Escala 1:7,000



Universidad de San Carlos de Guatemala -USAC-		
Facultad de Ingeniería		
Escuela de Ingeniería Civil		
"ANÁLISIS DE LA VARIABILIDAD HIDROMETEOROLÓGICA EN LA PARTE ALTA DE LA CUENCA DEL RÍO CHIXOY"		
<b>MAPA DE UBICACIÓN GEOGRÁFICA ESTACION METEOROLÓGICA XEQUEMEYÁ</b>		
Departamento: Totonicapán	Municipio: Mamostenango	Aldea: Xequemeyá
Elaborado por: Jorge D. Figueroa G.		Sistema de coordenadas: UTM WGS84 Zona 15 Norte

Fuente: elaboración propia, empleando ArcGis.

