

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA
SISTEMA DE ESTUDIOS DE POSGRADO

**RESPUESTA DE LA HIDROLOGÍA SUPERFICIAL DE LA CUENCA DEL RÍO
TEMPISQUE A LA VARIABILIDAD CLIMÁTICA Y CAMBIO DE COBERTURA
DE LA TIERRA**

Tesis sometida a la consideración de la Comisión del Programa de Estudios de Posgrado en
Ciencias de la Atmósfera para optar por el grado y título de Maestría Académica en
Hidrología

LUIS EDUARDO QUESADA HERNÁNDEZ

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, Costa Rica

2019

DEDICATORIA

A toda persona que le pueda ser útil.

AGRADECIMIENTOS

Al Ph.D Hugo Hidalgo León por todo su tiempo, sus consejos y paciencia para guiarme en muchos de los cursos de la maestría y durante la elaboración de esta tesis. Todo este tiempo como profesor me ha enseñado a ser un mejor profesional, buscar siempre la excelencia y a dar lo mejor de mi sin importar la tarea que tenga por delante. Siempre le estaré agradecido.

Al Ph.D Christian Birkel Dostal por ayudarme en todo el proceso de calibración del modelo hidrológico, por sus consejos y siempre estar atento a brindarme su tiempo para realizar esta investigación. Por apoyarme en la recolección de datos y darme tantos conocimientos sobre el modelado hidrológico.

A la M.Sc Paula Marcela Pérez Briceño por enseñarme a ser un mejor geógrafo, por todas sus críticas a mi cartografía siento que ahora sí sé cómo se hacen los mapas. Gracias por todos su tiempo, comentarios, críticas y sugerencias.

Al Ph.D Jorge Amador Astúa pese a que fue profesor solo en un curso de la maestría, siempre sus consejos, entusiasmo y la excelente forma de explicar diferentes temas. Definitivamente hizo que creciera en mí un mayor interés por las ciencias de la atmósfera.

A la Ph.D Ana María Durán Quesada por todos sus consejos en las etapas iniciales de esta investigación, por su guía y ayudarme a darle forma a todas las ideas que tenía al inicio.

A la Universidad de Costa Rica y al Centro de Investigaciones Geofísicas, así como los proyectos: **B7507 “Efectos del cambio climático observado sobre el ciclo hidrológico y la disponibilidad de recurso hídrico en la Región Chorotega”, B6143 “Procesos hidrometeorológicos en el Corredor Seco Centroamericano” y 805-B7-286 “Funding proposal for the advancing development and climate change resilience in the Central American Dry Corridor”.**

A mis amigos y colegas.

Esta tesis fue aceptada por la Comisión del Programa de Estudios de Posgrado en Ciencias de la Atmósfera de la Universidad de Costa Rica, como requisito parcial para optar por el grado y título de Maestría Académica en Hidrología

PhD. Eric Alfaro Martínez
Representante del Decano del Sistema de Estudios de Posgrado

PhD. Hugo Hidalgo León
Director de Tesis

PhD. Christian Birkel Dostal
Asesor

M.Sc Paula Marcela Pérez Briceño
Asesora

PhD. Ana María Durán Quesada
Directora del Programa de Posgrado en Ciencias de la Atmósfera

Lic. Luis Eduardo Quesada Hernández
Candidato

RESUMEN

La cuenca del río Tempisque, ubicada en Guanacaste, Costa Rica, ha experimentado cambios en el comportamiento de la precipitación y caudales durante las últimas décadas. Estos cambios se originan por distintos fenómenos de variabilidad climática que pueden provocar aumentos o disminuciones en la precipitación en diversas escalas de tiempo lo que conlleva un impacto en la hidrología superficial.

Sin embargo, estos no son los únicos cambios que se observan en la cuenca, ya que, con el desarrollo de actividades agropecuarias, las coberturas de la tierra han ido variando entre bosque, pastos y cultivos. Esto se refleja en el comportamiento hidrológico de la cuenca, asociado principalmente a los patrones de infiltración y flujos superficiales.

Entender que la hidrología superficial de una cuenca no solo depende de factores físicos como la variabilidad climática, sino que existe un factor antropogénico que muchas se deja de lado, es el principal objetivo de este trabajo. Esta investigación se divide en los siguientes capítulos:

El primer capítulo presenta el planteamiento del problema, la justificación de la investigación, la descripción hidrometeorológica del área de estudio y los antecedentes de trabajos realizados en temáticas de modelado hidrológico enfocado en el efecto de cambios de cobertura de la tierra, así como estudios hidrometeorológicos que se han elaborado en la cuenca del río Tempisque.

En el segundo capítulo se abordan los datos utilizados en la tesis, se describen los métodos utilizados, proceso de creación de datos y calibración del modelo hidrológico.

En el tercer capítulo se analizan las tendencias de precipitación mediante el método Mann-Kendall para distintas escalas de tiempo. Se encuentra que existe una tendencia a menores montos de precipitación durante las épocas estudiadas. Esta tendencia podría estar asociada a la dinámica de los vientos y a la geomorfología de la cuenca.

El cuarto capítulo, mediante un análisis de componentes principales, se analizan los fenómenos de variabilidad climática y cómo estos modifican el comportamiento de la precipitación en distintos periodos de rezago. Se establece que la precipitación de la cuenca se modifica principalmente por tres fenómenos: Chorro de Bajo Nivel del Caribe, Oscilación Multidecadal del Atlántico y al fenómeno de El Niño-Oscilación del Sur.

En el quinto capítulo se utiliza el modelo HBV-light con el fin de identificar el efecto de diferentes coberturas de la tierra en la hidrología superficial de la cuenca. Se encuentra que para eventos de escalas de tiempo cortas, a una mayor infiltración, los caudales pico serán menores y habrá un aumento en los flujos base. En escalas de tiempo medias (meses) existe mayor caudal durante los meses de la época seca en comparación con coberturas donde la infiltración es menor. Para el caso de escalas de tiempo largas (años) durante años El Niño, hay más caudal para coberturas con una infiltración mayor.

Para el sexto capítulo, se mencionan las conclusiones de la investigación, así como recomendaciones que se pueden seguir para futuros trabajos en esta temática.

ABSTRACT

The basin of Tempisque river, located in Guanacaste, Costa Rica, has experienced changes in the behavior of the precipitation and flow in the last decades. These changes are originated by different phenomena of climate variability that can provoke rising or decrease in the precipitation at various scales of time that lead to an impact in the hydrology.

However, these are not the only changes that are observed in this basin, the land cover has been varying between forest, pasture and crops with the development of agricultural activities. This is reflected in the hydrological behavior of the basin, mainly associated with infiltration patterns and surface flows.

The main objective of this work is to understand that the surface hydrology of a basin does not only depends on physical factors such as climate variability, but also that there is an anthropogenic factor that is often left aside. The investigation is divided into the following chapters:

The first chapter presents the problem statement, the justification of the research, the hydrometeorological description of the study area and the background of work carried out on hydrological modeling topics focused on the effect of changes in land cover, as well as hydrometeorological studies that have been developed in the basin of Tempisque river.

The second chapter deals with the data used in the thesis, describes the methods used, the process of creating data and calibrating the hydrological model.

In the third chapter, precipitation trends are analyzed through the Mann-Kendall method for different time scales. It is found that there is a tendency to lower amounts of precipitation during the studied periods. This trend could be associated with the dynamics of the wind and the geomorphology of the basin.

In the fourth chapter, through an analysis of the principal component method, the phenomena of climatic variability is analyzed and its modification of the behavior of the precipitation at different lags. It is established that the precipitation of the basin is modified mainly by three phenomena: Caribbean Low-Level Jet, Atlantic Multidecadal Oscillation and El Niño-Southern Oscillation Phenomenon.

In the fifth chapter the model HBV-light is used in order to identify the effect of different land coverings in the surface hydrology of the basin. It was found that for events of short time scales, at greater infiltration rates, peak flows will be lower and there will be an increase in base flows. In average time scales (months) there is a greater flow during the months of the dry season compared to the coverages where the infiltration is lower. For the case of long-time scales (years) during El Niño years there is greater flow for forest coverages with a greater infiltration.

For the sixth chapter, the conclusions of the research are mentioned, as well as recommendations that can be followed for future works in this area.

ÍNDICE

Dedicatoria.....	i
Agradecimientos.....	ii
Resumen.....	iv
Abstract.....	v
Capítulo 1: Introducción.....	1
1.1 Problema.....	3
1.2 Justificación.....	4
1.3 Descripción del área de estudio.....	7
1.4 Descripción de variables físicas de la cuenca del Tempisque.....	10
1.5 Antecedentes.....	12
1.5.1 Consideraciones hidrológicas.....	12
1.5.2 Metodologías para abordar los cambios en una cuenca hidrológica.....	15
1.5.3 Estudios meteorológicos e hidrológicos en la cuenca del Tempisque.....	18
1.6 Objetivos.....	20
1.6.1 Objetivo General.....	20
1.6.2Objetivos específicos.....	20
Capítulo II: Datos y métodos.....	21
2.1 Datos y procesamiento.....	21
2.1.1 Datos de precipitación.....	21
2.1.2Proceso validación de datos.....	22
2.1.3 Datos fenómenos climáticos gran escala.....	24
2.1.4 Procesamiento de imágenes satelitales.....	25
2.2 Métodos.....	26
2.2.1 Análisis de tendencias.....	26

2.2.2 Efecto de la variabilidad climática en la precipitación	27
2.2.3 Efecto del cambio de cobertura de la tierra en la hidrología.....	29
2.2.3.1 Descripción del modelo hidrológico	30
2.2.3.2) Rutina humedad del suelo.....	30
2.2.3.3) Descripción de la metodología utilizada en el modelo	32
2.2.4) Calibración del modelo.....	32
Capítulo III: Análisis de tendencias para la cuenca del río Tempisque.....	36
Capítulo IV: Variabilidad Climática en la gran cuenca del Río Tempisque	42
4.1 Distribución espacial de los componentes principales rotados.....	42
4.2 Análisis de los componentes principales obtenidos.....	43
4.3 Correlaciones entre los índices y el primer CPR.	46
4.4 Correlaciones entre índices y el segundo CPR.....	49
4.5 Correlaciones entre índices y el tercer CPR.....	50
Capítulo V: Efecto del cambio de la cobertura de la tierra en la hidrología superficial de la cuenca alta del río Tempisque.....	52
5.1 Cobertura de la tierra para la cuenca alta del río Tempisque.....	52
5.2 Efecto del cambio de la cobertura de la tierra en la hidrología en caudales pico	55
5.3 Efecto del cambio de cobertura en escalas mensuales.....	58
5.4 Efecto del cambio de cobertura en escalas anuales	59
Capítulo VI: Conclusiones y recomendaciones.....	62
6.1 Conclusiones	62
6.2 Recomendaciones	65
Bibliografía.....	66

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1: Resultado de la validación de datos observados de la base de la base de datos NUMEROSA y datos de CHIRPS.....	24
Tabla 2.2: Índices utilizados para el análisis de variabilidad climática.....	25
Tabla 2.3: Ejemplo de tablas de correlación.....	29
Tabla 2.4: Rango de parámetros utilizados para calibrar el modelo HBV-light versión estándar.....	34
Tabla 4.1: Correlaciones entre los componentes principales rotados y los índices de distintos fenómenos de variabilidad climática a escala mensual.....	44
Tabla 4.2: Correlaciones entre los componentes principales rotados y los índices de distintos fenómenos de variabilidad climática a escala anual.....	45
Tabla 4.3: Correlaciones con significancia de 0.95 entre el primer componente rotado y la Oscilación Multidecadal del Atlántico.....	46
Tabla 4.4: Correlaciones con significancia de 0.95 entre el primer componente rotado y el CLLJ.....	47
Tabla 4.5: Correlaciones con significancia de 0.95 entre el primer componente rotado y el índice multivariado del ENOS.....	47
Tabla 4.6: Correlaciones con significancia de 0.95 entre el primer componente rotado y el índice de latitud del centro de masa de la ZCIT.....	48
Tabla 4.7: Correlaciones con significancia de 0.95 entre el primer componente rotado y el índice de longitud del centro de masa de la ZCIT.....	48
Tabla 4.8: Correlaciones con significancia de 0.95 entre el primer componente rotado y el índice de precipitación del centro de masa de la ZCIT.....	49
Tabla 4.9: Correlaciones con significancia de 0.95 entre el primer componente y el índice de dispersión del centro de masa de la ZCIT.....	49
Tabla 4.10: Correlaciones con significancia de 0.95 entre el tercer componente rotado y el índice del CLLJ.....	50

Tabla 4.11: Correlaciones con significancia de 0.95 entre el tercer componente rotado y el índice Multivariado del ENOS.....	51
Tabla 4.12: Correlaciones con significancia de 0.95 entre el tercer componente rotado y el índice latitudinal del centro de masa de la ZCIT.....	51
Tabla 4.13: Correlaciones con significancia de 0.95 entre el tercer componente rotado y la dispersión del centro de masa de la ZCIT.....	52
Tabla 4.14: Correlaciones con significancia de 0.95 entre el tercer componente rotado y la precipitación del centro de masa de la ZCIT.....	52
Tabla 5.1: Área en kilómetros cuadrados de cada una de las coberturas de la tierra según el nivel de elevación utilizado para dividir la cuenca del alto Tempisque.....	53
Tabla 5.2: Parámetros utilizados para analizar significancia de los cambios en los caudales asociados a cambios en las coberturas de la tierra.....	61

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Datos de SPI para 12 meses en la estación Liberia para el periodo 1970-1999.....	4
Figura 1.2: Distribución del CSC en condiciones extremo-secas, extremo-húmedas y bajo condiciones promedio.....	6
Figura 1.3: Área de estudio, cuenca del Río Tempisque.....	9
Figura 1.4: Precipitación promedio mensual en milímetros para la estación Liberia.....	10
Figura 1.5: Caudales promedio mensual en metros cúbicos por segundo para el periodo 1979-2010, estación Guardia.....	11
Figura 1.6: Evapotranspiración potencial promedio mensual en milímetros para la estación Liberia.....	12
Figura 1.7: Caudales promedio anuales en la estación Guardia vs Anomalía de Temperatura Superficial del mar, región 3-4 ENOS.....	13
Figura 1.8: Comportamiento de la escorrentía superficial bajo diferentes escenarios de cobertura de la tierra.....	17
Figura 2.1: Distribución de base de datos NUMEROSA y grilla de datos CHIRPS.....	21
Figura 2.2: Modelo HBV-light, rutinas de suelo y agua subterránea.....	31
Figura 2.3: Banda con las mejores 100 simulaciones y los datos observados por la estación Guardia.....	35
Figura 3.1: Valor z anual según el método de Mann-Kendall, periodo 1970-2010.....	36
Figura 3.2: Valor z época seca (diciembre-abril) según el método de Mann-Kendall, periodo 1970-2010.....	37

Figura 3.3: Valor z época lluviosa (mayo-noviembre) según el método de Mann-Kendall, periodo 1970-2010.....	38
Figura 3.4: Tendencias anuales de precipitación y temperatura para Centroamérica en el periodo 1970-1999.....	39
Figura 3.5: Anomalías de precipitación entre la década 1970 y 2000 según datos de GPCP.....	40
Figura 3.6: Diferencia de magnitud (ms^{-1}) y dirección del viento entre la década de 1970 y 2000.....	41
Figura 4.1: Correlación entre la precipitación y el primer, segundo y tercer componente principal rotados.....	42
Figura 4.2: Varianza explicada por los componentes principales rotados.....	43
Figura 5.1: Coberturas de la tierra empleadas en el modelado hidrológico para los años 1989, 1999, 2009, 2014 y 2017.....	54
Figura 5.2: Hidrogramas obtenidos del modelo hidrológico HBV-light para la cobertura de 1989 (baja infiltración) y 2009 (alta infiltración) para el periodo setiembre-octubre de 1999.....	56
Figura 5.3: Comportamiento de la escorrentía media mensual para diferentes escenarios de la tierra.....	58
Figura 5.4 Caudal total anual y el efecto de diferentes tipos de cobertura para el periodo 1990-2003.....	60

LISTA DE ABREVIATURAS

AMO: Atlantic Multi-decadal Oscillation
CHIRPS: Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data
CLLJ: Caribbean Low-Level Jet
CPR: Componente Principal Rotado
CSC: Corredor Seco Centroamericano
DOS1: Dark Object Subtraction Tool
ENOS: El Niño-Oscilación del Sur
ENSO El Niño-Southern Oscillation
GLUE: Generalized likelihood uncertainty estimation
GPCP: Global Precipitation Climatology Project
HBV: Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning
ICE: Instituto Costarricense de Electricidad
IMN: Instituto Meteorológico Nacional
INEC: Instituto Nacional de Estadística y Censos
MEI: Multivariate ENSO index
NS: No Significativo (estadísticamente)
PDO: Pacific Decadal Oscillation
SCP: Semi-Automatic Classification Plugging
SPI: Standardized Precipitation Index
SWAT: Soil and Water Assessment Tool.
ZCIT: Zona de Convergencia Intertropical
ZCITLAT: Latitud Centro de masa de la Zona de Convergencia Intertropical
ZCITLON: Longitud Centro de masa de la Zona de Convergencia Intertropical
ZCITP: Precipitación en el Centro de masa de la Zona de Convergencia Intertropical
ZCITSPR: Dispersión del Centro de masa de la Zona de Convergencia Intertropical

Capítulo 1: Introducción

El uso de aguas superficiales, como ríos o lagos, es fundamental para el desarrollo de distintas actividades socioeconómicas. Sectores productivos como la industria, agricultura, turismo o generación de energía eléctrica dependen del recurso hídrico para su adecuado funcionamiento.

Guanacaste es la provincia más seca de Costa Rica, cuya precipitación anual promedio oscila entre 1500 mm y 2500 mm (IMN, 2008), además esta área forma parte de la región denominada Corredor Seco Centroamericano (van der Zee et al., 2012), el cual es un área en la costa Pacífica de América Central propensa a las sequías y una menor precipitación en comparación con el resto de la región (Hidalgo et al., 2019).

En esta provincia se encuentra la cuenca del río Tempisque, la cual tiene gran importancia para Costa Rica dada la cantidad de actividades económicas, principalmente agrícolas, que en ella se desarrollan. Del cauce del río Tempisque se extrae una importante cantidad de agua para riego de cultivos como el arroz, caña de azúcar y melón (Mora, 2016) así como para distintas actividades inmobiliarias (Guzman-Arias, 2013), por lo que las aguas superficiales de esta cuenca son fundamentales para el apropiado desarrollo socio-económico de la provincia.

Sin embargo, se ha determinado que modos de variabilidad climática como El Niño-Oscilación del Sur (ENOS), generan mucha influencia en esta región (Bonilla, 2014; Calvo et al., 2018). De acuerdo con Fernández & Ramírez (1991) durante una fase cálida del ENOS se observa una disminución en la cantidad de lluvia y una modificación en su distribución espacial. De manera que El Niño se ha asociado a una disminución en las lluvias provocando sequías meteorológicas, agrícolas y algunas veces hidrológicas. Esto repercute en la economía de la región, la cual en su mayoría está dedicada a actividades agrícolas y turísticas que requieren del agua para su desarrollo.

Aunado a lo anterior, existe toda una dinámica asociada a la influencia del cambio de cobertura de la tierra sobre el ciclo hidrológico que ha sido poco estudiada; este factor, altera

la escorrentía superficial de una cuenca y por ende el agua disponible para el desarrollo de las diferentes actividades económicas que se realizan.

Por ello, entender el efecto combinado de la variabilidad climática junto con los cambios en la cobertura de la tierra resulta fundamental para un adecuado proceso de planificación del recurso hídrico, tomando en cuenta los cambios en la precipitación y la contribución de cómo las actividades antrópicas afectan la dinámica hidrológica de la cuenca.

Por lo anterior, como primer punto de esta investigación se caracteriza el comportamiento de la precipitación de la cuenca del Río Tempisque. Utilizando un análisis de tendencias se podrá identificar si hay un aumento o una disminución de esta variable y los sitios en los que esto se está dando con una significancia estadística.

Posteriormente se analizará el efecto de la variabilidad climática sobre la precipitación utilizando el método de componente principales. Esto permite reconocer cuales mecanismos o fenómenos modifican con mayor fuerza la precipitación en un momento dado y los sitios en los que estos patrones se dan.

Finalmente, mediante un modelo hidrológico, se analiza el impacto de los cambios de cobertura en la tierra en los caudales de la cuenca alta del río Tempisque. Utilizando diferentes imágenes satelitales, se elaboran coberturas de la tierra en distintos años (1989, 1999, 2009, 2014 y 2017) lo que permite tener varios escenarios de cobertura de la tierra con el fin de identificar de qué manera los caudales pueden cambiar en escalas diarias y mensuales.

Mediante este análisis se busca establecer una conexión entre las variables antrópicas y físicas que modifican el comportamiento de los caudales. Con esta información se facilitará los procesos de toma de decisiones en gobiernos locales, así como instituciones gubernamentales, relacionadas con los usos del suelo, gestión de recurso hídrico y las diferentes actividades socio-económicas que se realicen en la cuenca. Por ello, distintos procesos de planificación territorial tendrían un mayor sustento científico asociado a los procesos que modifican el comportamiento hidrológico de una cuenca.

1.1 Problema

Estudios anteriores han demostrado que la variabilidad climática en una cuenca tiene una alta capacidad de modificar el comportamiento normal de la precipitación y por consiguiente los caudales que dependen de ella (Wang et al., 2013; Ryberg et al., 2014).

Pese a ello, la variabilidad climática no es el único fenómeno capaz de modificar el comportamiento de los caudales ya que los cambios en la cobertura de la tierra generan un impacto en diferentes parámetros hidrológicos como la infiltración de los suelos, asociado por ejemplo, a una mayor impermeabilización. Esto conlleva a modificaciones en la escorrentía superficial, así como en los flujos subsuperficiales y flujos base. Todos estos cambios se verán reflejados en el comportamiento final del caudal.

Por lo anterior, en esta investigación se busca resolver las siguientes preguntas:

¿Cuál fenómeno, ya sea variabilidad climática o cambios de cobertura de la tierra, tiene una mayor capacidad de modificar el comportamiento de los caudales en la cuenca del Río Tempisque?

¿De qué forma los cambios de cobertura de la tierra modifican los caudales en distintas escalas de tiempo (diarias, mensuales y anuales)?

1.2 Justificación

La cuenca del río Tempisque y en general todo Guanacaste, es la zona de Costa Rica donde se presenta los menores montos de precipitación en comparación con el resto del país, con precipitaciones que rondan los 1500 mm anuales (Arias-Rodríguez, 2012). Paradójicamente, las actividades agrícolas bajo un régimen de secano son muy frecuentes en la región. Dentro de los principales cultivos destaca la siembra de arroz, caña de azúcar, melón para exportación y algodón (Mora, 2016). De todos los cultivos antes mencionados, son pocos los que cuentan con un sistema de regadío, por lo que existe una alta dependencia de las lluvias para definir fechas de siembra y cosecha.

