



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

**DETERMINACIÓN DE LA VARIABILIDAD DE LOS RECURSOS HÍDRICOS,
RELACIONADOS AL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA CUENCA DEL RÍO CHIXOY**

Gerardo Eleazar Reyes Donis

Asesorado por el Ing. Claudio César Castañón Contreras

Guatemala, enero de 2013

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DETERMINACIÓN DE LA VARIABILIDAD DE LOS RECURSOS HÍDRICOS,
RELACIONADOS AL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA CUENCA DEL RÍO CHIXOY**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

GERARDO ELEAZAR REYES DONIS

ASESORADO POR EL ING. CLAUDIO CÉSAR CASTAÑÓN CONTRERAS

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO CIVIL

GUATEMALA, ENERO DE 2013

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Juan Carlos Molina Jiménez
VOCAL V	Br. Mario Maldonado Muralles
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO


DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Fernando Amílcar Boiton Velásquez
EXAMINADOR	Ing. Omar Enrique Medrano Méndez
EXAMINADOR	Ing. Alejandro Castañón López
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:

**DETERMINACIÓN DE LA VARIABILIDAD DE LOS RECURSOS HÍDRICOS,
RELACIONADOS AL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA CUENCA DEL RÍO CHIXOY**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil,
con fecha noviembre de 2010.



Gerardo Eleazar Reyes Donis

Guatemala, 17 de septiembre de 2012

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

Ingeniero Aguilar:

Luego de un breve saludo, sírvame la presente para informarle que el trabajo de graduación **“DETERMINACIÓN DE LA VARIABILIDAD DE LOS RECURSOS HÍDRICOS, RELACIONADOS AL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA CUENCA DEL RÍO CHIXOY.”**, elaborado por el estudiante Gerardo Eleazar Reyes Donis, ha sido finalizado a satisfacción y revisado por mi persona.

Sin otro particular, me despido.

Atentamente,



Claudio César Castañón Contreras
Ingeniero Civil
Col. No. 5629

Ing. Claudio César Castañón Contreras
Colegiado No. 5629
Asesor

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
www.ingenieria-usac.edu.gt



Guatemala,
6 de noviembre de 2012

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

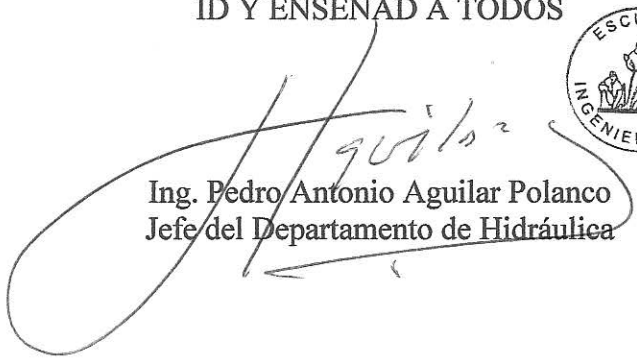
Estimado Ingeniero Montenegro.

Le informo que he revisado el trabajo de graduación **DETERMINACIÓN DE LA VARIABILIDAD DE LOS RECURSOS HÍDRICOS, RELACIONADOS AL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA CUENCA DEL RÍO CHIXOY**, desarrollado por el estudiante de Ingeniería Civil Gerardo Eleazar Reyes Donis, quien contó con la asesoría del Ing. Claudio César Castañón Contreras.

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

Atentamente,

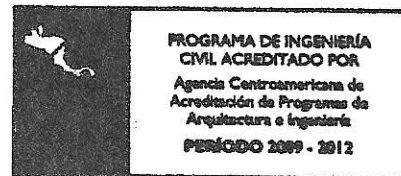
ID Y ENSEÑAD A TODOS


Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Jefe del Departamento de Hidráulica



FACULTAD DE INGENIERIA
DEPARTAMENTO
DE
HIDRAULICA
USAC

/bbdeb.





El director de la Escuela de Ingeniería Civil, después de conocer el dictamen del Asesor Ing. Claudio César Castañón Contreras y del Jefe del Departamento de Hidráulica, Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco, al trabajo de graduación del estudiante Gerardo Eleazar Reyes Donis, titulado **DETERMINACIÓN DE LA VARIABILIDAD DE LOS RECURSOS HÍDRICOS, RELACIONADOS AL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA CUENCA DEL RÍO CHIXOY**, da por este medio su aprobación a dicho trabajo.


Ing. Hugo Leonel Montenegro Franco



Guatemala, enero de 2013.

/bbdeb.



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: **DETERMINACIÓN DE LA VARIABILIDAD DE LOS RECURSOS HÍDRICOS, RELACIONADOS AL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA CUENCA DEL RÍO CHIXOY**, presentado por el estudiante universitario: **Gerardo Eleazar Reyes Donis**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

Ing. Murphy Olimpo Paiz Recinos
Decano

Guatemala, 17 de enero de 2013

/gdech



ACTO QUE DECIDO A:

Mis padres	Marino Eleazar Reyes Rivadeneira y Lidia Eurdaned Donis Pivaral. Por siempre confiar en mí y brindarme todo el apoyo necesario en ésta y muchas metas.
Mis hermanos	Lizzette Reyes Donis, Ángel Reyes Donis, Ariel Reyes Donis y Cecilia Reyes Donis, por todo su apoyo incondicional.
Mis tíos	Por siempre brindarme su apoyo y consejos.
Mis sobrinos	Alejandra Reyes, Sofía Reyes, Diego Guerra, Lidia Carolina Reyes, Gabriel Reyes y Mariana Guerra, por darme su felicidad cuando más lo necesitaba.
Mis cuñadas	Alejandra Balcarcel y Carolina Vaides.
Mis amigos	Por su apoyo durante mi carrera y fuera de ella, Cleydi García, Gabriela Ross, Nereyda Lemus, Lilian Donis, Hugo Cruz, Flor Roldan, Luis Ochoa, Julio De Villa, Luis Maldonado. Sergio Castellanos, Natalia Rodas, Marielos Rodas, Kandy Pérez, Carlos Rodríguez, Estuardo

Jordán, Yidja Girón, Arturo Gómez, Marco Coronado e Ileana Pierri.

AGRADECIMIENTOS A:

Dios	Por guiarme, cuidarme y darme las fuerza para seguir adelante ante todo, la gloria se para Él.
Mi asesor	Ing. Claudio Castañón, por su apoyo en este trabajo de graduación.
Ing. Rodolfo Rivas	Por haberme formado profesionalmente en parte de mi carrera.
Instituto Nacional de Electrificación	Por brindarme su ayuda para este trabajo de graduación.
La Facultad de Ingeniería	Por formarme académicamente y darme lo mejor.
La Universidad de San Carlos de Guatemala	Por ser mi alma mater y casa de estudios.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS	IX
GLOSARIO	XI
RESUMEN.....	XV
OBJETIVOS.....	XVII
INTRODUCCIÓN	XIX
1. ANTECEDENTES.....	1
1.1. Ubicación y localización de la cuenca del río Chixoy	1
1.2. Accesos y comunicaciones.....	3
1.3. Poblaciones dentro del cuenca.....	3
1.4. Descripción de la cuenca.....	5
1.5. Estaciones hidrológicas dentro de la cuenca.....	6
1.6. Geomorfología, climatología, aforos y parámetros hidrológicos	7
1.6.1. Climatología.....	7
1.6.2. Geografía.....	8
1.7. Geología y suelos.....	10
2. EL CAMBIO CLIMÁTICO Y SU IMPACTO SOBRE LOS RECURSOS HÍDRICOS	13
2.1. El sistema climático	13
2.1.1. Qué se entiende por clima.....	15
2.1.2. Componentes del sistema climático	16
2.2. Causas naturales del cambio climático.....	17

2.2.1.	Mecanismos no radiativos	17
2.2.2.	Mecanismos radiativos	18
2.2.3.	Mecanismos externos	18
2.2.3.1.	Variaciones galácticas	19
2.2.3.2.	Variaciones orbitales	19
2.2.3.3.	Variaciones solares	20
2.2.4.	Mecanismos internos	21
2.2.4.1.	Formación de los sistemas montañosos	21
2.2.4.2.	Vulcanismo.....	22
2.2.4.3.	Circulación oceánica	23
2.3.	Causas antrópicas del cambio climático	25
2.3.1.	Modificaciones del paisaje y del uso del suelo	27
2.4.	Impactos del cambio climático	28
2.4.1.	Recursos hídricos en Guatemala	29
2.4.2.	La hidrología y los recursos hídricos	32
2.4.3.	El clima y los recursos hídricos	33
2.4.4.	Impacto en los recursos hídricos.....	34
2.4.5.	Otros impactos	34
3.	APLICACIÓN A LA ZONA DE ESTUDIO	37
3.1.	Análisis de la información.....	37
3.2.	Datos.....	38
3.2.1.	Control de calidad	41
3.2.2.	Corrección de datos de temperatura	42
3.2.3.	Rangos y saltos de tiempo en los datos	45
3.3.	Generación y gráfico de índices.....	48
3.4.	Resultados	66
3.5.	Tendencia de la precipitación.....	70

3.5.1.	Tendencia de la precipitación acumulada anual	70
3.5.2.	Tendencia de las precipitaciones fuertes.....	72
3.5.3.	Tendencia de la precipitación acumulada anual para los meses de septiembre y octubre	74
3.6.	Tendencia de la temperatura media diaria	79
3.6.1.	Tendencia de la temperatura media diaria mayor a 25 grados centígrados	79
3.6.2.	Tendencia de la temperatura media diaria mayor a 20 grados centígrados	82
4.	ANÁLISIS DE CAUDALES	87
4.1.	Análisis de datos	87
4.2.	Datos	87
4.2.1.	Rangos y saltos de tiempo en los datos	90
4.3.	Generación y gráfico de datos.....	92
4.4.	Tendencia y resultados del caudal medio anual.....	97
4.5.	Comparación del caudal contra la precipitación	102
	CONCLUSIONES	103
	RECOMENDACIONES	105
	BIBLIOGRAFÍA.....	107

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Cuenca del río Chixoy.....	2
2.	Vías de acceso	3
3.	Poblados en la cuenca.....	5
4.	Balace de energía en la atmósfera	15
5.	El gran cinturón oceánico.....	24
6.	Evolución del CO ₂ desde 1870	26
7.	Contribución de cada subsector a las emisiones CO ₂ en Guatemala ..	27
8.	Influencia de los distintos forzamientos radiativos	28
9.	Ubicación de las estaciones de temperatura y precipitación	40
10.	Temperatura y precipitación en estación San Andrés Sajcabajá	46
11.	Temperatura y precipitación en estación Quixal	47
12.	Ejemplo de formato de datos para el archivo de datos iniciales en Rclimindex	49
13.	Días al año cuando la temperatura media diaria es mayor a 20°C (TR20)	52
14.	Días al año con temperatura media diaria mayor a 25°C (SU25)	53
15.	Mayor número de días secos consecutivos en un año (CDD)	54
16.	Mayor número de días húmedos consecutivos en un año (CWD)	55
17.	Precipitación total al año (PRCTOT)	56
18.	Número de días al año con lluvia mayor a 10mm (R10mm)	57
19.	Número de días al año con lluvia mayor a 20mm (R20mm)	58

20.	Número de días en un año con lluvia mayor al percentil 95 para los días húmedos (R95p).....	59
21.	Días al año cuando la temperatura media diaria es mayor a 20°C (TR20)	60
22.	Días al año con temperatura media diaria mayor a 25°C (SU25).....	61
23.	Precipitación total al año (PRCTOT).....	62
24.	Número de días al año con lluvia mayor a 10mm (R10mm).....	63
25.	Número de días en un año con lluvia mayor al percentil 95 para los días húmedos (R95p).....	64
26.	Mayor número de días secos consecutivos en un año (CDD).....	65
27.	Mayor número de días húmedos consecutivos en un año (CWD).....	66
28.	Indicador relacionado con la tendencia de la precipitación total anual (PRCPTOT)	71
29.	Indicador relacionado con la tendencia de las precipitaciones fuertes o intensas (R95p).	73
30.	Precipitación total de septiembre registrada en la estación La Capellanía	74
31.	Precipitación total de septiembre registrada en la estación La Navidad	75
32.	Precipitación total de septiembre registrada en la estación Tierra Blanca	75
33.	Precipitación total de octubre registrada en la estación La Capellanía	76
34.	Precipitación total de octubre registrada en la estación La Navidad ...	77
35.	Precipitación total de octubre registrada en la estación Serchil.....	77
36.	Indicador relacionado con la tendencia de temperatura media diaria mayor a 25°C (SU25).....	81
37.	Indicador relacionado con la tendencia de temperatura media diaria mayor a 20°C (TR20).....	83

38.	Indicador de variación de la media de la temperatura media.....	85
39.	Ubicación de las estaciones de aforo.....	89
40.	Caudal medio anual en la estación Los Ganchos	90
41.	Caudal medio anual en la estación Serchil	91
42.	Caudal medio anual en la estación El Cebollal	91
43.	Caudal medio anual en la estación El Cebollal	93
44.	Caudal medio anual en la estación Quixal II	93
45.	Caudal medio anual en la estación Las Torres	94
46.	Caudal medio anual en la estación Camalmapa.....	94
47.	Caudal medio anual en la estación Chisiguan	95
48.	Caudal medio anual en la estación La Estancia	95
49.	Caudal medio anual en la estación Los Ganchos	96
50.	Caudal medio anual en la estación Pacaranat.....	96
51.	Caudal medio anual en la estación Serchil	97
52.	Indicador relacionado con la tendencia del caudal total anual	100
53.	Variación del caudal intenso en estación El Cebollal.....	101

TABLAS

I.	Coordenadas de la cuenca del río Chixoy	1
II.	Departamentos dentro de la cuenca	4
III.	Estaciones hidrológicas dentro de la cuenca	6
IV.	Geomorfología, Climatología y aforos.....	7
V.	Vertientes y cuencas.....	30
VI.	Principales ríos y localización de cuencas en Guatemala.....	31
VII.	Estaciones analizadas	39
VIII.	Estación San Andrés Sajcabajá, datos que salían de las 3 desviaciones propuestas.....	43

IX.	Estación Quixal, datos que salían de las 3 desviaciones propuestas	44
X.	Índices que se generaron con el programa Rclimdex.....	50
XI.	Resultados de la temperatura media diaria	67
XII.	Resultados de la precipitación	69
XIII.	Resultados de la precipitación acumulada anual para septiembre y octubre	78
XIV.	Listado de estaciones de aforo analizadas	88
XV.	Resultados del caudal medio anual	98

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
AC	Antes de Cristo
C	Caudal
Σ	Desviación estándar
CO₂	Dióxido de carbono
°C	Grados Celsius
Km	Kilómetros
km²	Kilómetros cuadrados
m³	Metros cúbicos
m³/año	Metros cúbicos por año
Msnm	Metros sobre el nivel del mar
mm/año	Milímetro por año
Mm	Milímetros

P	Precipitación
mg/L	Miligramos sobre litro
T	Temperatura
Tmáx	Temperatura máxima
Tmín	Temperatura mínima

GLOSARIO

Afluente	Río tributario de otro.
Año hidrológico	División anual que principia en el mes en el que se considera que empieza la época de lluvias o invierno en los diferentes países. En el caso de Guatemala, el año hidrológico inicia el 1 de mayo y finaliza el 30 de abril del año siguiente.
Atmósfera	Conjunto de gases y aerosoles que envuelven a la Tierra y que comúnmente se conoce como el aire.
Biosfera	Es el sistema formado por el conjunto de los seres vivos propios del planeta Tierra, junto con el medio físico que les rodea y que ellos contribuyen a conformar.
Estación hidrológica	Es el lugar donde se efectúan observaciones hidrológicas o climatológicas para fines hidrológicos.

Excentricidad

Es la forma de la órbita terrestre que acentúa las variaciones entre las estaciones. Con un período de, aproximadamente, 100 000 años, la órbita se alarga y acorta, lo que provoca que su elipse sea más excéntrica y luego retorne a una forma más circular.

GNU

Movimiento y comunidad de software y conocimientos libres.

Hidrología

Ciencia que trata de las características y propiedades del agua sobre el suelo y en su interior, y principalmente de la distribución del agua procedente de lluvias.

INDE

Instituto Nacional de Electrificación.

Isoyetas

Línea que une puntos de la superficie de la Tierra donde la cantidad de precipitación durante un período dado tiene el mismo valor.

IPCC

Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático.

Litosfera

La litosfera es la capa rocosa más superficial del planeta Tierra, con un espesor medio de unos 300 kilómetros en los continentes y de 70 kilómetros en los océanos.

Oblicuidad

Es la inclinación del eje de rotación terrestre. Al aumentar su ángulo, las estaciones resultan más extremas en ambos hemisferios (veranos más cálidos e inviernos más fríos).

Outliers

Considera valores extremos diarios como valores diarios que se encuentran fuera de un rango definido por el usuario.

Precesión

Precesión o bamboleo es la rotación del eje de la Tierra, que describe una circunferencia completa, aproximadamente, cada 23000 años. La precesión determina si el verano en un hemisferio dado cae en un punto de la órbita cercano o lejano al Sol.

p-value

Conocida también como valor p , es la probabilidad de obtener un resultado al menos tan extremo como el que realmente se ha obtenido, suponiendo que la hipótesis nula es cierta. Es un indicador de la significancia estadística de la serie de datos.

R	Es un lenguaje y ambiente computacional para cálculos y gráficos estadísticos. Es una implementación GNU del lenguaje S desarrollado por John Chambers y colegas de los Laboratorios Bell.
Ratio o cociente	Se utiliza como sinónimo de razón, en el sentido del cociente de los números o de cantidades comparables.
Rclimdex	ClimDex es un programa basado en Microsoft Excel que proporciona un paquete computacional fácil de usar para el cálculo de índices de extremos climáticos para monitorear y detectar cambio climático.
Red hidrológica	Conjunto de estaciones meteorológicas e hidrológicas en una cuenca, situadas de forma que sus observaciones puedan facilitar los datos básicos necesarios para el conocimiento del régimen de la cuenca en el espacio y en el tiempo.

RESUMEN

La investigación realizada presenta un análisis de las tendencias de las variables hidrometeorológicas registradas en la cuenca del río Chixoy, con el objetivo de tener evidencia si los elementos que definen el recurso hídrico han sufrido modificaciones relacionados al cambio climático.

En este trabajo de investigación, se analizaron tres factores que influyen en el clima de la cuenca del río Chixoy, que son: precipitación, temperatura y caudal. Se recopiló la información de estaciones climatológicas que han registrado datos desde 1979 al 2010, utilizando el software Rclimindex para definir la calidad de la información y posteriormente calcular índices que servirán para análisis de tendencias, los que reflejan si existe o no evidencia si se han aumentado o disminuido los valores de las variables estudiadas.

OBJETIVOS

General

Analizar y determinar si existe una tendencia de cambio en los recursos hídricos de la cuenca del río Chixoy, asociados al cambio climático.

Específicos

1. Determinar la tendencia de variación en la precipitación de la cuenca del río Chixoy.
2. Determinar la tendencia de variación en la temperatura de la cuenca del río Chixoy.
3. Determinar la tendencia de variación en los caudales de la cuenca del río Chixoy.
4. Determinar si existe alguna correlación entre los factores de precipitación y caudal.

INTRODUCCIÓN

La investigación de los impactos asociados al cambio climático han mejorado los conocimientos sobre la vulnerabilidad al cambio climático de muy diversos sistemas ecológicos (bosques, herbazales, humedales, ríos, lagos y entornos marinos) y humanos (agricultura, recursos hídricos, recursos costeros, salud humana, instituciones financieras y asentamientos humanos).

Las variaciones climáticas alteran los ecosistemas como así mismo los componentes del ciclo hidrológico (precipitación, evapotranspiración, transpiración y escorrentías) y de los cuerpos de agua (ríos, lagos y mares).

Aunque se encuentra literatura a nivel mundial y nacional sobre los efectos del cambio climático, como la primera comunicación nacional de cambio climático publicada en el 2001 por el Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales, pocos o nulos son los estudios a nivel de cuenca de los efectos del cambio climático, adicionalmente los estudios evalúan principalmente los escenarios de cambio climático pero no se concentran en si efectivamente se ha registrado cambios en las variables del ciclo hidrológico.

En el presente trabajo de graduación, en el capítulo uno se presenta información de la cuenca del río Chixoy, como lo son ubicación, caminos, departamentos dentro de la cuenca, climatología, descripción sobre la misma, climatología, geomorfología y uso de los suelos, datos que permiten saber acerca de ésta.

En el capítulo dos se muestra información sobre el clima, como actúa, se compone, causas que ocasionan el cambio climático y los mecanismos que influyen en éste, también la relación que existe entre los recursos hídricos y el cambio climático y cómo éste puede afectar al territorio nacional y los impactos que trae.

En el capítulo tres se muestra un análisis completo de los datos contenidos en las estaciones de precipitación y temperatura media diaria de la cuenca del río Chixoy, durante el período de 1979 al 2010, pasando por un control de calidad para ser aptos en este trabajo, después de pasar por este control se generan los índices de clima mediante el *software Rclimdex*, que a su vez genera gráficos en base a los datos de cada estación y con esto poder obtener resultados descriptivos de la variabilidad de la temperatura media diaria y precipitación y así tabularlos, para que permitan una mejor interpretación de éstos, que mediante mapas se localizan y se marca su tendencia al incremento o decremento, tanto para la precipitación y como para la temperatura media diaria.

En el cuarto capítulo, se presenta un análisis del caudal medio anual y su comportamiento, pasando los datos por un control de calidad, para un mejor análisis; mediante la generación de resultados y gráficos se podrá observar la tendencia y si ésta es muy significativa o no, así mismo si representa algún cambio en el parámetro que es objeto de estudio. Al final se muestran las conclusiones y recomendaciones pertinentes.

1. ANTECEDENTES

1.1. Ubicación y localización de la cuenca del río Chixoy

Como área para el estudio, se tomó como referencia de inicio de la cuenca, el cual está en Huehuetenango hasta el punto de embalse de la misma que se ubica en Pueblo Viejo, Baja Verapaz.

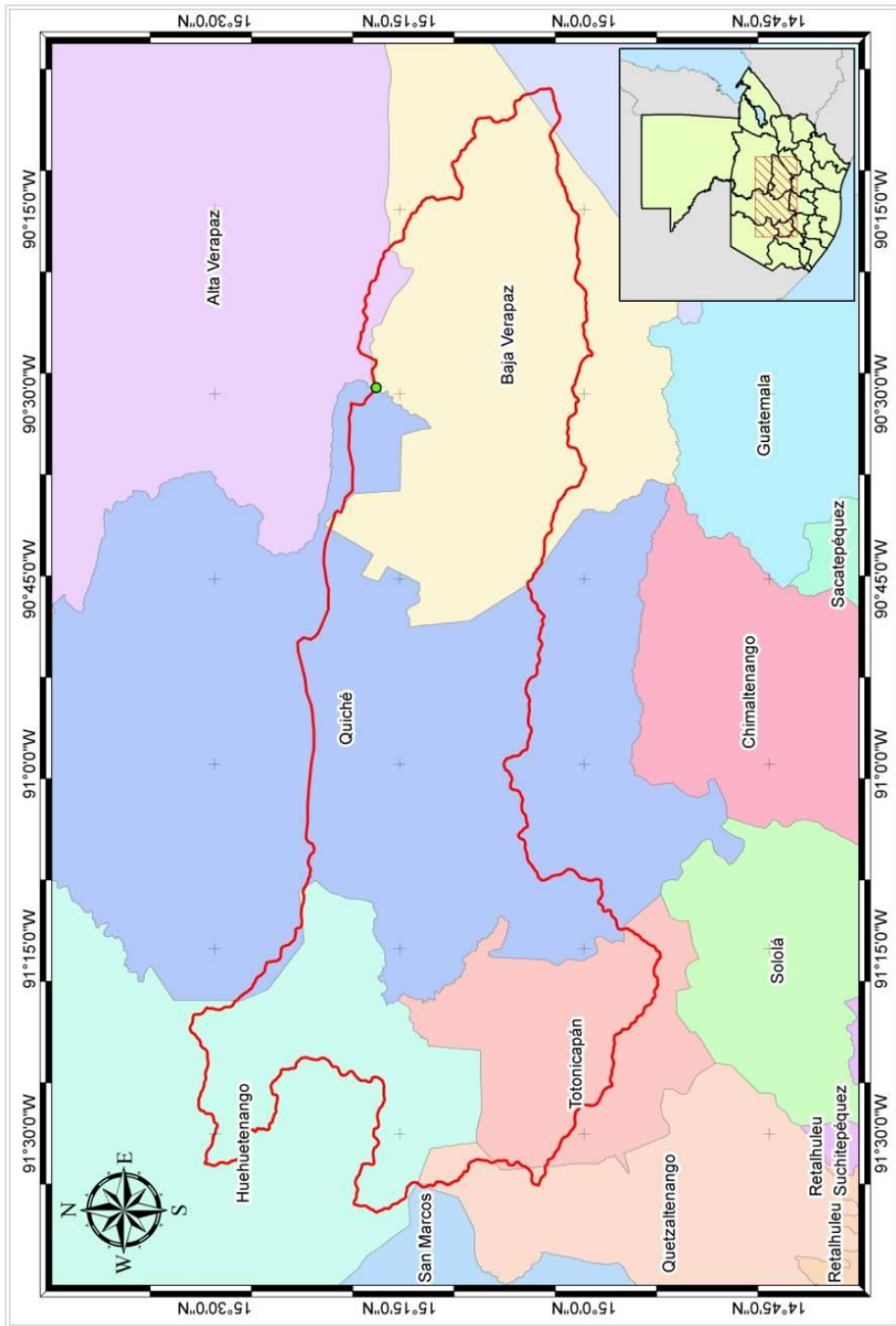
Tabla I. **Coordenadas de la cuenca del río Chixoy**

Cuenca hidrográfica	Golfo de México
Nacimiento	15°16'54"N 90°29'27"W
Finaliza	15°16'13"N 91°24'49"O

Fuente: elaboración propia.

En la figura 1 se muestra la cuenca del río delimitada por una línea, la cual indica el área que se estudiará y así mismo los departamentos que abarca, la cuenca, la cual está ubicada en los departamentos de Alta Verapaz, Baja Verapaz, Quiché, Totonicapán, Huehuetenango y Quetzaltenango.

Figura 1. Cuenca del río Chixoy

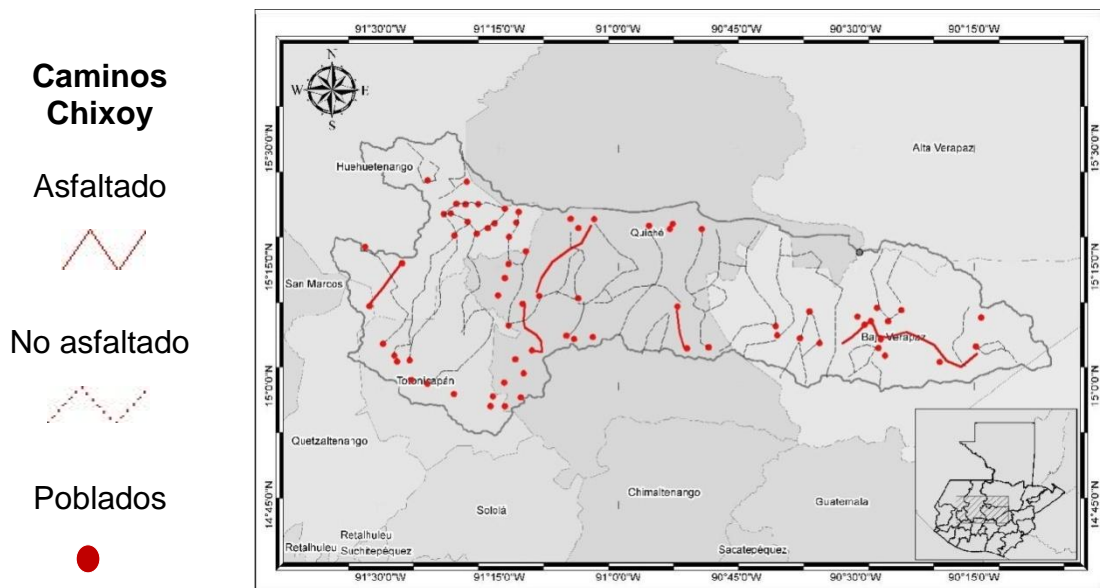


Fuente: Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología.

1.2. Accesos y comunicaciones

A continuación se muestran las carreteras, caminos y veredas dentro de la cuenca que la comunican entre sí, estos mismos dan acceso a los diferentes departamentos y poblados dentro de la misma y su importancia, ver figura 2.

Figura 2. Vías de acceso



Fuente: Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología.