Cuando existe alguna modificación en el patrón de las lluvias, ya sea en el inicio o final, así como la intensidad de esta, existe una alta probabilidad de impactos en el sector agropecuario y por consiguiente daños en la economía de las personas que se dedican a estas actividades (Bonilla, 2014). Esto no solo afecta a los agricultores que tienen siembras en secano, ya que los productores que utilizan sistemas de regadío también se verían afectados por disminuciones en los caudales de los ríos que brindan el agua a los canales de regadío.

En esta cuenca, la presencia de fenómenos de variabilidad climática (principalmente sequías sostenidas) es bastante frecuente, esto se puede observar fácilmente utilizando el índice estandarizado de precipitación (SPI por sus siglas en inglés) para 12 meses (Mckee, 1993) que se observa en la figura 1.1.



Figura 1.1 Datos de SPI para 12 meses en la estación Liberia para el periodo 1970-1999.

Se reconoce como en distintos años la cuenca se ha visto afectada por eventos de sequía, especialmente en los años 1976, 1982, 1987, 1994 y 1997. Estos años se asocian a eventos El Niño, por lo que se puede reconocer fácilmente la alta exposición que tiene la cuenca ante este fenómeno. Más recientemente en el año 2015, se dio uno de los eventos de sequía más importantes en los últimos años (Hidalgo et al., 2016), generando pérdidas millonarias en el sector agropecuario e industrial (Solano, 2015).

Pese a lo anterior, diversos estudios han demostrado que el fenómeno de El Niño no es el único evento con capacidad de modificar el comportamiento de la precipitación en Costa Rica. La investigación realizada por Fallas-López & Alfaro (2012) demuestra cómo los cambios en la Oscilación Multidecadal del Atlántico (AMO por sus siglas en inglés) y la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO por sus siglas en inglés) pueden prolongar periodos secos en América Central. A esto se le deben de sumar diversos precursores de variabilidad hidrometeorológica identificados en diversas investigaciones realizadas por Hidalgo et al. (2015, 2017). Este es el caso del jet de bajo nivel del Caribe (CLLJ por sus siglas en inglés), el cual genera cambios importantes en los montos mensuales de precipitación, así como la distribución de la misma a lo largo de América Central (Amador 1998;2008).

Además de la variabilidad climática presente en la cuenca, asociadas principalmente a sequías, se debe de agregar las condiciones secas que son parte de la climatología de la cuenca. Lo anterior se debe a la presencia del Corredor Seco Centroamericano (CSC), el cual es una zona de América Central en la que existe una menor precipitación en comparación con el resto de la región. El CSC tiene una alta dinámica espacial, la cual se puede observar en la figura 1.2, en ella se muestra cómo cambia la distribución espacial del CSC de acuerdo con épocas extremo-húmedas y secas. Utilizando valores de aridez junto con las áreas en las que los índices detectan mayor frecuencia sequía, se puede apreciar (figura 1.2) cómo la cuenca del Río Tempisque se encuentra siempre dentro del CSC independientemente de la fase en la que éste se encuentre.

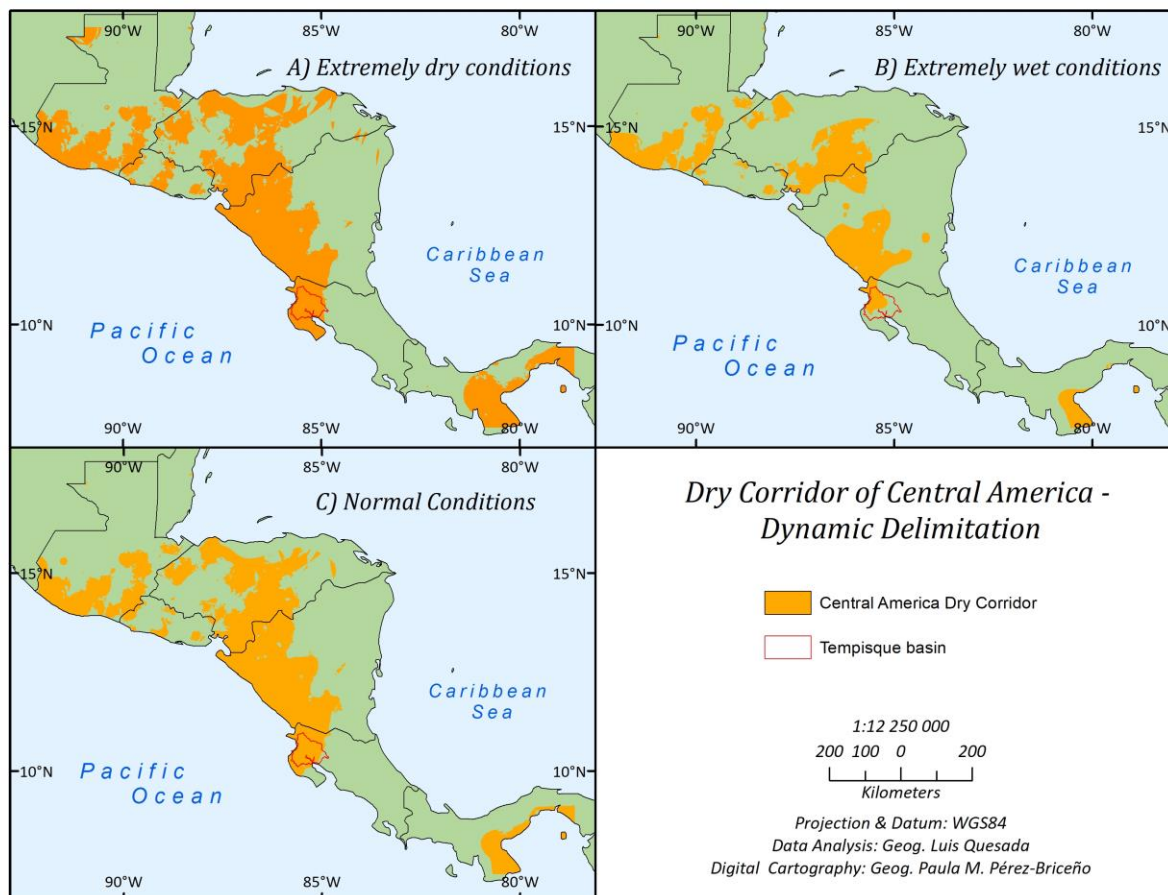


Figura 1.2: Distribución del CSC en condiciones extremo-secas (A), extremo húmedas (B) y bajo condiciones promedio (C). Modificado de Quesada et al. (en preparación).

Esto explicaría por qué esta cuenca y en general Guanacaste presenta un régimen de menor precipitación y por consiguiente menores caudales.

Si bien es cierto, existe una amplia variedad de aspectos meteorológicos y físicos que modifican los patrones de precipitación, cuando se analiza el efecto que esto tiene en la hidrología superficial, se debe de tomar en cuenta el aspecto antrópico el cual muchas veces ha sido dejado de lado (Li et al., 2011).

Este es el caso de la cuenca del Tempisque, área que en la actualidad sufre cambios importantes asociados a la cobertura de la tierra y sus respectivas actividades económicas. El cambio del sector primario (agrícola) al terciario (servicios enfocados en el turismo) ha provocado el crecimiento de áreas urbanas en sitios donde antes existían pastos o áreas agrícolas, ejerciendo más presión sobre las áreas boscosas de la cuenca (Siu, 2015).

El efecto antrópico en la hidrología superficial puede ser analizado desde la perspectiva de cambios de cobertura de la tierra, lo cual tiene un efecto muy variado que puede depender del tipo de cuenca hidrográfica, sitio en la cuenca donde se den los cambios, así como el tipo de cambio ya que estos pueden afectar de menor o mayor manera el efecto de la escorrentía superficial. Lo anterior fue demostrado en la investigación elaborada por Lørup et al. (1997), donde se define que los cambios pueden tener diversos efectos en el comportamiento de los caudales (aumentos o disminuciones del caudal total, tiempo de respuesta ante eventos de lluvia, flujos base), dependiendo del tipo de cambio que se dé.

Los efectos mencionados con anterioridad estarían asociados a la dinámica física de la cuenca. Sin embargo, pueden existir otros cambios en los caudales asociados a la demanda del recurso hídrico para satisfacer esta nueva cobertura (sistemas de riego o industria), ya que se extraerá más agua de las fuentes superficiales (DeFries & Eshleman, 2004).

Dada la alta variabilidad climática presente en el Tempisque y los importantes cambios que ha sufrido en la cobertura de la tierra, es fundamental generar conocimiento científico con el cual entender el efecto de los fenómenos de variabilidad climática en la precipitación y en los caudales. Este tipo de análisis es fundamental para el crecimiento socioeconómico de la región, ya que como se ha mencionado, existe una alta demanda de recurso hídrico para el desarrollo de actividades económicas y cualquier oscilación puede generar daños económicos importantes a gran cantidad de pequeños y medianos productores, así como a diversos sectores industriales y turísticos. Además, entendiendo el efecto de la cobertura de la tierra en la dinámica de los caudales, se pueden generar procesos de planificación territorial mediante los cuales se puede dar un mejor manejo del recurso hídrico, lo cual pueda de cierta manera disminuir el impacto de fenómenos de variabilidad-cambio climático.

1.3 Descripción del área de estudio

La cuenca del río Tempisque (figura 1.3) se ubica en la provincia Guanacaste, según Vega (2001) es la cuenca más grande de Costa Rica, con un área de alrededor 5,404.6 km² de los cuales la cuenca del Tempisque abarca 3,357.3 km² y Bebedero 2,047.3 km². Esta cuenca cubre un 53% de la provincia y el 10,6% de todo el territorio costarricense.

Históricamente, esta cuenca hidrográfica se ha dedicado a distintas actividades agropecuarias que han ido variando conforme a los años. Inicialmente la actividad ganadera tuvo un auge

importante durante los siglos XIX y XX, sin embargo, con el desarrollo de rutas de acceso, como el caso de la carretera Interamericana (Hall, 1984), se inicia un cambio hacia las actividades agrícolas.

La agricultura siempre ha sido muy riesgosa en la zona, esto asociado al comportamiento de la lluvia durante las épocas de siembra y cosecha, por lo cual, el desarrollo de canales de irrigación ha requerido de inversión privada y gubernamental, para la mejora en las condiciones de cultivo. Diversas políticas se han desarrollado para incentivar el crecimiento de sembradíos de arroz, algodón y caña de azúcar. Sin embargo, las fluctuaciones del mercado, así como el comportamiento de las lluvias históricamente ha provocado pérdidas económicas importantes en la zona (Peters, 2001).

A estas actividades económicas se le debe de agregar el turismo y desarrollo del sector terciario de la economía. Esto se ve reflejado en los datos de empleo recopilados por el Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC) donde el 63% de la población que habita Guanacaste labora en el sector terciario, asociado principalmente a la actividad turística que ha ido en aumento en las últimas décadas. Este dato incrementa para ciertos cantones donde existe un desarrollo urbano más importante como el caso de Liberia, donde alcanza un 78% de la población económicamente activa dedicada a actividades del sector terciario (INEC, 2011).

En la actualidad, las actividades agrícolas persisten en la zona junto a la ganadería que, gracias al desarrollo de tecnologías agrícolas (mejora en las semillas, mecanización de la producción), así como la mejora en los sistemas de regadío, ha permitido cierta mejora en las condiciones de producción (MAG, 2014). Pese a esto, las sequías sostenidas en esta región siguen siendo muy importantes, como el caso del año 2015 (Hidalgo et al., 2015).

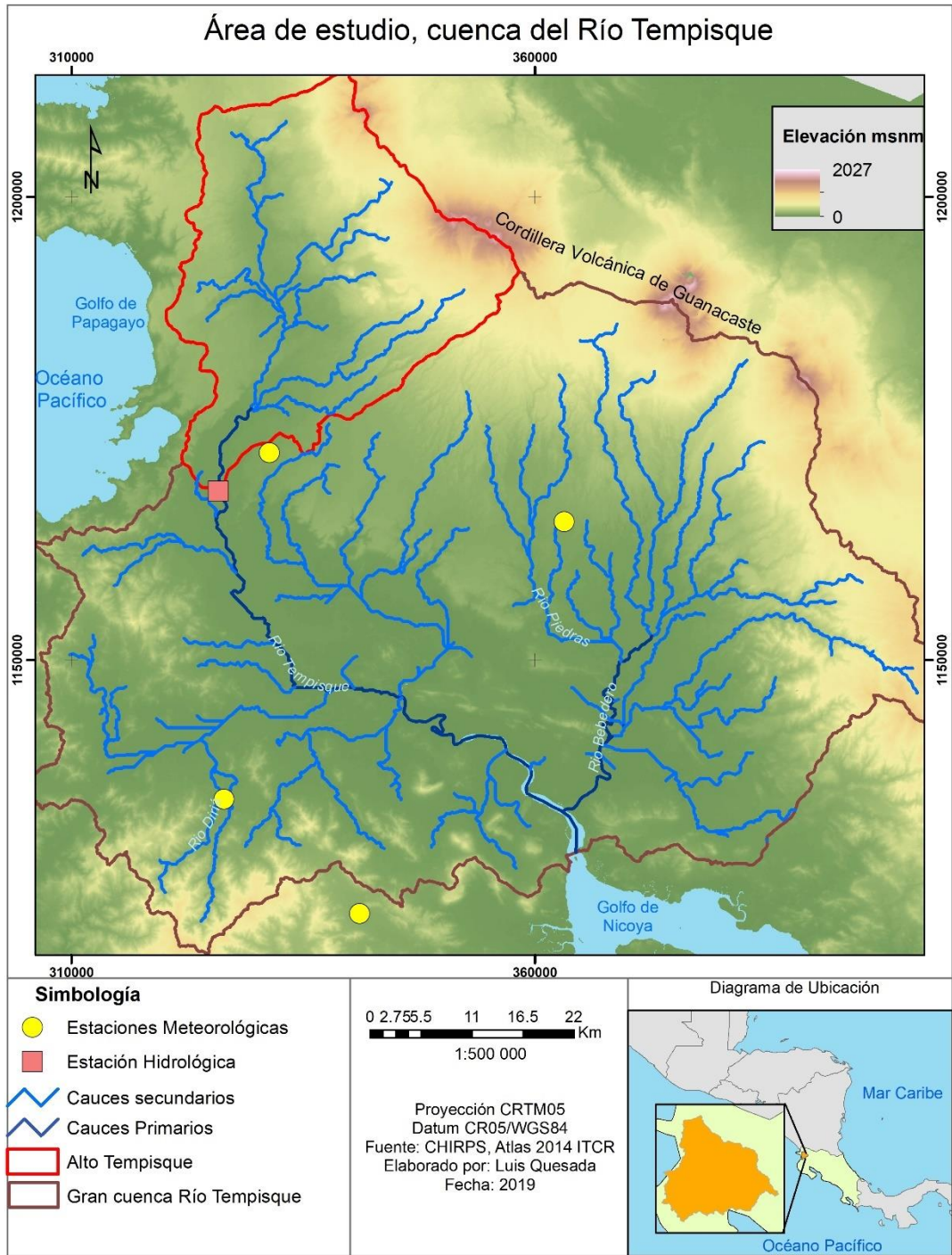


Figura 1.3: Área de estudio, gran cuenca del río Tempisque, en rojo se muestra la parte alta de la gran cuenta del río Tempisque. Los círculos amarillos representan las estaciones de la base de datos NUMEROSA (CIGEFI), el cuadrado en color salmón representa la estación hidrológica Guardia ICE.

1.4 Descripción de variables físicas de la cuenca del Tempisque

La precipitación en esta cuenca tiene un comportamiento típico de la vertiente del Pacífico de Centroamérica. En la figura 1.4 se aprecia el comportamiento de esta variable, presentando un primer máximo para el mes de junio, seguido de una reducción para los meses de julio y agosto generado por el aumento de la actividad del Chorro de bajo nivel del Caribe (Amador, 1998, 2008), lo que propicia el desarrollo del veranillo (Magaña et al., 1999). Una vez que se reduce la fuerza de este mecanismo, se observa un segundo máximo local para setiembre y octubre que corresponde a la segunda parte de la estación lluviosa.

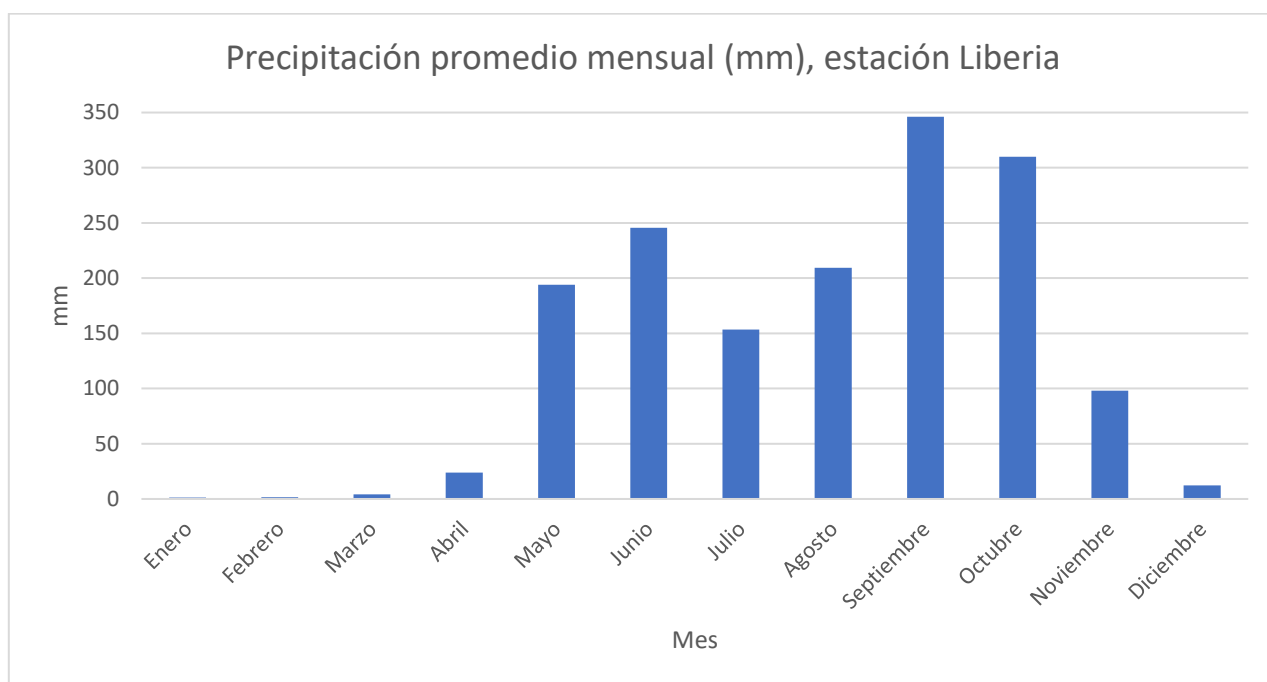


Figura 1.4: Precipitación promedio mensual para estación Liberia (IMN, 2013).

A partir del mes de noviembre la precipitación tiende a descender en la cuenca, dando paso a la época seca que se extiende de diciembre a abril. Al observar este comportamiento en la precipitación, no es de extrañar que los caudales sigan una dinámica similar (figura 1.5).

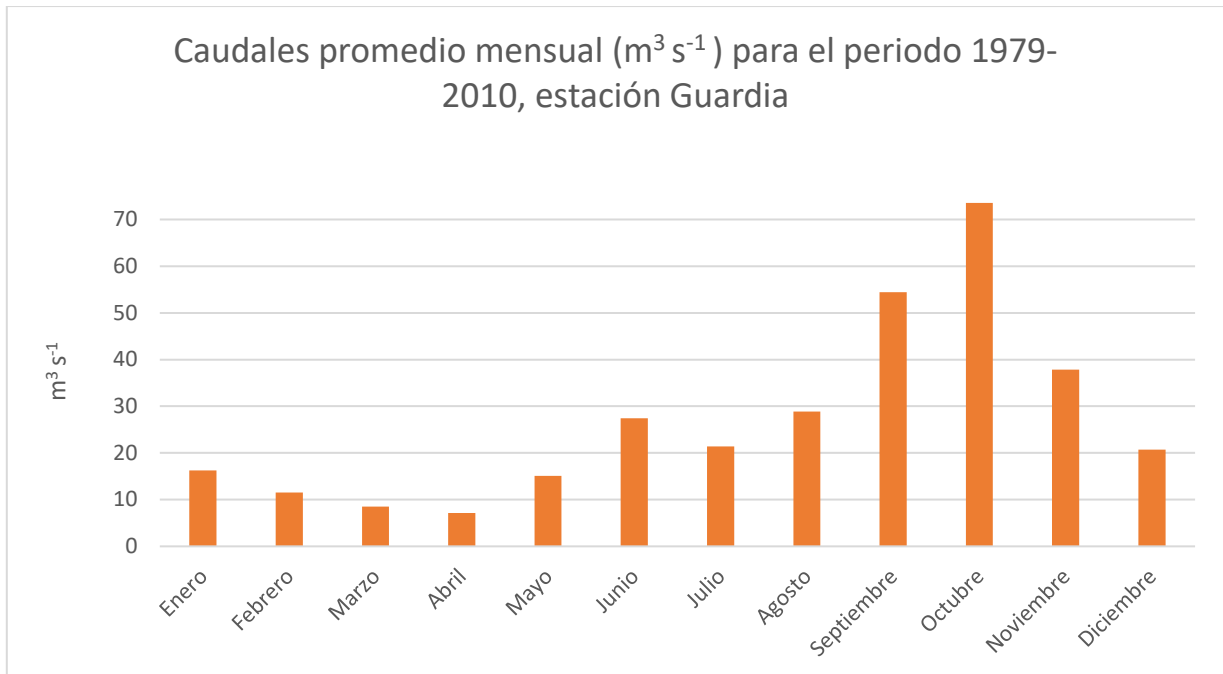


Figura 1.5: Caudales mensuales promedio en la estación Guardia, datos facilitados por el ICE

Durante la época seca, principalmente en los meses de enero y diciembre, existe todavía una cantidad apreciable de caudal en comparación a los meses de febrero a abril, esto se debe al efecto de los flujos base en la cuenca, los cuales aportan agua asociada a la época lluviosa pero que, debido a los procesos de infiltración, tienen un movimiento mucho más lento. Con el inicio de la época lluviosa, mayo-junio se presenta un aumento en la precipitación, seguido el desarrollo del veranillo que se observa para el mes de julio. La segunda parte de la época lluviosa en los meses de septiembre y octubre es la que aporta mayor cantidad de agua a los caudales, a partir de este momento existe una disminución importante para noviembre.

Además de los caudales, la precipitación también regula el comportamiento de la evapotranspiración en la cuenca (figura 1.6), la cual está asociada a la cantidad de radiación disponible para realizar el proceso de evapotranspiración.