1.3. Poblaciones dentro del área de la cuenca

Dentro de la región bajo estudio, la población es de aproximadamente 480 000 personas, de la cual el 86 por ciento vive en el área rural. El 57 por ciento de la población es menor de 20 años y el 60 por ciento es analfabeta. La predominancia étnica es indígena.

La pobreza en la cuenca del Chixoy se concentra en la población rural, esto, como es natural, agrava el problema social, ya que en las zonas críticas hay una densidad de población de 200 habitante/kilometro cuadrado. Ver figura 3.

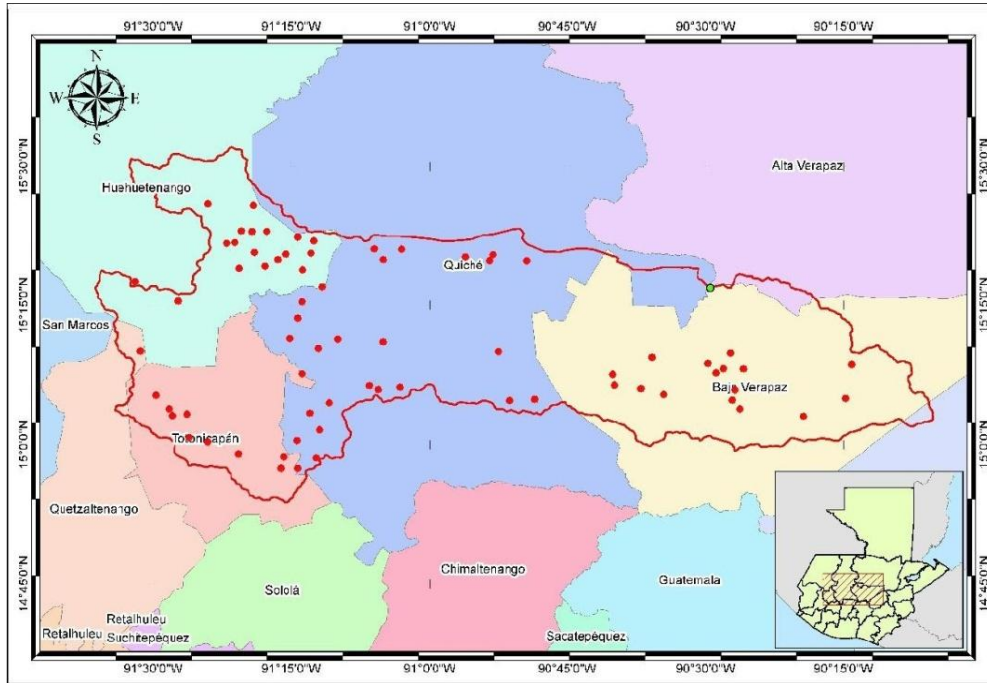
En la tabla II se encuentran los departamentos que están dentro de la cuenca los cuales son los siguientes:

Tabla II. **Departamentos dentro de la cuenca**

No.	Departamento
1	Alta Verapaz
2	Baja Verapaz
3	Quiché
4	Totonicapán
5	Huehuetenango
6	Quetzaltenango

Fuente: elaboración propia.

Figura 3. Poblados en la cuenca



Fuente: Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología.

En la gráfica anterior se muestran los poblados de la cuenta, los cuales se denotan con un punto rojo, el cual indica cuando los poblados sobre pasan los 1 000 habitantes.

1.4. Descripción de la cuenca

El río Chixoy es llamado río Negro desde sus fuentes en el altiplano de Huehuetenango y en El Quiché hasta llegar a la represa de la central hidroeléctrica Chixoy, donde el río Salamá y el río Carchelá se unen al río Negro. Después de la represa el río continúa su recorrido sobre 56 kilómetros como río Chixoy hacia el norte, marcando los límites entre los departamentos de Alta Verapaz y El Quiché, hasta llegar a la frontera con México. Desde la

frontera toma el nombre de río Salinas y sigue marcando la frontera sobre 113 kilómetros, hasta llegar a la confluencia con el río La Pasión, para formar el Usumacinta.

1.5. Estaciones hidrológicas en la cuenca del río Chixoy

Las estaciones que se usarán para el estudio serán con las que cuentan y tiene en operación el Instituto Nacional de Electrificación (INDE), a continuación, en la tabla III, se muestra un listado de las mismas.

Tabla III. **Estaciones hidrológicas dentro de la cuenca**

Estación	Estado
Cerro La Laguna	En operación
Chajul	En operación
Chicaman	En operación
Comitancillo	En operación
El Cebollal	En operación
El Paradillo	En operación
La Capellania	En operación
La Navidad	En operación
Pueblo Viejo	En operación
Quixal	En operación
Serchil	En operación
San Andrés Sajcabajá	En operación
San Antonio Ilotenango	En operación
Santa Cruz del Quiché	En operación
Tierra Blanca	En operación
Xequemeyá	En operación

Fuente: elaboración propia.

1.6. Geomorfología, climatología, aforos y parámetros hidrológicos

La cuenca cuenta con datos característicos propios, los cuales se marcan por el lugar, altura, clima de la región, estos datos se muestran en la tabla IV y describen lo más importante de la misma que sirve para el estudio.

Tabla IV. **Geomorfología, climatología y aforos**

Geomorfología	Parámetros
Nombre	Chixoy
Superficie	5 494 km ²
Longitud	417,90 km
Cota máxima	3800 msnm
Cota minia	650 msnm
Vertiente	Golfo de México
Climatología y aforos	Parámetros
Temperatura media anual	12-24°C
Precipitación media anual	1200 mm/año
Caudal medio anual	57 m ³ /s

Fuente: elaboración propia.

1.6.1. Climatología

La provincia climática está constituida por las zonas de vida existentes en las subcuencas del río Chixoy. En este caso, la diversidad de ecosistemas existentes en la cuenca está definida por seis zonas de vida.

El clima tiene un amplio rango de variación, con la presencia de microclimas que caracterizan zonas particulares. La precipitación media anual es de 1200 milímetros. La variación estacional diferencia una época lluviosa entre mayo y octubre, cuando se precipita el 94 por ciento de la lluvia anual. Los valores promedios de temperatura fluctúan entre los 12 y 24 grados centígrados, con pequeñas variaciones anuales.

Las zonas de vida determinadas para la región son las siguientes:

- Bosque húmedo Subtropical templado (bh-St)
- Bosque seco Subtropical (bs-S)
- Bosque húmedo Montano Subtropical (bh-M)
- Bosque húmedo Montano Bajo Subtropical (bh-MB):
- Bosque muy húmedo Montano Bajo Subtropical (bmh-MB)
- Bosque muy húmedo Montano Subtropical (bmh-M)

1.6.2. Geografía

La cuenca Chixoy se caracteriza por presentar un patrón rectilíneo. A nivel de Gran Paisaje, la cuenca del río Chixoy está delimitada al norte por la Sierra de los Cuchumatanes, con áreas como la planicie de Llano del Coyote (1850 MSNM). Hacia el sur, el límite está definido por las sierras de Comitancillo y de Sacapulas, con elevaciones mayores a 2 000 metros, como los cerros Negro (2141 metros), Chumulchacan (2060 metros), Tzujil (2369 metros) y Chupacbalam (2485 metros).

El nivel de Paisaje está definido por la serie de rasgos fisiográficos que delimitan la cuenca. En este caso los rasgos están definidos por cadenas

montañosas que marcan la línea parte aguas con las cuencas Serchil y Pacaranat al sur y río Blanco al norte.

Las características bioclimáticas de ambas zonas de vida definen ecosistemas diferentes que están asociados a elementos del paisaje como mesetas en montaña, mesetas en cerros, cerros bajos, terrazas residuales y terrazas recientes.

Estos elementos delimitan las áreas sujetas a actividad prehispánica. En este caso, la mayoría de centros ceremoniales y áreas habitacionales prehispánicos se localizan en mesetas en cerros y colinas modificadas en ambos márgenes del río sobre la cota 1400 metros. La modificación de las elevaciones naturales incluye la construcción de estructuras estucadas con escalinatas, juegos de pelota con montículos asociados, muros de retención y terrazas de cultivo o con fines constructivos.

El río, en su recorrido de oeste a este, ha originado un valle en jurisdicción de Sacapulas, con extensas planicies aluviales, en las cuales se ubica actualmente la mayor concentración de población y áreas bajo cultivo. El valle, con un largo aproximado de 22,5kilómetros, inicia al oeste en las poblaciones de San Antonio El Órgano y El Jocote y finaliza en la aldea Xecatoloj, a 2kilómetros al este de Sacapulas. El ancho máximo aproximado es de1 kilómetro en la confluencia con el río Blanco.

Durante su recorrido se le unen varios afluentes secundarios como los ríos Limonar y Tuixcox, que nacen en la cabecera de la cuenca y drenan al río Chixoy a la altura de los parajes El Paradillo y Las Majadas, respectivamente. Asimismo, el río El Naranja corre paralelo a la ruta nacional No.15, que conduce

hacia Santa Cruz del Quiché y se une al río Chixoy a la altura de la aldea San José Sajcutzil.

1.7. Geología y suelos

El material geológico de esta zona está constituido principalmente por rocas metamórficas y plutónicas, que incluyen esquistos, gneises, mármoles, serpentinas y granitos. Hacia el norte disminuye la existencia de rocas metamórficas, a medida que las rocas cristalinas pasan gradualmente a la faja de sedimentos plegados. Esta zona forma parte de los sistemas de cordilleras que se desarrollan desde Chiapas en México, hasta las islas del Golfo de Honduras.

Los suelos en la cuenca del río Chixoy son pocos profundos, excesivamente drenados desarrollados sobre caliza fracturada, en un clima húmedo seco. Ocupan terreno quebrado, inclinado y las pendientes en la mayoría de los lugares tienen más del 50 por ciento de inclinación. En su estado natural, están densamente forestados con árboles deciduos y pino. Pero gran parte del área ha sido deforestada para cultivar maíz con resultados poco satisfactorios.

El suelo superficial tiene una profundidad de 30 centímetros y es arcilla, incluye muchos fragmentos pequeños de caliza en la mayoría de los lugares. Las pruebas de Potencial de hidrógeno (Ph) dan una reacción medianamente alcalina de 7,0 a 7,5. La mayor parte del área estudiada presenta una topografía muy quebrada. Las pendientes son inclinadas hasta escarpados, variando desde el 15 por ciento hasta el 75 por ciento de inclinación. Terrenos planos son virtualmente inexistentes.

La concentración de asentamientos prehispánicos en la cuenca es indicativo de una relación entre el recurso agua y suelo. Es evidente que el manejo tecnificado del recurso suelo se realizó desde tiempos prehispánicos, lo cual se evidencia en los sistemas de terrazas localizadas en los sitios Pacot, Xolchum, Chitinamit y Chutixtiox.

En general los suelos más productivos están comprendidos dentro de las clases agrológicas I, II y III, con textura arenosa limosa con una estructura franca, ideales para cultivos. Con un manejo tecnificado suelen mantener una productividad estable.

2. EL CAMBIO CLIMÁTICO Y SU IMPACTO SOBRE LOS RECURSOS HÍDRICOS

2.1. El sistema climático

La radiación que la Tierra recibe del Sol es modificada, como para el resto de los planetas del sistema solar, por su propia masa, por su distancia al Sol, por su rotación y por el estado de su superficie. El equilibrio dinámico existente define el Sistema Climático terrestre.

La Tierra recibe grandes cantidades de calor, luz y rayos ultravioletas procedentes del Sol y a su vez emite también una gran cantidad de energía, la misma que recibe del Sol. Si emitiese menos, se calentaría, se haría estéril y su superficie rocosa terminaría por fundirse.

La Tierra se mantiene caliente porque recibe energía del Sol, y no se funde porque emite energía en forma de radiación infrarroja.

Del 100 por ciento de la radiación que llega a la Tierra el 30 por ciento es reflejada y el 70 por ciento restante es absorbida por la superficie terrestre y por la atmósfera y radiada al exterior. El suelo y el mar remiten la energía absorbida en forma de radiación electromagnética infrarroja, ver figura 4.

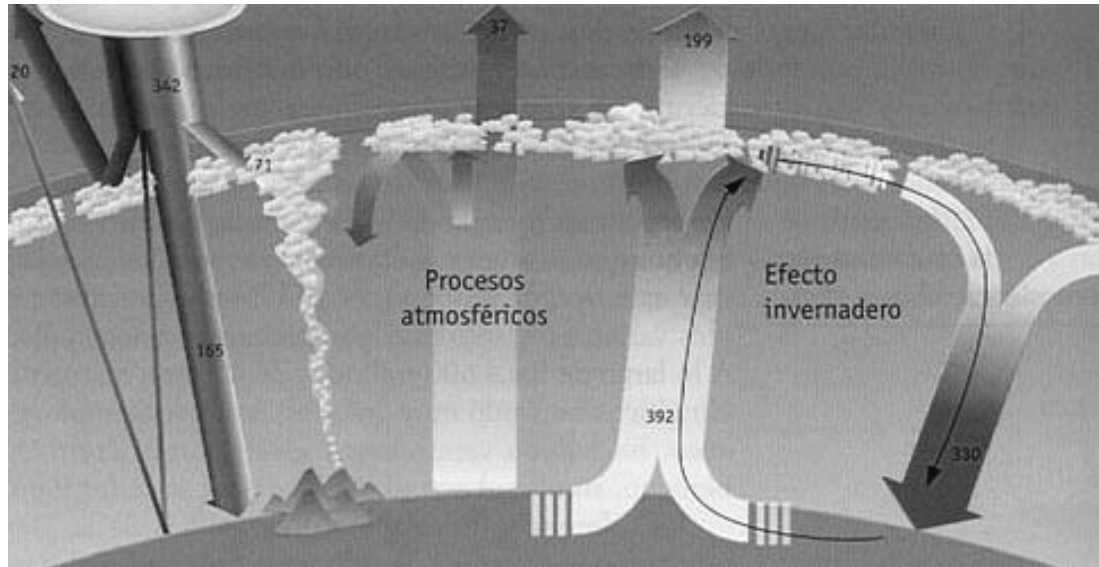
El sistema climático terrestre mantiene desde hace 600 millones de años su temperatura media dentro de un rango de variación pequeño, con cambios medios de una decena de grados arriba o abajo. La Tierra al estar mucho más fría que el Sol no emite luz ni rayos ultravioleta, solo emite calor.

La atmósfera es prácticamente transparente (pequeña absorción) en la parte visible del espectro, pero significativamente absorbente a la radiación ultravioleta (radiación solar entrante de onda corta) por el ozono, y a la radiación infrarroja (radiación de salida de onda larga desde la Tierra) por el vapor de agua, el dióxido de carbono y otros gases.

Esta absorción de radiación por parte de los gases calienta la atmósfera, estimulando a ésta a emitir más radiación de onda larga. Parte de ella es enviada al espacio (normalmente a niveles superiores y más fríos de la atmósfera) mientras que la mayor parte es enviada de vuelta a la Tierra.

La consecuencia es que la Tierra almacena más energía cerca de la superficie debido a la existencia de la atmósfera, con una temperatura media de 15 grados centígrados, es decir 33 grados centígrados más que los debidos por la radiación neta efectiva, fenómeno conocido como efecto invernadero, como lo describe Buchdahl, Joe, en el libro *A review of contemporary and prehistoric global climate change*.

Figura 4. **Balance de energía en la atmósfera**



Fuente: FERNÁNDEZ CARRASCO. Pedro. Estudio del impacto del cambio climático Sobre los recursos hídricos. Aplicación en Diecinueve pequeñas cuencas en España. p 29.

2.1.1. Qué se entiende por clima

Se entiende por clima el estado medio de la respuesta térmica, principalmente océano y atmósfera, al desigual calentamiento de la superficie del planeta por la radiación solar, como lo describe Buchdahl, Joe, en el libro *A review of contemporary and prehistoric global climate change*.

Este estado medio se evalúa generalmente por los valores de las variables atmosféricas en un determinado período de tiempo, la temperatura, de la que se tiene en cuenta la máxima, la mínima y la temperatura media, así como la amplitud u oscilación térmica en distintos períodos de tiempo, la precipitación, de la que se registra su cantidad, naturaleza, persistencia e intensidad y su

distribución estacional, y los vientos, cuyas características se ven notablemente influenciadas por las oscilaciones térmicas.

Son factores determinantes del clima, la latitud, que condiciona el efecto de la radiación solar y el efecto de la rotación terrestre, la altitud, que incide en la presión y la temperatura, y la distribución entre tierras y mares así como su orografía, que ejerce una acción modificadora o moderadora de los restantes factores.

Existen diversos criterios para la clasificación de los climas y su delimitación geográfica, si bien el más clásico distingue cinco grandes zonas climáticas, en cuya definición se tienen en cuenta factores térmicos y de precipitaciones y su alternancia estacional:

- El clima tropical lluvioso
- El clima seco o árido
- El clima templado lluvioso
- El clima frío
- El clima polar

2.1.2. Componentes del sistema climático

Aunque la atmósfera y los océanos forman los componentes principales del sistema climático, es conveniente entender el sistema climático global estructurado en cinco grandes áreas de estudio: la atmósfera, los océanos, la criosfera, la biosfera y la litosfera.

El sistema climático es una máquina térmica que genera energía cinética, es decir, movimiento, a partir de las diferencias entre la energía recibida y la

emitida. La energía llega del Sol en forma de luz, entra en la atmósfera y la atraviesa hasta llegar al suelo y al agua del océano, donde se absorbe. La atmósfera responde con las nubes y los vientos, que llevan el calor de unas zonas a otras de la Tierra. El suelo y el mar reemiten energía en forma de radiación electromagnética infrarroja, mientras que en el mar las olas y las corrientes distribuyen también el calor, pero mucho más lentamente. El hielo refleja la luz del Sol, y desprende sal que modifica la circulación de las corrientes del océano.

2.2. Causas naturales del cambio climático

El clima global está determinado por un complejo sistema formado por la atmósfera, los océanos, la criosfera, la biosfera y la litosfera. Cualquier variación en este sistema, que tenga como resultado un cambio climático, es originada por un mecanismo actuante, una causa del cambio climático. Estos mecanismos pueden ser tanto externos como internos al sistema. Los mecanismos externos implican agentes que no pertenecen al sistema climático, por el contrario los mecanismos internos operan con el propio sistema climático. Además de esta clasificación se pueden dividir los mecanismos actuantes en radiativos y no radiativos.

2.2.1. Mecanismos no radiativos

Cualquier cambio en el clima lleva implícito alguna forma de redistribución de la energía en el sistema climático global. Aquellos agentes actuantes que no afectan directamente al balance de energía de la atmósfera (el balance entre la radiación solar entrante y la radiación terrestre saliente), son denominados mecanismos no radiativos del cambio climático global, como lo describe

Buchdahl, Joe, en el libro *A review of contemporary and prehistoric global climate change*.

Estos agentes son principalmente aquellos que afectan a la variación de la geometría de la superficie terrestre, como la localización y tamaño de los sistemas montañosos y la distribución de las cuencas oceánicas.

2.2.2. Mecanismos radiativos

Los procesos que alteran el balance de energía del sistema Tierra-Atmósfera son conocidos como mecanismos actuantes radiativos, como lo describe Shine, K, et al, en el libro *Radiative forcing of climate: Climate change: The IPCC scientific Assessment*.

Entre éstos se pueden incluir las variaciones de la órbita de la Tierra alrededor del Sol, de la radiación solar, las actividades volcánicas y la composición de la atmósfera. Sin embargo asociar una determinada causa con un particular cambio es extremadamente difícil, ya que la natural relación entre los elementos que conforman el sistema asegura los procesos de retroalimentación. Un cambio en un componente implica cambios en otros o en todos ellos.

2.2.3. Mecanismos externos

Los principales mecanismos externos actuantes que operan a lo largo de escalas temporales que van desde 10 años a 100 millones de años. Incluyendo las variaciones galácticas y las variaciones en la órbita terrestre alrededor del sol, y las fluctuaciones de las radiaciones solares, se indican a continuación.

2.2.3.1. Variaciones galácticas

La órbita del sistema solar alrededor del centro de la galaxia ha sido considerada como un posible mecanismo climático externo, como lo describe Huggett, R, en el libro *Climate earth processes and earth history*. Durante el transcurso de un año galáctico (ahora estimado en 303 millones de años), la variación en el medio interestelar, como lo describe Williams, G, en el libro *Possible relation between periodic glaciations and the flexure of the galaxy*, puede influir en el computo de la radiación solar incidente sobre la superficie de la Tierra, lo que actúa como un agente de carácter radiactivo que induce un cambio climático. También sugiere que variaciones en el campo gravitacional inducido por los vecinos más próximos a la galaxia, La Pequeña y Gran Nebulosa de Magallanes, podrían tener lejanas consecuencias para el clima de la Tierra.

2.2.3.2. Variaciones orbitales

La existencia de períodos glaciales fue inferida por primera vez en 1837 por el biólogo suizo-norteamericano Louis Agassiz, quien obtuvo datos geológicos que indicaban que las glaciaciones de los Alpes se habían expandido en el pasado a las tierras bajas que los circundaban. Esto lo llevó a sugerir que, en un tiempo geológico no muy lejano, el clima habría sido mucho más frío que el actual. Esta hipótesis se vio reforzada por estudios realizados por el mismo investigador en Escocia y en los Estados Unidos.

En 1842, el matemático francés Joseph Adhémar sugirió que las glaciaciones podrían haberse originado por factores astronómicos que causaron una disminución en la cantidad de irradiación que la Tierra recibe del Sol.

2.2.3.3. Variaciones solares

La actividad solar y en particular las manchas solares se han contado sistemáticamente, usando un índice llamado "número de manchas" desde 1700, aunque existen estudios incompletos no sistemáticos desde 165 AC, recopilados por observadores chinos. La cuenta de las manchas solares realmente comenzó en 1610 cuando se tuvieron disponibles los primeros telescopios astronómicos.

Las partículas que emite el sol se conocen como el viento solar, y producen entre otras cosas las auroras boreales y australes. El campo magnético del Sol se extiende por todo el sistema solar e interacciona con el campo magnético de la Tierra todo el tiempo de una manera estable, pero cuando se produce una llamarada o prominencia solar, el campo magnético solar se perturba y aplasta al de la Tierra, produciéndose una tormenta geomagnética que consiste en un cambio repentino de dirección e intensidad del campo magnético terrestre.

Las variaciones de la irradiancia solar temporales de hasta 0,5 por ciento pueden producir variaciones en el clima y en el crecimiento de las plantas. Se ha señalado que algunos años especialmente fríos, como al inicio del siglo XVII, coincidieron con períodos de actividad solar muy reducida llamados los mínimos de Maunder. Las partículas muy energéticas que llegan a la atmósfera también pueden afectar la capa de ozono temporalmente.

Por último se sospecha que los cambios en el campo magnético también afecten el comportamiento de algunos seres vivos. Sin embargo, todavía no hay explicaciones claras de estos fenómenos y las estadísticas todavía no son definitivas.

2.2.4. Mecanismos internos

En este apartado se describen los mecanismos de carácter interno que operan en escalas de tiempo que van desde un año a 100 millones de años. Estos mecanismos pueden ser tanto mecanismos radiativos como no radiativos, e incluyen los movimientos de la corteza terrestre y su generación, la actividad volcánica, la circulación oceánica y la variación de la composición atmosférica.

2.2.4.1. Formación de los sistemas montañosos

La orogénesis es el proceso tectónico de la formación de montañas. Este mecanismo actúa sólo en escalas de tiempo comprendidas entre décadas e incluso centenares de millones de años. La litosfera está formada por 12 diferentes placas principales que están constantemente ajustando su posición relativa entre ellas. Estos movimientos son provocados por las fuerzas de origen convectivo originadas en el manto terrestre. Cuando dos placas colisionan una de ellas puede ser subducida por la otra o las dos pueden chocar y elevar las masas continentales en contacto, formando grandes cadenas montañosas.

Parece demostrado que la presencia de montañas en la Tierra influyen poderosamente en el clima y que por tanto la generación de montañas actúa como un mecanismo no radiactivo del clima, como lo describe Buchdahl, Joe, en el libro *A review of contemporary and prehistoric global climate change*. Las cadenas montañosas orientadas de Norte a Sur influyen en los patrones atmosféricos de circulación general, los cuales tienen una tendencia este-oeste debido a la rotación de la Tierra.

2.2.4.2. Vulcanismo

Las rocas fundidas brotan desde las profundidades del interior de la Tierra, enfriándose y endureciéndose en o cerca de su superficie, hasta crear rocas tales como lavas y granito. Las rocas ígneas o "ardientes" están compuestas por minerales que forman los materiales básicos de los que derivan todas las rocas corticales, formando fenómenos como láminas, domos o conos volcánicos.

Los volcanes producen gases, líquidos y sólidos. Los gases volcánicos incluyen vapor de agua e hidrógeno y azufre combinado con dióxido de carbono. El vapor de agua que se condensa en el aire forma nubes que se precipitan como lluvia. Los gases que interactúan aumentan el calor en las lavas que erupcionan, y las erupciones explosivas producen nubes de gas ardiente provisto de residuos incandescentes.

Grandes explosiones pueden ahogar áreas importantes en ceniza y arrojar grandes cantidades de polvo hacia la estratósfera, donde el dióxido de azufre se convierte rápidamente en aerosoles de ácido sulfúrico, enfriando climas a escala global y añadiendo estratos de sedimentos a las profundidades de los océanos, como lo describe Lambert, C, en el libro *Non indigenous ascidians in southern California harbors and marinas*. En su mayor parte se encuentran ubicados allí donde la litósfera está fragmentada, es decir, en los límites entre placas, ya sean divergentes o convergentes.

Para que una erupción volcánica afecte al clima han de darse una serie de condiciones:

- Tal erupción volcánica debe generar grandes volúmenes de gases y cenizas capaces de bloquear la luz solar.
- Las cenizas y los gases deben alcanzar la estratosfera (situada a más de 10 kilómetros. sobre la superficie terrestre), pues si se quedan a niveles inferiores son eliminados por la lluvia.
- La inyección de gases y cenizas en la estratosfera debe darse en un momento y lugar que permita a los vientos dispersar el material volcánico alrededor del planeta. En este sentido las zonas cercanas al Ecuador parecen las idóneas.

2.2.4.3. Circulación oceánica

Las corrientes marinas, tanto superficiales como profundas, forman lo que se denomina circulación oceánica.

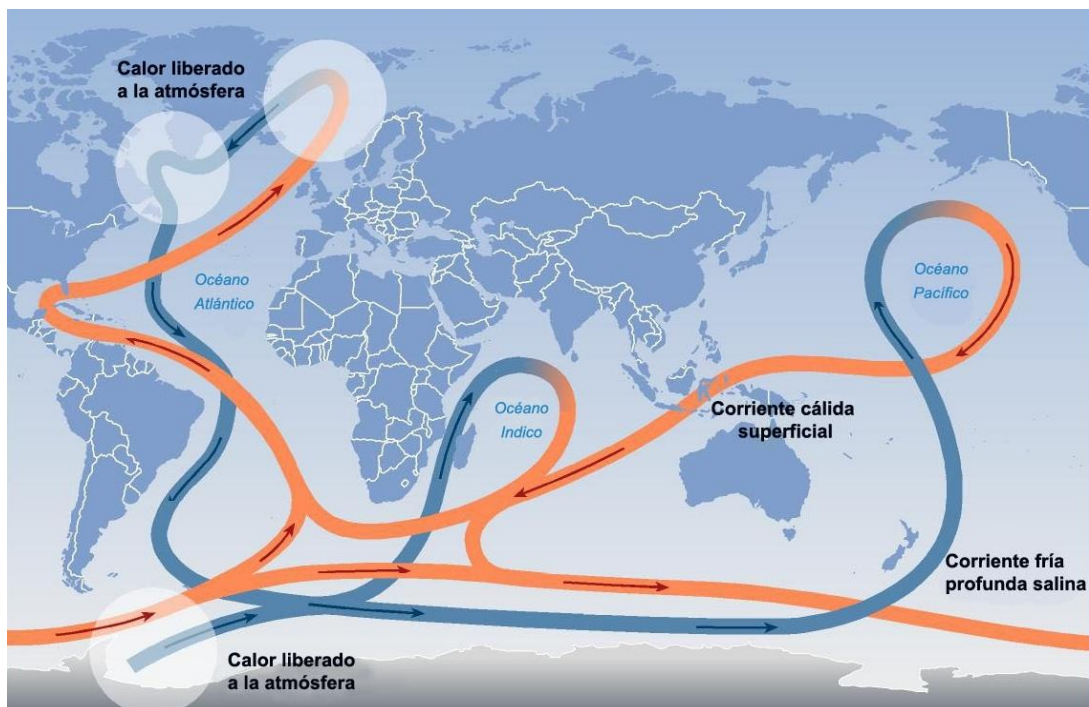
Las corrientes marinas son movimientos capaces de transportar grandes masas de agua de una región a otra. Estos movimientos son producidos por diversas causas: la acción del viento, influyendo sobre ella también la rotación de la Tierra y la interferencia de los continentes, las diferencias de temperatura y salinidad.

Las corrientes superficiales están principalmente influenciadas por la acción del viento y la deriva por la aceleración de Coriolis, debida a la rotación de la Tierra, hacia la derecha en el hemisferio Norte y hacia la izquierda en el

hemisferio Sur. Fenómeno perfectamente definido mediante el modelo de Ekman y que explica la corriente de deriva o movimiento de aguas superficiales bajo la acción de un campo de vientos persistentes. Los Alisios son el paradigma de la persistencia en los vientos y de ahí la existencia de la divergencia ecuatorial.

Si se fija sólo en la circulación oceánica superficial del Atlántico norte, se ve que las corrientes describen un enorme círculo que se mueve en dirección de las agujas del reloj, es decir, en sentido anticiclónico, como se muestra en la figura 5.

Figura 5. **El gran cinturón oceánico**



Fuente: FERNÁNDEZ CARRASCO. Pedro. Estudio del impacto del cambio climático Sobre los recursos hídricos. Aplicación en Diecinueve pequeñas cuencas en España. p. 49.

La corriente del golfo transporta agua cálida que a medida que se aproxima hacia latitudes más altas, hacia el norte, se encontrará con un aire más frío. Estas diferencias de temperatura entre el mar y la capa inferior de la atmósfera será una de las causas principales de las altas o bajas presiones que determinan el clima.

Los océanos Pacífico e Índico también desempeñan su papel en la circulación termosalina. Tienen poca o ninguna formación de hielo, y por lo tanto carecen de fuente de aguas abisales, pero las diferencias de precipitaciones y temperatura provocan grandes corrientes de entrada y salida de sus cuencas a través del océano sur.

Sin embargo, al igual que los sistemas climáticos, los cuerpos de agua que se van moviendo y pasando junto a otros mantienen su identidad, incluso cuando las diferencias de temperatura y salinidad entre ellos sean minúsculas. Para combinarse precisan una gran cantidad de energía.

2.3. Causas antrópicas del cambio climático

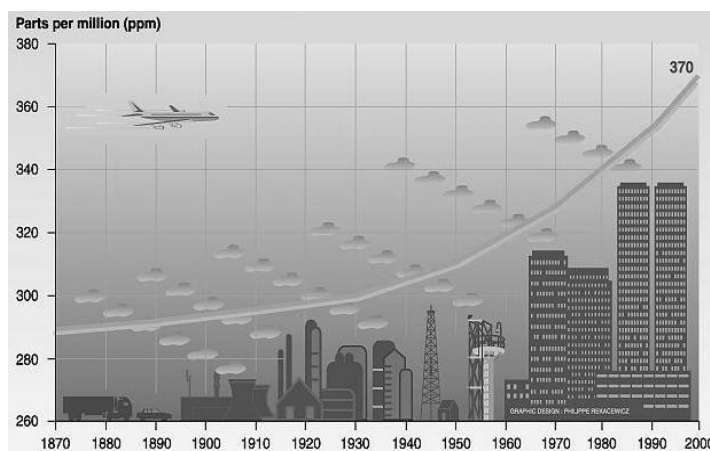
La variación de la composición de la atmósfera, incluyendo su contenido de gases de efecto Invernadero y los aerosoles, es uno de los principales mecanismos que pueden explicar el cambio climático. Los gases de efecto invernadero, juegan un papel importante en la regulación del clima global, por lo tanto cambios en la concentración de estos gases en la atmósfera modificarán los resultados del efecto invernadero natural, afectando consecuentemente al clima global.

Las actividades humanas, como el quemado de combustibles de origen fósil y los cambios en la utilización de las tierras y en la cubierta terrestre, están

haciendo aumentar la concentración en la atmósfera de gases de efecto invernadero, que alteran los balances radiativos y tienden a calentar la atmósfera, y, en algunas regiones, los aerosoles producen el efecto contrario sobre los balances radiativos y tienden a enfriar la atmósfera, ver figura 7.

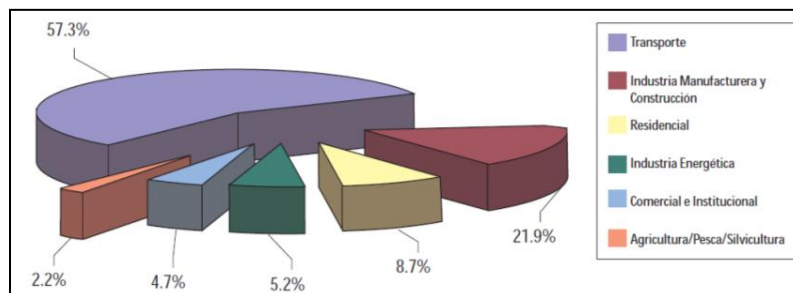
Cambios en el contenido de gases en la atmósfera pueden ocurrir tanto debido a causas naturales como a factores antropogénicos. La acción del ser humano a través de la quema de combustibles fósiles, la desaparición de bosques y otros procesos industriales, ha aumentado la cantidad de dióxido de carbono y otros gases desde el siglo XVIII, de tal forma que la concentración de dióxido de carbono ha pasado de 290 miligramos/litro en 1870 a 370 miligramos/litro en el 2000, ver figura 6.

Figura 6. **Evolución de la concentración de CO₂ desde 1870**



Fuente: FERNÁNDEZ CARRASCO. Pedro. Estudio del impacto del cambio climático Sobre los recursos hídricos. Aplicación en Diecinueve pequeñas cuencas en España. p. 62.

Figura 7. **Contribución de cada subsector a las emisiones de CO₂ en Guatemala**



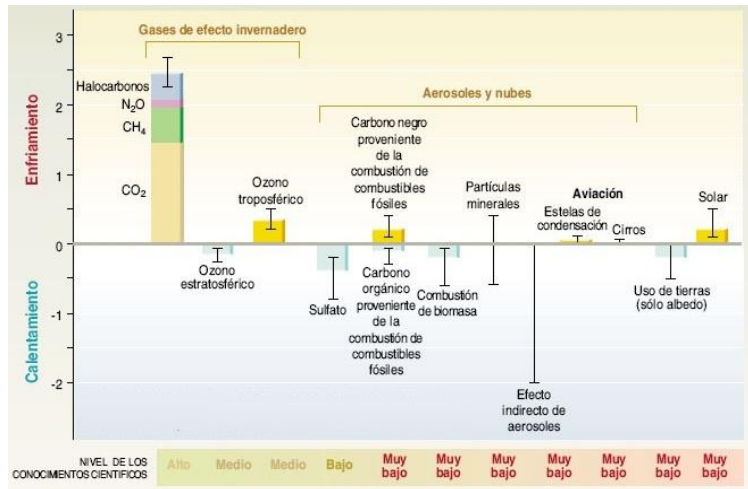
Fuente: Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales. 1ª Comunicación Nacional Sobre cambio Climático. p. 30.

2.3.1. **Modificaciones del paisaje y del uso del suelo**

Los cambios en la utilización de la Tierra asociados a las diferentes gestiones y manejos de las actividades productivas humanas, conocidos como cambios de uso del suelo, son unos de los elementos modificadores de la cobertura del suelo más activos en los últimos años. En los últimos siglos como señala el Informe especial del grupo III del IPCC 2007, se han liberado en la última parte del siglo XX cantidades sustanciales de carbono como consecuencia de la tala de bosques en latitudes altas y medias, y en los trópicos.

Las modificaciones en la cubierta vegetal, provocan cambios en la fracción de la radiación solar reflejada por la superficie terrestre, cambios en el balance dentro del ciclo del agua, al modificar los ratios de evapotranspiración así como la humedad retenida por la vegetación, cambios en la distribución y las características de las denominadas fuentes y sumideros de gases de efecto invernadero, con efectos tanto a escala local como global.

Figura 8. **Influencia de los distintos forzamientos radiativos**



Fuente: FERNÁNDEZ CARRASCO. Pedro. Estudio del impacto del cambio climático Sobre Los recursos hídricos. Aplicación en Diecinueve pequeñas cuencas en España, p. 63.

Los cambios en la cobertura vegetal pueden afectar al clima global de muchas maneras, aunque parece que la deforestación a gran escala en los trópicos húmedos parece ser el de mayor peso dentro de los procesos de cambio de usos de la Tierra, debido a que reduce la evapotranspiración y aumenta la temperatura del suelo. No obstante aunque los efectos sobre el ciclo hidrológico son bien conocidos cualitativamente, no han sido hoy día cuantificados de una forma satisfactoria, debido a incertidumbres en su funcionamiento todavía no bien modeladas.

2.4. Impactos del cambio climático

Se pretende identificar cuáles son los impactos que el cambio climático ha generado a los largo del tiempo, pero enfocado a los recursos hídricos y principalmente a los que posee el territorio de Guatemala.

2.4.1. Recursos hídricos en Guatemala

En Guatemala, en un año promedio se dispone de 24 500 metros cúbicos de agua por persona, de los cuales solamente un 3 por ciento son aprovechados para riego, uso doméstico e industrial, disposición de desechos, generación de energía y para navegación. La distribución geográfica de la escorrentía superficial del agua no es uniforme en el territorio nacional y aunque se puede transportar se incurre en altos costos. Tampoco la distribución espacial de la lluvia es uniforme, presentando variaciones en función del lugar y del período del año, además de las variaciones interanuales. La utilización de los recursos hídricos tienen características propias determinadas por su ubicación, cantidad, calidad y demás recursos bióticos y abióticos que forman los hábitats naturales.

El país cuenta con 38 cuencas (tabla VI), 18 localizadas en la vertiente del Pacífico con un área de 23 390 kilómetros cuadrados, 10 cuencas en la vertiente de las Antillas (Mar Caribe) con 34 389 kilómetros cuadrados y 10 cuencas en la vertiente del Golfo de México con 50 640 kilómetros cuadrados.

El 75 por ciento del territorio nacional está formado por cuencas hidrológicas internacionales que se extienden en países vecinos. La longitud y caudales de los ríos dependen de las características de su vertiente (tabla V). En la vertiente del océano Pacífico los ríos tienen longitudes cortas (90 kilómetros en promedio), se originan entre los 2000 metros sobre el nivel del mar y 3000 metros sobre el nivel del mar y tienen una precipitación media anual de 2200 metros sobre el nivel del mar. En la vertiente de las Antillas la longitud promedio de los ríos es de 240 kilómetros e incluye al río más largo del país, el Motagua con 487 kilómetros de longitud; en esta vertiente el régimen de

caudales es constante durante todo el año, con una precipitación media anual de 2500 milímetros.

Los ríos que desembocan en el Golfo de México tienen una longitud promedio de 174 kilómetros; se caracteriza por que en la vertiente se localizan los ríos más caudalosos del país (Usumacinta, Chixoy y La Pasión) que tienen pendientes suaves y cauces relativamente estables; la precipitación media en la vertiente es de 2500 milímetros/año.

Tabla V. **Vertientes y cuencas**

Vertiente	Cuencas			
Pacífico	Coatán	Sis-Icán	Acomé	Los Esclavos
	Suchiate	Nahualate	Achiguate	Paz
	Naranjo	Atitlán	Maria Linda	OstúaGuina
	Ocosito	Madre Vieja	Paso Hondo	Olopa
	Samalá	Coyolate		
	Antillas	Grande de Zacapa	Polochic	Mopán Belice
Mar Caribe	Motagua	Cahabón	Hondo	Temash
	Izabal- Rio Dulce	Sartún		
Golfo de México	Cuilco	Pojom	Chixoy	Usumacinta
	Selegua	Ixcán	La Pasión	San Pedro
	Nentón	Xaclbal		

Fuente: Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología.

Tabla VI. Principales ríos y localización de cuencas en Guatemala

Vertiente	Río	Longitud (km)	Caudal (m³/seg)
Pacífico	Cabús	60.80	21.30
	Naranjo	105.55	20.70
	Ocosito	106.80	30.20
	Samalá	145.00	8.70
	Nahualate	130.30	60.80
	Madre Vieja	125.30	8.00
	Coyolate	154.95	15.6
	Maria Linda	70.10	13.10
	Los Esclavos	144.80	15.80
	Paz	133.80	23.20
Antillas	Grande de Zacapa	86.50	28.50
	Motagua	486.55	208.70
	Polochic	193.65	69.30
	Cahabón	195.75	164.3
Golfo de México	Ixcán	52.50	34.00
	Selegua	101.75	38.00
	Chixoy	417.00	551.00
	Usumacinta	311.00	1500.00
	La Pasión	353.90	322.80
	San Pedro	186.25	52.90

Fuente: Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología.

2.4.2. La hidrología y los recursos hídricos

El ciclo hidrológico está gobernado por el clima, de tal manera que un cambio en este último provoca cambios en los distintos elementos del ciclo del agua, así, cambios en las precipitaciones determinarían cambios en las características de la escorrentía y en los eventos extremos de la misma, modificando su intensidad y la frecuencia de éstos. Los cambios en la temperatura modificarán los balances de evapotranspiración, humedad en el suelo e infiltración a capas más profundas.

La demanda de agua para los usos agrícolas, de abastecimiento a poblaciones y energéticos se verá modificada. El sector agrario modificará su demanda en el mismo sentido en el que se modifique el déficit hídrico del suelo. Los aprovechamientos eléctricos pueden ser afectados por una pérdida parcial del potencial hidroeléctrico bruto y la concentración de la producción en períodos de tiempo más cortos. Las prioridades entre los distintos usos también pueden verse afectadas, al ser distinto el volumen de agua disponible.

El cambio climático puede presentar aspectos positivos y negativos, desde el aumento en la cantidad de recurso disponible a exacerbar la escasez periódica y crónica de agua, particularmente en las áreas áridas y semiáridas del globo.

La mayoría de los países en desarrollo son muy vulnerables al cambio climático, ya que muchos de ellos están situados en regiones áridas y semiáridas y en su mayoría, obtienen sus recursos hídricos de puntos de abastecimiento únicos, como por ejemplo, perforaciones o embalses aislados.

Estos sistemas de suministro son, por naturaleza, vulnerables, ya que carecen de reservas alternativas en caso de necesidad. Además, dada la escasez de recursos técnicos, financieros y de gestión en los países en desarrollo, acomodarse a las situaciones de escasez e implementar medidas de adaptación representará una pesada carga para sus economías.

Los impactos del cambio climático dependerán del estado comparativo del sistema de abastecimiento de agua y de la capacidad de los gestores de recursos hídricos para responder no sólo al cambio climático sino también al incremento de población y a los cambios de la demanda, en las tecnologías y en las condiciones económicas, sociales y legislativas.

2.4.3. El clima y los recursos hídricos

Las variaciones climáticas alteran los componentes del ciclo hidrológico (precipitación y evapotranspiración) y de los cuerpos de agua (ríos, lagos y mares).

El clima modifica la calidad del agua que a su vez afecta la salud humana y animal. Una menor precipitación implica una reducción de la escorrentía superficial que produce una menor dilución de las descargas municipales, un aumento de la demanda bioquímica de oxígeno y una disminución de la fauna acuática; el agua utilizada para fines agrícolas también se ve afectada al incrementarse la contaminación de los cuerpos de agua. Menores precipitaciones significan menos agua disponible para consumo humano, consumo industrial y para las actividades agropecuarias. Además, el incremento de temperatura ocasionaría una reducción del oxígeno disuelto en el agua.

2.4.4. Impactos en los recursos hídricos

El cambio climático puede traer repercusiones negativas en los recursos hídricos, una atmósfera más caliente puede tener una tasa más rápida de evaporación que podría resultar en una precipitación más alta en algunas regiones, mientras que en otras se presentaría una reducción en la escorrentía.

Además, en un clima más caliente se producirían variaciones estacionales en la precipitación a nivel local.

El calentamiento global puede resultar en un incremento de la variabilidad del clima; para algunas regiones significarían condiciones de sequía mientras que en otras se producirían inundaciones. Como la escorrentía es una función de la precipitación, al disminuir la precipitación se reduce la escorrentía y al aumentar la precipitación se incrementa. Los resultados de la escorrentía en el caso optimista superan los valores del año base mientras que en el caso pesimista son significativamente menores.

2.4.5. Otros impactos

Al ocurrir una disminución de precipitación y consecuentemente una disminución de caudales de los ríos, por ejemplo en los ríos Samala, Achiguate, Michatoya, Coyolate, María Linda, ocurriría una mayor sedimentación y un proceso acelerado de asolvamiento de sus respectivos cauces. Esto traería consecuencias negativas para la economía nacional, toda vez que la costa sur es una región agroexportadora, que se caracteriza por una producción de caña de azúcar, café, hule y ganado.

Al reducirse la producción disminuye el ingreso de divisas al país. Además, este sector productivo es una fuente de generación de divisas al país y de ofertas de trabajo para mucha población migrante que viene del altiplano y baja a las zonas agrícolas de la costa sur en busca de trabajo agrícola.

El aumento de la temperatura y la disminución de la precipitación y de la escorrentía superficial ocasionaría una disminución de las fuentes de agua para consumo humano y animal y para riego. Consecuentemente se vería afectada la salud de la población con un considerable impacto en las enfermedades de origen hídrico, como son especialmente las diarreicas y parasitarias, así como enfermedades de la piel.

El aumento de la escorrentía superficial, especialmente en los ríos de los departamentos de Escuintla y Santa Rosa ocasionaría inundaciones en la época lluviosa, especialmente en los municipios de La Gomera, Nueva Concepción y Taxisco.

El incremento de la escorrentía puede producir una mayor degradación de suelo de las cuencas hidrográficas, principalmente en la costa sur del país. Al incrementar la precipitación hay una constante pérdida de las cosechas de verduras, frutas y cereales en la parte alta de las cuencas, y café, caña de azúcar y ganado en la parte de la costa, con sus implicaciones negativas en la economía y en los sectores productivos.

3. APLICACIÓN A LA ZONA DE ESTUDIO

3.1. Análisis de información

El análisis del clima en la cuenca del río Chixoy se realizó a partir de las informaciones de la red de estaciones del Instituto Nacional de Electrificación (INDE).

La línea base está centrada en el período de observaciones 1979-2010. El comportamiento de la tendencia en la temperatura y precipitación se mostrará en los siguientes numerales. También se podrá apreciar en los datos los cambios que se ha suscitado en el paso de los años.

Después de someter a un cuidadoso procedimiento de control de calidad y una evaluación de la homogeneidad mediante desviaciones estándar, los datos se utilizarán para calcular un conjunto de índices de cambio climático en el período estipulado. El análisis de estos índices, pondrá de manifiesto si la tendencia general, al calentamiento o enfriamiento en la región de estudio, es marcado o no lo es.

La desviación estándar o desviación típica (σ) es una medida de centralización o dispersión para variables de razón (ratio o cociente) y de intervalo, de gran utilidad en la estadística descriptiva. Se define como la raíz cuadrada de la varianza. Junto con este valor, la desviación típica es una medida (cuadrática) que informa de la media de distancias que tienen los datos respecto de su media aritmética, expresada en las mismas unidades que la variable.

Se utilizarán series diarias de precipitación y temperatura media de las estaciones ubicadas en la cuenca en el período 1979-2010, una vez recopilada la información se generarán tablas que presenten la misma de una forma ordenada y fácil de comprender, establecer los cambios que ha sufrido la cuenca por meses y años de las temperaturas, precipitaciones, y caudales. Para esto se usará Rclimindex para determinar si los datos son confiables.

3.2. Datos

Para poder alcanzar los objetivos de este trabajo, es necesario contar con una base de datos diaria consistente y lo más extensa posible en el tiempo. El estudio incluye los datos de 17 estaciones. Aunque unas pocas de ellas contenían datos desde 1979, a pesar del tiempo de toma de ellos están en forma digital. Por esta razón, este documento se centra en el período 1979-2010. No todas las estaciones tenían una calidad adecuada referente a, la homogeneidad o del período de registro.

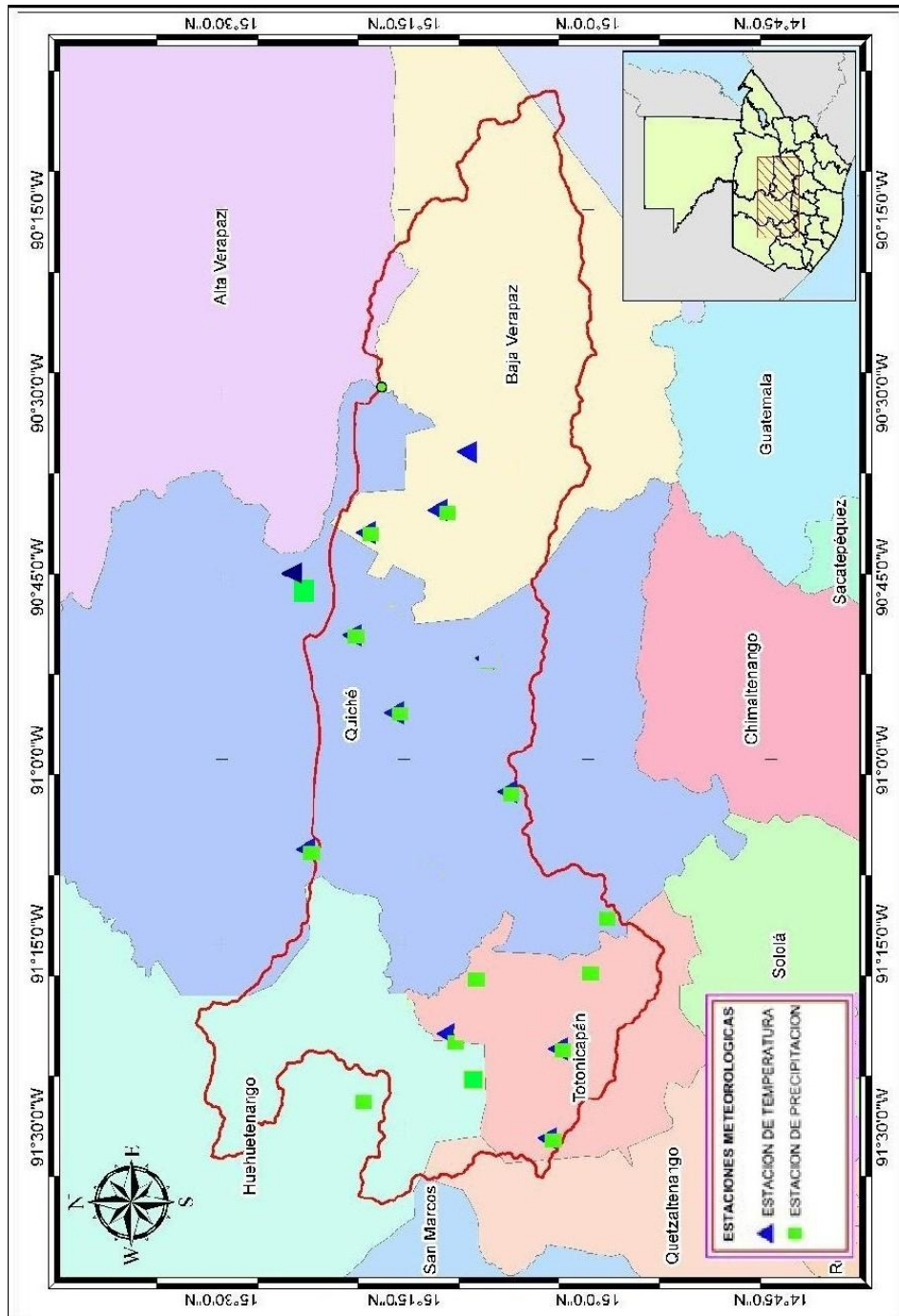
El análisis requiere de series de tiempo con el 80 por ciento o más de los datos para el período de estudio. Una lista de las estaciones, las variables utilizadas, y su período de registros se presentan en la tabla VII y sus ubicaciones se muestran en la figura 9. Hay 16 estaciones de precipitación y 12 estaciones de temperatura que cumplieron con los criterios de calidad de datos y la integridad.

Tabla VII. **Estaciones analizadas**

Estación	Latitud	Longitud	Elevación	Primer año	Ultimo año
Cerro La Laguna	15° 23' 29"	90° 31' 41"	2000.00msnm	1979	2010
Chajul	15° 29' 00"	91° 02' 09"	980.00msnm	1979	2010
Chicaman	15° 20' 45"	90° 48' 55"	1500.00msnm	1979	2010
Comitancillo	15° 13' 32"	91° 14' 20"	1760.00msnm	1979	2010
El Cebollal	15° 12' 30"	90° 43' 50"	821.00msnm	1989	2010
El Paradillo	15° 15' 47"	91° 19' 54"	1450.00msnm	1979	2010
La Capellania	15° 24' 38"	91° 26' 00"	3135.00msnm	1986	2010
La Navidad	15° 24' 42"	90° 41' 25"	1920.00msnm	1979	2010
Pueblo Viejo	15° 16' 20"	90° 29' 45"	815.00msnm	1982	2010
Quixal	15° 29' 45"	90° 36' 40"	300.00msnm	1979	2010
Serchil	15° 14' 00"	91° 24' 00"	1600.00msnm	1992	2010
San Andrés Sajcabajá	15° 10' 29"	90° 56' 32"	1300.00msnm	1979	2010
San Antonio Ilootenango	15° 03' 17"	91° 13' 38"	1942.00msnm	1979	2010
Santa Cruz del Quiché	15° 01' 41"	91° 08' 38"	2000.00msnm	1979	2010
Tierra Blanca	15° 06' 38"	91° 29' 45"	2325.00msnm	1993	2010
Xequemeyá	15° 05' 47"	91° 21' 09"	2140.00msnm	1979	2010

Fuente: elaboración propia.

Figura 9. **Ubicación de las estaciones de temperatura y de precipitación**



Fuente: elaboración propia.

3.2.1. Control de calidad

Todas las estaciones inicialmente se sometieron a un control de calidad previo (CC) y control de homogeneidad. Para la etapa de control de calidad, los valores extremos de temperatura se identificaron con los umbrales de la desviación estándar. La estación se calculó para cada día del calendario con el entorno de 5 días. Todos los valores extremos superiores a $\pm 3\sigma$ de la media u *outliers*, fueron evaluados con un control de calidad más detallado de los datos.

Estos datos extremos fueron analizados y estudiados, después de localizar cuáles de ellos eran extremos y salían del rango, se procedió a verificar los mismos, verificando que cuando los datos eran ilógicos se eliminaban y cuando tenían cercanía a los datos dentro de la media se hacía un promedio de los datos más cercanos y se obtenía el nuevo valor corregido, con los valores ya corregidos se ingresan de nuevo los valores en el paquete de control de calidad RClimdex y éste mostraba que los datos ahora están dentro de las $\pm 3\sigma$ de la media.

Este procedimiento se repitió con todas las estaciones que se tiene para el presente estudio, ya que no todas contaban con los datos de temperatura y precipitación juntos en una misma estación, pero de igual modo se estudiaron los datos que se contenían en las mismas.

Para que los resultados sean lo más precisos posible, la información climática utilizada para un análisis climático de largo plazo, particularmente los análisis de cambio climático, las series deben ser lo más confiables posible. Desafortunadamente, la mayoría de las series largas están afectadas por varios factores no climáticos, dificultando la identificación de las variaciones del clima a lo largo del tiempo. Para ello 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 problemas es la poca información histórica de las estaciones que permita identificar si la causa de los saltos es de origen artificial o climático.

3.2.2. Corrección de datos de temperatura

A continuación se presentan, en las tablas VIII y IX, los datos de dos de las dieciséis estaciones en estudio, que al ser ingresadas al programa Rclimdex, el mismo indicó que estaban fuera de las $\pm 3\sigma$ desviaciones propuestas, además muestra los rangos en los que debería estar la temperatura, se busca en la base de datos respecto al año, mes, día y se observa si los datos son coherentes, de no ser así, se reescribe como dato faltante o se realiza un promedio entre los datos más cercanos al dato erróneo que desplegó el *software*.