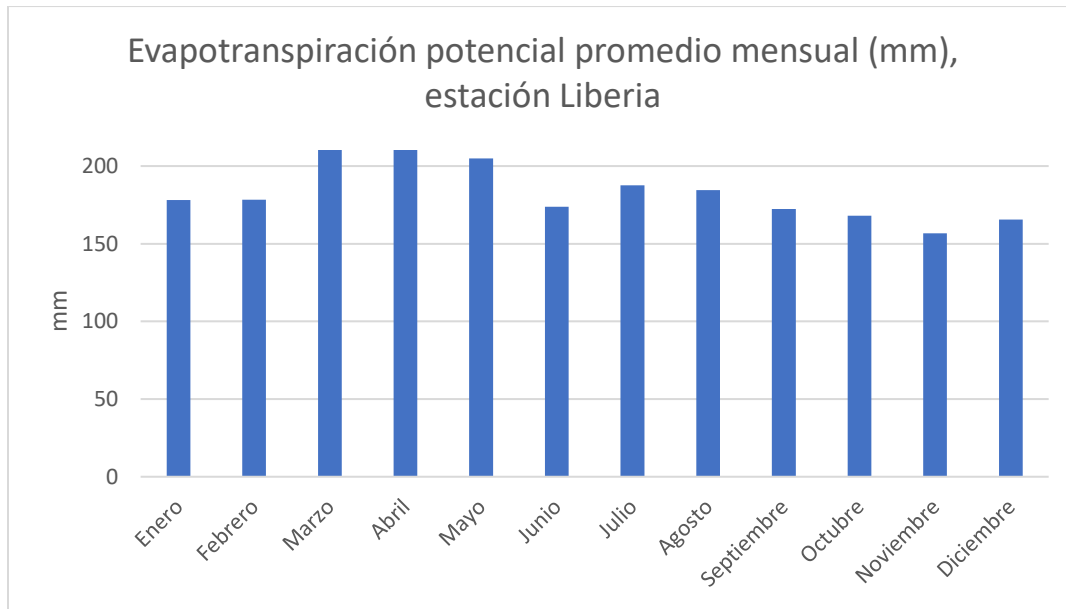


Figura 1.6: Evapotranspiración potencial para la estación Liberia, IMN, 2013.

Se observa que los máximos de esta variable se dan en los meses en los que la época seca se encuentra en su punto máximo, es decir, para los meses de marzo y abril. Sin embargo, al iniciar la época lluviosa y haber una menor cantidad de radiación, debido a la nubosidad, la evapotranspiración tiende a disminuir. Esto también se observa para el mes julio y agosto donde hay un aumento asociado al veranillo, que conlleva una reducción en la precipitación y por consiguiente, menos nubosidad y mayor energía disponible para la evapotranspiración.

1.5 Antecedentes

1.5.1 Consideraciones hidrológicas

La escorrentía se define, como el agua “proveniente de la precipitación que circula sobre o bajo la superficie terrestre y que llega a una corriente para finalmente ser drenada hasta la salida de la cuenca” (Aparicio, 1989, p.27). Dada la definición anterior, existen dos formas para que se genere la escorrentía superficial. Por un lado, están los procesos en los cuales el agua “se infiltra hasta que las capas superiores del mismo se saturan. Posteriormente, se comienzan a llenar las depresiones del terreno y, al mismo tiempo, el agua comienza a escurrir sobre su superficie” (Aparicio, 1989, pp.27). El otro modo para que aparezca escorrentía es mediante los flujos hortonianos, estos se dan cuando la capacidad de infiltración del suelo es superada por la intensidad de la precipitación (T Chow, 1994).

La escorrentía es una variable que depende de muchos factores, los cuales van a influir en su comportamiento, ya sea un aumento (cuando existe mayor precipitación) o una disminución. El efecto de fenómenos de variabilidad climática en los caudales es fácilmente observable, en la figura 1.7, haciendo una comparación entre los caudales mensuales y la anomalía de temperatura superficial del mar en la región 3.4 de ENOS.

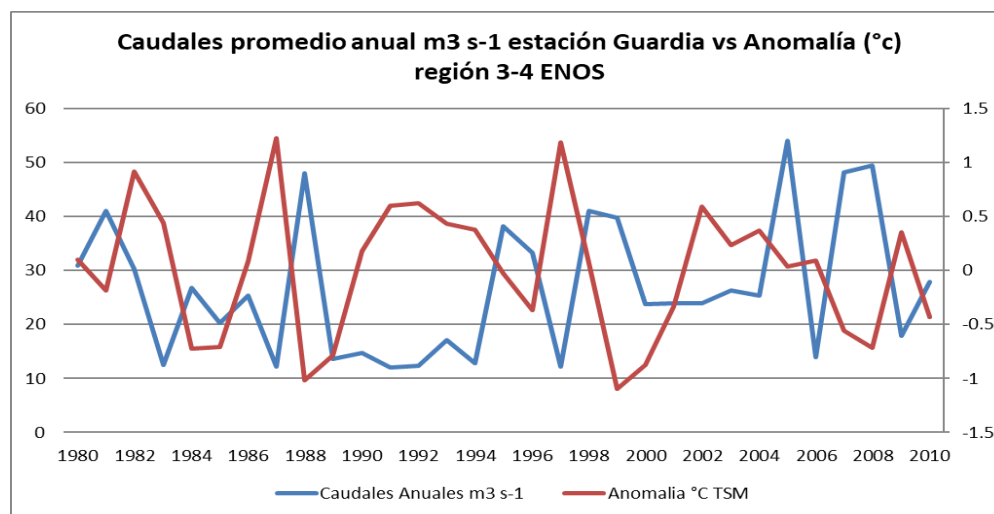


Figura 1.7: Comparación de anomalía de temperatura superficial del mar zona Niño 3.4 y caudal mensual para la estación Guardia de 1980 al 2010. Fuente: Elaboración propia a partir de ICE s.f y Rainer et al. 2003

De lo anterior se puede reconocer que, cuando existe un aumento en la temperatura superficial del mar, existe una tendencia a menores caudales, esto se observa para los años 1982, 1997, así como en el periodo 1991 al año 1993, lo contrario ocurre cuando hay anomalías negativas de temperatura, ya que se presenta un aumento en los caudales como en el año 1999.

Sin embargo, no solo la variabilidad climática cambia el comportamiento de la escorrentía, ya que se ha demostrado que las características de la cobertura de la tierra también tienen la capacidad de afectar esta variable (Dwarakish & Ganasri, 2015).

Los estudios de relacionados con cambios de cobertura y su efecto en la escorrentía inician en el año 1970 utilizando distintos tipos de metodología; la investigación desarrollada por Hornbeck et al. (1970) en Nueva Inglaterra (Estados Unidos) mediante la metodología de cuencas pareadas, usa dos cuencas pequeñas en las que se hacen cambios de cobertura

drásticos y controlados. Como resultado se encuentra que, al eliminar la cobertura forestal, hay un aumento en los caudales y la respuesta de los mismos estaría directamente relacionada a las lluvias; además, se encuentra que los caudales pico llegan a aumentar entre un 50 a un 250%. Swank & Crossley (1988) realizan una aproximación similar a la realizada por Hornbeck et al. (1970), dejando en evidencia lo común que era utilizar cuencas pareadas en las que se eliminaba toda la cobertura vegetal y se observaba el efecto que esto tenía en la escorrentía.

Pese a esto, el uso de cuencas pareadas conlleva muchas dificultades metodológicas: encontrar dos cuencas con características físicas similares, controlar los cambios de cobertura y la tala de bosques o uso de agroquímicos para controlar la vegetación, provoca que se requiera de una alta inversión y tiempo para realizar esta clase de investigaciones.

Por lo anterior, Onstad & Jamieson (1970) realizan quizá uno de los primeros intentos en reproducir el efecto de los cambios de cobertura de la tierra en la escorrentía superficial utilizando modelos hidrológicos. Esta investigación evalúa diferentes escenarios de conservación forestal, sin embargo, los resultados no pudieron ser validados dada la escasez de datos.

Desde la fecha, muchas investigaciones se han desarrollado en busca de definir con claridad el efecto que provoca la cobertura de la tierra en los caudales, Lørup et al. (1997) hacen una recopilación de estudios realizados durante los años 80's y parte de los 90's alrededor del mundo en esta temática.

Pese a lo anterior DeFries & Eshleman (2004) definen que estas investigaciones se encuentran en una etapa muy temprana, sin embargo, con el desarrollo de la tecnología y una mayor facilidad para recopilar información mediante satélites, se puede facilitar el desarrollo de estos análisis. Lo anterior es confirmado por Dwarakish & Ganasri, (2015), donde definen el gran potencial que tienen los modelos hidrológicos, principalmente semi-distribuidos y distribuidos para reproducir el comportamiento de la escorrentía, asociada a los cambios en la cobertura de la tierra.

Los resultados de diversas investigaciones han demostrado que los cambios en la escorrentía asociados a la cobertura dependen de varios factores como, por ejemplo: el tipo de cambio de cobertura de la tierra, el sitio de la cuenca en el que se dan los cambios y la velocidad de

los cambios, complejidad de la cuenca, así como diversos factores socio-económicos y biofísicos (Lørup et al., 1997; Dwarakish & Ganasri, 2015).

1.5.2 Metodologías para abordar los cambios en una cuenca hidrológica

Para analizar cambios en una cuenca, Li et al. (2009) proponen tres acercamientos distintos: uso de series de tiempo mediante análisis estadísticos de diferente tipo, uso de cuencas pareadas y el más recomendado por los autores, uso de modelos hidrológicos. A continuación, se hace un pequeño análisis de cada una de estas metodologías propuestas por Li et al. (2009), a excepción del uso de cuencas pareadas, ya que este método presenta grandes desventajas (inversión económica, tiempo, encontrar dos cuencas pequeñas y bien instrumentadas) y no es aplicable al contexto de Costa Rica.

1.5.2.1) Análisis de series de tiempo

La recopilación de datos meteorológicos e hidrológicos permite crear bases de datos, mediante las cuales se pueden realizar diferentes análisis estadísticos de utilidad para identificar cambios que dan a lo largo del tiempo en una cuenca hidrológica. Dentro de las metodologías que se pueden utilizar para analizar estos cambios, destaca el análisis de tendencias estadísticas en los datos. Esta clase de análisis se han utilizado para estudios de cambio climático (Razavi et al., 2016), comportamiento de caudales (Hamed, 2008; Birkel, 2006) y precipitación (Méndez & Martínez, 2010; Castro-Llanos & Carvajal-Escobar, 2013). Entre los diferentes métodos que se utilizan para esta clase de análisis, se encuentra el método de Mann-Kendall (Mann, 1945; Kendall, 1975). Para calcular tendencias este método al ser no paramétrico tiene la ventaja de ser aplicado a series de tiempo cuyos datos no tienen un comportamiento normal, el cual es el caso de la precipitación y caudales. Existe una amplia variedad de trabajos en los que se ha utilizado este método, se puede consultar la investigación de Yue et al. (2002) para mayor información. En estas investigaciones se han podido identificar tendencias en diversos tipos de datos, lo que permite entender el comportamiento que han tenido en un periodo de tiempo considerable y así, tratar de asociar esta tendencia a algún fenómeno en específico, ya sea físico como lo es el cambio climático o antrópico como los cambios de cobertura de la tierra.

Además, las series de tiempo cumplen un papel fundamental a la hora de realizar el modelado hidrológico, ya que son comparadas con datos observados en la cuenca para así, determinar

si un modelo tiene la capacidad de reproducir conceptual o física y matemáticamente la dinámica de la cuenca en la que se está utilizando.

1.5.2.2) Uso de Modelos hidrológicos

Los modelos hidrológicos se han ido desarrollando ya durante muchas décadas; se considera que un modelo es bueno si este logra reproducir de una forma acertada el comportamiento observado de diferentes datos por ejemplo la esorrentía, mediante distintos tipos de ecuaciones, las cuales pueden ser empíricas, conceptuales o físicas (Gayathri et al., 2015).

El uso de modelos hidrológicos en la actualidad ha aumentado de forma considerable debido a la facilidad para obtener datos con los cuales alimentar los modelos, interfaces más amigables con los usuarios, así como una mayor capacidad computacional (DeFries & Eshleman, 2004). El proceso para escoger un modelo hidrológico depende de muchos factores, principalmente los datos con los que se dispone, capacidad computacional y el objetivo que se busca alcanzar, ya que de esto depende escoger un modelo agrupado, semi-distribuido o distribuido.

Para el caso de Costa Rica, existen estudios en los que se han utilizado modelos hidrológicos con distintos objetivos, Marsik et al. (2015) utilizando el modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool, Arnold et al. 1998) analizó las consecuencias del cambio de cobertura de la tierra y los caudales en la cuenca del río Grande de Tárcoles. Brenes (2015) analiza mediante el modelo SWAT el efecto de la contaminación en la cuenca del río Jaboncillal. Méndez (2016) mediante una versión modificada del modelo HBV (Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning) realiza balances hídricos en la cuenca del río Agua Caliente en la provincia de Cartago.

Quizá uno de los modelos que más aplicados en Costa Rica ha sido el modelo HBV en su versión light, dentro de los ejemplos de investigaciones que han utilizado este modelo se encuentran Birkel et al. (2012) donde se plantean distintos escenarios de coberturas de la tierra y el efecto que esto genera en diferentes variables hidrológicas en la cuenca del río Sarapiquí. En la figura 1.8 se muestra parte de los resultados de esta investigación, donde se puede apreciar la reducción de los caudales asociado a una mayor cobertura forestal.

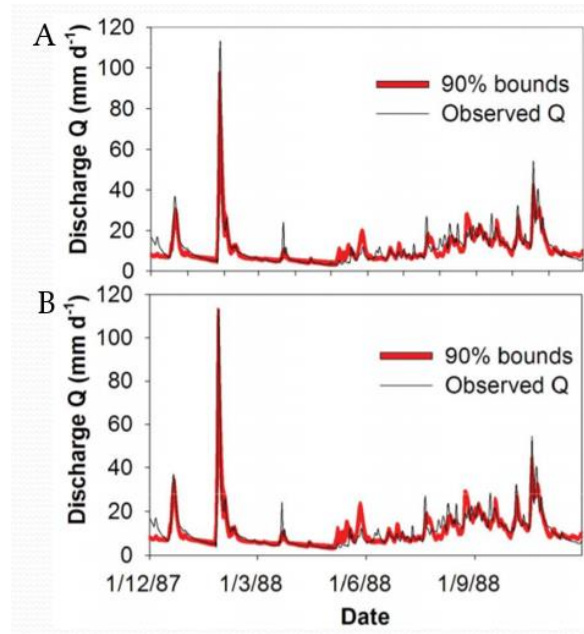


Figura 1.8: Figura A) muestra comportamiento de escorrentía sin cambios de cobertura, B) corresponde a una disminución de la cobertura boscosa. Fuente: Birkel et al. (2012).

En la figura A se observa que los caudales pico son mucho menores, esto debido a una cobertura forestal que propicia una mejor infiltración del agua en el suelo, lo contrario ocurre en la figura B, donde el pico de escorrentía es mucho mayor cuando existe una menor cobertura forestal y aumenta la cantidad de pasto en la cuenca.

Otra investigación donde se utiliza este modelo es la de Quesada-Montano et al. (2018) haciendo un análisis de la variabilidad climática imperante en la cuenca del río Savegre, realiza una mejora en el proceso de calibración del modelo HBV-light, lo que permite que éste pueda reproducir mejor los datos observados. Westerberg & Birkel (2015) evalúan diferentes hipótesis con el fin de identificar las capacidades de tres modelos distintos (HBV-light, WASMOD, TOPMODEL) para reproducir la dinámica hidrológica de la cuenca del río Sarapiquí.

Como se aprecia, en Costa Rica se han hecho esfuerzos por hacer análisis utilizando modelos hidrológicos, sin embargo, estos no son comunes y existen muchas cuencas hidrológicas con pocas investigaciones en este ámbito, esto debido a la falta de datos observados para aplicarlos y la incertidumbre que muchas veces estos poseen (Westerberg & Birkel, 2015). Este es el caso de la cuenca del río Tempisque, donde los análisis meteorológicos e hidrológicos son escasos pese a la alta amenaza de sequías que presenta esta cuenca. A

continuación, se hace una recopilación de diversos estudios para el río Tempisque, haciendo énfasis en análisis meteorológicos e hidrológicos.

1.5.3 Estudios meteorológicos e hidrológicos en la cuenca del Tempisque

Existen diferentes estudios elaborados para esta cuenca donde se describe el comportamiento climático; el Instituto Meteorológico Nacional hace un análisis sobre la precipitación, evapotranspiración, temperatura y horas luz para el cantón Liberia, el cual se ubica gran parte dentro de esta cuenca hidrográfica (IMN, 2013). Además, se han realizado análisis más puntuales como el caso del Aeropuerto Daniel Oduber (IMN, 2016) donde se describe el comportamiento mensual de distintas variables para el periodo 2010-2015.

Pese a que se han realizado investigaciones climáticas dentro de esta cuenca, pocos estudios se han enfocado en analizar el comportamiento hidrológico y meteorológico para toda la cuenca del Tempisque. Arias-Rodríguez (2001) analiza el comportamiento de la precipitación y caudales en el río Tempisque para el periodo 1978-2000, cuyo fin principal fue definir una metodología apropiada para desarrollar distintos análisis estadísticos relacionados a análisis de datos medios. Otro estudio que es enfocado para la totalidad de la cuenca es el realizado por Jiménez & Gonzales (2001), donde se hace una descripción general de variables como la precipitación durante época seca y lluviosa, temperatura y presión, sin entrar en un análisis de las razones por las cuales existen estas fluctuaciones.

Dada la importancia de la actividad agrícola y lo vulnerable de la misma ante diferentes amenazas hidrometeorológicas, así como la necesidad de abastecer de recurso hídrico a las personas, es que el análisis de variabilidad climática, así como tendencias en los datos de precipitación son análisis comunes en la cuenca del Tempisque.

Por lo anterior es que los estudios de sequías se han desarrollado frecuentemente en esta cuenca. Un ejemplo de ello es el elaborado por Birkel (2006) en donde se analiza si existen tendencias a condiciones más secas en la cuenca del Tempisque.

Dentro de los estudios en los que se pone énfasis en las variaciones anuales en la precipitación, Alfaro & Hidalgo (2017) elaboran una propuesta para pronosticar el comportamiento que tendrá el veranillo (Mid Summer Drought, Magaña et al. 1999) el cual

tiene la capacidad de reducir la precipitación para los meses julio-agosto, esto puede generar pérdidas en la agricultura y empeorar condiciones de sequía durante fenómenos El Niño.

El impacto del ENOS en los sectores productivos ha sido un tema recurrente de investigación para el Tempisque; Retana et al. (2000) hace un análisis de los efectos de La Niña en la producción agropecuaria en esta cuenca. Calvo et al. (2018) recopilan información de impactos asociados a la sequía en Centroamérica y las pérdidas que ha sufrido la agricultura y ganadería en Guanacaste.

Respecto a los estudios hidrológicos, que se han elaborado para esta cuenca, se encuentra la investigación de Calvo et al. (2008) para definir caudales ambientales, Jiménez-Rodríguez et al. (2015) realiza una calibración de dos modelos hidrológicos distintos el Hydrological Land Use Change (HYLUC) y el NedbørAfstrømnings Model (NAM) para analizar escenarios de cambio climático en la hidrología de la cuenca Tempisquito. Bocanegra-Díaz (2017) elabora un estudio en el cual se enfoca en la sequía hidrológica en la cuenca Tempisque-Bebedero.

Una de las investigaciones que más resalta, dada la similitud en objetivos con este trabajo, es la elaborada por Calvo et al. (2015), siendo el único esfuerzo que se ha realizado por entender efecto de los cambios de cobertura de la tierra en la cuenca del Tempisque utilizando el modelo hidrológico HYLUC; sin embargo, esta investigación se ve limitada por la poca cantidad de años que utiliza en el análisis (5 años hidrológicos).

Como se aprecia, todavía hay espacio para estudios hidrometeorológicos en la cuenca del Tempisque, por lo que esta investigación generaría un aporte importante a la ciencia y al conocimiento hidrológico de la cuenca del Tempisque.

1.6 Objetivos

1.6.1 Objetivo General

Analizar el impacto conjunto de la variabilidad climática y los cambios en la cobertura de la tierra en la hidrología superficial de la subcuenca del río Tempisque y generar información de utilidad para la planificación territorial.

1.6.2Objetivos específicos

- 1.1) Realizar un análisis climatológico del área de estudio en el periodo de análisis 1970-2010.
- 1.2) Analizar el impacto de la variabilidad climática en los cambios en la hidrología superficial en la subcuenca río Tempisque para el periodo 1970-2010.
- 1.3) Determinar si la modificación de la cobertura de la tierra en la subcuenca del río Tempisque está relacionada con cambios significativos en la hidrología superficial en comparación con la variabilidad natural.

Capítulo II: Datos y métodos

Para los distintos análisis que se realizan en esta investigación, se usan bases de datos de diferentes fuentes, tanto de datos observados como simulados de precipitación y caudal. A continuación, se describen los datos que se utilizan, así como los análisis que se realizaron para definir si estos eran apropiados para cada uno de los análisis.

2.1 Datos y procesamiento

2.1.1 Datos de precipitación

Inicialmente se solicitan datos de precipitación al Instituto Meteorológico Nacional. Las estaciones que se obtuvieron se encuentran en el anexo 1. Esta información presentaba algunas limitantes que imposibilitaban su uso, por ejemplo: datos faltantes que no permiten un adecuado proceso de rellenado, periodos no apropiados para la investigación o estaciones con pocos datos. Por lo anterior, se utiliza la base de datos NUMEROSA del Centro de Investigaciones Geofísicas (CIGEFI-UCR), que cuenta con 2 estaciones dentro de la gran cuenca del río Tempisque y una cerca de la cuenca Alto Tempisque.

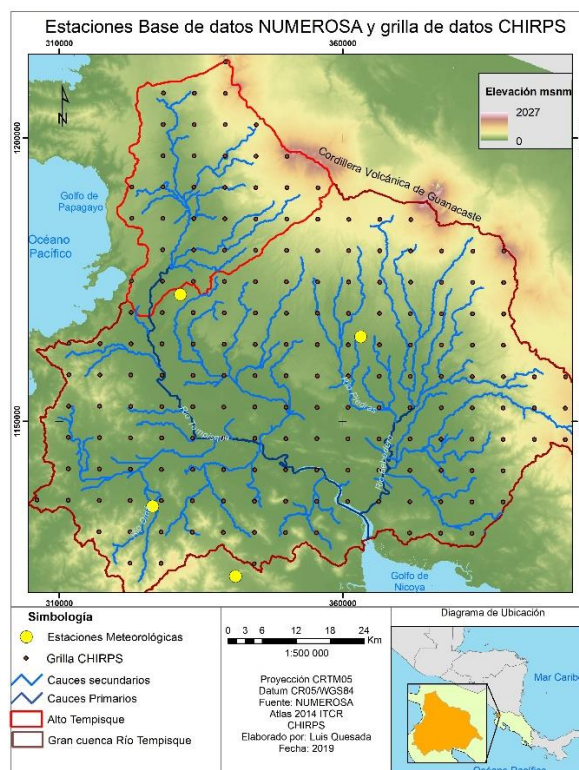


Figura 2.1: Distribución de puntos de la base de datos CHIRPS y estaciones de la base de datos NUMEROSA utilizadas para la validación de los datos.

Los otros datos precipitación utilizados se obtuvieron de la base de CHIRPS (Climate Hazard InfraRed Precipitation with Station Data) (<http://chg.geog.ucsb.edu/data/chirps/>) (Funk et al., 2015), esta información se obtuvo desde enero de 1981 y fue complementada para el periodo 1970-1980 con los datos utilizados por Hidalgo et al. (2017).

Para obtener los datos de precipitación, CHIRPS utiliza información infrarroja de “Cold Cloud Duration” a 0.05° de resolución espacial, así como datos observados de estaciones meteorológicas alrededor del mundo para calibrar los datos simulados. Esta base de datos inicia en el año 1981 y se extiende hasta la actualidad. La distribución de la rejilla de datos de precipitación (Figura 2.1) cubre toda la cuenca, sin embargo, estos datos al ser datos no observados in-situ se deben de realizar pruebas estadísticas para analizar si logran reproducir el comportamiento observado.

2.1.2 Proceso validación de datos

Para validar los datos simulados de la base de datos CHIRPS se utilizan 3 estaciones de la base de datos NUMEROSA del Centro de Investigaciones Geofísicas de la Universidad de Costa Rica, esta base de datos cuenta con datos diarios de precipitación del año 1970 al 2010 y por tanto es el periodo de estudio de esta investigación. Estos datos se transforman a datos mensuales utilizando la rutina “daily2monthly” del Tool Box TIME-ROUT (<http://www.hugohidalgoleon.com/software.html>) para el programa Matlab.

Teniendo los datos en forma mensual, tanto los observados como los simulados, se utilizan diferentes parámetros para compararlos. Zambrano-Bigiarini et al. (2017) recomiendan utilizar el índice de eficiencia Kling-Gupta modificado (Kling et al., 2012; Gupta et al., 2009) para comparar datos de CHIRPS con datos observados. La razón de esto es que “este índice tiene la capacidad de reproducir las dinámicas temporales medidas por r y preservar el volumen y distribución medidas por β y γ respectivamente” (Zambrano-Bigiarini et al., 2017, p1303). Este método utiliza la siguiente ecuación:

$$KGE = 1 - \sqrt{(r - 1)^2 + (\beta - 1)^2 + (\gamma - 1)^2} \quad (1)$$

Donde

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(S_i - \bar{S})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})^2}} \quad (2)$$

$$\beta = \frac{\mu_s}{\mu_o} \quad (3)$$

$$\gamma = \frac{CV_s}{CV_o} = \frac{\sigma_s/\mu_o}{\sigma_o/\mu_s} \quad (4)$$

Este método utiliza la correlación lineal (r) cuyo valor ronda entre -1 para una correlación inversa perfecta y 1 para una correlación normal, el resultado óptimo del sesgo (β) sería 1, para valores $< \beta$ habría una subestimación y para valores $> \beta$ una sobreestimación. Respecto a la variabilidad (γ), este parámetro compara si la dispersión de CHIRPS es mayor o menor respecto a los datos observados.

Adicional a estos parámetros, se utiliza el índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe cuyo valor óptimo es 1, este método utiliza la siguiente ecuación:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (Q_m^t - Q_o^t)^2}{\sum_{t=1}^T (Q_o^t - \bar{Q}_o)^2} \quad (5)$$

Donde Q_m son los datos modelados y Q_o serían los observados, este índice da valores entre 1 a $-\infty$, siendo lo ideal 1.

Al comparar los datos simulados de la base de datos de CHIRPS con los datos observados, se obtienen los resultados que se visualizan en la tabla 2.1. Se reconoce que hay sectores en los que hay una mejor concordancia entre los datos observados y simulados, siendo el punto de mejor ajuste el sector suroeste de la cuenca, en la subcuenca del río Diríá con un valor KGE de 0.84, así como un índice NSE de 0.83. Existen sectores de la cuenca en donde hay una menor eficiencia entre los datos observados y simulados, siendo la cuenca del río Piedras la que presenta la relación más baja, esto se debe a un índice alto de sesgo, por lo que en este sector se estaría sobreestimando los valores.

Tabla 2.1: Resultado de la comparación de datos observados de la base de datos NUMEROSA y datos simulados de CHIRPS.

Parámetro de Validación	Observado vs CHIRPS Tempisque	Observado vs CHIRPS Piedras	Observado vs CHIRPS Diríá
Kling–Gupta Efficiency (KGE)	0.66	0.55	0.84
Correlación (r)	0.88	0.82	0.91
Sesgo (β)	0.89	1.38	0.97
Variabilidad (γ)	0.7	0.89	0.86
Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE)	0.74	0.55	0.83

Para el sector del alto Tempisque, se reconoce una buena correlación, así como un sesgo apropiado, sin embargo, al comparar la variabilidad de los datos, esta es relativamente baja, lo que reduce el índice KGE así como los valores del NSE. Pese a esto, se concluye que los datos simulados de la base de datos CHIRPS tienen una alta relación con los datos observados, por ello, esta base de datos se utilizará para los distintos análisis.

2.1.3 Datos fenómenos climáticos gran escala

Los fenómenos que se analizan en esta investigación son los propuestos por Hidalgo et al. (2015, 2017), en estas investigación se establece que la Oscilación Multidecadal del Atlántico (AMO por sus siglas en inglés, Enfield et al., 2001), El Niño-Oscilación del Sur (ENOS), la Zona de Convergencia Intertropical (ITCZ por sus siglas en inglés, Quirós e Hidalgo 2016a; b), Oscilación Decadal del Pacífico (PDO por sus siglas en inglés, Mantua et al., 1997) y el Chorro de Bajo Nivel del Caribe (CLLJ por sus siglas en inglés, Amador, 1998, 2008) tienen la capacidad de modificar el comportamiento de la precipitación en Costa Rica. En la tabla 2.2, se muestra la fuente de los datos y el periodo que cubre cada uno de estos índices.

Tabla 2.2 Índices utilizados para el análisis de variabilidad climática.

Fuente de variabilidad Hidrometeorológica	Índice utilizado	Periodo de Datos	Fuente
Chorro de bajo nivel del Caribe (CLLJ)	CLLJ index	1948-2016	Amador (2008)
Oscilación Multidecadal del Atlántico	AMO index	1856-2018	Enfield et al (2001)
Oscilación decadal del Pacífico	PDO index	1854-2018	Mantua et al., (1997)
El Niño-Oscilación del Sur	MEI index	1950-2018	Wolter & Timli(1993, 1998)
Zona de Convergencia Intertropical	ITCZ LATC	1979-2012	Quirós & Hidalgo (2016a y 2016b)
	ITCZ LONC		
	ITCZ P		
	ITCZ SPREAD		

2.1.4 Procesamiento de imágenes satelitales

Para elaborar las diferentes coberturas de la tierra, se utilizan imágenes satelitales de los proyectos LANDSAT del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS por sus siglas en inglés). Estos datos se encuentran en línea (<https://earthexplorer.usgs.gov/>) y existe información de distintas misiones desde el año 1978 hasta la actualidad para la mayor parte del planeta.

El criterio para elegir las imágenes satelitales es que exista la menor nubosidad posible y la imagen presente la menor cantidad de errores posible, es decir, que no presente pixeles con datos faltantes. Las imágenes que se escogen para el año 1979 son de la misión Landsat 3 con una resolución de 60 metros, para 1989 y 1999 ambas de la misión Landsat 5 con resolución de 30 metros, para los años 2014 y 2017 del satélite Landsat 8 de una resolución de 30 metros. Todas las imágenes utilizadas son de nivel 1, es decir, cuentan con una calibración radiométrica, así como una rectificación ortográfica usando puntos de control junto con un modelo de elevación digital.

Para todas las imágenes con las que se trabaja, se aplican correcciones atmosféricas utilizando el método DOS1 (Dark Object Subtraction) desarrollado por Chávez (1988), para ello se empleó el programa Qgis versión 2.18.13 “Las Palmas” mediante el plugin de clasificaciones semi-automáticas de imágenes satelitales (SCP por sus siglas en inglés). Mediante este método se mejoran las sombras y el color de cada una de las imágenes, lo que

permite seleccionar puntos de control con una mayor claridad en las distintas bandas del espectro electromagnético.

Gracias al apoyo del proyecto **B7507 “Efectos del cambio climático observado sobre el ciclo hidrológico y la disponibilidad de recurso hídrico en la Región Chorotega”** se obtuvieron capas raster clasificadas con la metodología antes descrita, estas imágenes contaban con distintos tipos de coberturas de la tierra, sin embargo, fueron generalizadas para obtener solo tres categorías: bosque, agrícola y pastos.

El proceso de generalización agrupó las diferentes coberturas de acuerdo a su capacidad de infiltración de la escorrentía, de forma tal que las áreas con menor infiltración (suelos descubiertos, quemados, urbano) se agruparon en la categoría de pasto, infiltración media son las áreas con cobertura agrícola y las de alta infiltración (mangles o bosque) corresponden a bosques.

2.2 Métodos

En este apartado se explicarán los diferentes procesos que se realizan para cumplir con cada uno de los objetivos que se plantean en esta investigación. Cabe resaltar que las primeras dos partes de la investigación se realizan para la totalidad de la cuenca del río Tempisque. El tercer objetivo de la investigación, el cual aborda el modelado hidrológico y los análisis de cambios de cobertura de la tierra, solo se elaboran para la cuenca del Alto Tempisque, esto debido a la falta de datos para hacer este análisis para toda la cuenca y dado el tamaño de la cuenca, por lo que los análisis hidrológicos se tornarían mucho más complejos.

2.2.1 Análisis de tendencias

Para realizar el análisis de tendencias, se utilizarán los datos de CHIRPS para el periodo 1970 al 2010, el método que se emplea es el de Mann-Kendall, mediante una rutina en el programa R que se obtiene del paquete “trend” mediante la función `mk.test`. El método se explica de la siguiente manera, según Wilks (2011) dada una serie de tiempo $X_i, i = 1, 2 \dots n$ donde X serán los datos mensuales de precipitación, se debe de:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \text{sgn}(x_{i+1} - x_i) \quad (6)$$

Donde

$$\text{sgn}(\Delta x) = \begin{cases} +1, & \Delta x > 0 \\ 0, & \Delta x = 0 \\ -1, & \Delta x < 0 \end{cases} \quad (7)$$

Utilizando la ecuación 6 se encuentra el número de pares de datos adyacentes en los que el primer valor es menor que el segundo, una vez hecho esto, se hace la sumatoria de las ocasiones en las que ocurre utilizando los criterios propuestos en la segunda parte (ecuación 7). Una vez que se tiene el valor de S, se debe de calcular la varianza, la cual va a depender de si existen valores repetidos o no. Por ello, si no existen valores repetidos, se deberá utilizar la siguiente ecuación:

$$\text{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \quad (8)$$

De haber valores repetidos

$$\text{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{j=1}^J t_j(t_j-1)(2t_j+5)}{18} \quad (9)$$

Donde J representa el número de grupos repetidos y t_j el número de valores repetidos, con el resultado de estas ecuaciones se evalúa utilizando un valor estándar gaussiano según se muestra en la ecuación 10, el cual dependerá del valor de S obtenido en la ecuación 6:

$$z = \begin{cases} \frac{S-1}{[\text{Var}(S)]^{\frac{1}{2}}} & \text{si } S > 0 \\ \frac{S+1}{[\text{Var}(S)]^{\frac{1}{2}}} & \text{si } S < 0 \end{cases} \quad (10)$$

Mediante este método, se podrá comprobar si las estaciones meteorológicas presentes en el área de estudio, tienen un comportamiento que tiende a la reducción (sequía) o al aumento (más precipitación).

Cuando se ha realizado el cálculo de Mann-Kendall, los resultados se proceden a analizar en el programa ArcMap versión 10.5 con una licencia institucional, mediante una interpolación para la cuenca utilizando el método Kriging (Oliver, 1990).

2.2.2 Efecto de la variabilidad climática en la precipitación

Con el fin de evaluar el efecto que tienen los distintos fenómenos hidroclimáticos de gran escala en la cuenca del río Tempisque, se utilizará el método de componentes principales.

Este método ya ha sido utilizado con anterioridad en distintas investigaciones (Fallas-López & Alfaro, 2012; Vargas 2016; Hidalgo et al., 2017, Martínez et al., 2019) en las que se busca identificar el efecto que tienen distintos fenómenos en la precipitación.

Según Haan (1979) el objetivo principal de esta técnica es reducir una base de datos con muchas variables a unas pocas en las que se almacene la mayor cantidad de varianza posible. Estas nuevas variables serán combinaciones lineales de las originales y no serán correlacionadas entre sí.

Utilizando el programa Matlab R2017B se sigue la metodología propuesta por Haan (1979) en donde el primer paso es calcular una matriz de correlación, para ello se utiliza la función *corrcoef* de MATLAB en la base de datos de CHIRPS para la cuenca del Tempisque, esta base de datos tiene 181 puntos por 492 datos, lo cual representa los datos mensuales de precipitación para el periodo 1970-2010.

Una vez que se tiene esta matriz se calculan los eigenvalores y eigenvectores, para ello se utiliza la función *eig* de MATLAB, una vez que se tienen estos valores, deben de ser introducidos en la siguiente ecuación

$$A = \lambda_j^{\frac{1}{2}} * a_{ij} \quad (11)$$

De la ecuación anterior, λ serán los eigenvalores ordenados de mayor a menor y a son los eigenvectores, A será una matriz de dimensiones $p \times p$ en la cual se tienen los coeficientes para hacer la transformación lineal. El siguiente paso es calcular las anomalías de los datos iniciales X y normalizar estos valores, esto se logra con la siguiente ecuación

$$X = [(X_{ij} - \bar{X})/S_j] \quad (12)$$

Una vez que se tiene el valor X , solo resta realizar la multiplicación por la matriz A en la que se encuentran los factores para obtener los componentes principales, de esta forma:

$$Z = X * A \quad (13)$$

Donde Z será una matriz $n \times p$ donde tendrá n valores por p componentes principales. Con este análisis se logran obtener valores que pueden ser correlacionados con distintas variables para identificar cuál de ellas es la causante de la variabilidad en los datos. Sin embargo, este

análisis se puede mejorar si se aplica una rotación en los eigenvectores, con lo cual, el análisis físico del mismo sea asociable con mayor facilidad a un fenómeno en particular.

El método aquí utilizado es el propuesto por Kaiser (1958) llamado rotación ortogonal Varimax, el objetivo de ello es lograr que las variables que se están analizando obtengan un valor de correlación en las cargas cercano a 1 para uno de los componentes principales y valores cercanos a 0 para los demás.

Con los componentes principales rotados se realizan correlaciones utilizando los índices que se muestran en la tabla 2.2. Estos índices fueron recopilados para el periodo 1969-2010, el año extra se utiliza para hacer correlaciones con diferentes rezagos de tiempo. Estas correlaciones se introducen en una tabla como la que se muestra a continuación.

Tabla 2.3 Ejemplo de tabla de correlación utilizada en el análisis de componentes principales

Ejemplo tabla de correlacion	Rezago	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0	
	Mes	J	A	S	O	N	D	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	
3														-0.37					
4																			
5																			
6																			
7																			

La interpretación de las tablas de correlación debe de realizar de la siguiente forma: las correlaciones se harán siempre entre los componentes principales para la época lluviosa (mayo-noviembre) y el promedio de los fenómenos de variabilidad climática (tabla 2.2) durante diferentes escalas de tiempo que van de 3 a 7 meses (columna mes en la tabla 2.3). Estas correlaciones tienen diferentes rezagos (16 a 0 meses, fila celeste) lo que permite identificar cómo una oscilación afecta la época lluviosa, pese a que esta haya ocurrido meses atrás. Utilizando la tabla 2.3 de ejemplo, el resultado de correlacionar la época lluviosa (mayo-noviembre) con tres meses de alguno de los índices (mayo-julio) para un rezago de cuatro meses, daría como resultado -0,37.

2.2.3 Efecto del cambio de cobertura de la tierra en la hidrología

En esta sección se explica el funcionamiento de forma general del modelo hidrológico que se utiliza en la investigación, el proceso de calibración del mismo y la metodología que se realiza para analizar los cambios de cobertura y posterior efecto en la hidrología superficial.

2.2.3.1 Descripción del modelo hidrológico

Para el análisis de cambios de cobertura y su efecto en la escorrentía, se utiliza el modelo HBV (Hydrologiska Byrans Vattenavdelning) desarrollado originalmente por el Instituto Meteorológico e Hidrológico de Suecia a partir del año 1970. La versión específica del modelo HBV-light se desarrolla en la universidad de Uppsala en el año 1993 y una nueva versión fue desarrollada por la Universidad de Zurich, en la cual se pueden modelar diferentes intervalos de tiempo, así como distintas subcuencas y zonas de elevación (Seibert & Vis, 2012).

El modelo hidrológico HBV-light es un modelo semidistribuido, es decir, se puede dividir en distintas zonas de acuerdo con el tipo de análisis que se esté realizando. Estas áreas pueden ser: una cuenca hidrológica dividida en distintas subcuencas, en niveles de elevación o bien tres coberturas vegetales. Para los distintos análisis que realiza el modelo se usan datos diarios de precipitación (mm), temperatura (°C), caudal (mm) y evapotranspiración (mm) la cual pueden ser datos diarios o mensuales.

Este modelo se clasifica como conceptual, es decir, reproducen todos los componentes del ciclo hidrológico utilizando ecuaciones semi-empíricas con una base física y utiliza parámetros que pueden ser recolectados en campo o mediante calibraciones (Gayathir et al., 2015).

El modelo cuenta con 3 rutinas distintas, las cuales analizan la formación de nieve, humedad de la superficie del suelo y agua subterránea (Figura 2.2). Dadas las características propias del sitio donde se aplicará el modelo, no se utiliza la rutina de nieve. A continuación, se analizan de forma general la rutina de superficie del suelo ya que esta es la que se utilizará para modelar los cambios de cobertura de la tierra en la cuenca del Tempisque; para un análisis más a fondo de las rutinas de nieve y aguas subterráneas, revisar Seibert (2005) y Seibert & Vis (2012).

2.2.3.2 Rutina humedad del suelo

En esta sección se modela el efecto del agua en la superficie del suelo, esta agua puede provenir de precipitación o bien el derretimiento de la nieve, los parámetros que se utilizan son: **FC** el cual responde a la máxima cantidad de humedad que puede almacenar el suelo (mm), **LP** valor de humedad del suelo en el que la evapotranspiración actual es igual a la

evapotranspiración potencial, **BETA** analiza la contribución relativa de la precipitación o el derretimiento de la nieve a la humedad del suelo.

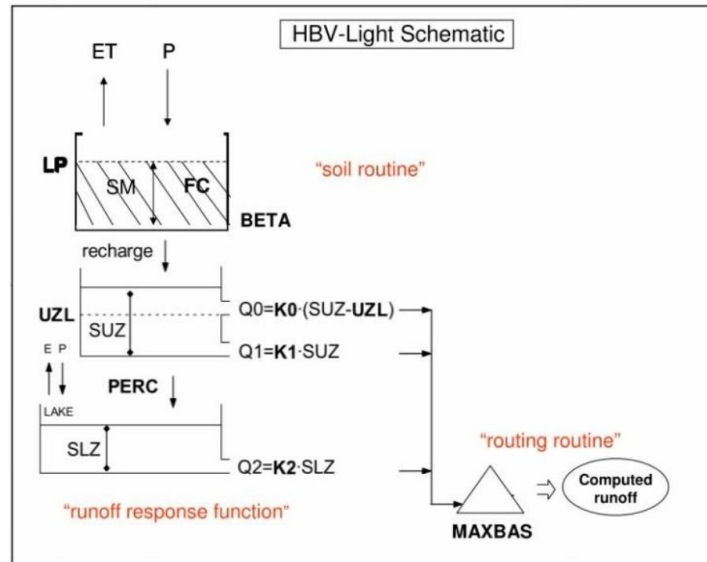


Figura 2.2 Modelo HBV-light, rutinas de suelo y agua subterránea (Gendzh, 2015).

Estos parámetros son utilizados en la ecuación (14) para determinar las salidas asociadas a la evaporación y a los flujos resultantes que, por los procesos de percolación, entrarán a la tercera parte de la rutina (agua subterránea).

$$\frac{F(t)}{I(t)} = \left(\frac{S_{SOIL}(t)}{P_{FC}} \right)^{P_{BETA}} \quad (14)$$

$$E_{act} = E_{pot} * \min \left(\frac{S_{SOIL}(t)}{P_{FC} * P_{LP}}, 1 \right) \quad (15)$$

De lo anterior: $I(t)(mm d^{-1})$ es la cantidad de agua entrante al suelo (en este caso asociado a la precipitación), $F(t)(mm d^{-1})$ es el flujo que se dirige a las capas subterráneas, de esta relación se obtiene un valor $P(t)$ el cual es el agua que se agrega a la capa del suelo. Este valor es una función de la razón entre el agua contenida actualmente por el suelo $S_{SOIL}(t)(mm)$ y su máxima capacidad $P_{FC}(mm)$. Además del agua que se infiltra en el suelo, el modelo también calcula las pérdidas asociadas a la evapotranspiración, las cuales son dadas por la ecuación (15).

2.2.3.3) Descripción de la metodología utilizada en el modelo

Siguiendo la metodología utilizada por Birkel et al. (2012) en la cuenca del río Sarapiquí, se parte del hecho de que las coberturas boscosas generarán una mayor facilidad para que el suelo infiltre el agua que llegue a su superficie asociado a la precipitación. Este fenómeno será menor en los suelos con una cobertura de pastos y aún menor en suelos con coberturas agrícolas. Este comportamiento, estará asociado al parámetro **FC** del modelo, por lo que:

$$FC_{Bosque} > FC_{Agricola} > FC_{Pasto} \quad (16)$$

Lo anterior fue también identificado en la investigación elaborada por Seibert & McDonnell (2010) para una cuenca en Oregon, Estados Unidos, utilizando un sistema de cuencas pareadas se reconoce que, al eliminar la cobertura vegetal de una cuenca, el parámetro FC, tiende a ser mucho menor al momento de calibrar el modelo, lo que significa menos cantidad de agua en el suelo.

Por lo anterior, el modelo utilizará tres tipos de cobertura distinta (bosque, pastos, agrícola) con diez niveles de elevación distintos. Una vez que el modelo logra reproducir de forma apropiada los datos observados, se procede a realizar cambios en las coberturas forestales de acuerdo a las imágenes satelitales obtenidas (1989, 1999, 2009, 2014, 2017) y todo cambio en los caudales simulados estaría asociado a cambios de cobertura de la tierra.

2.2.4) Calibración del modelo

Este proceso se realiza utilizando la cobertura de la tierra para el año 1989 y diez zonas de elevación distintas las cuales debían de estar bien distribuidas a lo largo de la cuenca. La distribución de las zonas se puede observar en el anexo 2. Se establece un periodo de calentamiento del modelo que abarca los años 1987 a 1989, el periodo de calibración se define para los años 1990 a 1999, dejando los años 2000 al 2003 como un periodo de validación.