Tabla VIII. **Estación San Andrés Sajcabajá, datos que salían de las 3 desviaciones propuestas**

Año	Mes	Día	Tmín	T	Tmáx
1978	9	17	17,49	26,9	26,44
1978	9	27	18,01	26,2	25,66
1978	9	28	17,98	26,9	25,79
1978	10	7	17,31	25,7	25,7
1979	7	19	16,77	16,2	25,91
1980	12	29	13,1	12,8	25,69
1980	12	30	13,73	13,2	25,58
1981	1	1	13,63	13,2	24,91
1981	5	1	16,97	15,7	29,61
1981	5	2	17,48	17,3	29,67
1987	12	31	11,87	10	27,04
1989	5	27	17,94	17,5	27,86
1989	5	28	17,85	17	27,96
1989	12	24	12,69	9	26,4
1989	12	27	14,17	13,5	24,41
1991	4	27	16,53	30,5	29,5
1991	11	26	16,05	25,5	25,4
1991	12	1	14,06	27	26,39
1992	6	20	17,6	27	26,81
1993	3	25	11,03	41	34,3
1994	4	12	11,85	41	35,39
1995	9	7	17,33	28,5	27,07
1995	9	15	18,28	25,5	25,38

Año	Mes	Día	Tmín	T	Tmáx
1995	9	20	18,21	26,5	25,89
1995	9	21	18,33	26,5	25,96
1998	1	20	15,53	24	23,59
1998	6	2	17,99	16,8	27,1
1998	12	13	13,24	28,8	27,19
1998	12	14	13,88	27,5	26,47
2002	7	5	19,11	19	24,86
2002	7	23	17,53	17,5	25,88
2002	9	22	17,44	29,5	27,33
2002	9	23	17,82	28	26,8
2002	9	24	17,01	28	26,89
2002	9	25	17,11	28	26,68
2003	8	2	18,48	25,5	25,3
2003	8	4	18,43	25,5	25,1
2003	8	5	18,37	26	25,46
2004	9	16	17,11	28,5	27,36
2006	7	31	15,61	12,8	27,5
2006	11	21	14,83	14,5	25,48
2006	11	22	14,2	14	26,13
2006	11	23	14,31	14	25,39
2010	1	10	13,05	13	24,69
2010	9	19	16,79	16,5	26,71
2010	10	5	16,75	16,5	26,72

Fuente: elaboración propia.

Tabla IX. **Estación Quixal, datos que salían de las 3 desviaciones propuestas**

Año	Mes	Día	Tmín	T	Tmáx
1983	9	14	17,29	17,0	31,56
1983	9	16	16,56	16,0	32,23
1983	9	17	17,19	16,3	32,04
1983	9	18	16,08	15,0	32,8
1983	9	19	15,11	12,5	33,75
1983	9	20	14,07	12,1	33,72
1983	9	21	14,52	12,0	33,5
1983	9	22	14,55	11,0	34,15
1983	9	23	15,09	13,5	34
1983	9	24	16,09	15,0	32,37
1988	2	26	12,33	12,3	33,18
1991	7	8	15,63	15,5	33,58
1991	7	10	17,31	16,5	32,08
1993	2	11	14,12	12,8	31,03
1993	2	25	16,41	16,0	30,59
1993	4	6	16,16	15,5	34,16
1993	5	12	16,56	16,5	34,65
1993	6	12	17,33	16,5	33,63
1993	7	2	18,61	18,3	31,2
1993	7	12	15,72	14,8	33,22
1993	7	13	17,16	17,0	31,44
1993	8	4	17,66	17,5	31,98
1993	8	10	17,17	16,3	31,9
1993	8	11	16,39	16,0	32,14
1993	9	3	18,93	18,0	31,7
1993	9	4	18,4	17,5	31,43
1993	9	10	16,94	16,3	32,64

1994	1	23	15,05	15,0	29,49
1994	3	3	17,28	16,5	29,92
1994	4	29	9,79	5,5	39,44
1994	5	26	16,06	16,0	35,1
1994	6	23	17,16	17,0	32,99
1994	8	18	17,39	17,0	31,79
1994	9	1	18,12	17,5	31,82
1994	9	2	17,71	17,0	31,99
1994	9	30	12,37	7,5	36,02
1994	10	5	16,42	16,0	32,19
1995	5	11	15,8	15,0	35,27
1995	5	29	14,84	14,5	35,59
1995	5	30	13,69	13,0	36,87
1995	8	14	16,11	16,0	32,96
1995	8	17	16,18	16,0	32,12
1995	10	19	12,06	7,4	34,95
1996	2	4	13,37	12,5	31,62
1996	4	23	10,72	7,7	39,28
1999	2	3	10,83	8,1	33,18
1999	10	31	15,74	15,6	30,99
1999	11	3	15,53	14,5	31,62
1999	11	11	9,74	5,0	35,03
1999	11	12	12,72	12,5	32,05
2000	2	5	5,1	0,0	37,55
2000	3	5	4,93	0,0	38,61
2000	6	14	15,77	14,5	34,6
2000	6	15	16,17	16,0	33,85
2010	5	2	12,05	10,5	37,61

Fuente: elaboración propia.

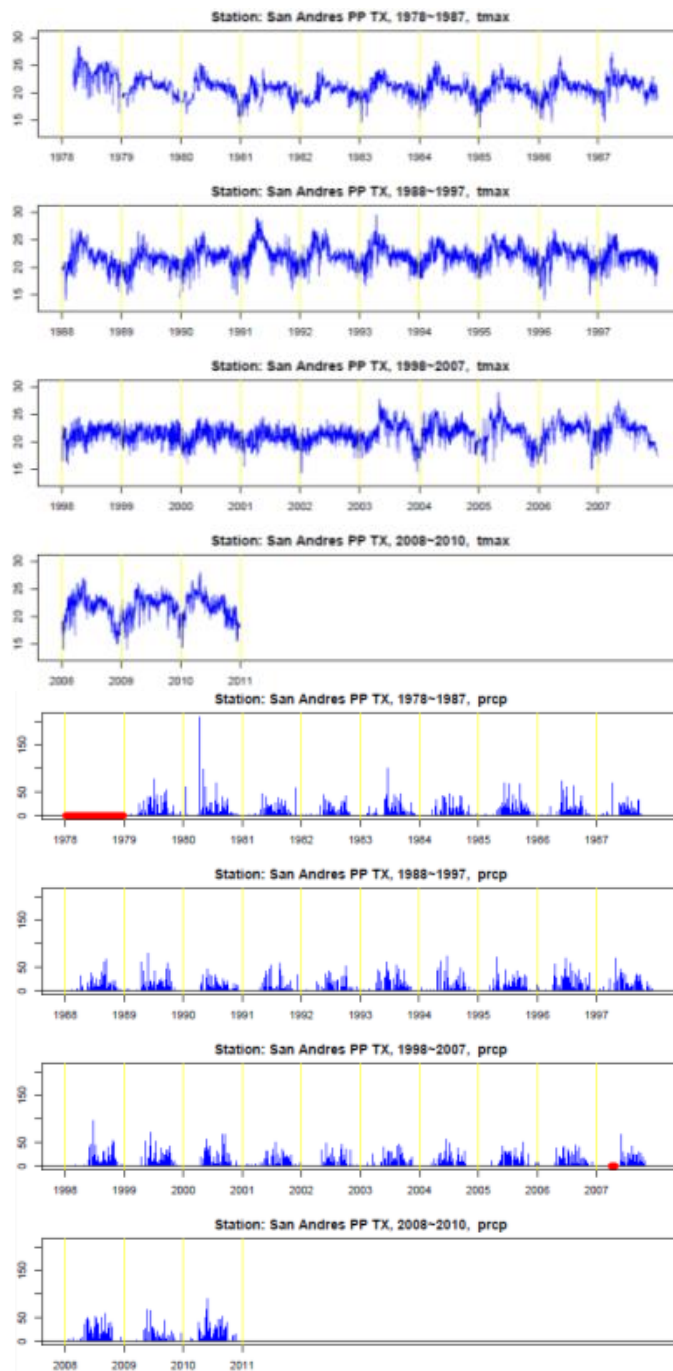
Se evaluaron todas las estaciones que contaban con datos de temperatura y precipitación, luego de haber encontrado todos los datos fuera de las desviaciones estándar establecidas, se buscaron los mismos y fueron corregidos mediante promedios de datos cercanos o fueron tomados como datos faltantes, cuando eran ilógicos sus valores.

Corregidos esos valores, se procedió a volver a introducirlos en el programa *RClimdex*, y se analizaron de nuevo, hasta que más del 90 por ciento de los datos fueran satisfactorios y estuvieran dentro de los límites dados por las desviaciones.

3.2.3. Rangos y saltos de tiempo en los datos

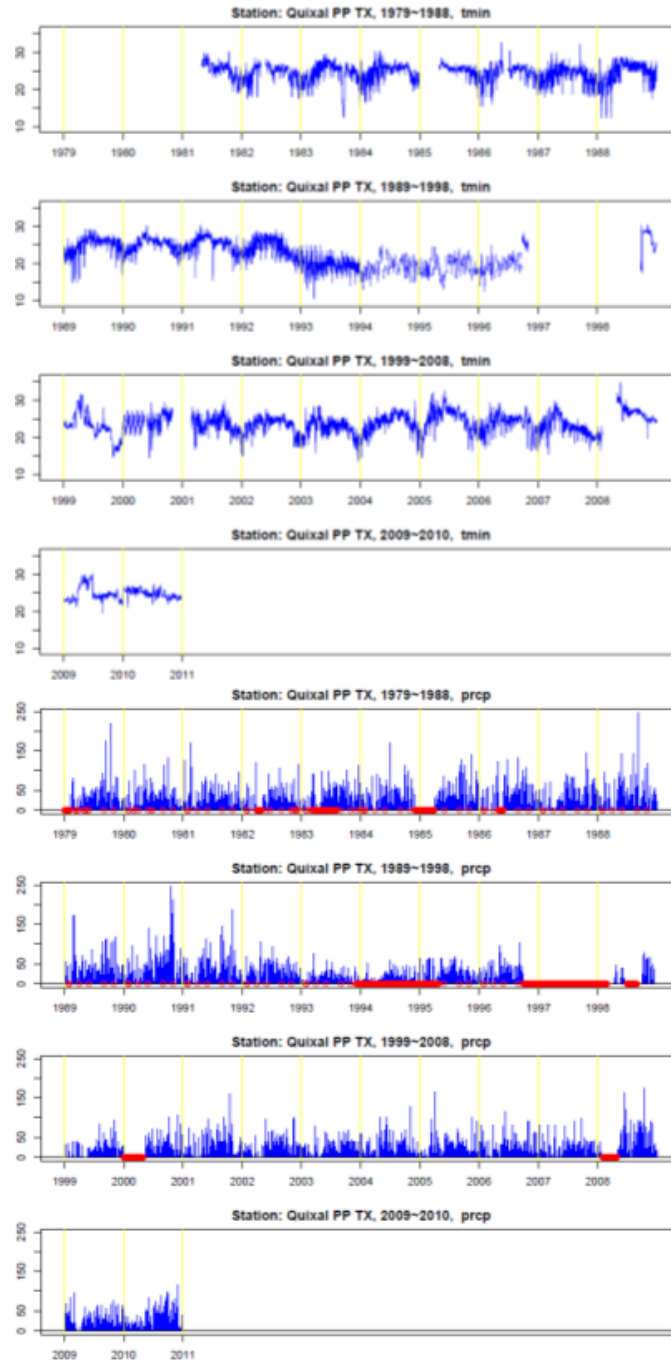
Así como anteriormente los datos pasaron por un control de calidad, a continuación se presenta una gráfica de temperatura y precipitación donde se observa el rango de variación en los que actúan los datos y los saltos de tiempo de datos faltantes, que por razones desconocidas no se tabularon en su tiempo, ya sea por desactivación temporal de la estación o por desperfectos en la misma.

Figura 10. **Temperatura y precipitación en estación San Andrés Sajcabajá**



Fuente: elaboración propia.

Figura 11. **Temperatura y precipitación en estación Quixal**



Fuente: elaboración propia.

En las figuras 10 y 11 se puede notar la variabilidad de la temperatura y precipitación a lo largo del tiempo de toma de los mismos, se puede notar que existen espacios vacíos en la temperatura y círculos en la precipitación en donde no se posee información alguna. Este tipo de gráfico permite también visualizar la variabilidad de la temperatura y precipitación en cada año.

En los datos de temperatura de la estación San Andrés Sajcabajá, en el período de 1998 al 2003, se nota que los datos no son homogéneos con el resto de la serie, se llegó a la conclusión de que en ese lapso de tiempo la estación pudo haber poseído algún desperfecto mecánico por falta de mantenimiento o por efectos del clima sobre el mecanismo del mismo, por lo que se recomienda que el INDE haga un análisis de lo que pudo suceder en ese periodo de toma de datos.

Después de haber pasado por un control de calidad se pueden calcular los índices de variabilidad necesarios mediante gráficas que indicarán el comportamiento de las variables del estudio (temperatura y precipitación) en cada una de las estaciones se corrigió mediante los métodos mencionados con anterioridad para obtener mejores resultados, y así poder crearse criterios sobre lo que sucede.

3.3. Generación y gráfico de índices

Los datos de precipitación, temperatura máxima y mínima de las estaciones finalmente seleccionadas, se proceden a sistematizar, de tal forma que cumplan ciertas características y se ajusten a los formatos de entrada de los archivos utilizados en el programa RClimdex. Los requisitos de cada archivo son los siguientes, ver figura 12.

- Una primera columna debe ser el año de registro.
- La segunda columna el número del mes.
- La tercera columna es el día.
- La cuarta columna es el dato de precipitación, con un decimal. Los vacíos deben cambiarse con el número -99,9 (valor indiferente al programa y por lo tanto no altera los resultados).
- La quinta y sexta columna corresponden a los datos de temperatura máxima y mínima respectivamente, con un decimal. Los vacíos también deben cambiarse con el número -99,9 (valor indiferente al programa y por lo tanto no altera los resultados).
- El archivo de 6 columnas se graba como texto (TXT).

Figura 12. **Ejemplo de formato de datos para el archivo de datos iniciales en Rclimindex**

1979	10	10	0,0	18,0	3,6
1979	10	11	0,4	17,6	9,0
1979	10	12	20,2	18,5	7,0
1979	10	13	0,0	21,5	7,7
1979	10	14	0,0	19,6	6,5
1979	10	15	0,1	20,0	9,0
1979	10	16	4,9	19,7	9,8
1979	10	18	2,9	18,4	11,8
1979	10	19	5,6	20,4	8,8
1979	10	20	3,6	18,9	10,4

Fuente: elaboración propia.

Después del control de calidad el programa genera los indicadores. Debido a que es muy complicado analizar uno por uno los indicadores generados por el programa para todas las estaciones, éstos se agrupan y se analizan por ítem, tal como se muestra en la columna agrupaciones (ver tabla X).

En este estudio se utilizaron datos de temperatura media diaria ya que el INDE proporcionó los mismos de esa manera, y para los fines de este estudio todos los índices se calcularon con base en temperatura media diaria.

Tabla X. **Índices que se generaron con el programa Rclimdex**

Indicador	Detalle	Agrupación
CDD	Mayor número de días secos consecutivos en un año	Asociados al comportamiento de la precipitación y de eventos extremos de lluvia
CWD	Mayor número de días húmedos consecutivos en un año	
PRCTOT	Precipitación total al año	
R10mm	Número de días al año con lluvia mayor a 10 mm	
R20mm	Número de días al año con lluvia mayor a 20 mm	
R95P	Número de días en un año con lluvia mayor al percentil 95 para los días húmedos	
TR20	días al año cuando la temperatura media diaria es mayor a 20°C	Asociadas al comportamiento de la temperatura media diaria
SU25	Días al año con temperatura media diaria mayor a 25°C	Asociadas al comportamiento de la temperatura media diaria

Fuente: elaboración propia.

La serie de índices resultantes son almacenados en un subdirectorio 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), tal como se muestra en la figura 13.

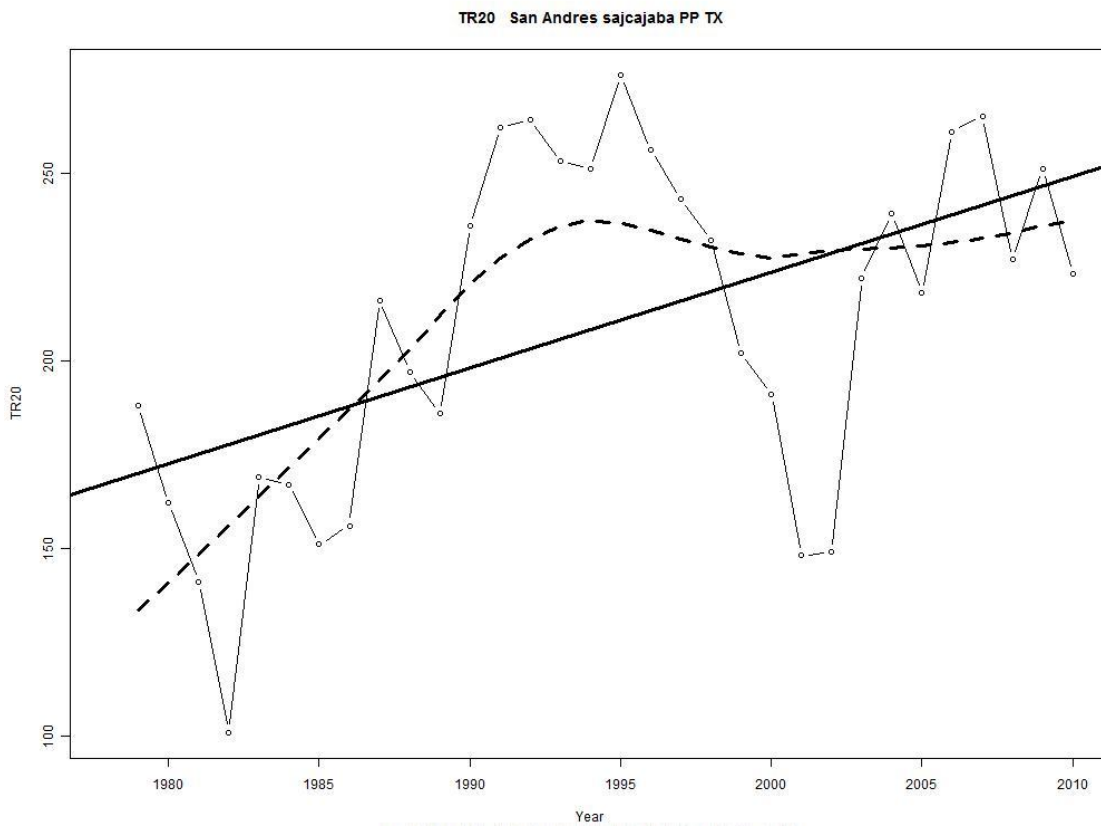
Estadísticas del ajuste de la curva de tendencia lineal se muestran en los gráficos. En la parte inferior de los gráficos se destaca el *p-value*, el cual indica si la serie es estadísticamente significativa ($p\text{-value} < 0,05$) ó no, y la tendencia estimada (*slope estimate*), la cual define el valor de cambio del indicador, y se utilizará para verificar de cuanto ha sido la variabilidad que se ha suscitado en la temperatura y precipitación respecto al tiempo de la toma de datos.

A continuación se muestran las gráficas de los índices calculados para el estudio, se mostrarán las gráficas de dos del total de estaciones para ejemplificar como se observan las tendencias de cada índice generado.

Se tomarán las estaciones San Andrés Sajcabajá y Quixal para ejemplificar como se manifiestan las variaciones de los índices en estudio.

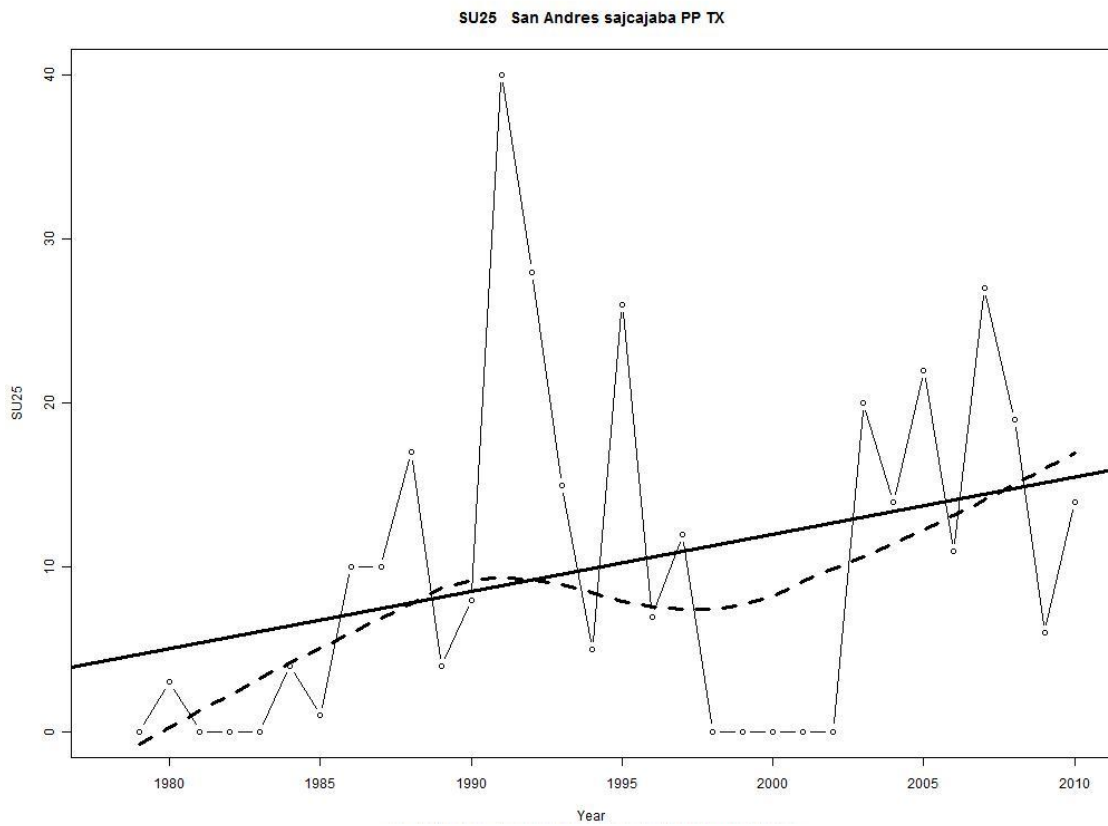
Estación San Andrés Sajcabajá

Figura 13. Días al año cuando la temperatura media diaria es mayor a 20°C (TR20)



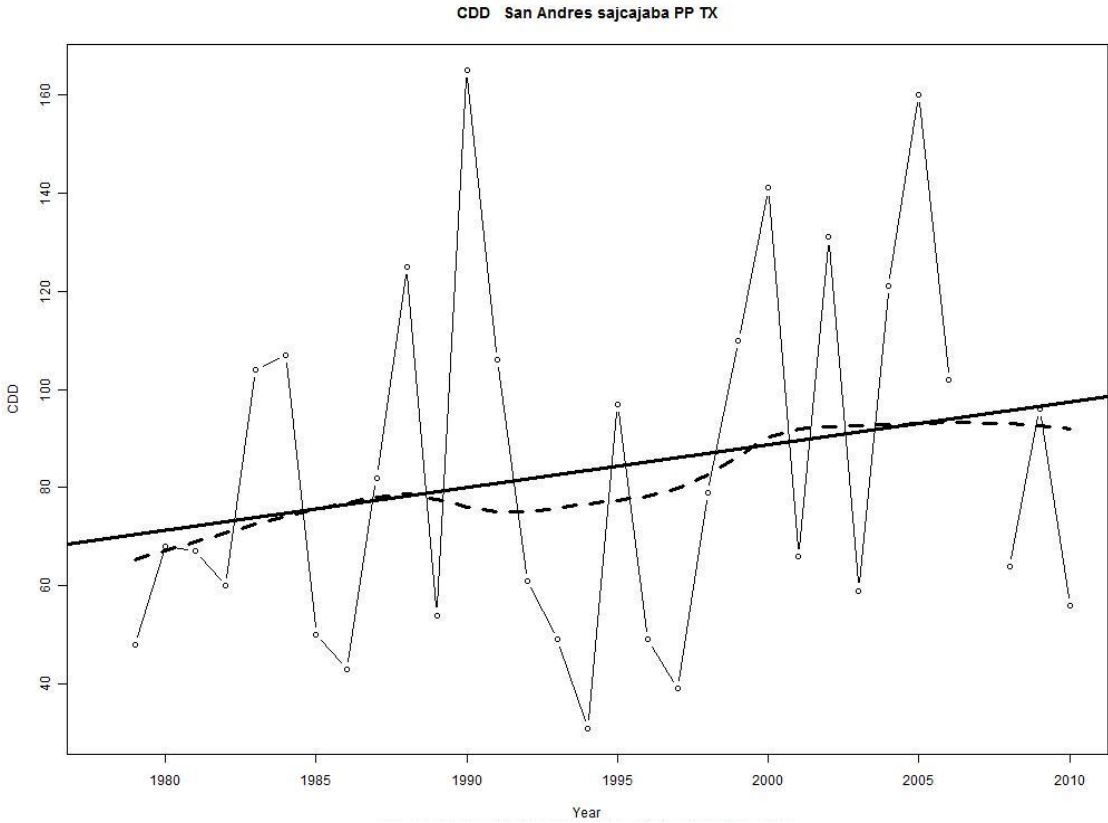
Fuente: elaboración propia.

Figura 14. **Días al año con temperatura media diaria mayor a 25°C (SU25)**



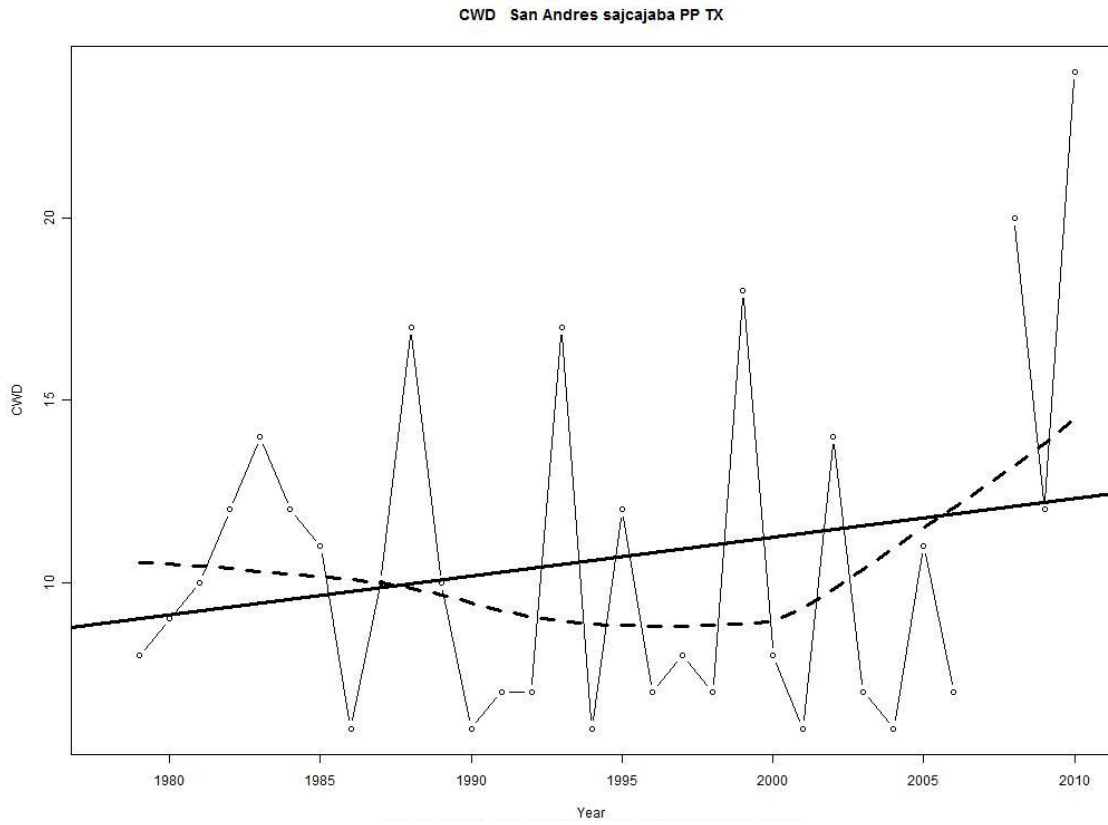
Fuente: elaboración propia.