El proceso de calibración se realiza mediante el *método generalized likelihood uncertainty estimation* (GLUE, Beven et al. 1992) utilizando simulaciones de Monte Carlo. El objetivo es lograr un set de parámetros (en este caso las mejores 100 simulaciones) que tengan capacidad de reproducir valores cercanos a los observados. Inicialmente se realizaron dos millones de iteraciones, estos resultados se evalúan con una función objetivo, la cual utiliza tres parámetros distintos, los cuales se muestran a continuación:

$$\text{Nash - Sutcliffe Efficiency (Reff)} = 1 - \frac{\sum(Q_{obs} - Q_{sim})^2}{\sum(Q_{obs} - \bar{Q}_{obs})^2} \quad (17)$$

$$\text{Logarithmic Nash - Sutcliffe Efficiency (logReff)} = 1 - \frac{\sum(\ln Q_{obs} - \ln Q_{sim})^2}{\sum(\ln Q_{obs} - \ln \bar{Q}_{obs})^2} \quad (18)$$

$$\text{Volumetric Efficiency (VE)} = 1 - \frac{\sum(Q_{obs} - Q_{sim})}{\sum Q_{obs}} \quad (19)$$

Cada uno de estos parámetros evalúa aspectos distintos del modelo. Para el caso de la eficiencia utilizando Nash-Sutcliffe se analiza la capacidad del modelo para reproducir los picos de los caudales. En su versión logarítmica este parámetro examina los flujos base, con ello se puede identificar si el modelo de forma general está subestimando o sobreestimando los caudales. Finalmente, la prueba de eficiencia volumétrica se enfoca en la capacidad del modelo de generar un caudal similar al observado, independientemente de la dinámica del caudal, ya que este método analiza tanto los flujos base como los picos de caudal.

El proceso de calibración se realizó utilizando una versión estándar del modelo HBV-light, sin embargo, en otras investigaciones se ha demostrado que este modelo también puede ser utilizado en su versión de tres cajas de agua subterránea (Quesada-Montano et al., 2018). El set de parámetros y sus respectivos intervalos utilizados en la primera prueba de Monte Carlo con dos millones de iteraciones se observa en la tabla 2.4. Este set fue evaluado con los métodos de eficiencia antes mencionados y se realiza un análisis de sensibilidad (anexo 3) de los parámetros del modelo para ajustar los intervalos.

Tabla 2.4 Rango de parámetros utilizados para calibrar el modelo HBV-light versión estándar

Parámetro	Primera Simulación Monte Carlo (2 millones de iteraciones)		Segunda Simulación de Monte Carlo (1 millón de iteraciones)	
	Inicio Intervalo	Final Intervalo	Inicio Intervalo	Final Intervalo
FC	1	3000	1	400
BETA	1	40	6	20
PERC	1	30	2.5	15
ALPHA	0	1.5	0	0.4
K1	0.01	0.3	0	0.1
K2	0.0001	0.1	0.01	0.012
MAXBAS	1.25	3.5	2	2.5
PCALT	0	20	0	2
Análisis Eficiencia				
	Percentil 0.05	Percentil 0.95	Percentil 0.05	Percentil 0.95
Reff	0.51	0.6	0.61	0.64
LogReff	0.58	0.71	0.68	0.72
VE	0.91	0.98	0.97	0.99

Una vez que se ajustaron los intervalos se realizó una segunda simulación de Monte Carlo con un millón de iteraciones, esta fue la versión final del modelo calibrado, las cien mejores simulaciones obtuvieron eficiencias de 0.76, siendo 1 el valor máximo, por lo que se considera que el modelo tiene la capacidad de reproducir los datos observados de caudal. En la figura 2.3 se puede observar la banda con las mejores 100 simulaciones y los datos observados.

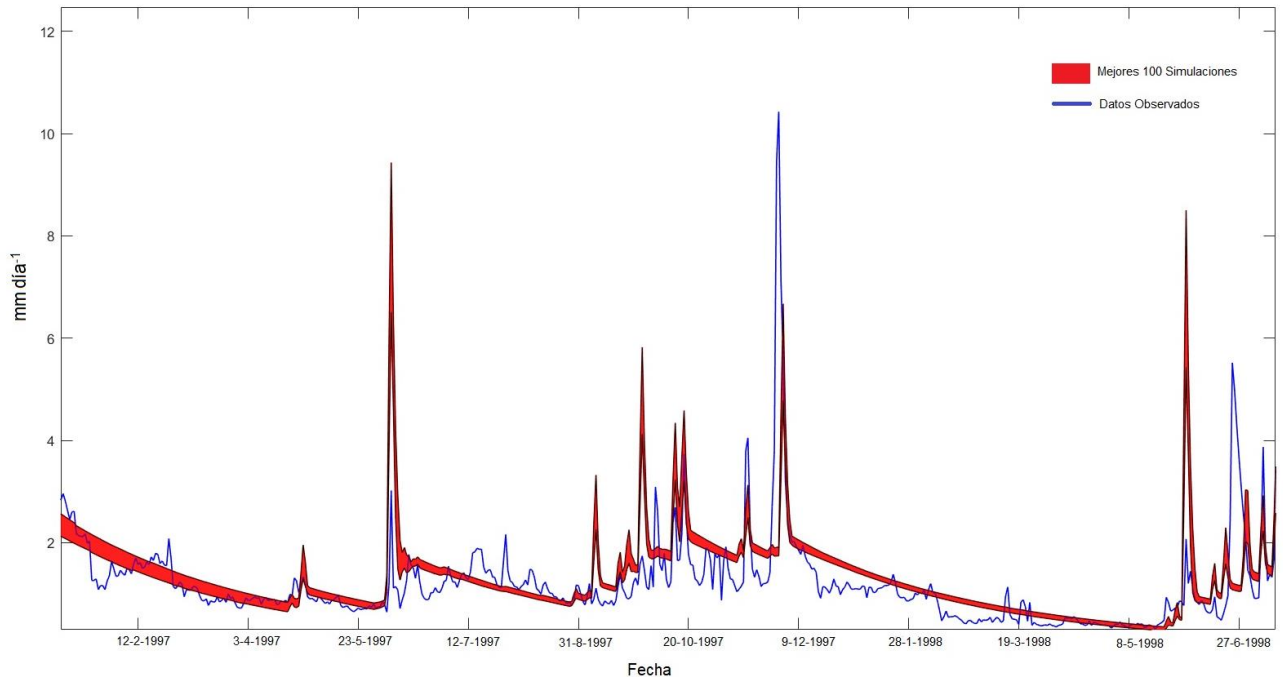


Figura 2.3: Banda con las mejores 100 simulaciones y los datos observados por la estación Guardia.

En general el modelo logra capturar el comportamiento de la hidrología de la cuenca, sin embargo, existen aumentos en el caudal que no logra reproducir, esto se debe a que los datos de entrada presentan errores, principalmente aumentos de precipitación observada que no se reflejan en los datos de caudal observados y viceversa.

Para hacer la validación del modelo se dejan cuatro años (2000-2003) y se utilizan los parámetros que se encontraron en la segunda calibración de Monte Carlo con un millón de iteraciones (tabla 2.4), los resultados de eficiencia de este periodo son de alrededor de 0.79.

Con el modelo calibrado, se procede a realizar los análisis que provoca los cambios en la cobertura de la tierra en los caudales, para ello, se hacen dos acercamientos distintos: primeramente, se analiza este efecto en el corto plazo, por lo que se identifica el máximo pico de caudal en el periodo de datos y a partir de los cambios en la cobertura de la tierra, se analiza como este evento se modifica de acuerdo a las coberturas. El segundo análisis se llevará a cabo transformando los caudales diarios a totales mensuales y anuales, de esta forma se reconocerán los efectos a largo plazo.

Capítulo III: Análisis de tendencias para la cuenca del río Tempisque

Según los resultados obtenidos del análisis de tendencias, el comportamiento anual de la precipitación presenta una disminución en el sector este de la cuenca, cercano a la cordillera volcánica de Guanacaste (figura 3.1)

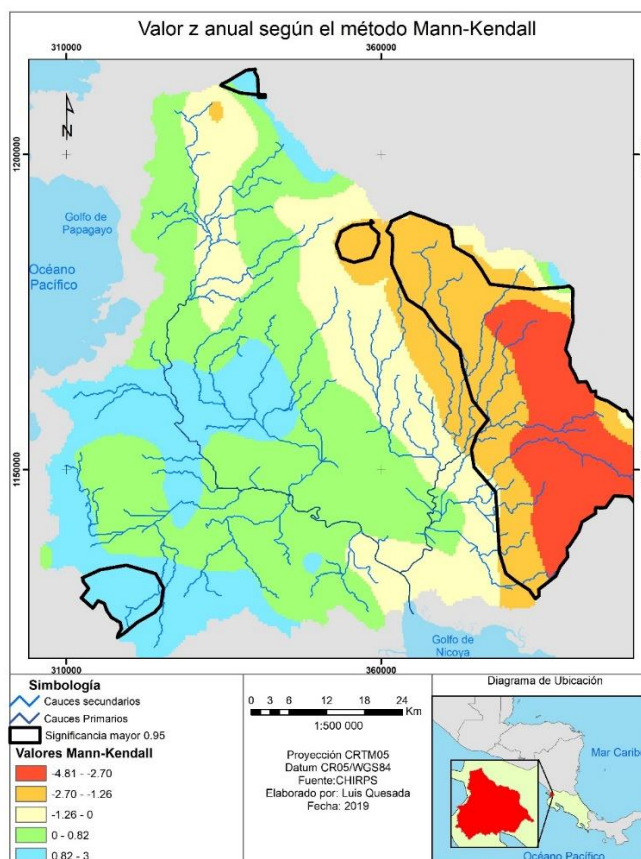


Figura 3.1: Tendencia en la precipitación anual para la cuenca del río Tempisque, periodo 1970-2010, así como las áreas en las que esta tendencia tiene una significancia estadística.

Estas áreas presentan una tendencia negativa estadísticamente significativa, con un nivel de confianza de 0.95. Esta tendencia anual en la precipitación ha traído consigo cambios importantes en el caudal de la gran cuenca del Tempisque, principalmente en el sector asociado a la cuenca Bebedero el cual se ubica precisamente al este de esta área. Este comportamiento sumado a fenómenos de variabilidad climática, podría ser una de las razones por las cuales las sequías en Guanacaste se han tornado mucho más severas (Birkel, 2006).

Cuando se analiza el comportamiento de las tendencias en la precipitación durante la época seca, se presenta el mismo fenómeno ocurrido durante las tendencias anuales, sin embargo, las áreas que presentan una tendencia a menores precipitaciones se extienden hasta abarcar prácticamente la mitad de la cuenca (figura 3.2).

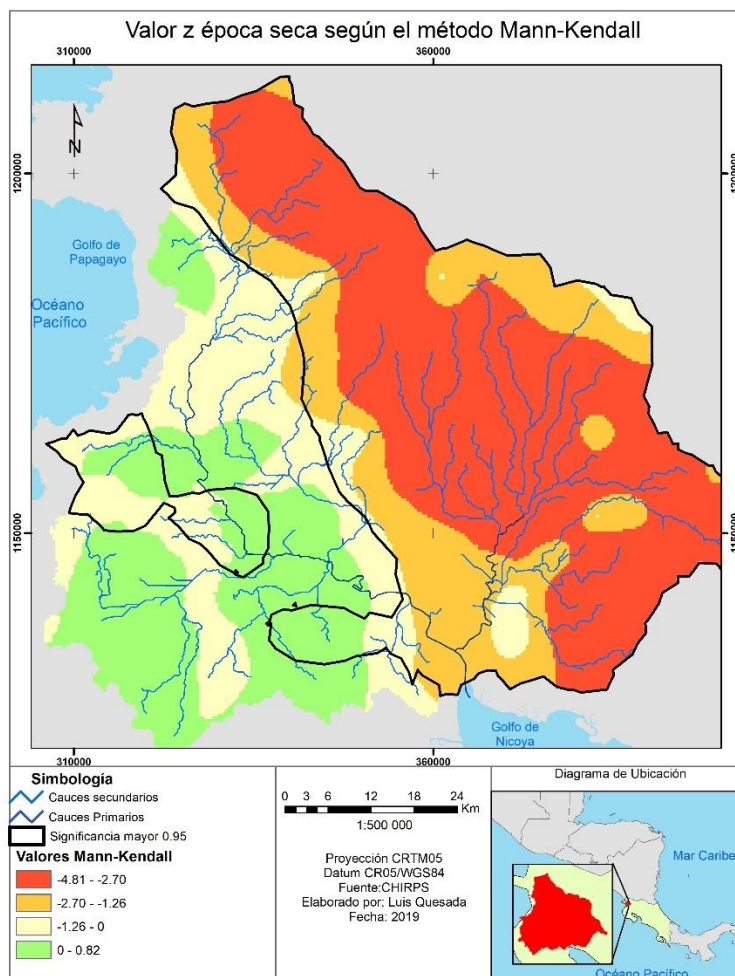


Figura 3.2. Tendencias de precipitación en la cuenca del río Tempisque durante la época seca (Diciembre-Abril) durante el periodo 1970-2010

Para este caso, la cuenca alto Tempisque si se estaría viendo afectada, a diferencia de las tendencias anuales que muestran esta disminución en la precipitación principalmente en el sector Bebedero. De esta figura se puede deducir, que las épocas secas en las últimas décadas han presentado cada vez una menor precipitación, por lo que el periodo de estiaje de los ríos puede estar aumentando, por lo que, si se analizan los caudales, estos también presentarían una tendencia a valores menores.

Al realizar este análisis durante la época lluviosa (Figura 3.3), se observan áreas donde hay una tendencia a la baja en la precipitación, similar al comportamiento anual y época seca, siempre ubicándose en el sector este de la cuenca, por lo que, en las épocas lluviosas, la precipitación estaría disminuyendo en el sector Bebedero de la cuenca.

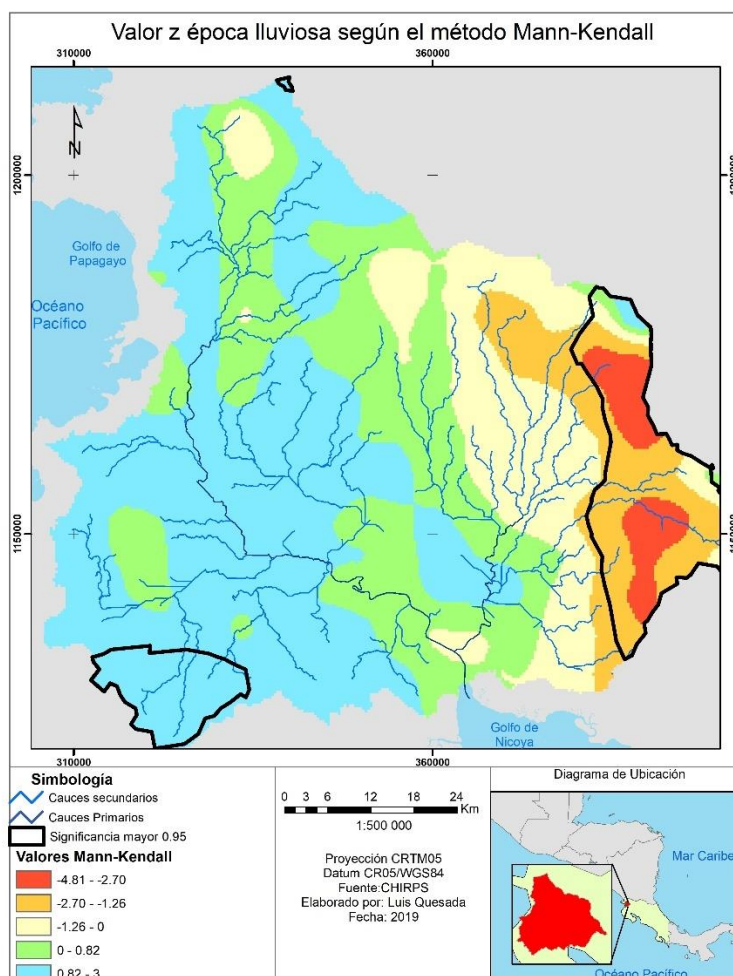


Figura 3.3: Tendencia en la precipitación durante la época lluviosa (mayo-noviembre) durante el periodo 1970-2010 en la gran cuenca del río Tempisque

De las figuras anteriores se puede reconocer que el sector este de la cuenca del Tempisque, principalmente la cuenca del río Bebedero, es donde la disminución de la precipitación es más notorio y estadísticamente significativo. Pese a ello, la cuenca del Alto Tempisque durante las épocas secas también se estaría viendo afectada por esta disminución.

La investigación de Hidalgo et al. (2017) llega a una conclusión similar realizando un análisis para todo Centroamérica. En la figura 3.4 se puede apreciar como el área cercana a la cuenca

del río Tempisque presenta una disminución en la precipitación, así como un ligero aumento en las temperaturas para el periodo 1970-1999.

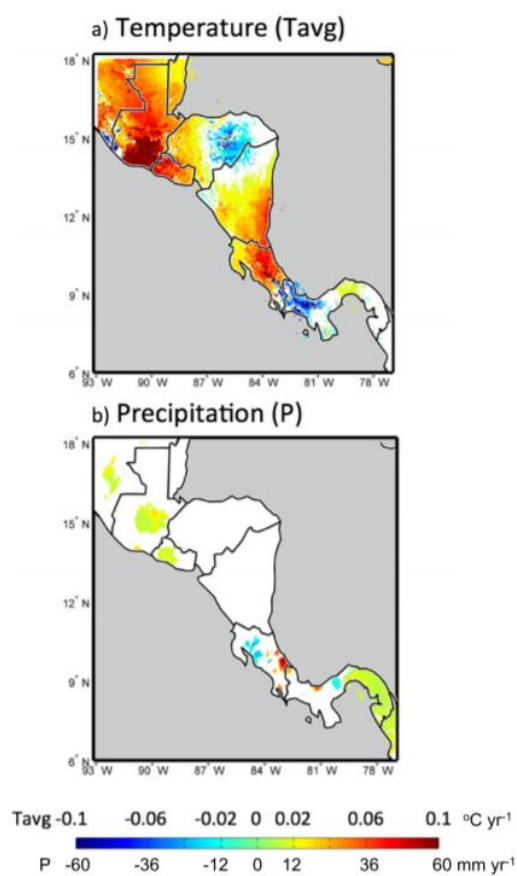


Figura 3.4. Tendencias anuales en la precipitación y temperatura para Centroamérica en el periodo 1970-1999 (Hidalgo et al 2017).

Los resultados obtenidos del análisis de tendencias (figuras 3.1, 3.2 y 3.3) también son consistentes con las observaciones del Global Precipitation Climatology Project (GPCP), al comparar la década de 1970 con la del 2000 (figura 3.5), se observa una anomalía negativa en la precipitación en Guanacaste.

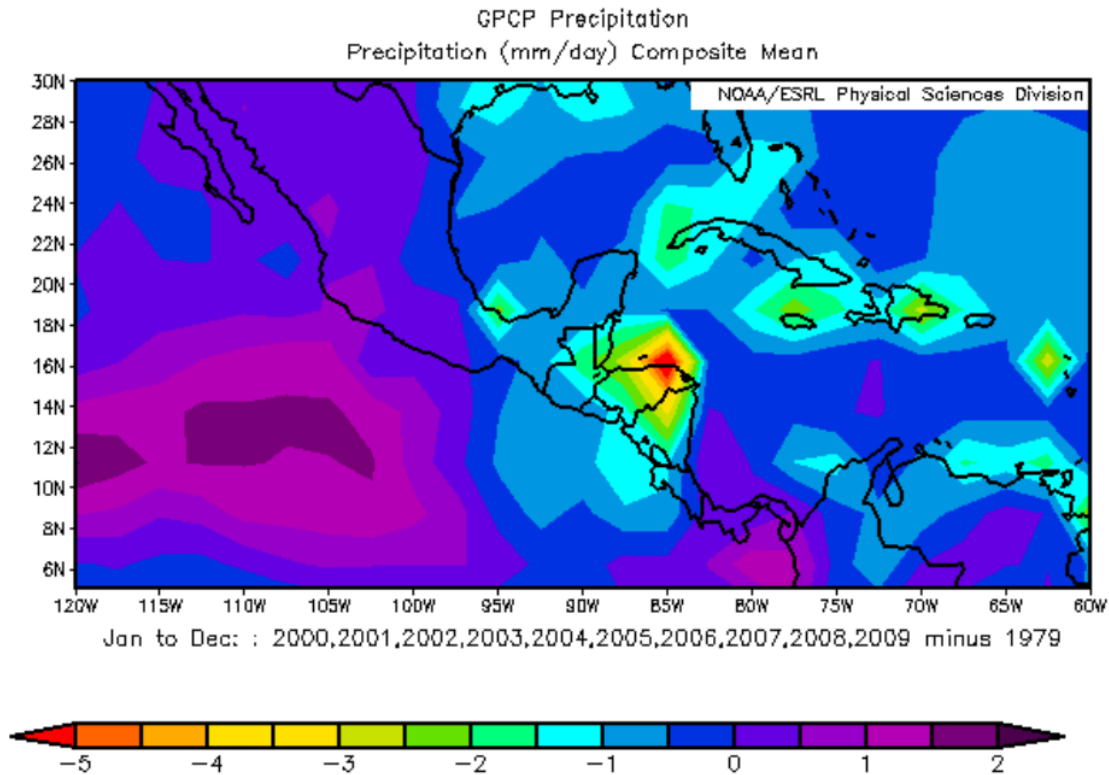


Figura 3.5 Anomalía de precipitación entre la década 1970 y 2000 (Adler et al., 2003).

Encontrar una razón por la cual este sector de la cuenca del Tempisque presente una menor precipitación resulta complejo de atribuir a un fenómeno o un mecanismo en específico, ya esta tendencia podría estar respondiendo a un comportamiento estadístico de los datos y no a un mecanismo físico en particular. Sin embargo, comparando la magnitud y dirección de los vientos en la década de 1970 con los presentados en la década del 2000 (figura 3.6), se observa un aumento en la magnitud de los vientos norestes precisamente justo sobre Guanacaste.

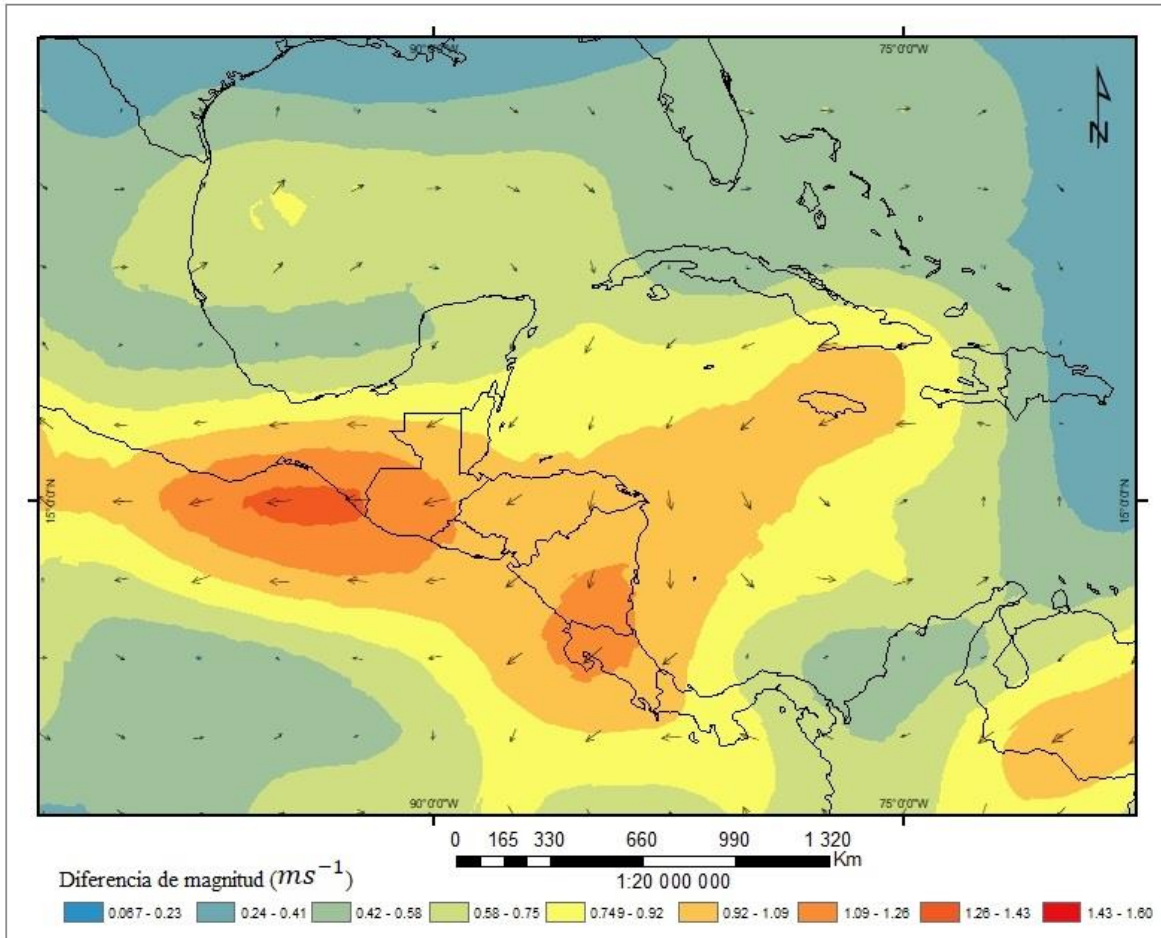


Figura 3.6 Diferencia de magnitud (ms^{-1}) y dirección del viento entre la década de 1970 y 2000, Elaboración propia a partir de Kalnay et al. (1996)

Este aumento en la magnitud del viento proveniente del noreste podría estar originando una subsidencia sobre el este de la cuenca del río Tempisque, que está asociado a condiciones más secas en el pacífico (Hidalgo et al., 2018). A lo anterior se le debe de agregar cambios en el CLLJ, fenómeno responsable de cambios en la magnitud y distribución de la precipitación en América Central (Amador, 1998; 2008). Por ello, se debe realizar un análisis de distintos mecanismos de variabilidad climática, los cuales provoquen aumentos o disminuciones en distintos plazos de tiempo.

Capítulo IV: Variabilidad Climática en la gran cuenca del Río Tempisque

4.1 Distribución espacial de los componentes principales rotados

Para analizar la relación espacial entre los componentes principales y los datos de precipitación, se realiza una correlación entre los tres primeros componentes y los datos originales. Para el primer componente principal rotado (CPR) responde a un 59.3% de la varianza y se observa que éste está asociado a la variabilidad que experimenta prácticamente toda la cuenca, sin embargo, presenta una menor correlación cerca de la Cordillera Volcánica de Guanacaste, que se ubica en el este de la cuenca (figura 4.1, A).

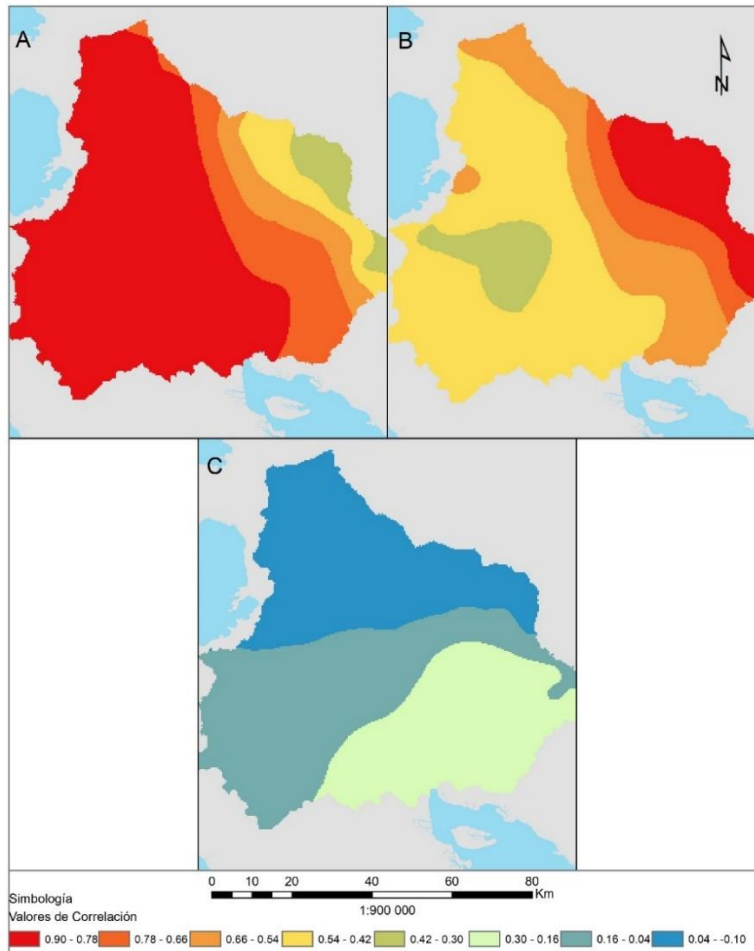


Figura 4.1 Correlación entre la precipitación y (A) primer componente representando un 59.3% de la varianza, (B) segundo componente 33.3% de la varianza y (C) tercer componente 3.39% de la varianza.

El segundo CPR (33.3% de la varianza), muestra una mayor correlación con el sector este (figura 4.1, B), en apariencia, este componente es el que estaría relacionado con la tendencia en la precipitación (figura 3.1, 3.2 y 3.3), asociadas a la tendencia en la baja en la precipitación. Esta distribución del segundo CPR, también demuestra que los índices que se utilizaron en esta investigación para explicar la variabilidad climática no están relacionados con las variaciones presentes en este sector.

Finalmente, el tercer CPR cuya varianza corresponde a un 3.39% (figura 4.1, C), está correlacionado con la precipitación del sector sur de la cuenca, sin embargo, este presenta los valores de correlación más bajos de todos los CPR elegidos.

4.2 Análisis de los componentes principales obtenidos

Cómo se desarrolló en la metodología, se utiliza el método de componentes principales con una rotación varimax para identificar los distintos fenómenos que generan cambios en el comportamiento de la precipitación en la cuenca del río Tempisque. De este método se obtienen las primeras tres componentes (figura 4.2) las cuales describen el 96.4 del total de la varianza presente en los datos de precipitación en el periodo 1970-2010.

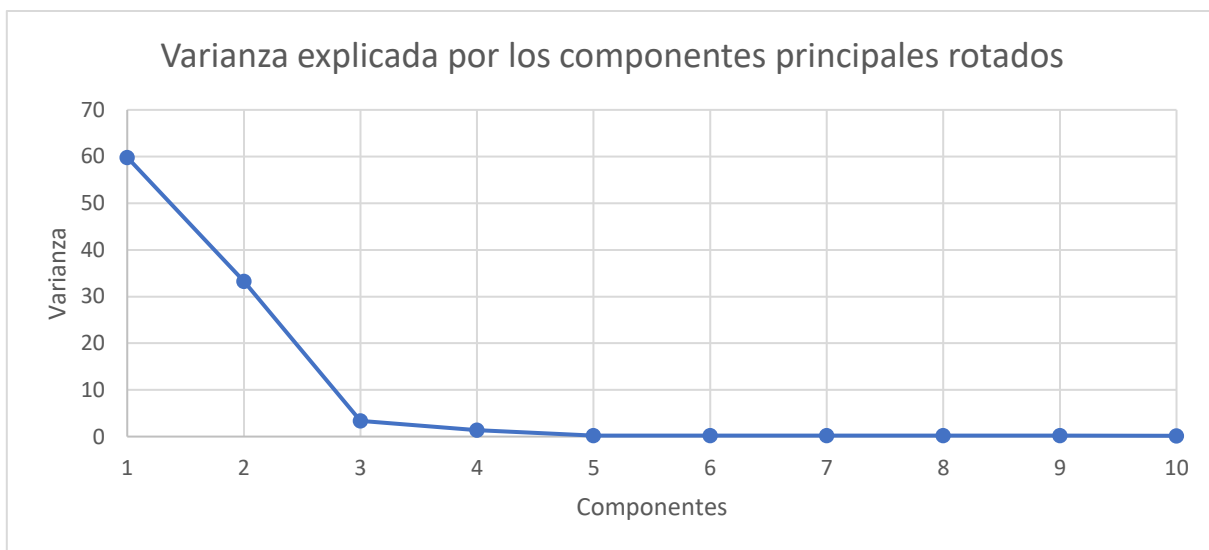


Figura 4.2 Varianza explicada por la totalidad de componentes principales

Utilizando estas componentes, se obtienen los eigenvalores para cada una de ellas con el fin de realizar distintos tipos de correlaciones entre los índices que se muestran en la tabla.

El primer análisis que se realiza, es una correlación mensual entre los diferentes componentes y los índices escogidos, esto genera como resultado la tabla 4.1 y 4.2. El efecto de la ZCIT es bastante notorio en escalas mensuales, todos los índices asociados a la ZCIT tienen una alta correlación con el primer y segundo componente principal, a excepción del índice relacionado con la latitud y la dispersión del centro de masa de la ZCIT para el primer componente. En esta escala de tiempo, la variable que más estaría influyendo es la longitud asociada al centro de masa, es decir, que tan cerca se encuentre la ZCIT al área de estudio.

Tabla 4.1: Correlaciones entre los componentes principales y los índices de distintos fenómenos a una escala mensual

	Correlación 1 Componente	Correlación 2 Componente	Correlación 3 Componente
AMO	0.20	-0.02	-0.03
MEI	-0.08	-0.08	0.08
PDO	-0.03	0.06	-0.01
CLLJ	0.45	-0.12	-0.04
ZCITLAT	0.32	0.68	-0.05
ZCITLON	0.62	0.44	0.13
ZCITSPR	-0.38	-0.55	-0.04
ZCITP	0.42	0.41	0.23

El índice relacionado con El Niño presenta una correlación nula para todos los componentes a escalas mensuales, lo mismo ocurre con la oscilación decadal del Pacífico. La Oscilación Multidecadal del Atlántico tiene una ligera correlación con el primer componente, pero de igual forma esta relación es baja, dada las características propias de esta oscilación, la cual presenta cambios en escalas de tiempo mucho mayores que las mensuales (Enfield et al. 2001). El otro fenómeno de importancia a nivel mensual es el CLLJ, dada su alta actividad durante los meses de junio, julio y agosto este tiene una alta relación con la precipitación en la costa pacífica de América Central, este resultado de alta correlación entre precipitación y el CLLJ también se obtuvo en la investigación elaborada por Hidalgo et al. (2017).

Respecto a la correlación anual de los componentes y los índices analizados (tabla 4.2), como se podría esperar la AMO adquiere una mayor correlación con el primer componente en comparación con las escalas mensuales, dado a que se está analizando una escala de tiempo en donde se puede apreciar con mayor facilidad la influencia de este fenómeno.

Tabla 4.2: Correlaciones entre los componentes principales y los índices a una escala Anual

Índice	Correlación 1 componente	Correlación 2 Componente	Correlación 3 Componente
AMO	0.51	-0.38	-0.23
MEI	-0.20	-0.18	-0.17
PDO	0.06	0.08	0.02
CLLJ	0.53	0.12	-0.52
ZCIT LAT	0.18	0.19	0.00
ZCIT LON	0.56	0.26	-0.12
ZCIT SPR	-0.48	0.17	-0.10
ZCIT P	-0.36	-0.06	-0.10

El MEI también presenta un aumento, aunque ligero, la correlación al ser inversa demuestra que cuando hay aumentos en este índice, asociados por ejemplo a aumentos en la temperatura superficial del mar, habrá un descenso en la precipitación presente en la cuenca. Esto se aprecia para los 3 componentes principales, mostrando la mayor correlación para el primer componente. Hay un aumento notorio de la correlación mostrada por el CLLJ a una escala anual, se observa un valor de 0.53 para el primer componente, sin embargo, hay una correlación inversa para el tercer componente de -0.52, esta respuesta se puede asociar al efecto del fenómeno El Niño, el cual provoca una disminución en la precipitación y un aumento en la actividad del CLLJ.

En esta escala de tiempo, la ZCIT sigue presentando una influencia importante para el primer componente asociado principalmente a las variables de longitud y a la dispersión del centro de masa. En este punto se puede reconocer que las variables que estarían modificando el comportamiento anual de la precipitación sería la AMO, ZCIT y el CLLJ, pese a esto, no se puede obviar el efecto que produce el Niño en la precipitación de la cuenca el cual ya ha sido documentado con anterioridad (Hidalgo et al., 2019).

Correlacionando los índices mensual y anualmente con los CPR permite observar de forma general ciertos patrones, sin embargo, un análisis con mayor profundidad se debe de realizar. Por ello a continuación se muestran las correlaciones de los índices con distintos periodos de tiempo, así como rezagos, lo que permita aclarar las relaciones de cada uno de los componentes con los índices en específico.

4.3 Correlaciones entre los índices y el primer CPR.

Como se aprecia en la tabla 4.2, uno de los índices que más influencia tendrá en la precipitación, es la Oscilación Decadal del Atlántico, esto queda confirmado observando la tabla 4.3, en donde se muestran las correlaciones con una significancia de 0.95 sombreada en negro.

Durante todo el periodo que se analiza, esta oscilación tendrá una alta influencia en la variación de la precipitación. De esta forma al correlacionar el periodo noviembre-mayo del índice AMO con el promedio de época lluviosa (mayo-noviembre) de los CPR con seis meses de rezago, se obtiene una correlación de 0.49. Esto indica que la precipitación en la cuenca se estaría viendo afectada constantemente por los cambios en la AMO.

Tabla 4.3. Correlaciones con significancia de 0.95 entre el Primer Componente Rotado (mayo-noviembre) y la Oscilación Multidecadal del Atlántico según Enfield et al. (2001).

	Rezago	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
	Mes	J	A	S	O	N	D	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N
AMO vs PCR 1	3	0.38	0.34	0.34	0.36	0.41	0.43	0.44	0.44	0.47	0.46	0.47	0.46	0.44	0.38	0.35	0.33	0.35
	4	0.42	0.37	0.34	0.36	0.39	0.41	0.44	0.45	0.46	0.47	0.48	0.47	0.45	0.41	0.38	0.35	0.34
	5	0.43	0.4	0.37	0.36	0.38	0.39	0.42	0.45	0.47	0.47	0.48	0.48	0.46	0.42	0.4	0.37	0.35
	6	0.44	0.41	0.4	0.38	0.38	0.39	0.41	0.43	0.46	0.47	0.48	0.48	0.47	0.43	0.41	0.39	0.37
	7	0.46	0.43	0.41	0.4	0.39	0.39	0.4	0.42	0.45	0.47	0.49	0.49	0.47	0.44	0.42	0.4	0.39

Esta relación entre la precipitación y la AMO, ya ha sido reconocida en diferentes investigaciones que se han realizado para la vertiente del Pacífico, donde valores más cálidos (fríos) de AMO tienden a generar condiciones más secas (húmedas) (Maldonado et al., 2013; Alfaro, 2007, Fallas-López & Alfaro, 2013). Esta relación tan clara entre esta oscilación y la precipitación da una oportunidad para generar sistemas de predicción de precipitación con muchos meses de anticipación.

El CLLJ tiene un efecto mucho más rápido en comparación con la AMO, ya que, debido a las características del Chorro, éste genera cambios en un periodo de tiempo más corto, las máximas correlaciones se dan para un máximo de cuatro meses de rezago. Los valores de correlación mayor se observan para tres meses de rezago, específicamente para el trimestre junio, julio y agosto, siendo este periodo donde mayor actividad tiene el jet.

Tabla 4.4. Correlaciones con significancia de 0.95 entre el Primer Componente Rotado (mayo noviembre) y el índice del CLLJ según Amador (2008)

CLLJ vs PCR 1	Rezago	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
	Mes	J	A	S	O	N	D	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N
3	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	0.55	0.64	0.62	0.54	0.44
4	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	0.49	0.62	0.65	0.59	0.52
5	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	0.48	0.58	0.67	0.61	0.57
6	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	0.42	0.57	0.65	0.63	0.6
7	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	0.41	0.51	0.65	0.61	0.61

Para los demás casos (4, 5, 6 y 7 meses promediados), las correlaciones máximas estarán siempre en setiembre, presentando el máximo de correlación para un periodo de cinco meses (mayo-junio-julio-agosto-setiembre) con un rezago de dos meses. Del análisis que se obtiene de AMO y CLLJ es fácil reconocer la influencia que tiene el Océano Atlántico y el Mar Caribe en la precipitación de la cuenca.

Respecto a los fenómenos que se desarrollan en el Océano Pacífico, la PDO no presenta una correlación con el primer CPR, sin embargo, el MEI si tiene influencia en la precipitación de la cuenca (tabla 4.5), se observan correlaciones inversas para plazos muy cortos, es decir, en el momento en que el índice presenta fases cálidas (húmedas) la precipitación tenderá a aumentar (disminuir), esto principalmente en el final de la época lluviosa (setiembre, octubre, noviembre).

Tabla 4.5. Correlaciones con significancia de 0.95 entre el Primer Componente Rotado (mayo noviembre) y el índice multivariado del ENOS index según Wolter & Timli (1993, 1998).

MEI vs PCR1	Rezago	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
	Mes	J	A	S	O	N	D	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N
3	0.4	0.39	0.36	0.33	0.31	0.32	0.31	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	-0.4	-0.47	-0.51	-0.53
4	0.4	0.41	0.37	0.35	0.33	0.31	0.31	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	-0.32	-0.44	-0.5	-0.52
5	0.4	0.42	0.39	0.36	0.35	0.33	NaN	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	-0.38	-0.47	-0.5
6	0.39	0.42	0.4	0.38	0.36	0.34	0.32	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	-0.31	-0.42	-0.48
7	0.39	0.41	0.41	0.4	0.38	0.35	0.34	0.31	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	-0.36	-0.44

Para rezagos superiores a los nueve meses, se observan correlaciones positivas, lo cual es el resultado de la estacionalidad del ENOS y la tendencia a observar condiciones opuestas del índice en año consecutivos, es decir, luego de un evento cálido tiende a desarrollarse un evento frío esto trae como consecuencia periodos con mayor precipitación en la cuenca.

Respecto a los índices que describen el comportamiento de la ZCIT, todos ellos presentan correlaciones a corto plazo al igual que el MEI. Los índices que describen la posición de la

ZCIT (ZCIT LAT y ZCIT LON) presentan correlaciones positivas, es decir, cuando la ZCIT se acerca a la Costa Rica, la precipitación aumenta en la cuenca del Tempisque.

Tabla 4.6. Correlaciones con significancia de 0.95 entre el Primer Componente Rotado (mayo noviembre) y el índice de latitud del centro de masa de la ZCIT según Quirós & Hidalgo (2016a, b).

ITCZLA TC vs PCR1	Rezago	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
	Mes	J	A	S	O	N	D	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N
3	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	0.38	0.38	NS
4	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	0.4	0.36
5	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	0.37	0.38
6	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	0.36
7	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS

Respecto a la latitud, la máxima relación se obtiene en el periodo julio-octubre y la época lluviosa (mayo-noviembre) con un rezago de un mes, el cual da un valor de 0.4, por lo que entre más al norte se encuentre la ZCIT, más precipitación se presenta en la cuenca del río Tempisque. El índice que describe la posición longitudinal del centro de masa también presenta una correlación positiva, por si el centro de masa se encuentra más hacia el este, la precipitación aumentará, la correlación máxima se da con un mes de rezago, entre el periodo mayo-octubre y la época lluviosa con un valor de 0.65.

Tabla 4.7. Correlaciones con significancia de 0.95 entre el Primer Componente Rotado (mayo noviembre) y el índice de longitud del centro de masa de la ZCIT según Quirós & Hidalgo (2016 a,b).

ITCZLO N vs PCR1	Rezago	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
	Mes	J	A	S	O	N	D	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N
3	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	0.37	0.48	0.51	0.61	0.54	0.61	0.49
4	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	0.49	0.51	0.62	0.57	0.61	0.58
5	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	0.41	0.53	0.59	0.59	0.63	0.59
6	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	0.43	0.46	0.6	0.57	0.65	0.61
7	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	0.48	0.53	0.58	0.62	0.63

Las otras dos variables de la ZCIT responden a la precipitación que se da en el centro de masa y la dispersión del mismo, ambos índices tienen una correlación inversa. Es decir, cuando existe una alta precipitación en el centro de masa, hay una menor precipitación en la cuenca, teniendo el máximo valor de correlación para los meses setiembre-noviembre sin rezago, presentando un valor de -0.56.

Tabla 4.8. Correlaciones con significancia de 0.95 entre el Primer Componente Rotado (mayo noviembre) y el índice de precipitación del centro de masa de la ZCIT según Quirós & Hidalgo (2016 a,b).

ITCZP vs PCR1	Rezago	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
	Mes	J	A	S	O	N	D	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N
3	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	-0.37	NS	-0.37	-0.36	-0.56
4	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	-0.42	-0.49
5	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	-0.36	-0.39	-0.51
6	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	-0.41	-0.48
7	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	-0.49

El efecto de la dispersión es mucho más lento en comparación con la precipitación del centro de masa, este índice indicaría que una mayor (menor) dispersión provoca una disminución (aumento) en la precipitación que se presente en el Tempisque. Esta relación tiene su máximo para el periodo febrero-junio con 5 meses de rezago.

Tabla 4.9. Correlaciones con significancia de 0.95 entre el Primer Componente Rotado (mayo noviembre) y el índice de dispersión del centro de masa de la ZCIT según Quirós & Hidalgo (2016 a,b).