Figura 15. Mayor número de días secos consecutivos en un año (CDD)



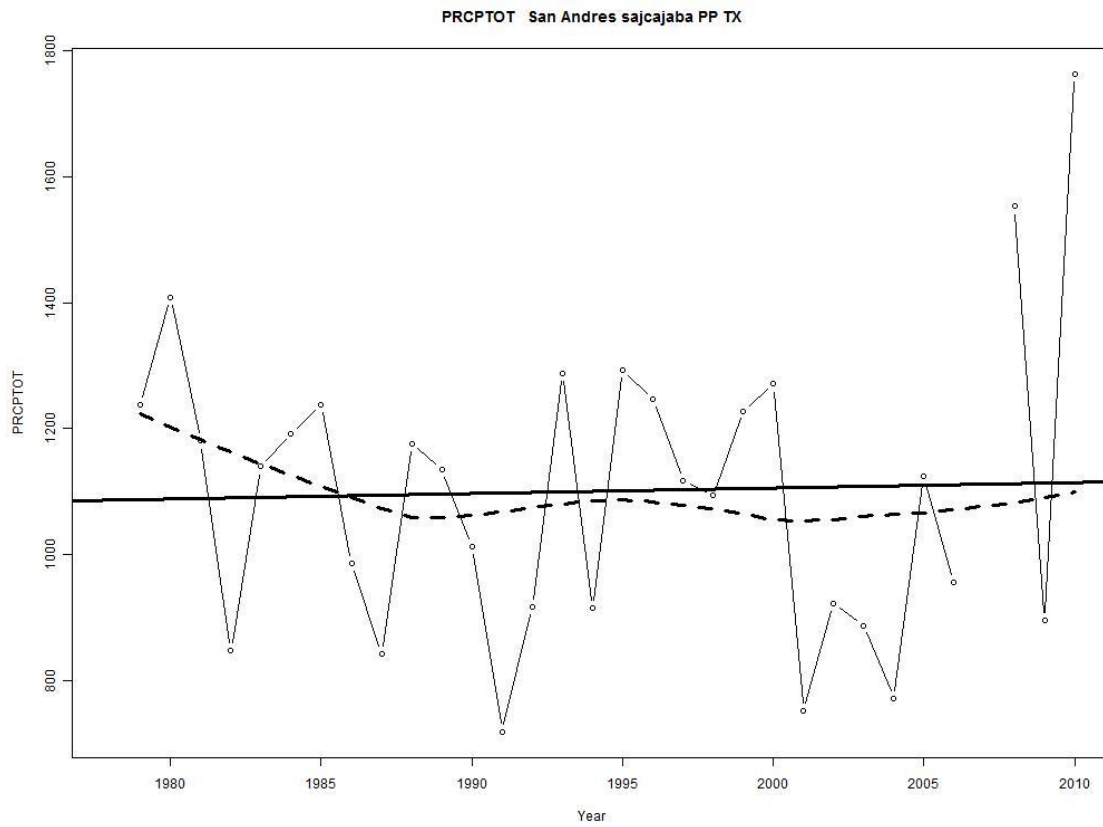
Fuente: elaboración propia.

Figura 16. **Mayor número de días húmedos consecutivos en un año (CWD)**



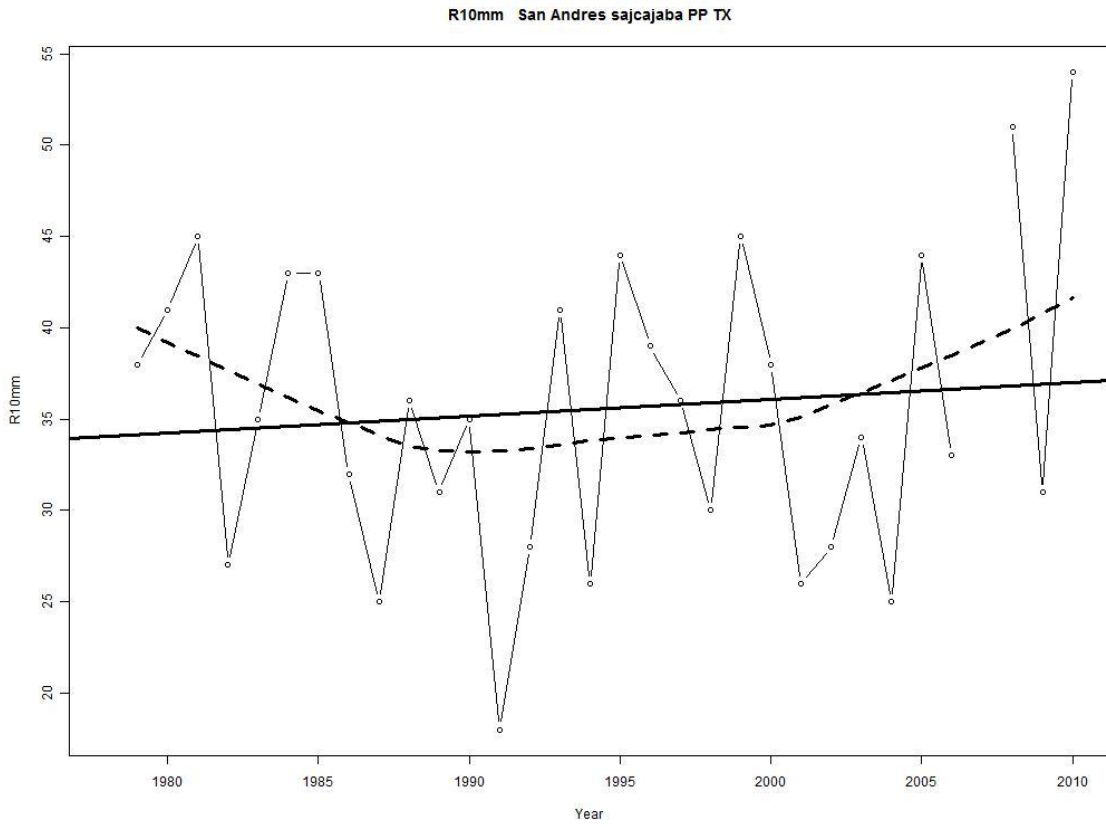
Fuente: elaboración propia.

Figura 17. Precipitación total al año (PRCTOT)



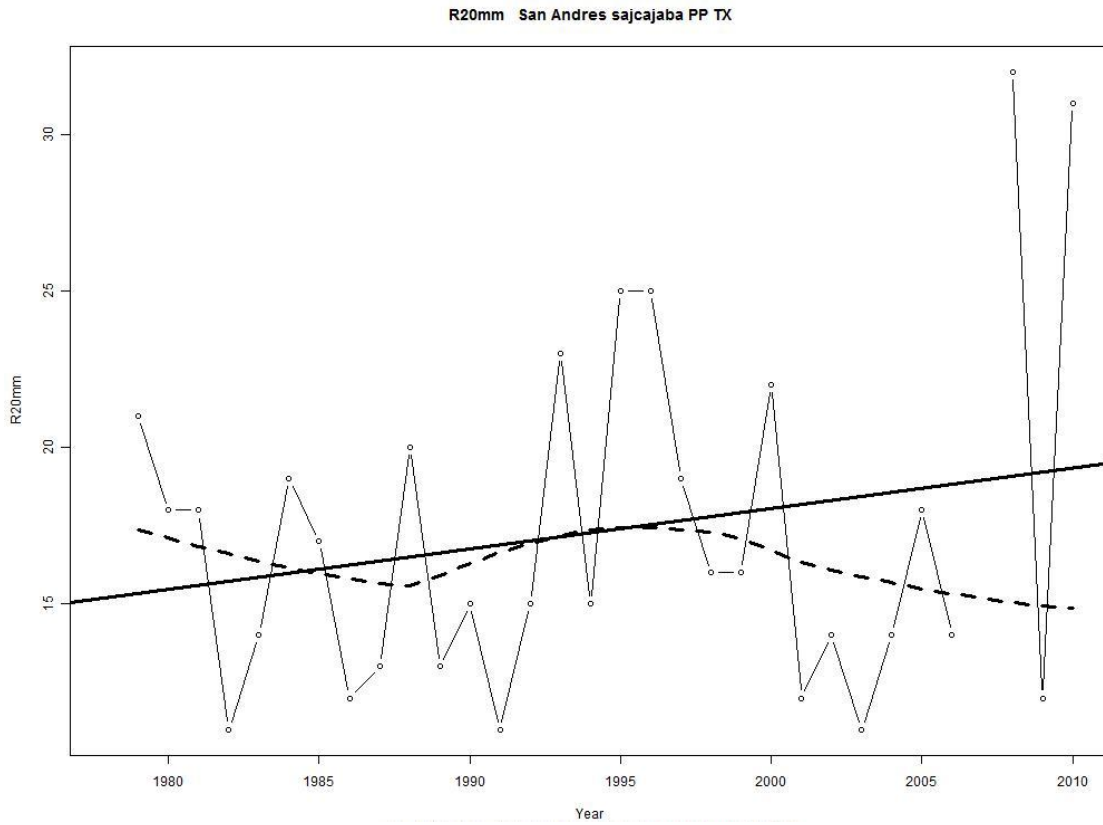
Fuente: elaboración propia.

Figura 18. **Número de días al año con lluvia mayor a 10mm (R10mm)**



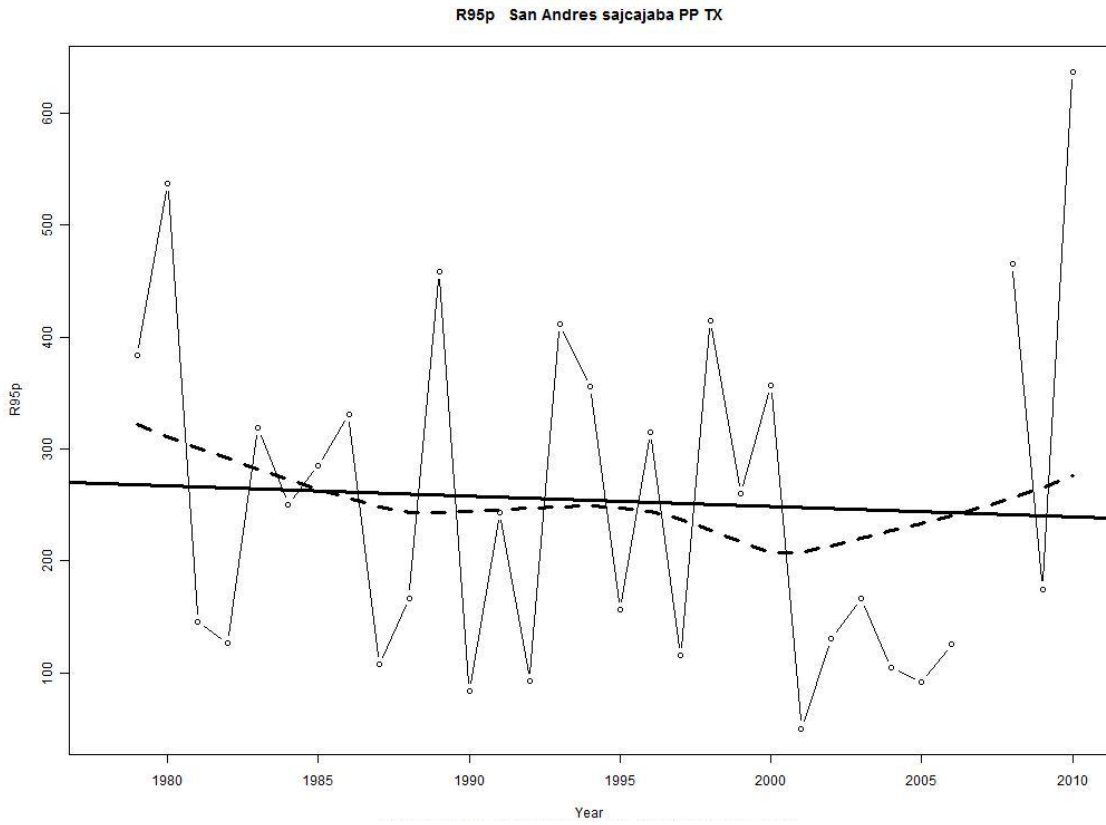
Fuente: elaboración propia.

Figura 19. **Número de días al año con lluvia mayor a 20mm (R20mm)**



Fuente: elaboración propia.

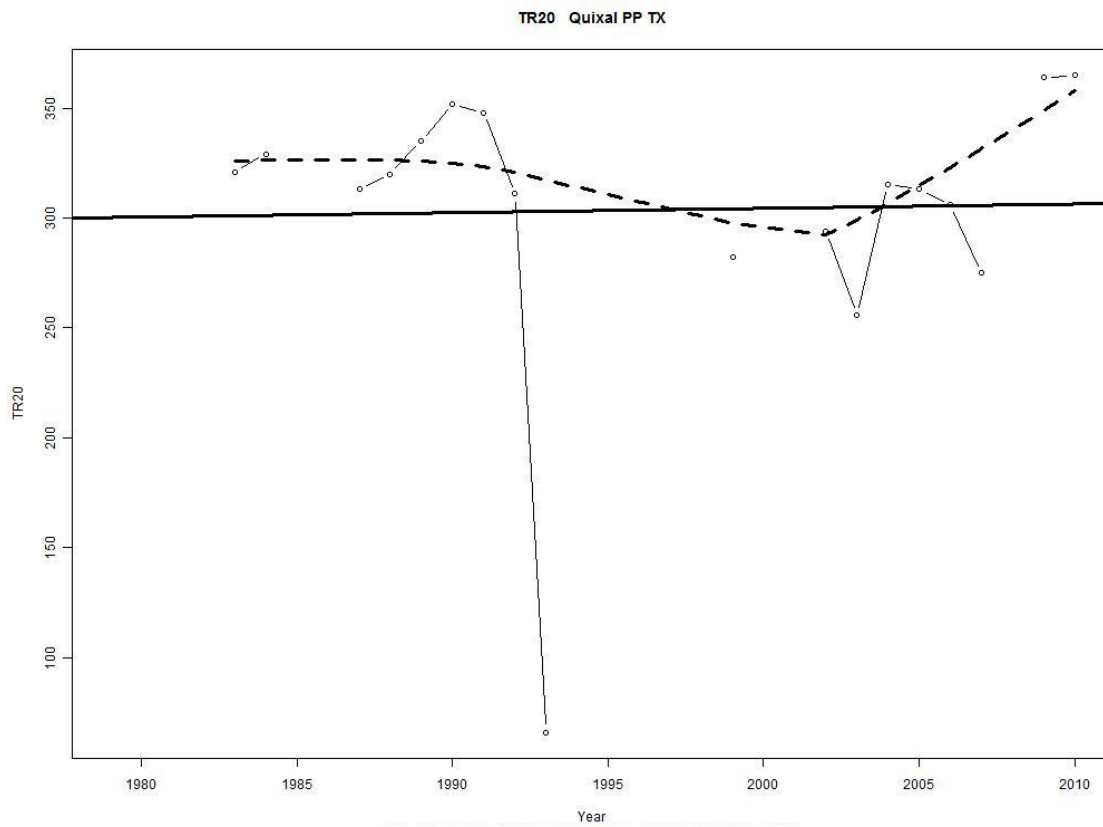
Figura 20. **Número de días en un año con lluvia mayor al percentil 95 para los días húmedos (R95p)**



Fuente: elaboración propia.

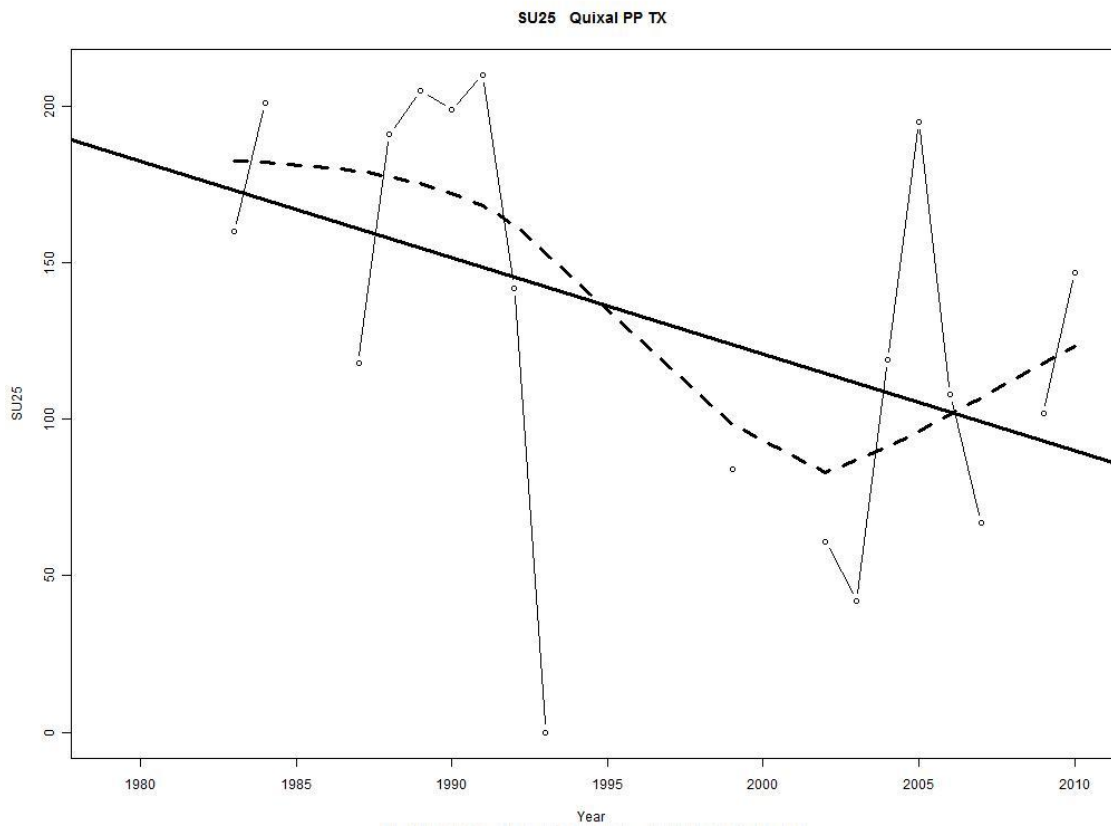
Estación Quixal

Figura 21. **Días al año cuando la temperatura media diaria es mayor a 20°C (TR20)**



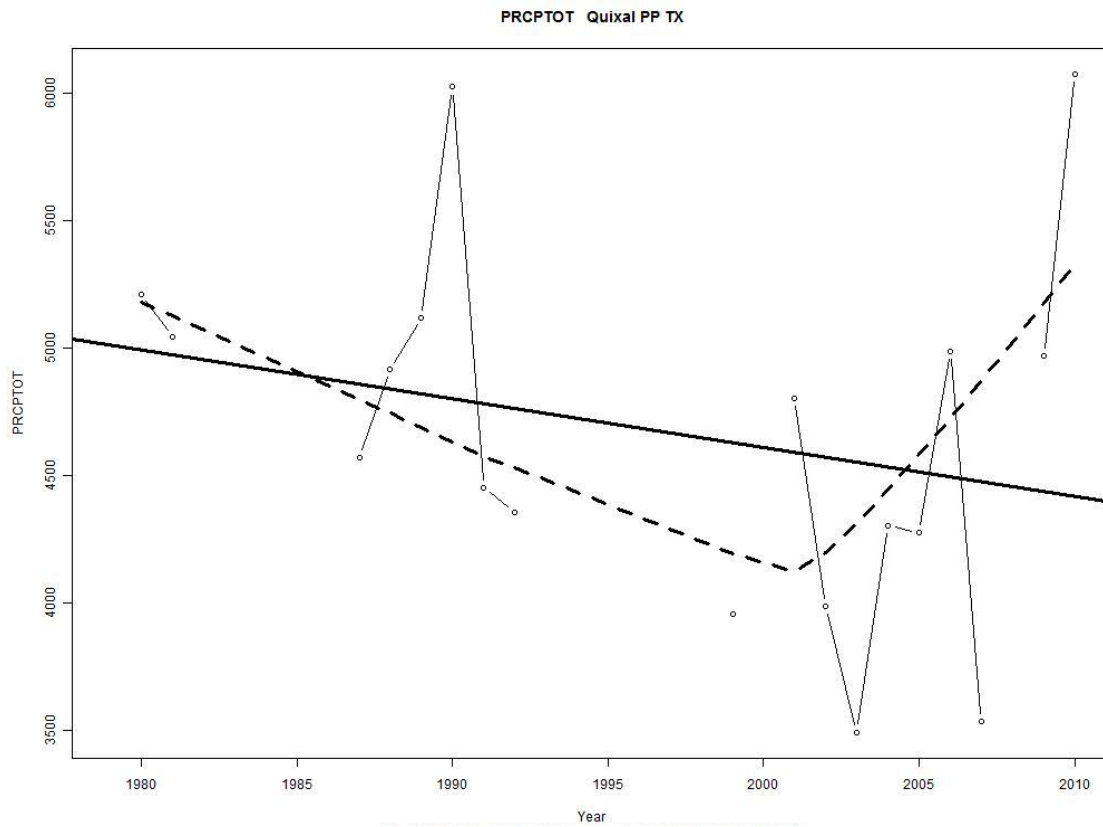
Fuente: elaboración propia.

Figura 22. **Días al año con temperatura media diaria mayor a 25°C (SU25)**



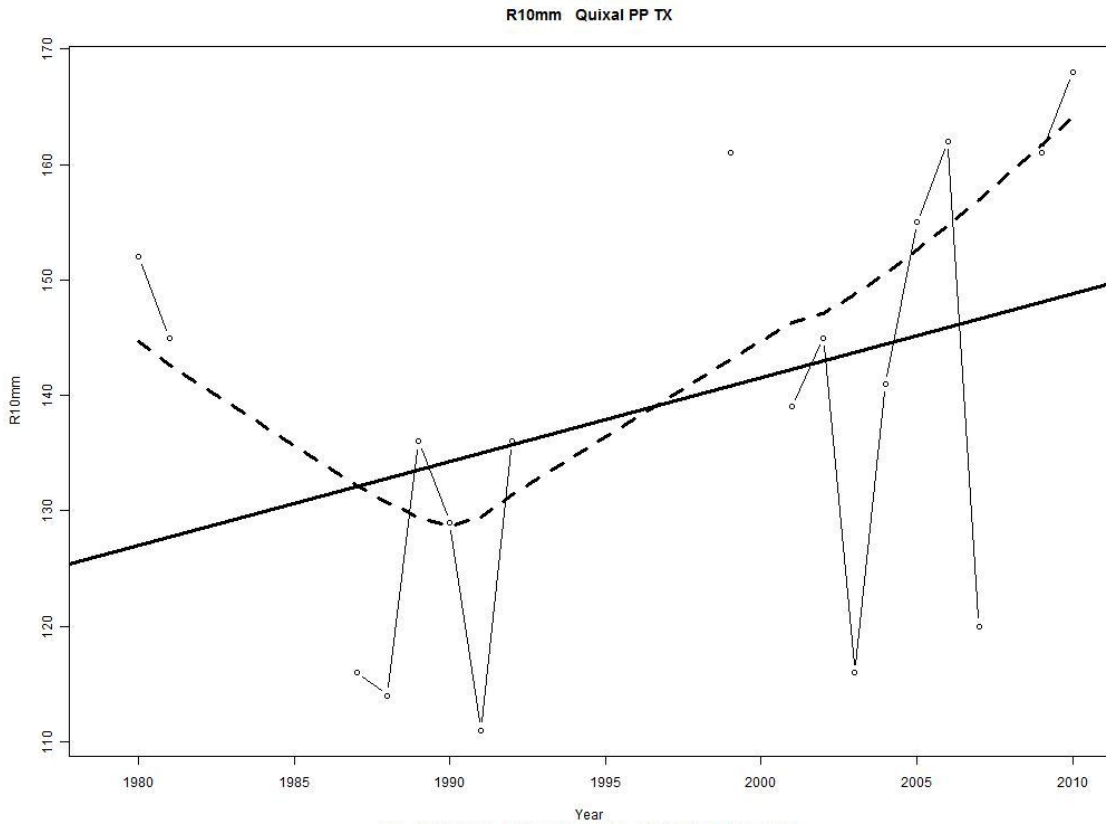
Fuente: elaboración propia.

Figura 23. Precipitación total al año (PRCTOT)



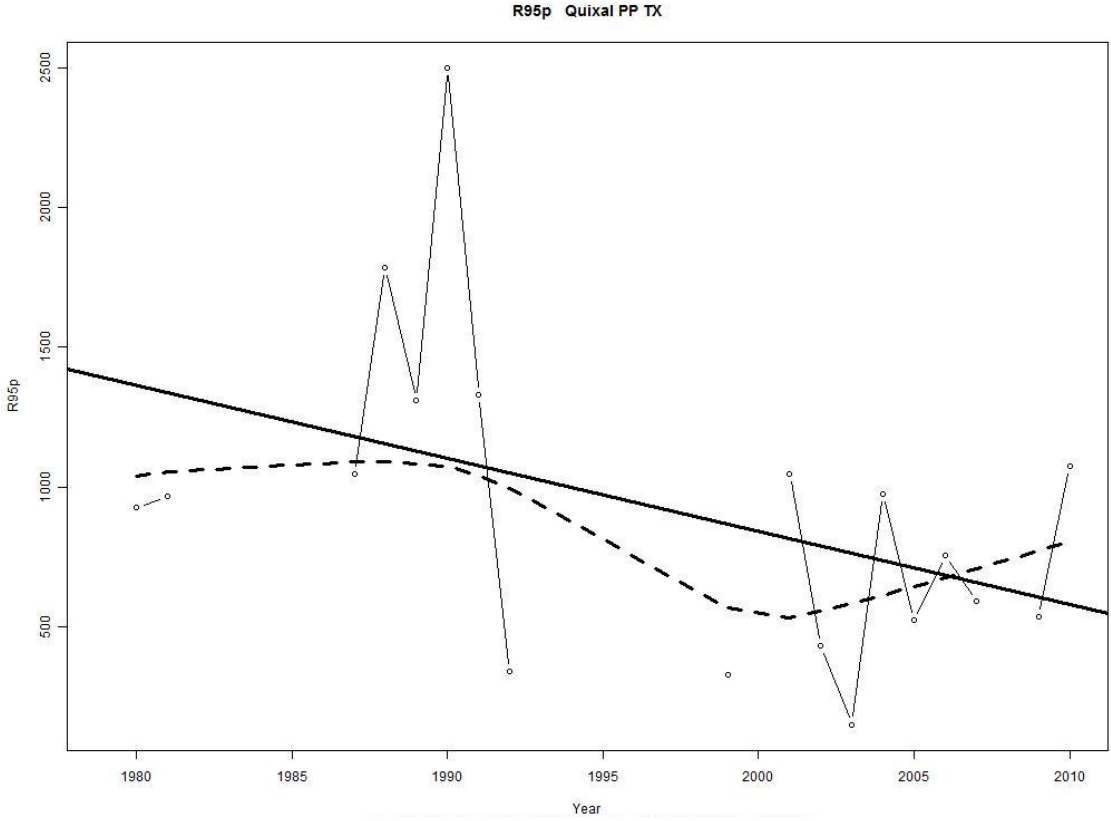
Fuente: elaboración propia.

Figura 24. **Número de días al año con lluvia mayor a 10mm (R10mm)**



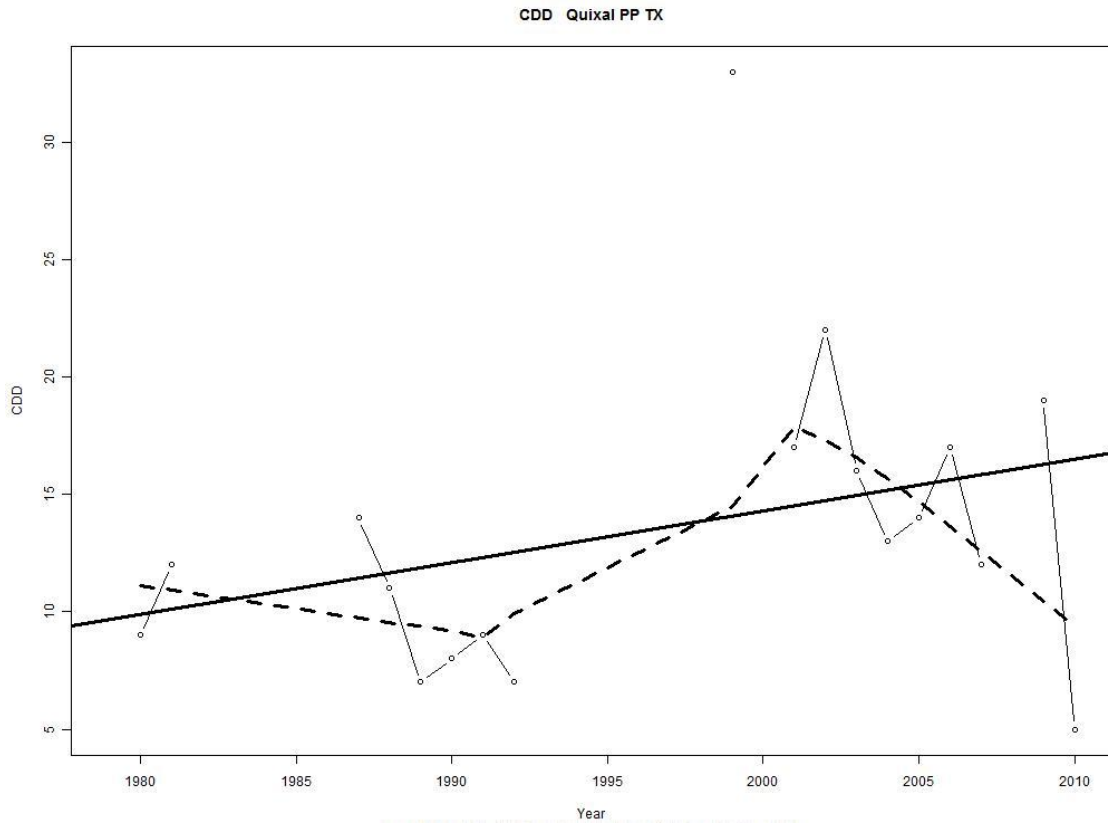
Fuente: elaboración propia.

Figura 25. **Número de días en un año con lluvia mayor al percentil 95 para los días húmedos (R95p)**



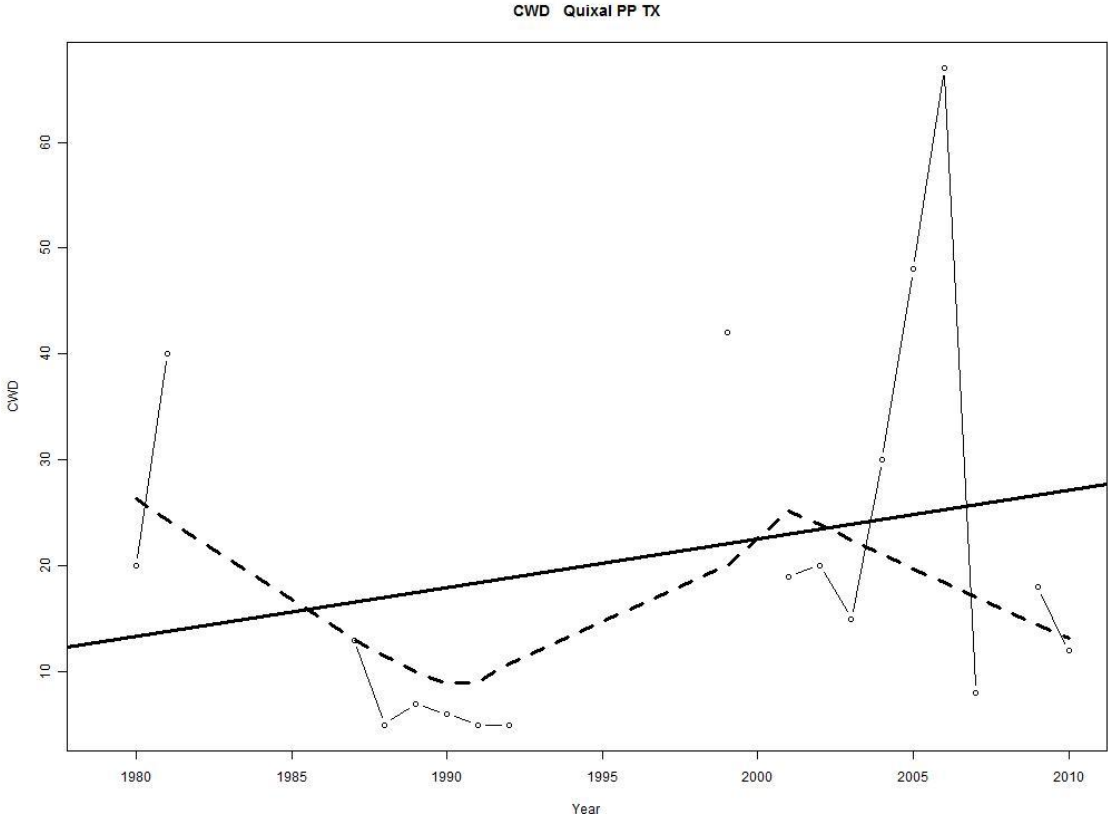
Fuente: elaboración propia.

Figura 26. **Mayor número de días secos consecutivos en un año (CDD)**



Fuente: elaboración propia.

Figura 27. **Mayor número de días húmedos consecutivos en un año (CWD)**



Fuente: elaboración propia.

3.4. Resultados

Se pudo mostrar mediante algunas gráficas la tendencia de la temperatura y precipitación para dos estaciones que sirvieron para ejemplificar el modo en que se estudió cada estación que contaba con información, el análisis de la temperatura y la precipitación revelaron una variedad de cambios en los valores extremos en los últimos 30 años en la cuenca del río Chixoy.

Aunque es esto cierto tanto para los elementos del clima, los cambios de temperatura tienen un alto grado de coherencia espacial. Esto no es ninguna sorpresa, ya que las precipitaciones en la región tienen más variabilidad que la temperatura, a continuación se muestra un resumen de los resultados de la temperatura en la tabla XI y un resumen de los resultados de la precipitación en la tabla XII.

Tabla XI. **Resultados de la temperatura media diaria**

Estación	Días al año con Temperaturas media diaria mayor a 25°C (días/año)	Tendencia	Días al año cuando la temperatura media diaria es mayor a 20°C (días/año)	Tendencia
Cerro La Laguna	0,008	+	-0,594	-
Chajul	-0,101	-	-0,681	-
Chicaman	0,008	+	-2,12	-
El Cebollal	-1,143	-	-0,676	-
El Paradillo	0,115	+	4,932	-
La Navidad	0,002	+	-0,189	-
Pueblo Viejo	-0,204	-	-0,824	-
Quixal	-3,083	-	0,198	+
Serchil	-0,067	-	0,382	+
San Andrés Sajcabaja	0,35	+	2,547	+
Tierra Blanca			0,048	+
Xequemeyá			-0,62	-

Fuente: elaboración propia.

El símbolo (+) significa tendencia positiva, es decir, incremento y (-) tendencia negativa o disminución.

Cabe destacar que se intentaron calcular los índices TN10P y TN90P pero las series en estudio tenían un poco más del 25 por ciento de datos faltantes, por lo cual no fue posible calcular los mismos, eso limitó un poco los resultados del estudio sobre la temperatura, y se redujo al cálculo de los índices que se mostraron anteriormente.

Tabla XII. Resultados de la precipitación

Estación	Lluvia mayor a 10mm (mm/año)	Tendencia	Lluvia mayor a 20mm (mm/año)	Tendencia	Días secos consecutivos (días/año)	Tendencia	Días húmedos consecutivos (días/año)	Tendencia	Días al año con lluvia mayor a percentil 95 (mm/año)	Tendencia	Precipitación Total (mm/año)	Tendencia
Cerro La Laguna	-0,26	-	-0,16	-	0,03	+	-0,12	-	6,248	+	0,98	+
Chajul	0,36	+	0,22	+	-0,04	-	0,14	+	4,13	+	8,51	+
Chicaman	0,35	+	0,25	+	-0,15	-	-0,13	-	4,511	+	11,34	+
Comitancillo	0,19	+	0,11	+	0,676	+	0,083	+	1,875	+	4,59	+
El Cebollal	0,29	+	0,05	+	0,348	+	0,104	+	4,93	+	9,99	+
El Paradillo	0,20	+	0,16	+	1,994	+	-0,016	-	2,205	+	4,31	+
La Capellania	0,61	+	0,33	+	-0,04	-	0,41	+	8,04	+	17,218	+
La Navidad	-0,67	-	-0,22	-	0,062	+	-0,383	-	5,71	+	-8,77	-
Pueblo Viejo	0,29	+	0,14	+	0,126	+	-0,01	-	1,171	+	6,84	+
Quixal	0,73	+	-0,54	-	0,221	+	0,462	+	-26,145	-	-19,13	-
Serchil	0,36	+	0,1	+	-1,29	-	0,212	+	7,811	+	9,60	+
San Andrés Sajcabaja	0,09	+	0,13	+	0,87	+	0,106	+	-0,928	-	0,90	+
San Antonio Ilotengo	0,13	+	0,1	+	1,15	+	-0,002	-	5,595	+	7,70	+
Santa Cruz del Quiché	0,068	+	0,1	+	0,72	+	-0,142	-	4,138	+	1,75	+
Tierra Blanca	0,44	+	0,33	+	0,77	+	0,07	+	2,053	+	10,76	+
Xequemeyá	0,064	+	0,05	+	0,042	+	0,184	+	2,631	+	5,45	+

Fuente: elaboración propia.

El símbolo (+) significa tendencia positiva, es decir, incremento y (-) tendencia negativa o disminución.

3.5. Tendencia de la precipitación

Se estudia este fenómeno con el fin de poder observar el comportamiento que adquiere la misma, esto servirá, para formar un criterio sobre el rumbo que a tomado ésta con el paso de los años, en el período de estudio.

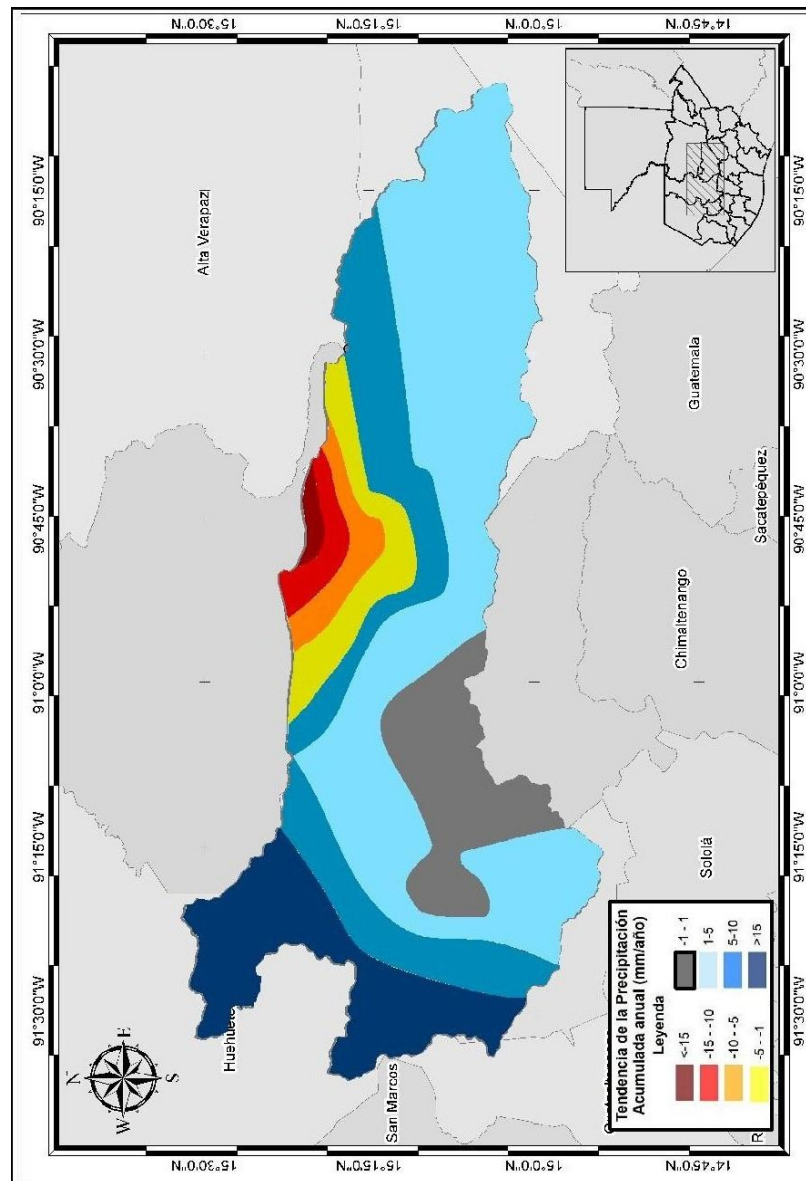
3.5.1. Tendencia de la precipitación acumulada anual

En general, de acuerdo con el indicador relacionado con la precipitación total anual, ésta se comporta de la siguiente manera y como se muestra en la figura 28:

- Zona de incremento de la precipitación (tonos azules): la mayor parte de la cuenca muestra esta tendencia, corresponde a la parte oriente y occidente de la cuenca, donde se observa que se ha registrado mayor precipitación con el paso del tiempo, según el análisis de datos, esta tendencia se muestra en gran parte de la cuenca en estudio y se puede presentar más conforme pasen los fenómenos climáticos que ahora son más comunes en el país.
- Zonas de disminución de la precipitación (tonos amarillos, naranjas): se observa en la parte norte de la cuenca, donde la tendencia de la precipitación ha disminuido con el paso del tiempo, esta disminución solo se nota en una pequeña parte de la cuenca en estudio, lo cual puede indicar que esta tendencia solo ha afectado muy poco.
- Zona de tendencia no definida o con muy ligero cambio (blanco): se presenta en una pequeña parte al sur de la cuenca, esto puede indicar

que no se ha visto afectado por el cambio climático o algún otro fenómeno climático con el paso de los años.

Figura 28. **Indicador relacionado con la tendencia de la precipitación total anual (PRCPTOT)**



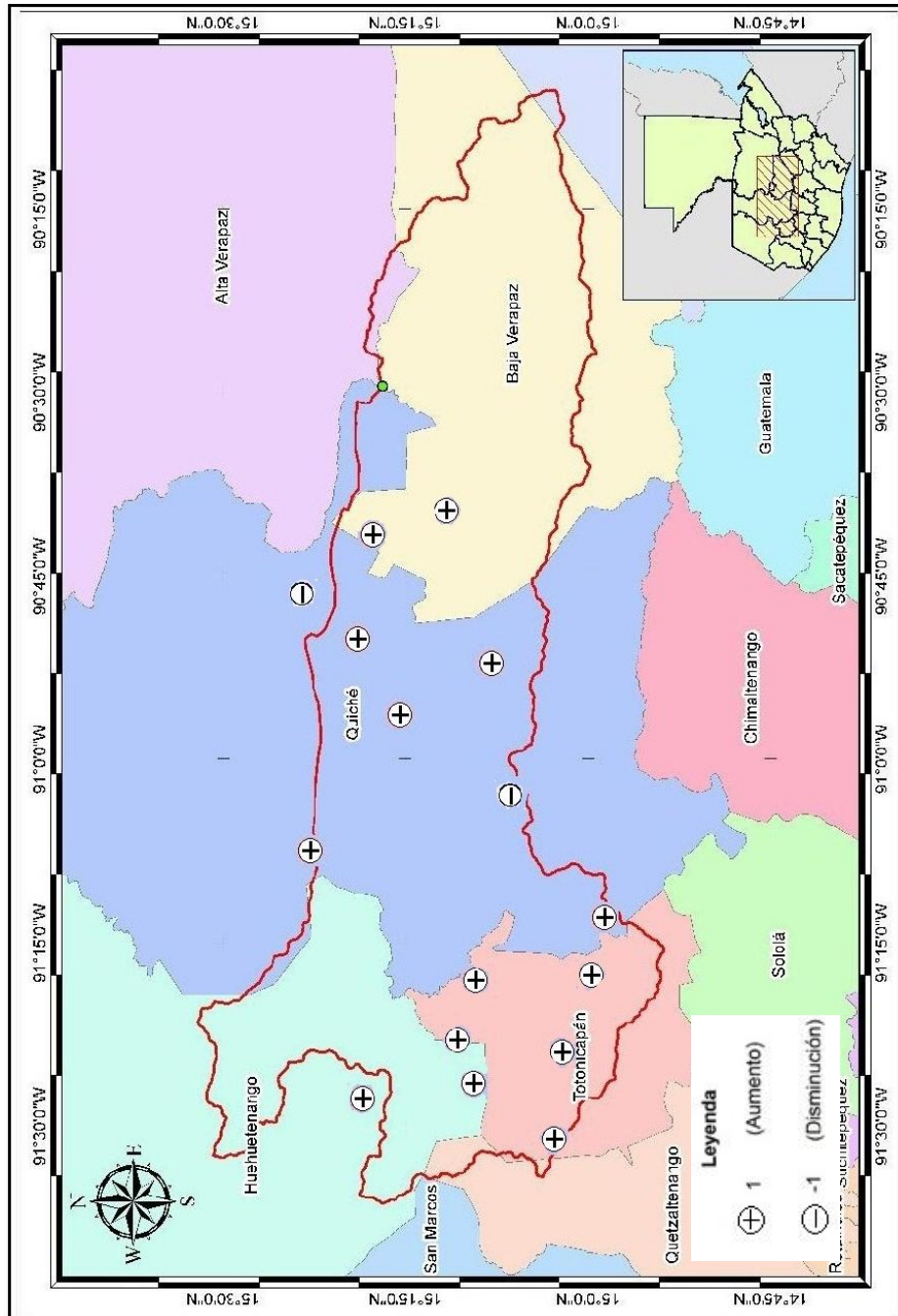
Fuente: elaboración propia.

3.5.2. Tendencia de las precipitaciones fuertes

En cuanto al indicador relacionado con precipitaciones de intensidad alta (R95p) se concluye lo siguiente:

- El comportamiento de las precipitaciones de intensidad alta (tormentas o aguaceros) es similar al de la precipitación total anual, es decir, la mayoría de las estaciones tienen una tendencia al aumento de este tipo de eventos extremos, especialmente en amplios sectores de la cuenca, en la figura 29 se muestran las estaciones con tendencia de aumento (signo más) y con tendencia de disminución (signo menos).
- La tendencia más marcada a la disminución de las precipitaciones se puede notar en la estación Quixal, ya que ésta está posicionada en la parte más baja de la cuenca (300 MSNM) y al norte de la misma, así como se puede observar en la figura 28.

Figura 29. **Indicador relacionado con la tendencia de las precipitaciones fuertes o intensas (R95p)**



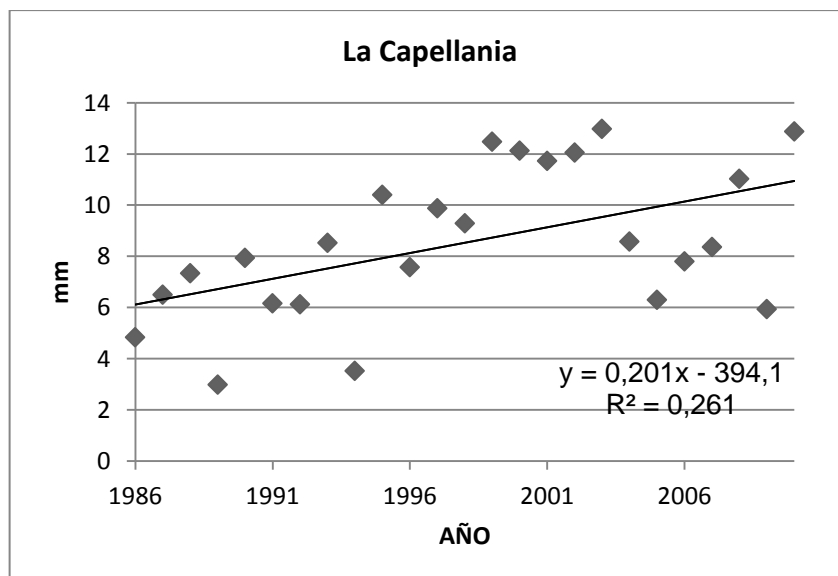
Fuente: elaboración propia.

3.5.3. Tendencia de la precipitación acumulada anual para los meses de septiembre y octubre

Como es sabido el mes de septiembre es el más lluvioso de la temporada de lluvias y octubre es el mes donde se termina dicha temporada, se hace un análisis de estos dos meses para obtener resultados sobre si las precipitación han disminuido o aumentado.

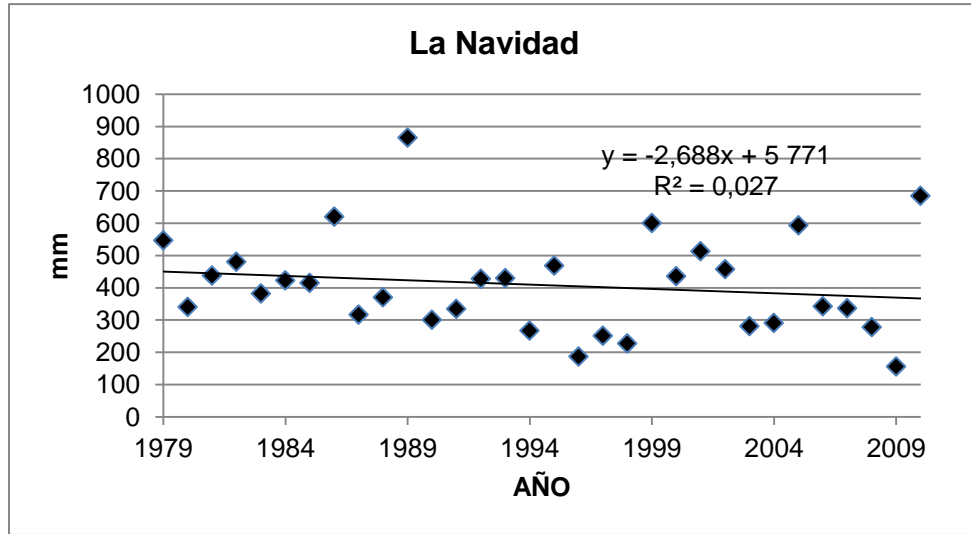
Se hace un análisis de la precipitación acumulada anual del mes de septiembre y octubre desde 1979 hasta 2010, a continuación se muestran gráficas de 3 estaciones que muestran la tendencia de la precipitación para septiembre y el valor de cambio climático que ha sufrido en el lapso de tiempo de estudio.

Figura 30. Precipitación total de septiembre registrada en la estación La Capellanía



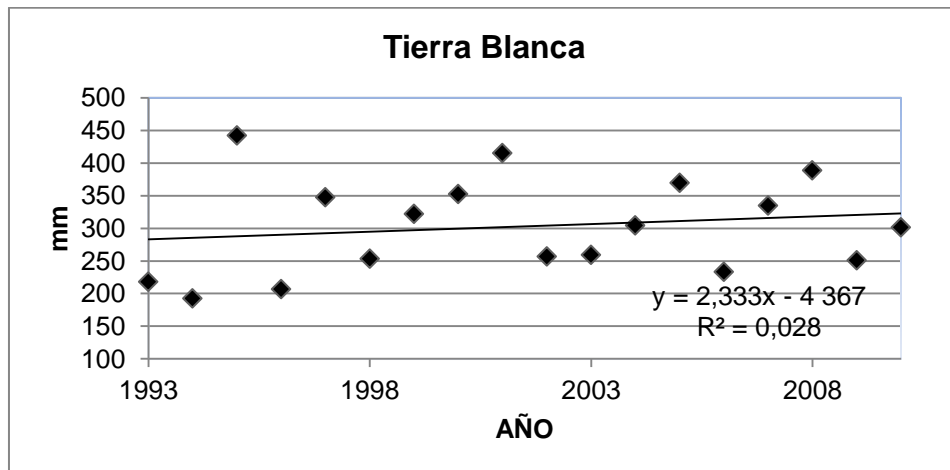
Fuente: elaboración propia.

Figura 31. **Precipitación total de septiembre registrada en la estación La Navidad**



Fuente: elaboración propia.

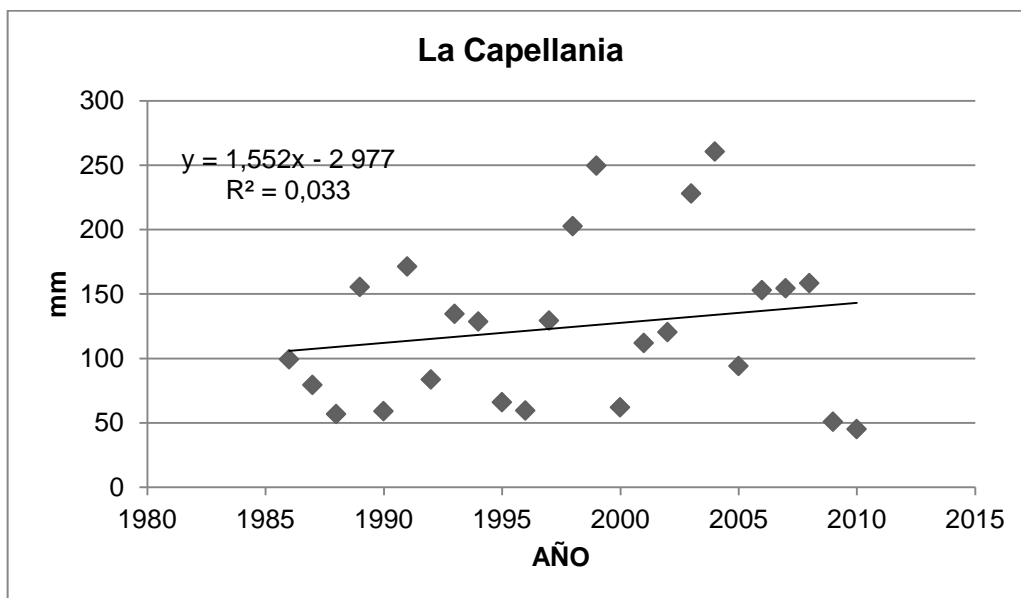
Figura 32. **Precipitación total de septiembre registrada en la estación Tierra Blanca**



Fuente: elaboración propia.

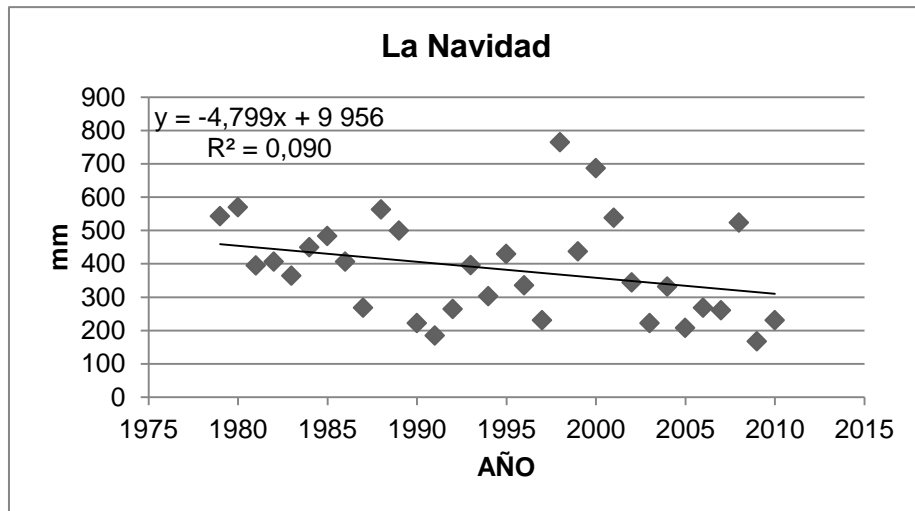
Se mostraron las gráficas para el mes de septiembre, ahora se mostraran las gráficas del mes de octubre, para observar diferencias y el cambio que se ha ido dando al valor de cambio climático.

Figura 33. **Precipitación total de octubre registrada en la estación La Capellanía**



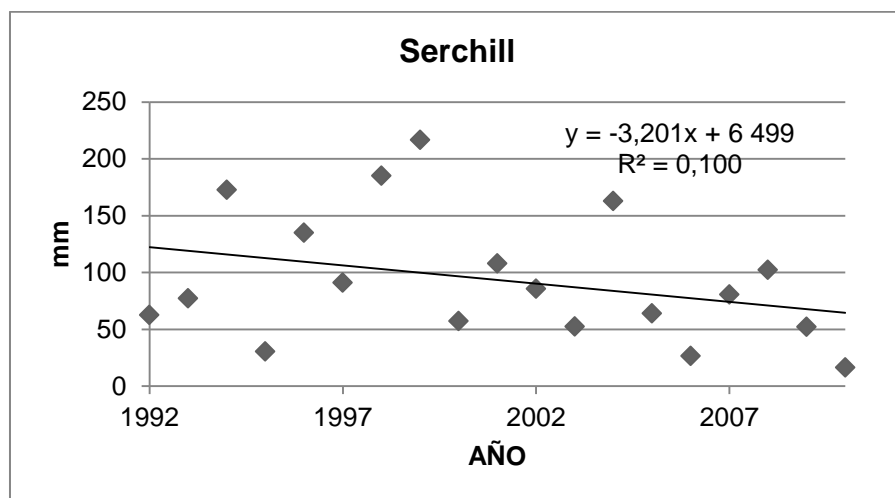
Fuente: elaboración propia.

Figura 34. **Precipitación total de octubre registrada en la estación La Navidad**



Fuente:elaboración propia.

Figura 35. **Precipitación total de octubre registrada en la estación Serchil**



Fuente: elaboración propia.

A continuación se muestra un resumen (tabla XIII) con los resultados desplegados de todas las estaciones para los meses de septiembre y octubre con lo cual se verá cuáles han sido las tendencias de los datos para estos meses, y si los cambios han sido muy marcados o casi no han tenido impacto sobre el área de la cuenca, ya que septiembre es el mes más lluvioso de la temporada y octubre es el mes transitorio para el fin de la misma, por eso se tomaron con particularidad estos meses para obtener resultados sobre si hay aumento o disminución en la precipitación acumulada anual.