ITCZSPR vs PCR1	Rezago	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
	Mes	J	A	S	O	N	D	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N
3	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	-0.4	-0.38	NS	NS	NS	NS	NS	NS
4	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	-0.41	-0.39	NaN	NS	NS	NS	NS
5	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	-0.37	NaN	-0.42	-0.36	NS	NS	NS	NS
6	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	-0.39	-0.37	-0.36	-0.41	-0.37	NS	NS	NS
7	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	-0.36	-0.38	-0.37	NaN	-0.42	-0.39	NS	NS

4.4 Correlaciones entre índices y el segundo CPR

A diferencia de las correlaciones que se observan para el primer CPR, el segundo CPR no muestra correlaciones con ninguno de los índices aquí analizados. Siendo este componente, el que describe la varianza del área donde se observaron tendencias negativas en la precipitación en la sección 3.1, es necesario utilizar modelos físico-matemáticos de escalas regionales que ayuden a entender el mecanismo que aquí está generando estos cambios en los patrones de precipitación.

4.5 Correlaciones entre índices y el tercer CPR

Para el tercer componente sí se encuentran correlaciones significativas, sin embargo, este no es el caso de todas las variables, ya que la PDO, AMO y ZCITLON no muestran relaciones con este componente, pese a ello las demás variables sí mostraron correlaciones (CLLJ, MEI, ZCITSPR, ZCITLAT, ZCITP). En relación con el CLLJ, éste muestra una correlación inversa, lo que podría estar asociada a eventos bajo el efecto del ENOS, los cuales provoquen mayor (menor) actividad del CLLJ, dependiendo de la fase en la que se encuentre este fenómeno.

Tabla 4.10. Correlaciones con significancia de 0.95 entre el tercer Componente Principal Rotado (mayo-noviembre) y el índice del CLLJ según Amador (2008)

CLLJ vs 3 CPR	Rezago	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
	Mes	J	A	S	O	N	D	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N
3	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	-0.32	-0.47	-0.48	NS	NS	-0.35	-0.48	-0.43	-0.39	NS	-0.34
4	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	-0.37	-0.49	-0.42	NS	-0.38	-0.46	-0.44	-0.46	-0.32	-0.34
5	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	-0.42	-0.45	-0.42	-0.37	-0.48	-0.44	-0.49	-0.38	-0.37
6	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	-0.39	-0.44	-0.49	-0.44	-0.46	-0.5	-0.41	-0.42
7	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	-0.39	-0.51	-0.55	-0.44	-0.52	-0.42	-0.45

La máxima correlación para este caso se da en el periodo enero-julio, con cuatro meses de rezago, generando una correlación de -0.55. Por lo que, si el Jet se encuentra más activo en este periodo, la precipitación será menor para la época lluviosa. De nuevo queda en evidencia la fuerte influencia que tiene este mecanismo para la distribución de la precipitación en el Tempisque.

Para el tercer CPR, el MEI está completamente asociado a la fase cálida del ENOS, este componente responde a cambios a más largo plazo en comparación con el primer CPR en el cual se observaba una correlación inversa hasta un máximo rezago de 4 meses. Para este caso la correlación es inversa, por lo que cuando el índice se encuentra en una fase positiva (negativa) la precipitación tenderá a disminuir (aumentar), los efectos del ENOS se estarían presentando cinco meses después de que inicia el aumento en el MEI.

Tabla 4.11. Correlaciones con significancia de 0.95 entre el tercer Componente Principal Rotado (mayo-noviembre) y el índice Multivariado del ENOS según Wolter & Timli (1993, 1998).

MEI vs 3 comp rotado	Rezagó	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
	Mes	J	A	S	O	N	D	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N
3		-0.54	-0.52	-0.47	-0.45	-0.43	-0.42	-0.4	-0.37	-0.36	-0.37	-0.35	NS	NS	NS	NS	NS	NS
4		-0.56	-0.54	-0.5	-0.47	-0.44	-0.42	-0.41	-0.38	-0.37	-0.37	-0.35	-0.32	NS	NS	NS	NS	NS
5		-0.56	-0.57	-0.52	-0.49	-0.46	-0.44	-0.41	-0.4	-0.38	-0.38	-0.36	-0.33	NS	NS	NS	NS	NS
6		-0.53	-0.57	-0.56	-0.52	-0.48	-0.45	-0.43	-0.4	-0.39	-0.39	-0.37	-0.34	NS	NS	NS	NS	NS
7		-0.51	-0.56	-0.57	-0.55	-0.51	-0.48	-0.44	-0.42	-0.4	-0.4	-0.38	-0.36	-0.31	NS	NS	NS	NS

La máxima correlación se encuentra para 15 meses de rezago (-0.57), por lo que los efectos de El Niño se podrían predecir con un margen de tiempo bastante importante, al ser este fenómeno el que más variabilidad climática provoca en la cuenca y más impactos socio-económicos.

El análisis de la ZCIT, de forma similar al MEI, responde a cambios en plazos mayores (tabla 4.12, 4.13 y 4.14), en comparación con el primer CPR. Analizando el índice asociado a la posición latitudinal (tabla 4.12), conforme el centro de masa se encuentre más al norte, habrá un aumento en la precipitación de la cuenca. Los efectos de la dispersión (tabla 4.13), así como la precipitación en el centro de masa (tabla 4.14), son similares, presentando correlaciones inversas con la precipitación con rezagos altos (superiores a 10 meses y 6 meses respectivamente).

Tabla 4.12 Correlaciones con significancia de 0.95 entre el tercer Componente Principal Rotado (mayo-noviembre) y el índice latitudinal del centro de masa de la ZCIT según Quirós & Hidalgo (2016 a,b).

ITCZLAT C vs 3 comp rotado	Rezagó	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
	Mes	J	A	S	O	N	D	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N
3		0.55	0.54	0.48	0.37	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
4		0.47	0.57	0.52	0.44	0.37	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
5		NS	0.5	0.57	0.49	0.43	NS	0.36	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
6		0.36	0.37	0.52	0.57	0.47	0.39	0.37	0.36	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
7		0.36	0.39	0.4	0.54	0.56	0.43	0.4	0.37	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS

Tabla 4.13 Correlaciones con significancia de 0.95 entre el tercer Componente Principal Rotado (mayo-noviembre) y la dispersión del centro de masa de la ZCIT según Quirós & Hidalgo (2016 a,b).

ITCZSPR vs 3 comp rotado	Rezago	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
	Mes	J	A	S	O	N	D	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N
3		-0.36	-0.52	-0.56	-0.66	-0.46	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
4		NS	-0.45	-0.54	-0.63	-0.55	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
5		NS	NS	-0.48	-0.62	-0.57	-0.42	-0.36	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
6		NS	NS	NS	-0.56	-0.6	-0.46	-0.42	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
7		NS	NS	NS	-0.38	-0.55	-0.5	-0.44	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS

Tabla 4.14 Correlaciones con significancia de 0.95 entre el tercer Componente Principal Rotado (mayo-noviembre) y la precipitación en el centro de masa según Quirós & Hidalgo (2016 a,b)

ITCZP vs 3 comp rotado	Rezago	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
	Mes	J	A	S	O	N	D	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N
3		-0.41	-0.44	-0.43	-0.53	-0.52	-0.47	-0.39	NS	-0.36	-0.44	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
4		-0.49	-0.45	-0.45	-0.49	-0.54	-0.48	-0.43	-0.41	-0.36	-0.4	-0.38	NS	NS	NS	NS	NS	NS
5		-0.48	-0.52	-0.47	-0.5	-0.51	-0.5	-0.44	-0.43	-0.4	-0.39	-0.36	-0.36	NS	NS	NS	NS	NS
6		-0.45	-0.5	-0.53	-0.51	-0.52	-0.48	-0.46	-0.44	-0.42	-0.42	-0.36	NS	NS	NS	NS	NS	NS
7		-0.41	-0.47	-0.52	-0.57	-0.54	-0.5	-0.45	-0.46	-0.43	-0.44	-0.4	NS	NS	NS	NS	NS	NS

Como ha quedado demostrado, existen diversos fenómenos capaces de modificar la precipitación en el Tempisque y muchos de ellos lo pueden hacer en intervalos de tiempo distintos, por ello, todo cambio en la lluvia va a tener un efecto en los caudales que se presenten en la cuenca ya que estos son dependientes de la lluvia. A pesar de esta relación, hay otros factores que pueden cambiar el comportamiento de los caudales, como lo son los cambios de cobertura de la tierra, por lo que todo análisis de caudales deberá de tener una componente asociada a la variabilidad climática y a cambios de cobertura (Li et al. 2009).

Capítulo V: Efecto del cambio de la cobertura de la tierra en la hidrología superficial de la cuenca alta del río Tempisque

5.1 Cobertura de la tierra para la cuenca alta del río Tempisque

Según los datos de cobertura de la tierra recopilados, la cuenca alta del río Tempisque presenta una dinámica bastante importante, principalmente en la parte baja y media, lo cual responde a las actividades agrícolas que se desarrollan en este sector. Analizando las diferentes coberturas de la tierra (tabla 5.1), se observan periodos donde hay terrenos descubiertos o quemados, los cuales son la antesala para el crecimiento de distintos cultivos. Sin embargo, como se mencionó en la metodología, estas coberturas se clasificaron como

pastos debido a su baja capacidad de infiltración pese a que el uso del suelo es agrícola. También se observan cambios importantes en la cobertura forestal en todos los años de análisis, esto podría obedecer a diferentes factores metodológicos a la hora de realizar la clasificación (error en la imagen, problemas en la firma espectral) o a cultivos que tengan una firma espectral similar a la cobertura forestal.

La cobertura del año 1989 fue la utilizada para realizar el proceso de calibración y validación del modelo, a diferencia de las demás coberturas, esta es la que presenta la menor cantidad de áreas bajo una cobertura agrícola. Esto se puede deber a la razón expuesta con anterioridad (terrenos en preparación para cultivos), por ello, para este año la mayoría de la cuenca responde a una cobertura de pasto y bosque. Conforme aumenta la elevación de la cuenca y por consiguiente los niveles que utiliza el modelo, la cobertura de bosque tiende al aumento.

Nivel	Cobertura 1989			Cobertura 1999			Cobertura 2009			Cobertura 2014			Cobertura 2017		
	Bosque	Agrícola	Pasto	Bosque	Agrícola	Pasto	Bosque	Agrícola	Pasto	Bosque	Agrícola	Pasto	Bosque	Agrícola	Pasto
1	7.37	1.44	81.00	4.79	22.55	62.33	18.10	12.98	58.72	6.23	4.50	79.07	16.30	20.62	52.89
2	19.21	0.19	94.05	9.73	25.80	77.84	37.56	11.61	64.28	8.84	2.40	102.20	27.27	14.79	71.38
3	10.72	0.11	43.92	4.05	14.54	36.11	20.53	3.97	30.25	6.11	0.26	48.37	15.07	6.03	33.65
4	21.40	0.06	71.36	5.52	26.29	60.97	41.74	3.39	47.68	9.95	0.24	82.63	28.64	6.54	57.63
5	35.90	0.06	74.77	12.74	39.46	58.48	57.30	4.11	49.32	18.55	0.13	92.06	44.19	9.81	56.73
6	53.71	0.20	82.64	28.05	56.20	52.27	86.75	6.41	43.39	38.24	0.09	98.22	67.30	10.19	59.06
7	42.77	0.58	74.62	27.63	49.22	41.11	66.17	12.63	39.17	35.44	0.23	82.31	58.90	11.13	47.93
8	65.56	3.77	62.53	65.41	34.65	31.70	91.76	16.13	23.97	81.28	1.11	49.47	90.64	9.42	31.80
9	42.14	1.43	34.52	56.57	8.15	13.27	58.76	6.25	13.09	61.92	0.46	15.71	62.18	6.09	9.83
10	15.13	0.31	16.49	27.93	1.95	2.06	23.70	2.37	5.86	26.30	0.11	5.52	26.37	3.25	2.30
Porcentaje	32.77	0.85	66.38	25.31	29.11	45.53	52.44	8.33	39.22	30.57	0.99	68.43	45.60	10.22	44.18

Tabla 5.1: Área en kilómetros cuadrados de cada una de las coberturas de la tierra según el nivel de elevación utilizado para dividir la cuenca del alto Tempisque.

Para el año 1999 se aprecia un aumento (Figura 5.1) considerable en la cobertura bajo condiciones agrícolas, principalmente en la parte baja y media de de la cuenca, las cuales son áreas con poca pendiente y aptas para esta actividad. Dado el aumento en la cobertura agrícola, se observa una disminución en las áreas con cobertura de pasto, respecto al área que representa el bosque, esta también tiende a disminuir en los primeros niveles.

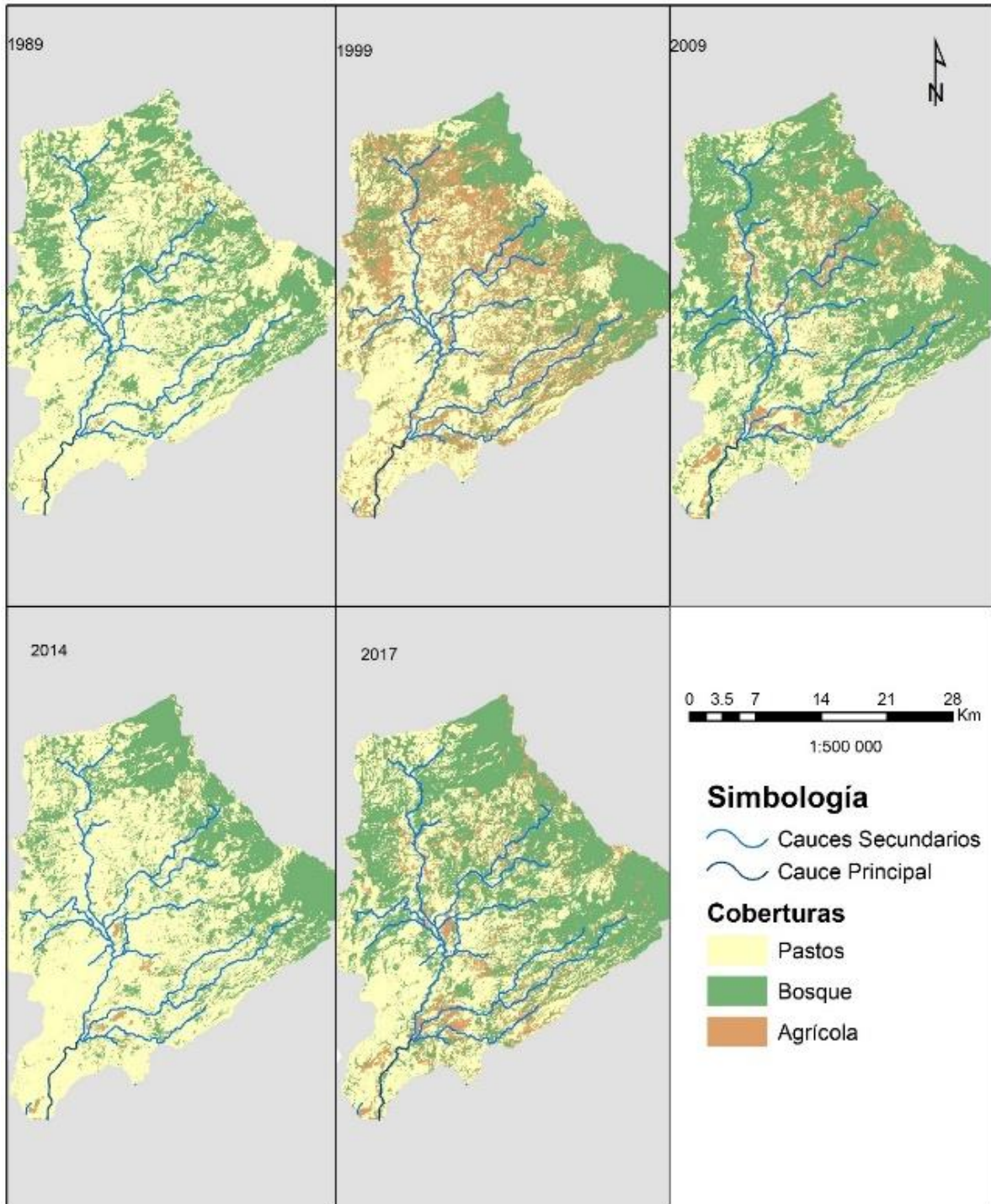


Figura 5.1 Coberturas de la tierra empleadas en el modelado hidrológico para los años 1989, 1999, 2009, 2014 y 2017.

El año 2009 presenta un aumento en la cobertura de bosque considerable en la parte baja y media de la cuenca, sin embargo, hay una disminución en la cobertura agrícola respecto a 1999, lo mismo ocurre para las áreas con pastos.

Para el año 2014, la cobertura es muy similar a la del año 1989, con pocas áreas con una cobertura agrícola y una alta cobertura boscosa en la parte alta y de pastos dominando las partes bajas y medias. En la parte media y alta se presentan aumentos en los pastos en comparación con el 2009, sin embargo, la cobertura boscosa se mantiene relativamente estable en la parte alta.

Finalmente, para el año 2017 el comportamiento de la cobertura de la tierra es equivalente a la que se presenta en el año 2009, con valores de cobertura similares en la parte baja y conforme aumenta la altitud de la cuenca, la cobertura boscosa empieza a aumentar.

Es importante mencionar, que hay coberturas en las que se observan cambios importantes de una década a otra, como el caso 2009-2014, esto se puede deber a muchos factores, desde el momento en que se tomó la imagen, problemas con los puntos de control utilizados para extraer las firmas espectrales o dificultades en la clasificación semi-automática. Por lo anterior es que no se debe de tomar estas coberturas como una serie secuencial, sino más bien utilizarlas como escenarios de cobertura que tienden a ser similares a condiciones reales.

Finalmente, los escenarios de cobertura con los que se trabajan se clasifican como: baja infiltración (1989, 1999 y 2014) e infiltración alta (2009 y 2017).

5.2 Efecto del cambio de la cobertura de la tierra en la hidrología en caudales pico

Para este análisis se identifica cuando ocurre el máximo caudal registrado en todo el periodo de estudio (1990-2003), éste se encontró para setiembre-octubre del año 1999, registrándose dos eventos a lo largo de estos meses que provocaron considerables aumentos de caudal (máximo de 80 mm día^{-1}). Una vez identificado este evento se realiza el análisis de los hidrogramas obtenidos del modelado utilizando la mejor simulación de cada una de las coberturas según los parámetros que se explicaron en la metodología (ecuaciones 17-19).

Del modelado hidrológico se obtuvieron cuatro simulaciones distintas (1999, 2009, 2014 y 2017) las cuales fueron analizadas junto con los datos calibrados utilizan la cobertura del año 1989. En la figura 5.2 se muestra la diferencia generada por los cambios de cobertura en los

caudales, para este caso, se puede observar que todas las coberturas inician con un comportamiento bastante similar, sin embargo para el día 12 de setiembre, inicia el aumento en la escorrentía, siendo la cobertura de 1999 la que más rápido reacciona ante el evento lluvioso siendo esta la cobertura que presenta la mayor cantidad de áreas agrícolas y de pasto.

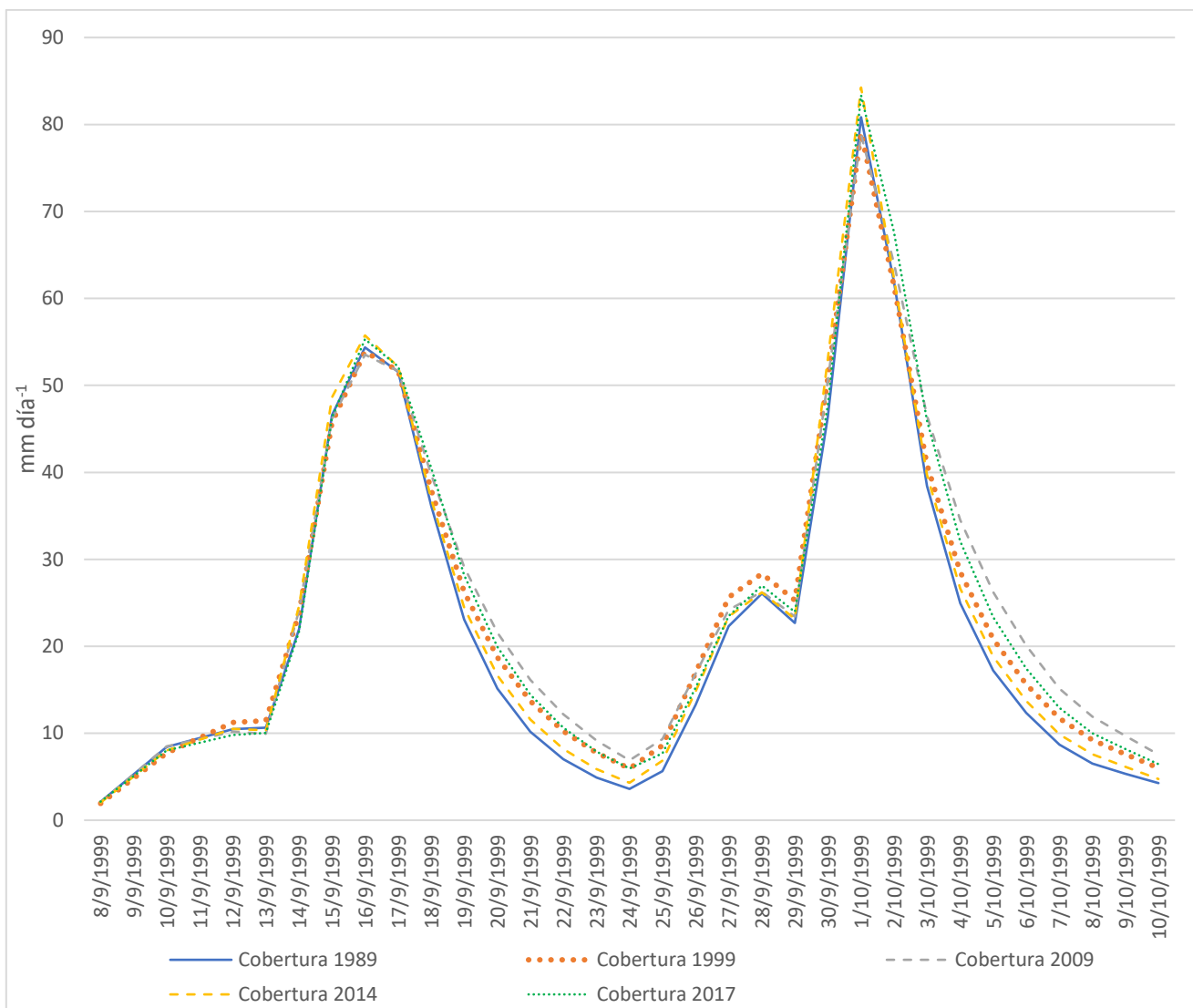


Figura 5.2 Hidrogramas obtenidos del modelo hidrológico HBV-light para diferentes escenarios de cobertura en el periodo setiembre-octubre de 1999.