Tabla XIII. **Resultados de la precipitación acumulada anual para septiembre y octubre**

Estación	Septiembre mm/año	Tendencia	Octubre mm/año	Tendencia
Cerro La Laguna	0,423	+	-0,234	-
Chajul	1,761	+	-2,722	-
Chicaman	0,895	+	2,037	+
Comitancillo	1,601	+	0,864	+
El Cebollal	-0,197	-	1,668	+
El Paradillo	1,32	+	0,361	+
La Capellanía	6,048	+	1,552	+
La Navidad	-2,688	-	-4,799	-
Pueblo Viejo	0,436	+	1,065	+
Quixal	1,274	+	-2,41	-
Serchil	3,615	+	-3,201	-
San Andrés Sajcabaja	-0,778	-	1,047	+
San Antonio Ilotenango	0,46	+	-0,907	-
Santa Cruz del Quiché	-0,157	-	-0,534	-
Tierra Blanca	2,333	+	1,037	+
Xequemeyá	0,407	+	-0,545	-

Fuente: elaboración propia.

El símbolo (+) significa tendencia positiva, es decir, incremento y (-) tendencia negativa o disminución.

Después de analizar los datos se puede observar que el 75 por ciento de las estaciones para el mes de septiembre muestran un incremento en la precipitación acumulada, por lo que se puede concluir que en los meses de septiembre las lluvias podrán ser más intensas, esto se puede deber a factores que influyen por cambios climáticos, alteraciones en el ciclo del agua u otros que se han dado en el área de la cuenca del río Chixoy, lo que puede influir a un aumento en los caudales para este mes.

En el mes de octubre se puede observar una disminución en las precipitaciones observadas, por lo que se puede esperar un decremento en las lluvias para este mes, ya que es donde finaliza la temporada de lluvia del año en estudio.

3.6. Tendencia de la temperatura media diaria

Se estudia la tendencia de la misma para poder observar el comportamiento que tiene ésta, lo cual servirá para que se forme un criterio sobre el rumbo que ha tomado la misma con el paso de los años, en el período de estudio.

3.6.1. Tendencia de la temperatura media diaria mayor a 25 grados centígrados

Se estudia el índice (SU25) de días al año que superan los 25 grados centígrados, en el 50 por ciento de las estaciones (ver figura 36.) hay una tendencia al aumento de las temperaturas medias diarias mayores a 25 grados

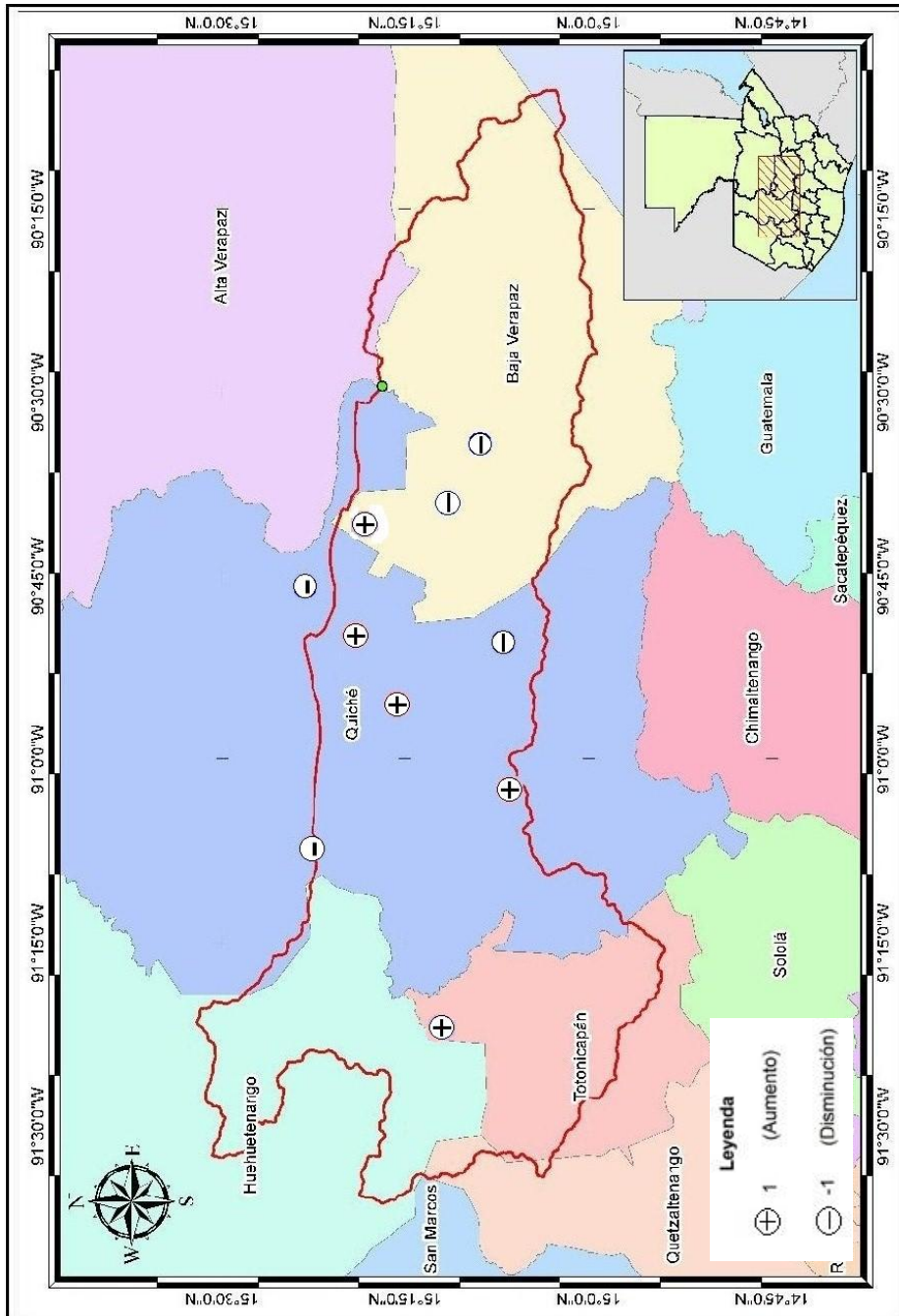
centígrados (signo más) y el otro 50 por ciento hay una tendencia a la disminución de días donde no supera los 25 grados centígrados de temperatura, pero se puede observar que las tendencias negativas son mayores (ver tabla XI), lo que indica que los días serán más fríos en la zonas de la cuenca del río Chixoy. Es de hacer anotar que con respecto a esta tendencia, los indicadores muestran mayor confiabilidad o significancia estadística en el centro de la cuenca que en los extremos de la misma.

También se observa un enfriamiento bien definido en el centro de la cuenca, no como en los extremos norte y sur, donde se ve un aumento de los días donde la temperatura es mayor a 25 grados centígrados.

Así mismo se puede notar que los valores de la tendencia al incremento de la temperatura son pequeños y que el decremento tiene valores altos, por lo que se podría deducir que con el paso del tiempo la temperatura podría ir en disminución.

En la figura 36 se muestra un mapa con la identificación de las estaciones y la tendencia que éstas adquieren.

Figura 36. **Indicador relacionado con la tendencia de temperatura media diaria mayor a 25°C (SU25)**



Fuente: elaboración propia.

La tendencia positiva (signo más) está relacionada con un aumento en la temperatura máxima y la tendencia negativa con disminución (signo menos).

3.6.2. Tendencia de la temperatura media diaria mayor a 20 grados centígrados

Se estudia el índice de días calientes, es decir, el número de días al año cuando la temperatura media diaria es mayor a 20 grados centígrados, se puede observar que el 67 por ciento de las estaciones muestran un decremento en los días en que la temperatura mínima supere los 20 grados centígrados y el 33 por ciento restante muestra un aumento en la cuenca (tabla XI).

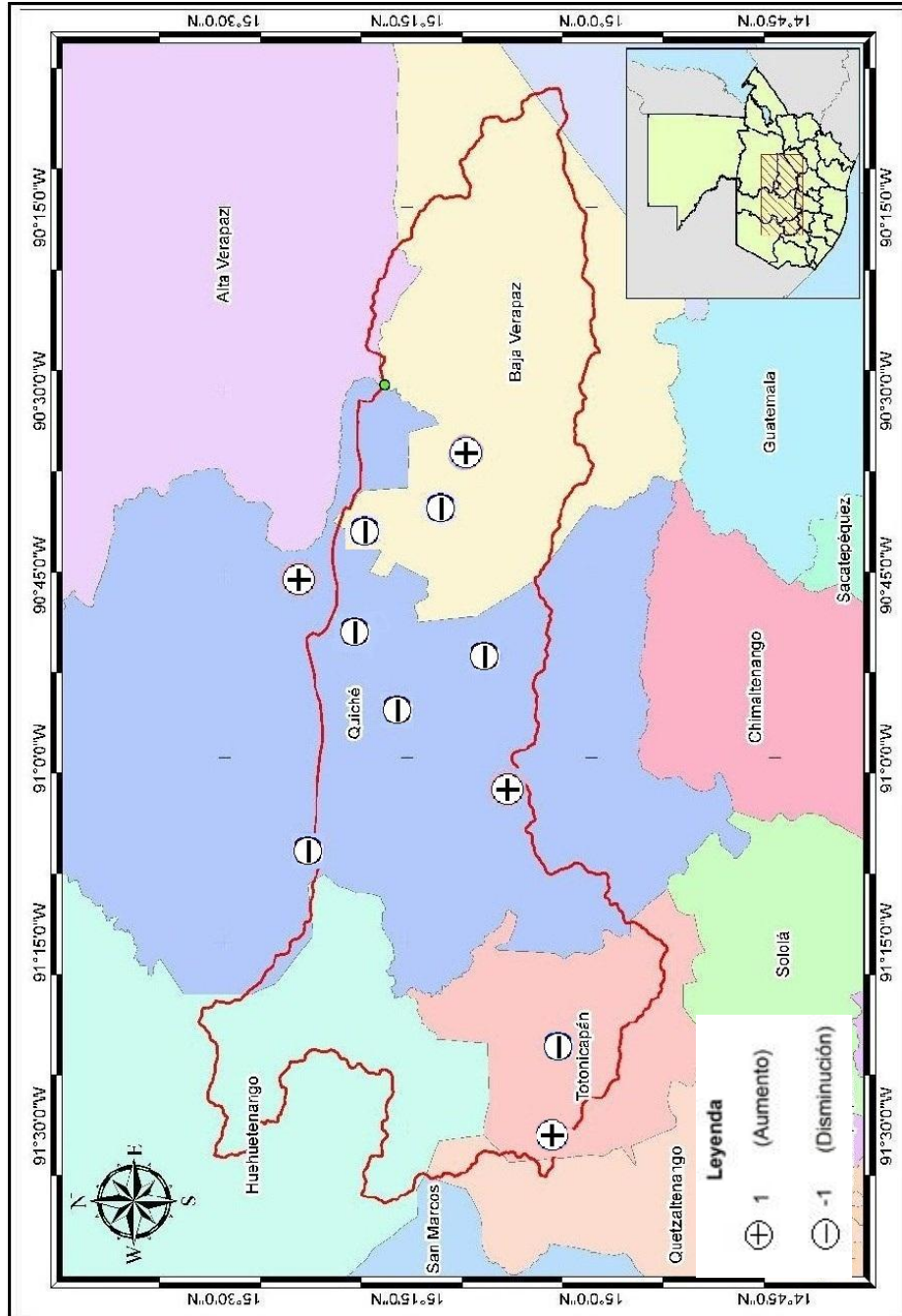
En la zona central de la cuenca se puede notar que tendencia de los datos a la disminución en la temperatura es mayor que en otros sectores de la misma.

Contrario a la temperatura máxima se puede observar que los valores de la tendencia al incremento de la temperatura son mayores y que el decremento tiene valores bajos, por lo que se podría deducir que con el paso del tiempo la temperatura podría ir aumentando paulatinamente.

A continuación se muestra un mapa con la identificación de las estaciones y la tendencia que éstas adquieren.

La tendencia positiva (signo más) está relacionada con un aumento en la temperatura mínima y la tendencia negativa con disminución (signo menos).

Figura 37. **Indicador relacionado con la tendencia de temperatura media diaria mayor a 20°C (TR20)**



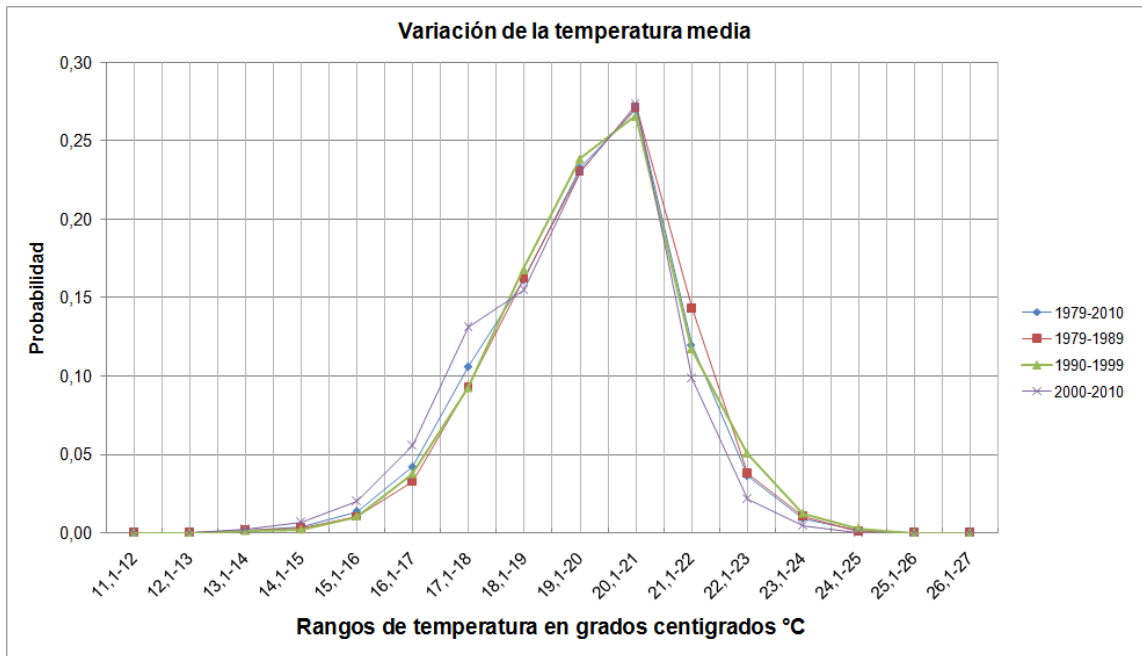
Fuente: elaboración propia.

Se podría concluir que según los índices de temperatura media diaria cuando supera los 25 grados centígrados, los días tienden a ser menores como se observa en los resultados calculados y que los días cuando la temperatura media diaria cuando supera los 20 grados centígrados tienden a ser mayores, esto se puede notar mayormente en la parte central del área de la cuenca, que abarca a los departamentos de Quiché y Baja Verapaz.

Las estaciones que marcan mayor cambio en la temperatura máxima y mínima tienen una altura entre el rango de 800 a 2000 metros sobre el nivel del mar. Y puede que con el tiempo esto pueda tender a un incremento mayor dado a los acontecimientos climáticos que se han dado durante los últimos años.

Se elaboró una gráfica para poder mostrar la variación de la temperatura media diaria en el período establecido para este estudio, ésta se realizó con el fin de poder observar si existía alguna variación de este valor, pero como se muestra en la figura 38, la misma no sufre ningún corrimiento, así también se puede observar que en la última década los valores de la temperatura media diaria en los valores bajo la media son mayores y sobre ella son menores, tal como se muestra en la figura 38. Por lo que se puede concluir que los cambios se han dado en la última década de estudio.

Figura 38. **Indicador de variación de la media de la temperatura media**



Fuente: elaboración propia.

4. ANÁLISIS DE CAUDALES

4.1. Análisis de información

El análisis del caudal en la cuenca del río Chixoy se realizará partir de la información de la red de estaciones hidrométricas del Instituto Nacional de Electrificación (INDE).

La línea base está centrada en el período de observaciones entre los años de 1969 hasta 2010. El comportamiento de los caudales se mostrará en los siguientes numerales. También se apreciará en los datos los cambios que se han suscitado con el paso de los años.

4.2. Datos

Para poder alcanzar los objetivos de este trabajo, es necesario contar con una base de datos diaria consistente y lo más extensa posible en el tiempo. El estudio incluye los datos de 9 estaciones. Aunque no todas contienen datos desde 1969, pero la mayoría de las mismas cuenta con más de 15 años de información la cual servirá para el propósito del estudio. Se muestra una lista de las estaciones con la variable utilizada, que es en este caso el caudal, y el período de registros como se muestra en la tabla XIV, así como las ubicaciones, las estaciones de medición de caudales cumplieron con el control de calidad de datos.

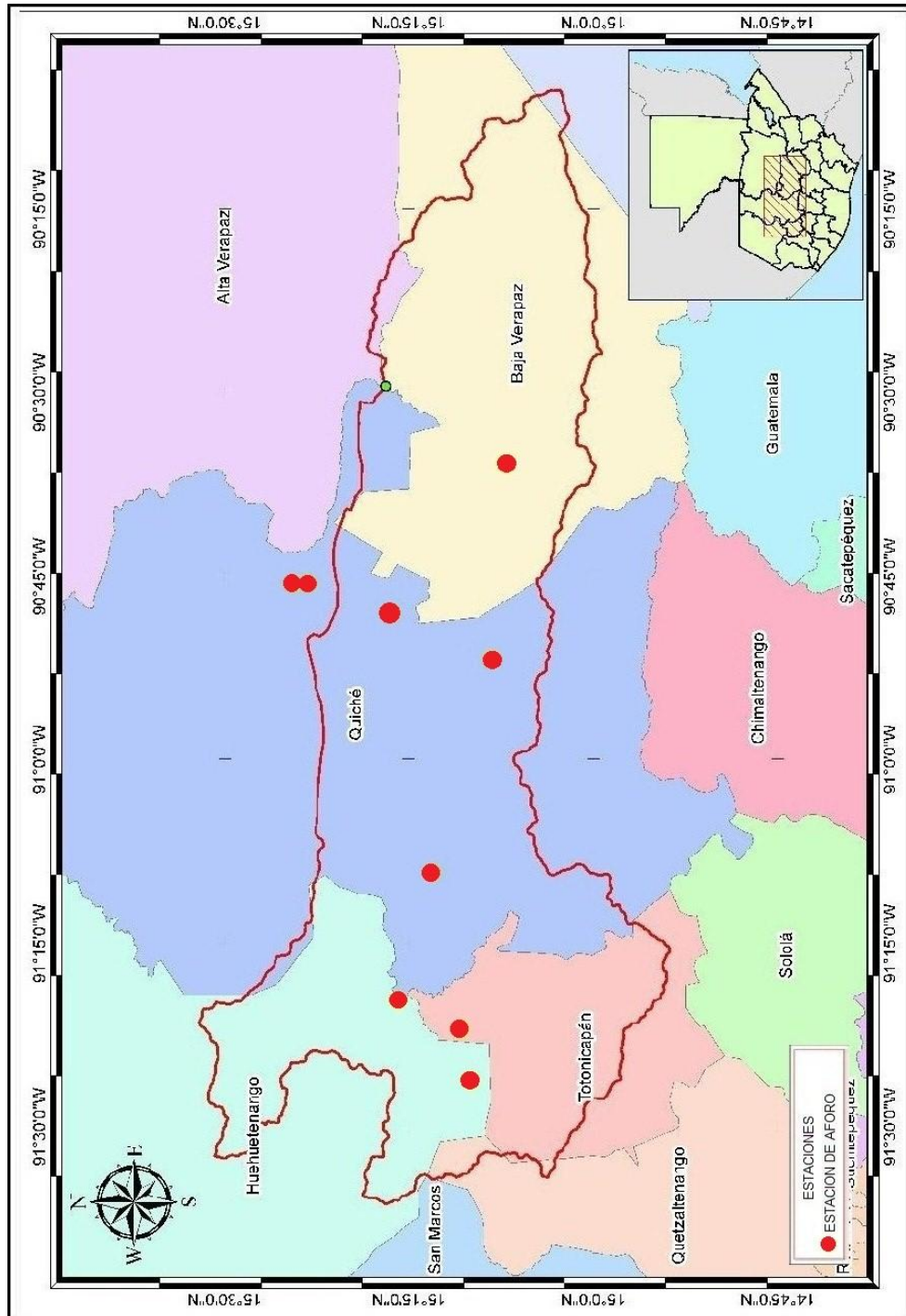
Tabla XIV. **Listado de estaciones de aforo analizadas**

Estación	Latitud	Longitud	Elevación	Primer año	Ultimo año
El Cebollal	15° 12' 30"	90 43' 50"	820,00msnm	1984	2010
Serchil	15° 14' 00"	91 24' 00"	1 610,00msnm	1992	2010
Camalmapa	15° 10' 46"	90 25' 10"	850,00msnm	1987	2010
Chisiguan	15° 17' 40"	91 04' 08"	1 161,00msnm	1969	2010
La Estancia	91° 16' 30"	15 20' 45"	1 600,00msnm	1991	2010
Las Torres	15° 21' 30"	90 39' 30"	568,00msnm	1963	2010
Los Ganchos	15° 30' 09"	90 36' 31"	290,00msnm	1975	2010
Pacaranat	15° 15' 05"	91 19' 05"	1 460,00msnm	1992	2010
Quixal II	15° 29' 35"	90 36' 35"	295,00msnm	1975	2010

Fuente: elaboración propia.

A continuación en la figura 39 se muestra un mapa de la cuenca del río Chixoy con la ubicación de las estaciones de aforo que registran los datos de caudales.

Figura 39. Ubicación de las estaciones de aforo

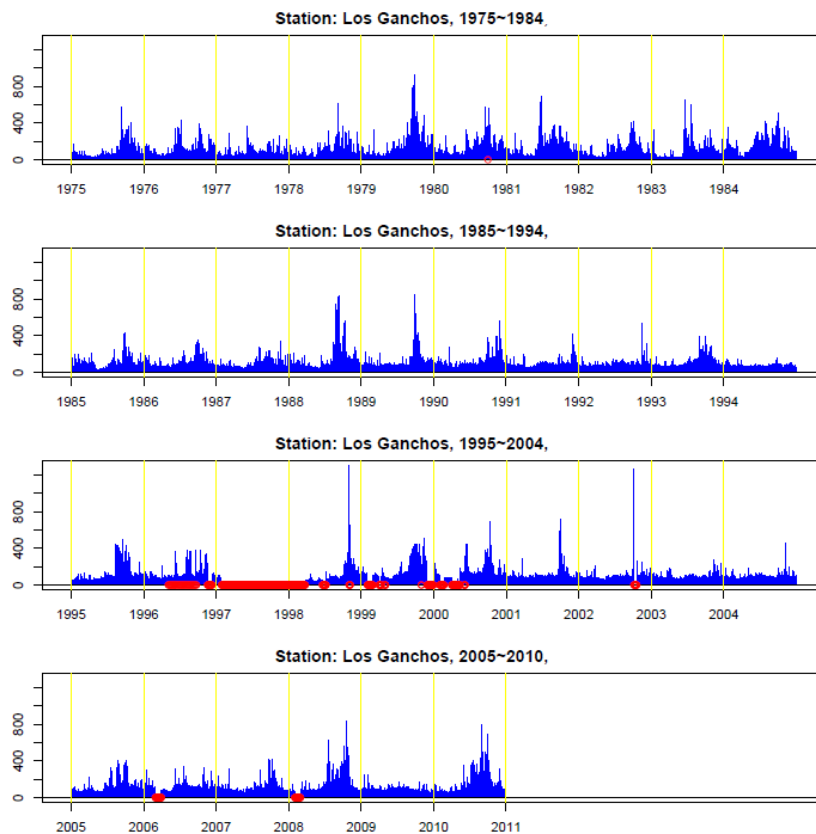


Fuente: elaboración propia.

4.2.1. Rangos y saltos de tiempo en los datos

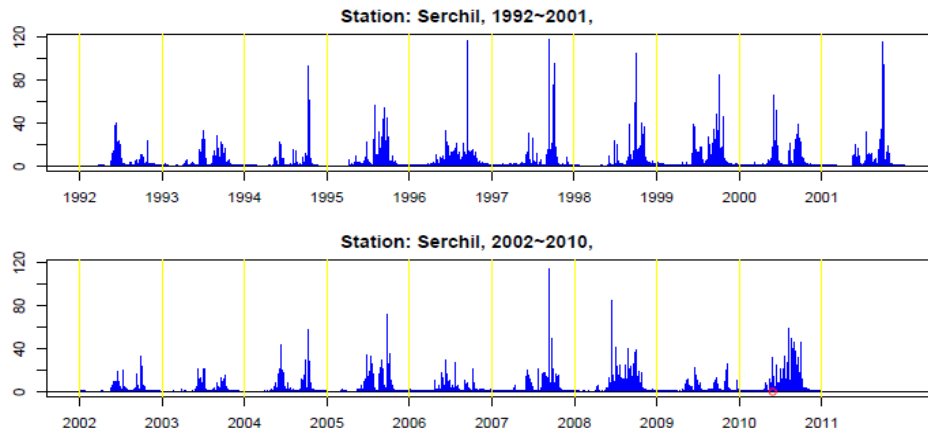
A continuación se presentan unas gráficas de estaciones de caudales donde se muestra el rango de variación en los que actúan los datos y los saltos de tiempo de datos faltantes que por razones desconocidas no se tabularon en su tiempo, ya sea por desactivación temporal de la estación de aforo o por cualquier otro motivo, estas gráficas fueron realizadas siempre con el software Rclimindex que se ha utilizado en el cálculo de los índices anteriores, se mostrarán las gráficas de 3, del total de estaciones para ejemplificarlas.

Figura 40. Caudal medio anual en estación Los Ganchos



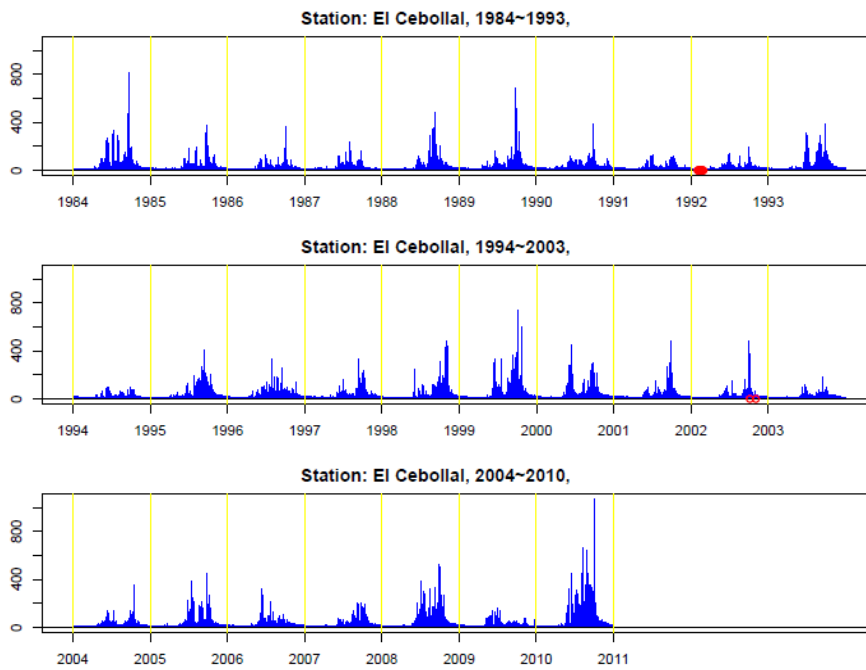
Fuente: elaboración propia.

Figura 41. Caudal medio anual en estación Serchil



Fuente: elaboración propia.

Figura 42. Caudal medio anual en estación El Cebollal



Fuente: elaboración propia.

En las figuras 41 y 42 se puede notar la variabilidad del caudal a lo largo del tiempo de toma de los mismos, se puede notar que existen espacios vacíos y éstos se denotan con círculos vacíos en donde no se posee información alguna. Este tipo de gráfico permite también visualizar la variabilidad del caudal probado en cada año.

4.3. Generación y gráfico de datos

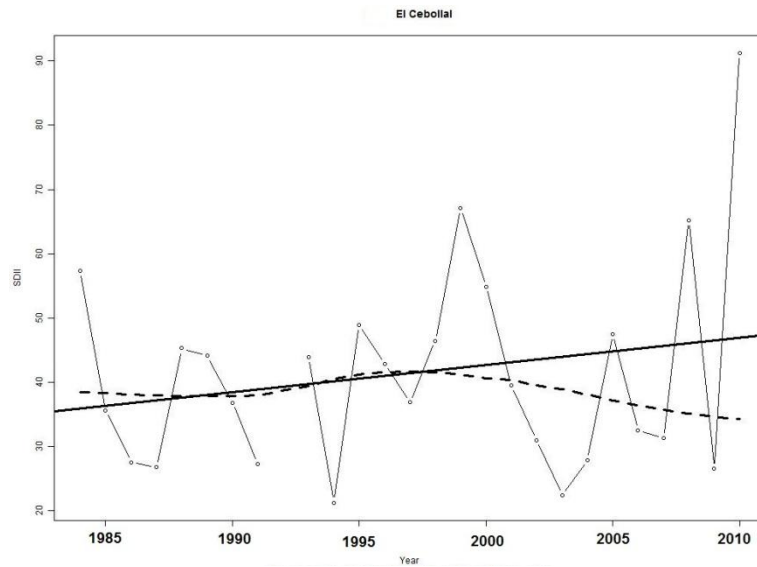
Se tomaron los datos medios diarios del caudal en metros cúbicos por segundo y se determinó el caudal promedio anual. Este caudal será el factor indicador del aumento o decremento del caudal, se realizó el análisis por estación contra el tiempo transcurrido.

En las siguientes figuras se muestra el comportamiento del caudal medio anual en el rango de tiempo indicado en la gráfica y cuál ha sido la tendencia con el paso del tiempo y si el mismo se ha visto afectado por los fenómenos climáticos.

El caudal medio anual es el promedio de caudal medio diario por año que se obtuvo de los datos de las estaciones que se tienen en estudio.

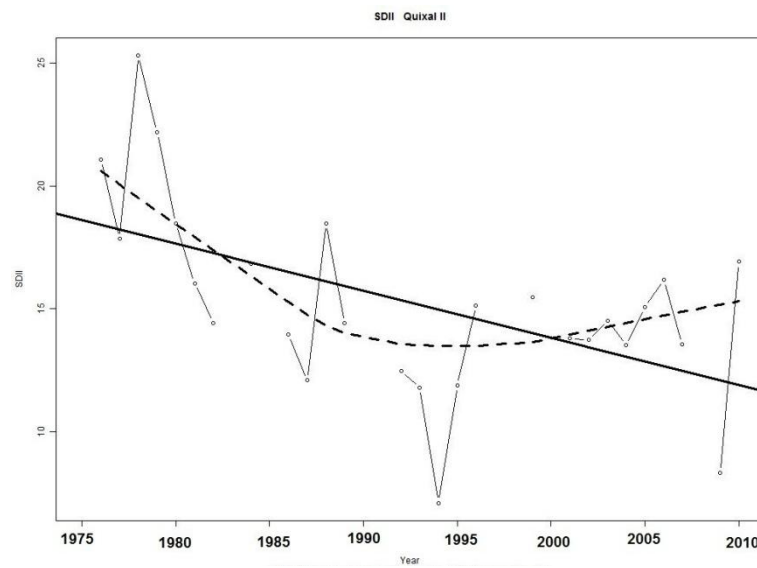
Para propósitos de visualización, se grafican series anuales, junto con tendencias calculadas por regresión lineal de mínimos cuadrados (línea sólida) y regresión lineal con ponderamientos locales (línea punteada) como se muestra en la figura 43,

Figura 43. Caudal medio anual en la estación El Cebollal



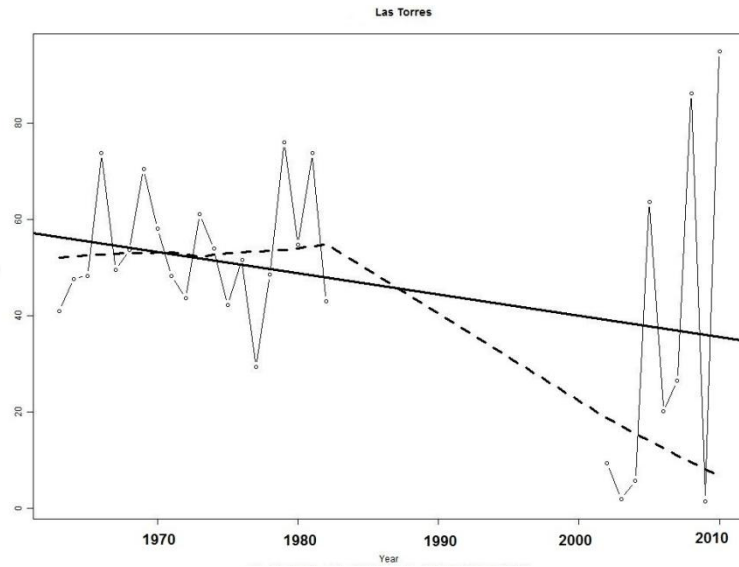
Fuente: elaboración propia.

Figura 44. Caudal medio anual en la estación Quixal II



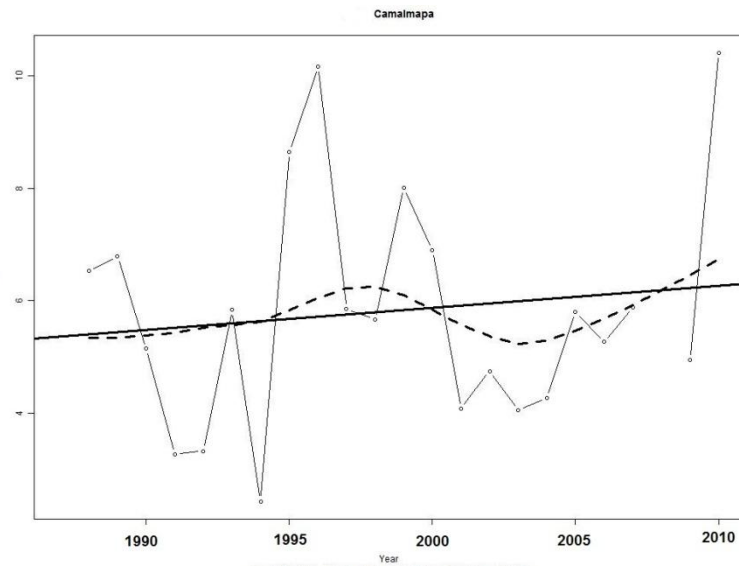
Fuente: elaboración propia.

Figura 45. **Caudal medio anual en la estación Las Torres**



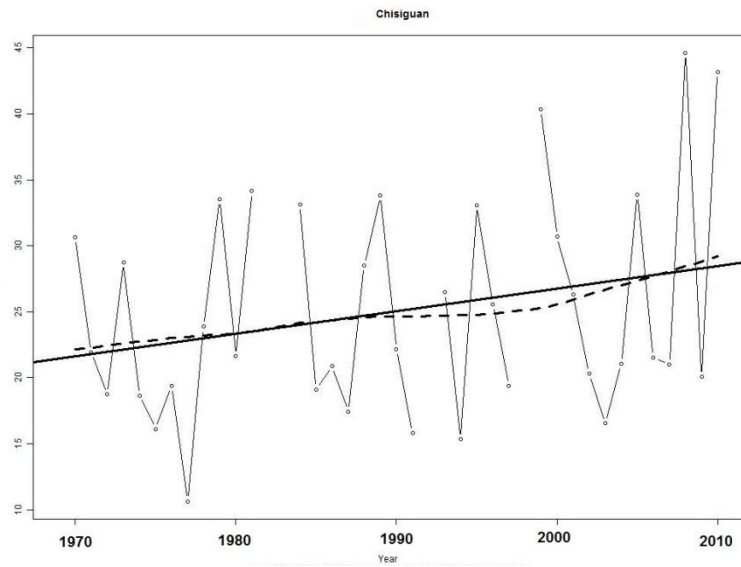
Fuente: elaboración propia.

Figura 46. **Caudal medio anual en la estación Camalmapa**



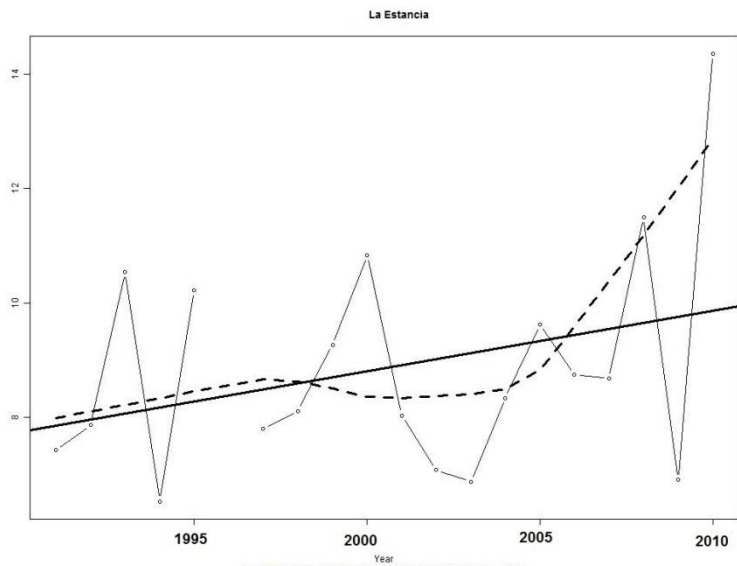
Fuente: elaboración propia.

Figura 47. **Caudal medio anual en la estación Chisiguan**



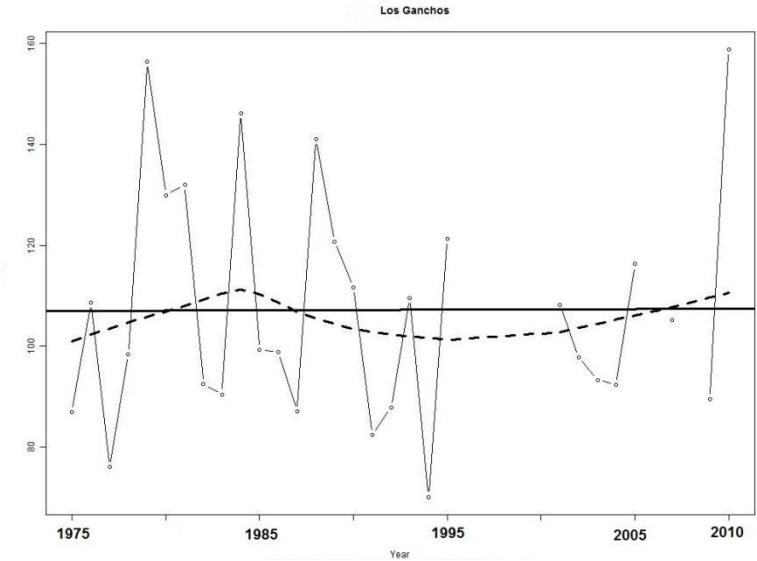
Fuente: elaboración propia.

Figura 48. **Caudal medio anual en la estación La Estancia**



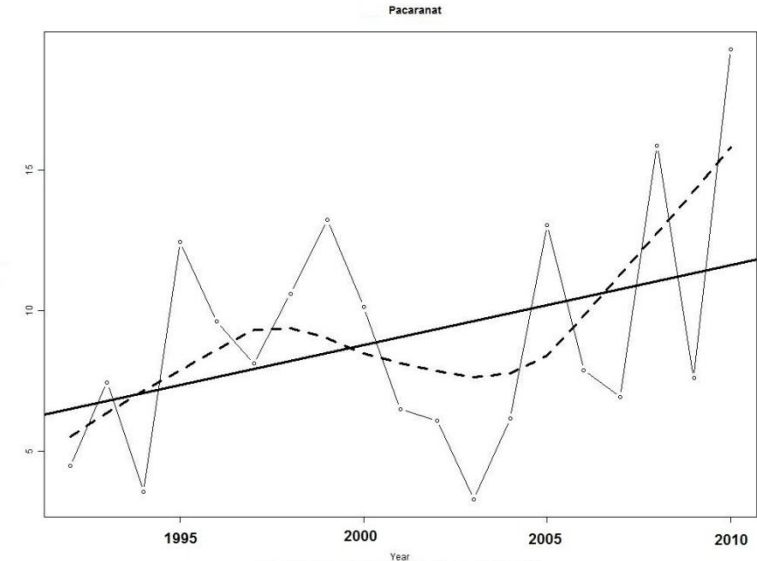
Fuente: elaboración propia.

Figura 49. **Caudal medio anual en la estación Los Ganchos**



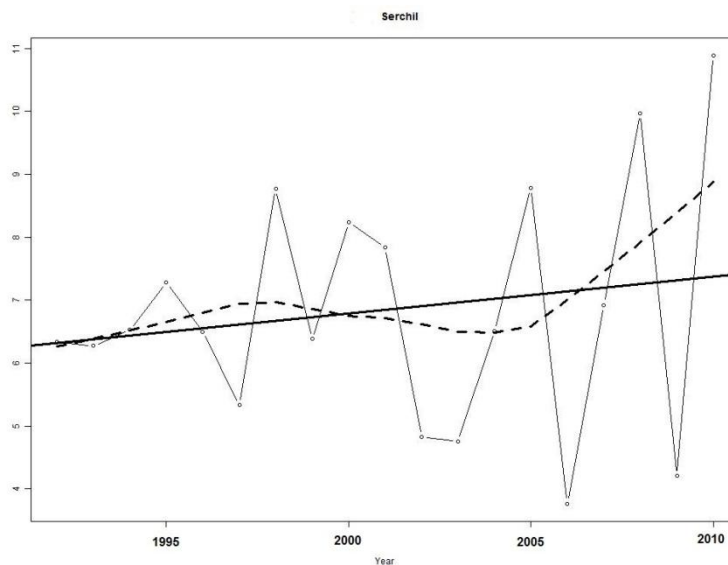
Fuente: elaboración propia.

Figura 50. **Caudal medio anual en la estación Pacaranat**



Fuente: elaboración propia.

Figura 51. Caudal medio anual en la estación Serchil



Fuente: elaboración propia.

4.4. Tendencia y resultados del caudal medio anual

Se mostró mediante algunas gráficas la tendencia del caudal para tres estaciones que se utilizaron para ejemplificar el modo en que se estudió cada estación de la que se tenía información, este análisis presentó una variedad de cambios en los valores extremos en los años de estudio de la cuenca del río Chixoy. Se puede observar que hay una disminución en el caudal para dos estaciones que se ejemplificaron, a continuación se muestra un resumen de los resultados en la tabla XV.

Tabla XV. **Resultados del caudal medio anual**

Estación	Altura (MSNM)	Caudal medio anual m³/año	Tendencia
Camalmapa	850	29,539	+
Chisiguan	1161	62,214	+
El Cebollal	820	154,055	+
La Estancia	1600	38,709	+
Las Torres	568	330,319	-
Los Ganchos	290	2,137	-
Pacaranat	1460	38,046	+
Quixal II	295	70,894	-
Serchil	1610	14,434	+

Fuente: elaboración propia.

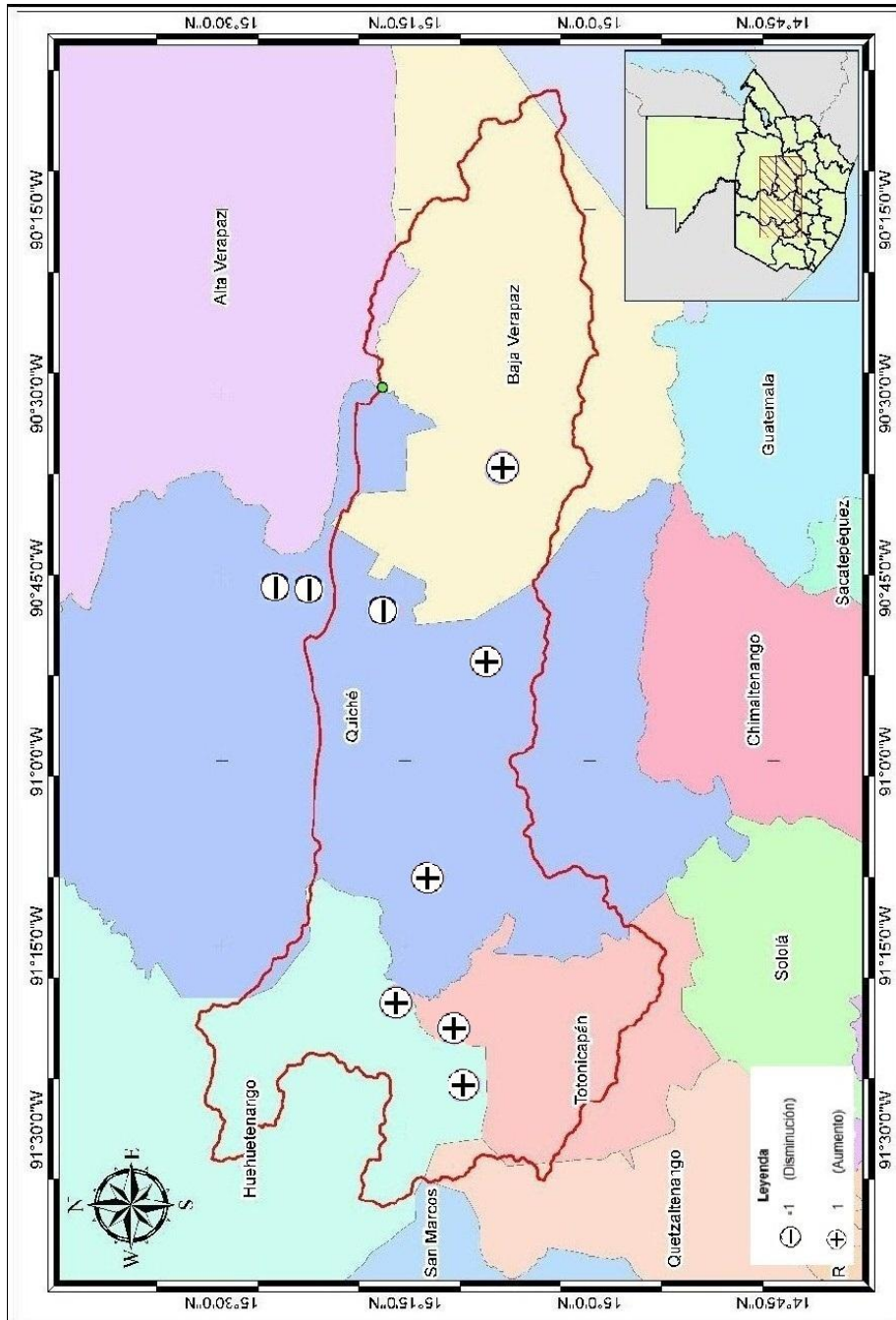
El símbolo (+) significa tendencia positiva, es decir, incremento y (-) tendencia negativa o disminución.

De las estaciones analizadas se puede concluir que una estación no muestra ninguna tendencia significativa, seis estaciones muestran una tendencia al incremento en el caudal y dos estaciones muestran una tendencia al decremento del mismo.

La estación el Cebollal que es la estación que reúne gran parte de la red hidrográfica, previo a ingresar al embalse de Chixoy, muestra una tendencia significativa al incremento del caudal.

A continuación se muestra la figura 52 con las estaciones de aforo y su tendencia indicadora.

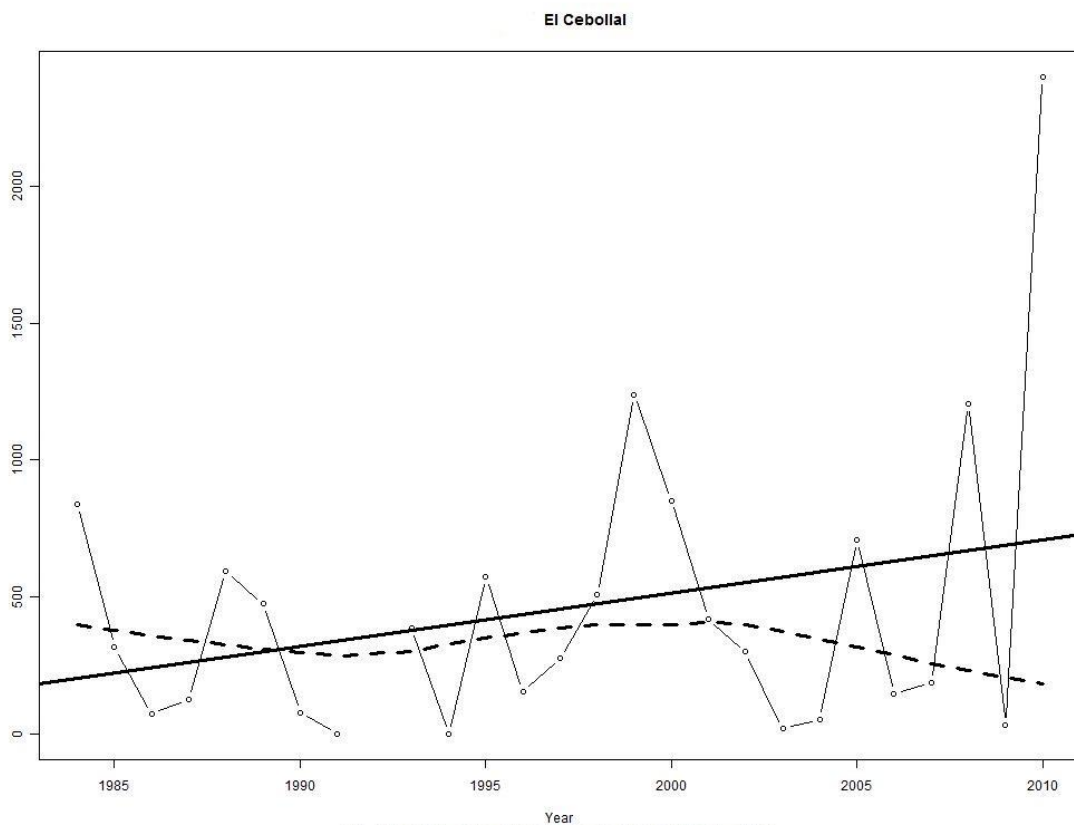
Figura 52. **Indicador relacionado con la tendencia del caudal medio anual**



Fuente: elaboración propia.

En figura 53 se muestra la variación de los caudales intensos que han mostrado la estación El Cebollal que se localiza a la entrada del embalse de la represa del río Chixoy, esta muestra un comportamiento de aumento considerable en la última parte de la década, esto puede indicar que el caudal irá en aumento con el paso del tiempo, causado por las precipitaciones extremas que se dan en el área en temporadas de lluvias. El caudal intenso es el que ocurre cuando el percentil es mayor a 95 por ciento, eso quiere decir que es el mayor.

Figura 53. **Variación del caudal intenso en estación El Cebollal**



Fuente: elaboración propia.

4.5. Comparación del caudal contra la precipitación

En esta sección se hará una comparación y análisis del caudal contra la precipitación en la zona de estudio, se ha podido notar que en la parte norte de la cuenca se ha dado la mayor variabilidad de caudal y precipitación, como se muestra en el capítulo 3, tabla XII, las estaciones Quixal y La Navidad muestran una tendencia negativa considerable y las mismas se ubican al norte de la cuenca, en la tabla XV las estaciones Las Torres y Quixal II muestran una tendencia negativa considerable en el caudal también.

Como se puede observar, los resultados en caudal y precipitación son coherentes, ya que donde se muestra que la precipitación disminuyó el caudal también.

Lo mismo se puede decir para el resto de las estaciones que muestran una tendencia al aumento en la precipitación y en los caudales en la mayor parte de la cuenca, por lo que se puede deducir que las precipitaciones irán en aumento y los caudales también, aunque de una forma no tan significativa, como los resultados negativos en el mismo que tienden a obtener valores más negativos.

CONCLUSIONES

1. En muchas zonas de la cuenca hidrográfica se observa un aumento de la precipitación acumulada durante el año, así mismo de las tormentas o lluvias intensas; se destacan las zonas del sur, este y oeste de la cuenca. Con los resultados se puede revelar que éstas irán en aumento, por lo que se pueden esperar temporadas de lluvia tanto intensas como parcialmente intensas, así también en la parte norte de la cuenca la intensidad de las precipitaciones ha ido disminuyendo y los valores de éstas son considerables.
2. Según los índices de temperatura media, los días son más fríos en las partes altas de la cuenca y más calientes en las partes bajas, las temperaturas tienden a descender, sobresaliendo el norte de la cuenca, donde las temperaturas son muy bajas debido a la altura sobre el nivel del mar.
3. El caudal, en la mayoría de las estaciones de aforo, ha mostrado incrementos en el mismo, sin embargo, en la parte norte de la cuenca éste se ha disminuido de gran manera. Se observó que en la estación El Cebollal que se encuentra a la salida del embalse de la central hidroeléctrica, muestra un incremento que se podría considerar como significativo y éste a su vez se consideraría para un futuro cálculo en el balance hídrico para el embalse de la central hidroeléctrica.

4. La precipitación y caudal tienen correlación entre sí, como se observó anteriormente mediante las tablas de resultados. Se pudo constatar que en la parte norte de la cuenca existe una disminución en las intensidades de lluvias y éstas, a su vez, concuerda con el caudal que ah disminuido y a su vez en la parte sur, este y oeste de la cuenca, en donde la precipitación ah mostrado un incremento, el caudal en las estaciones de esta zona, esto indica que los valores de las estaciones que se estudiaron son homogéneas unas con otras y sus posibilidades de variaciones en datos son mínimos.

RECOMENDACIONES

1. Es conveniente continuar tomando datos tanto de precipitación pluvial, caudales y temperaturas promedias en zonas estratégicas de esta cuenca hidrográfica para determinar el comportamiento de estos fenómenos climáticos en forma eficiente.
2. Que la Facultad de Ingeniería, a través de la escuela de Ingeniera Civil, esté más atenta al estudio de estos fenómenos atmosféricos para el resto de cuencas que conforman el territorio nacional, con el fin de tener suficiente información que permita al futuro profesional interesarse por el estudio de estos fenómenos que conforman el clima de una cuenca o región.
3. Monitorear constantemente todas aquellas estaciones que se encuentran esparcidas en el área de la cuenca hidrográfica del río Chixoy con el fin de darles mantenimiento y calibrarlas constantemente, para que la información sea confiable.

BIBLIOGRAFÍA

1. AGUILAR, E. *Changes in precipitation and temperature extremes in Central America and northern South America. 1961–2003*, J. Geophys. Res, 2005. 15 p.
2. BUCHDAHL, Joe. *A review of contemporary and prehistoric global climate change*. Manchester: Manchester Metropolitan University, 1999. 107 p.
3. *Climate Research Branch Environment Canada Downs view: Manual del Usuario RClimDex (1.0)*. Canadá: CIIFEN, 2004. 22 p.
4. COSTA POSADA, Carlos. La adaptación al cambio climático en Colombia. Revista Virtual REDESMA, Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM, octubre 2008. 80 p.
5. CHIVELET J, Martin, *Cambios Climáticos. Una aproximación al sistema Tierra*. Colombia: Ediciones libertarias. 1999. 467 p.
6. FERNÁNDEZ CARRASCO, Pedro. *Estudio del impacto del cambio climático sobre los recursos hídricos: Aplicación en diecinueve pequeñas cuencas en España*. Tesis Doctoral. España: Universidad Politécnica de Madrid, 2002. 267 p.

7. HUGGETT, R. J. *Climate, earth processes and earth history*. England: Springer-Verlag, 1991. 367 p.
8. LAL, M. K. K. *Vulnerability of rice and wheat yields in NW India to future changes in climate*. *Agric. Forest Meteorol*, 1998. vol. 89: 157 p.
9. LAMBERT, C. C; G. LAMBERT. *Non indigenous ascidians in southern California harbors and marinas*. *Mar. Biol. (Berl.)*, 1998. vol. 130: 765 p.
10. Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación. *Recursos Hídricos de Guatemala* [en línea] MAGA [ref. 3 de febrero de 2012] Disponible en Web: <http://www.infoiarna.org.gt/guateagua/subtemas/4/cuenca/salinas.htm>.
11. MAYORGA M., Ruth; HURTADO M., Gonzalo. *Evidencias del cambio climático en Colombia en base a información estadística*. Colombia: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM, 2010. 25 p.
12. Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales. *1ª Comunicación sobre cambio climático*. Guatemala: MARN, 2001. 124 p.
13. Proyecto Fineans, USAC. *Cuencas hidrográficas de Guatemala* [en línea] [ref. 2 de febrero de 2012] Disponible en Web: http://fineans.usac.edu.gt/wiki/index.php/Cuencas_Jose_por_cientoC3_por_cientoA9_Ochaeta.

14. SHINE, K.P. et al. *Radiative forcing of climate: Climate Change: the IPCC Scientific Assessment*. USA: Cambridge University Press, 1990. 178 p.
15. *The Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC. Climate Change 2007: the Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment*. USA: Cambridge University Press, 2007. 94 p.
16. WILLIAMS, G.E. *Possible relation between periodic glaciation and the flexure of the Galaxy*. *Earth Planet. Sci. Lett*, 1975. vol. 26, 576 p.