Una vez que inicia la precipitación y los flujos superficiales de la cuenca empiezan a aumentar, todas las coberturas responden de la misma manera, llegando a un caudal pico de alrededor de 55 mm día⁻¹ para el 16 de setiembre. Sin embargo, cuando inicia la recesión en

el hidrograma se observan diferentes comportamientos dependiendo de las características de la cobertura.

Para las coberturas 1989 y 2014 se observan una disminución rápida de los flujos superficiales en la curva de recesión ubicada 17 y 24 de setiembre, esto se debe a que el suelo pierde rápidamente la humedad debido a la evaporación o una mayor velocidad de movimiento en la cuenca, siendo estas las coberturas que menor cantidad de escorrentía tienen cuando inicia el segundo evento lluvioso. Para coberturas con una mayor infiltración (2009-2017) se observa una curva de recesión mucho más lenta debido a la cobertura boscosa, almacenando mayor cantidad de agua asociada a los flujos base.

Para el segundo evento lluvioso que inicia el 25 de setiembre, la reacción de la cobertura de 1999 es la más rápida de todas, alcanzando un pico de caudal para el día 28 de setiembre, este aumento responde a flujos hortonianos por la incapacidad del suelo de infiltrar más agua. Las coberturas con una mayor infiltración (2009-2017) también reaccionan de una forma similar debido a que todavía almacenan parte del agua del primer evento, esta reacción rápida se debe a los flujos por la saturación de los suelos, sin embargo, no alcanzan un máximo en comparación con la cobertura de 1999.

La cobertura del 2014 genera la máxima escorrentía en comparación con las demás coberturas, con un máximo el primero de octubre con $84.25 \text{ mm día}^{-1}$, mientras que la cobertura del año 2009 es la que presenta el menor pico de caudal, con un valor de $78.33 \text{ mm día}^{-1}$.

En la curva de recesión del segundo evento es cuando se observa con mayor facilidad los cambios asociados a las diferentes tasas de infiltración en el suelo, las coberturas con menor capacidad de infiltración (1989-2014) pierden agua más rápido en comparación con aquellas coberturas que tienen mayor cantidad de bosque (2009-2017), las cuales se ven alimentadas por los flujos base producidos días antes.

Comparando la cobertura 2009 (alta infiltración) con la de 2014 (baja infiltración) (figura 5.2) los efectos en el caudal pico son notorios para escalas de tiempo cortas. Resultados similares fueron en distintas investigaciones (Birkel et al. 2012; Calvo-Alvarado & Calvo, 2015; Lørup et al., 1997) en donde a menor infiltración, existe una mayor cantidad

de escorrentía superficial y una mayor respuesta la cuenca ante eventos lluviosos (Seibert & Mcdonnell, 2010).

5.3 Efecto del cambio de cobertura en escalas mensuales

Las consecuencias del cambio de cobertura de la tierra en plazos de tiempo mayores, se observan principalmente para la segunda mitad de la época lluviosa (setiembre-octubre-noviembre) y para el inicio de la época seca (diciembre-enero). Se puede reconocer claramente en la figura 5.3 el inicio de la época lluviosa para el mes de mayo, así como la segunda parte de esta época para el mes de setiembre, siendo octubre el mes en el que existe mayor escorrentía en la cuenca, siguiendo un comportamiento típico de la vertiente del Pacífico.

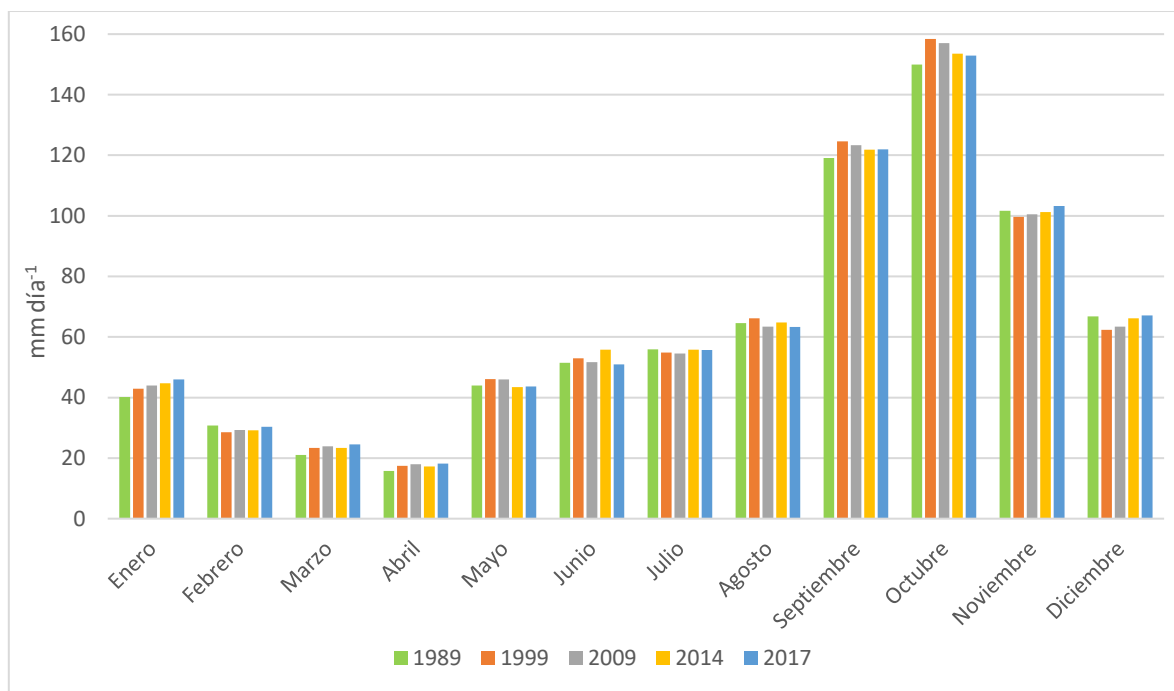


Figura 5.3 Comportamiento de la escorrentía media mensual para diferentes escenarios de cobertura de la tierra.

El efecto de los cambios de cobertura no es del todo claro a escalas de tiempo mensuales, sin embargo, de forma general se aprecia que la cobertura del año 1999 es la que más escorrentía está generando para los meses de mayo, agosto, setiembre y octubre. Esta cobertura estaría formando su escorrentía principalmente por los flujos hortonianos, es decir, la imposibilidad del suelo de infiltrar, ya que alrededor de 70% de esta cobertura se clasifica como pasto o

uso agrícola. Dadas las características de la cobertura del año 2014 (baja cobertura forestal), no es de extrañar que siga un comportamiento similar a la del año 1999, sin embargo, presenta valores menores, a excepción del mes de junio.

Para la segunda parte de la época lluviosa, principalmente los meses setiembre y octubre, las dos coberturas que generan mayor escorrentía son la del año 1999 y 2009, sin embargo, esta respuesta obedece a dos procesos distintos, siendo para el año 1999 flujos hortonianos, mientras que para el año 2009 son flujos asociados a suelos saturados que impiden la infiltración normal.

Para el caso de noviembre y diciembre, todas las coberturas presentan una respuesta distinta. Este comportamiento tan poco uniforme se puede deber al efecto de la distribución de los cambios de la tierra, lo cual ya ha sido definido como un factor que propicia distintas respuestas (DeFries & Eshleman, 2004, Birkel et al., 2012).

El comportamiento de las coberturas de la tierra durante el periodo enero-abril es bastante similar, sin embargo, hay un ligero aumento para el escenario 2009 y 2017, esto se podría deber a los procesos asociados a los flujos base que mantienen un caudal ligeramente mayor en comparación con las otras dos coberturas con menor capacidad de infiltración, las cuales pierden el agua a una mayor velocidad.

5.4 Efecto del cambio de cobertura en escalas anuales

Respecto al comportamiento total anual del caudal bajo distintos escenarios de cobertura (figura 5.4) hay cambios importantes asociados a la variabilidad climática, como es el caso del año 1994 y 1997 bajo los efectos de El Niño donde hay una disminución de los caudales importante.

Este aumento en los caudales asociado a más cobertura boscosa (2009-2017) es mucho más apreciable para el año 1999 donde hay alrededor de 100 mm día^{-1} más en comparación con coberturas con menor cobertura boscosa (1989, 1999 y 2014).

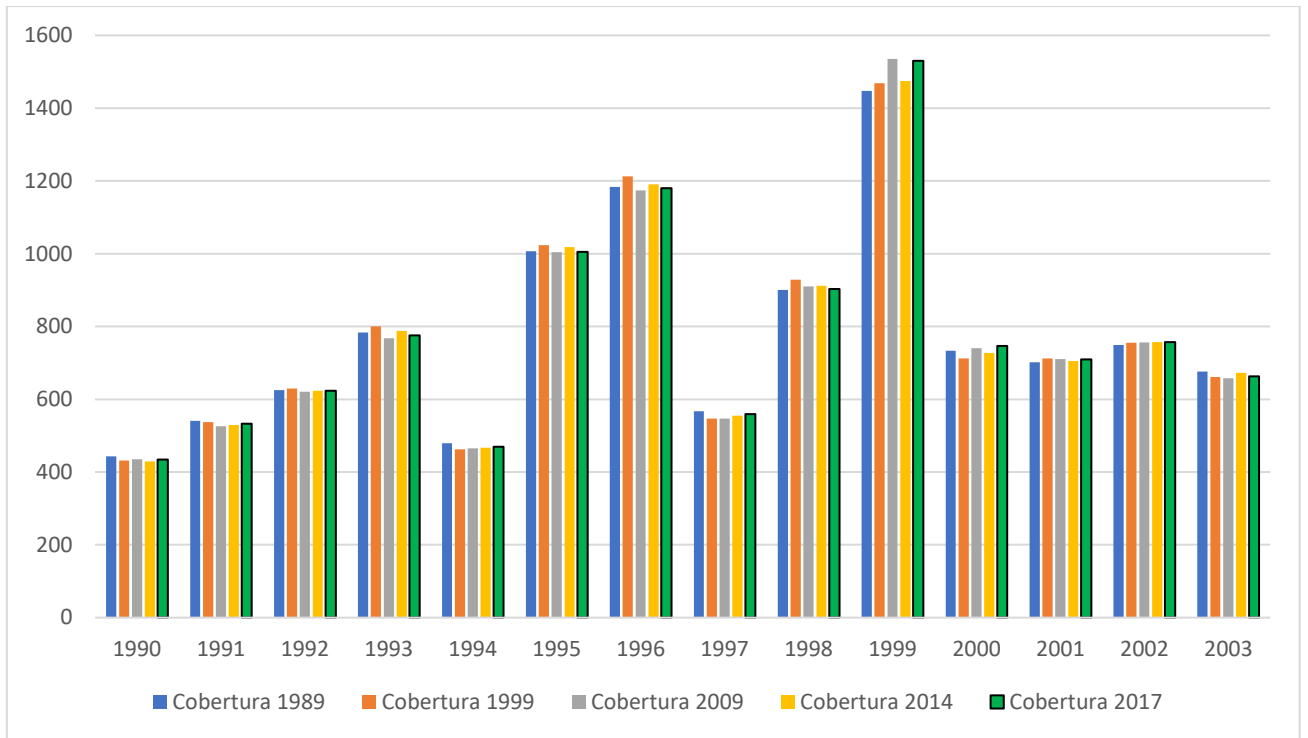


Figura 5.4 Caudal total anual y el efecto de diferentes tipos de cobertura para el periodo 1990-2003

Lo anterior puede ser un indicio de la capacidad que se tendría mediante una adecuada planificación territorial de realizar procesos de adaptación ante fenómenos de variabilidad climática. Esto podría reducir el impacto que se experimenta en la región, además, se puede apreciar (figura 5.4) que existe una ligera tendencia al aumento de los caudales bajo una cobertura de alta infiltración a partir del año 1998 al 2002.

5.5 Análisis estadístico de las variaciones de caudal bajo distintos escenarios de cobertura

Con el fin de identificar si los cambios en la escorrentía son significativos estadísticamente, se compararon los diferentes escenarios de cobertura (1999, 2009, 2014 y 2017) con la escorrentía obtenida utilizando la cobertura inicial (1989) en distintos periodos de tiempo: anual, mensual y diario. Los métodos utilizados para analizar la significancia fueron los siguientes: Test de Nash-Sutcliffe (Nash & Sutcliffe, 1970) para datos diarios, test de Kolmogorov-Smirnoff (Massey,1951) para la media anual, 3 y 7 días, el test de Mann-Whitney (Mann & Whitney, 1947) para datos diarios, mensuales y anuales, así como el test

Siegel-Tukey para datos anuales (Siegel & Tukey, 1960). En la tabla 5.2 se pueden observar los resultados obtenidos, para el primer estadístico (Nash-Sutcliffe) los valores más cercanos a 1 representan una concordancia perfecta. Para los demás parámetros, cero representa que se rechaza la hipótesis nula de la prueba estadística con un grado de confianza de 0.95, mientras que 1 representa la aprobación de la hipótesis alterna.

Tabla 5.2 Parámetros utilizados para analizar significancia de los cambios en los caudales asociados a cambios en las coberturas de la tierra.

Estadístico	1989 vs 1999	1989 vs 2009	1989 vs 2014	1989 vs 2017
Test Nash-Sutcliffe	0.98	0.98	1.00	0.99
Kolgomorov-Smirnoff Anual	0	0	0	0
Kolgomorov-Smirnoff 7 días	0	0	0	0
Kolgomorov-Smirnoff 3 días	0	0	0	0
Mann-Whitney Anual	0	0	0	0
Mann-Whitney Mensual	0	0	0	0
Mann-Whitney Diario	1	1	0	0
Siegel-Tukey Anual	0	0	0	0

0 representa el rechazo de la hipótesis nula, 1 se acepta la hipótesis alternativa

Como se puede apreciar, mucho de los cambios que se dan en la escorrentía no son significativos, de hecho, al comparar la cobertura de 1989 con los demás escenarios, se observa mediante el test Nash-Sutcliffe que las variaciones son prácticamente iguales para los datos diarios.

En ninguna escala de tiempo se observan cambios en la distribución estadística de los datos, por ejemplo, que haya un aumento de caudal pico asociados a los procesos de infiltración. Lo mismo ocurre con el estadístico Siegel-Tukey, ya que no hay cambios en variabilidad de los datos.

El único parámetro que muestra una significancia estadística es el Mann-Whitney en escalas de tiempo diarias para los escenarios de 1999 y 2009. Estos escenarios tienen condiciones que los diferencia de los demás, ya que cuenta con una cobertura de la tierra mayoritariamente pasto-agrícola (1999) o bosque (2009), por ello, es que observar cambios importantes en los caudales requeriría cambios muy fuertes en la cobertura de la tierra.

Capítulo VI: Conclusiones y recomendaciones

6.1 Conclusiones

La cuenca del río Tempisque en las últimas décadas, presenta cambios en su comportamiento hidrometeorológico que consecuentemente ha modificado su dinámica hidrológica. Esto queda en evidencia en la tendencia negativa y estadísticamente significativa para el periodo 1970-2010. Lo anterior genera una problemática importante relacionada a la gestión del recurso hídrico dentro de la cuenca, que, sumado a los fenómenos de variabilidad climática, pueden colocar a la cuenca en una situación aún más compleja.

Estas tendencias también se pueden observar durante la época lluviosa para el sector montañoso y son aún más notorias durante la época seca, esto conlleva a épocas secas con menores montos de precipitación respecto a la climatología de la cuenca.

Pese a que estas tendencias de menor precipitación no se ven distribuidas en toda la cuenca, sino que se han ubicado principalmente en los sectores montañosos, áreas en las que nacen los dos principales cauces que recorren la gran cuenca del río Tempisque (río Tempisque y río Bebedero). Esta menor precipitación probablemente también este generando tendencias negativas en los caudales, a esto se le debe de sumar la extracción (legal e ilegal) para suplir agua a diferentes actividades agroindustriales y de servicios que se realizan dentro de la cuenca.

Además de las tendencias que presenta la cuenca, queda en evidencia la gran cantidad de eventos que modifican el comportamiento de la precipitación en diferentes rezagos y periodos. Los principales mecanismos asociados a las variaciones en la precipitación según el primer CPR son la Oscilación Multidecadal del Atlántico, el Chorro de bajo nivel del Caribe y el Niño-Oscilación del Sur. Siendo la Oscilación Decadal del Pacífico el único mecanismo que no presentó ningún efecto en los montos de precipitación para ninguno de los componentes utilizados.

Pese a ser el ENOS el fenómeno que tiene mayor atención por parte de las autoridades gubernamentales debido a sus impactos tan claros, principalmente sus fases cálidas asociadas a menores montos de precipitación, el efecto de el CLLJ y la AMO es muy grande como para no darles mayor atención y una mejor vigilancia. Además, la teleconexión ENOS-CLLJ

parece tener un rol bastante importante en la distribución de precipitación en la cuenca bajo eventos ENOS.

A lo anterior se le debe de sumar el efecto que genera la Zona de Convergencia Intertropical, cuya ubicación del centro de masa genera cambios en la precipitación, la cual aumenta entre más al norte y al este se encuentre su centro de masa. Esto facilitaría la llegada de cúmulos del Pacífico hacia la cuenca del Tempisque.

Finalmente, los cambios de cobertura de la tierra y su efecto en la escorrentía superficial continúan siendo un tema en el que existe mucha incertidumbre, como se ha analizado en esta investigación, la escorrentía no solo depende de los cambios en la infiltración, si no que hay toda una dinámica asociada a la distribución espacial de estos que puede provocar una respuesta distinta a la esperada: mayor infiltración es igual a una menor escorrentía.

En todo análisis de escorrentía-cambios de cobertura de la tierra habrá tres factores fundamentales: el tipo de cambio de la tierra que se esté dando, el sitio donde el cambio se da y la cantidad de área que está cambiando.

Los efectos de la infiltración son complejos de analizar y dependiendo de la escala de tiempo utilizada estos se podrán observar con mayor facilidad. Se reconoce que a escalas de tiempo cortas una menor (mayor) infiltración tiende a aumentar (disminuir) la curva de concentración, lo contrario ocurre con las curvas de recesión de los hidrogramas, donde a menor (mayor) infiltración la curva tiende a aumentar (disminuir). De lo anterior se concluye que ante periodos lluviosos la menor infiltración acelera la respuesta de la cuenca, generando picos de caudal mayores, mientras que la mayor infiltración aumenta los flujos base manteniendo la humedad en el suelo durante más tiempo. Esto a largo plazo puede generar un efecto similar a la baja infiltración, dado a que los suelos se encuentran saturados y no pueden infiltrar más agua.

Es evidente el efecto que genera la variabilidad climática en los caudales es mucho mayor que el provocado por los cambios de cobertura de la tierra, esto queda en evidencia en los datos observados para la estación Guardia, los cuales durante años ENOS positivos se reducen de forma importante.

Pese a ello, la cobertura de la tierra en la cuenca puede modificar a largo plazo el comportamiento de la escorrentía, como se aprecia para el periodo 1998-2002 donde al haber

una mayor cobertura boscosa, existe un incremento en la escorrentía, sin embargo, estos aumentos parece que no tienen una significancia estadística importante.

Sin embargo, es evidente que los cambios en la cobertura de la tierra tendrían un impacto en distintas escalas de tiempo: diaria, mensual y anual. Pese a que estos cambios son mucho menores en comparación con la variabilidad climática, la importancia de ellos radica en que pueden ser controlados por el ser humano.

Al ser estos cambios controlados, con una apropiada planificación y política de desarrollo se puede obtener beneficios de ellos y reducir el efecto de la variabilidad climática. Este hubiera sido el caso de los años 1997-1998 los cuales bajo una mayor cobertura forestal se contaría con más escorrentía en un periodo Niño.

Para fines de planificación, lo ideal sería generar una cobertura en la que los picos de caudal sean bajos, evitando así avenidas en los cauces que puedan generar daños en la infraestructura o población que habite cerca de los ríos. También se debe de buscar aumentar la curva de recesión, lo que permita un aumento de los flujos base, con ello durante las épocas de estiaje (diciembre-abril) el caudal no se reduciría. La curva de concentración también debería de ser baja, para evitar picos de caudal en poco tiempo. Estas políticas se pueden implementar mediante planes reguladores en los distintos cantones que se encuentran dentro del territorio de la cuenca o mediante un plan de gestión de cuencas para la gran cuenca del Río Tempisque

6.2 Recomendaciones

- Mejorar la red de estaciones meteorológicas ubicadas en la cuenca, esto permitiría utilizar datos observados, dejando de lado datos simulados que puedan tener algún problema reproduciendo los datos reales.
- Los datos de caudales deben de ser analizados con mayor cautela, muchas veces presentan aumentos de caudal que no se ven reflejados en los datos de precipitación, por lo que la calidad de los mismos puede fallar en muchas ocasiones.
- Se debe de profundizar más en los diferentes mecanismos que generan la distribución de la precipitación en la cuenca del Tempisque, para ello se necesita un modelo climático de menor escala que ponga énfasis en la distribución de los vientos y logre captar de una forma apropiada el efecto del relieve de Centroamérica.
- Se deben de crear más escenarios de cobertura para poder identificar de una forma clara el efecto de la infiltración, vigilando las tres condiciones que se encontraron en el presente trabajo: distribución, tipo de cambio y área de cambio.
- Explorar diferentes modelos hidrológicos con una mayor capacidad de análisis de cambios de cobertura, lo ideal sería utilizar modelos distribuidos que faciliten una mayor diversidad de coberturas, así como unidades de análisis
- Todo proceso de planificación del uso del suelo asociado a mejoras en la gestión del recurso hídrico debe de ir enfocado a coberturas de la tierra que permitan una mayor infiltración del agua en el suelo. Lo que aumentaría los caudales durante periodos de estiaje.

Bibliografía

- Adler R.F., G.J. Huffman, A. Chang, R. Ferraro, P. Xie, J. Janowiak, B. Rudolf, U. Schneider, S. Curtis, D. Bolvin, A. Gruber, J. Susskind, and P. Arkin, (2003) The Version 2 Global Precipitation Climatology Project (GPCP) Monthly Precipitation Analysis (1979-Present). *Journal of Hydrometeorology*, 4,1147-1167
- Alfaro E., & Hidalgo H., (2017) Propuesta metodológica para la predicción climática estacional del veranillo en la cuenca del río Tempisque en el Pacífico Norte de Costa Rica, *Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos*, *Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos* 16 (1) 62-74
- Amador J., (1998). A climatic feature of the tropical Americas: The Trade Wind Easterly Jet. *Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos*, 5, 91-102.
- Amador J., (2008), The intra-Americas sea low-level jet, overview and future research. *Ann of the N Y Acad of Sci* 1146:153–188. doi:10.1196/annals.1446.012
- Aparicio F., (1989), *Fundamentos de Hidrología Superficial*, México, Limusa.
- Arias-Rodríguez O., (2001), Estudio Hidrometeorológico de la Cuenca del Río Tempisque, consultado en línea https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/2616/Informe_Final.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Arnold J, Srinivasan R, Muttiah S & Williams J.R., (1998), Large area hydrological modeling and assessment part 1: model development, *Journal of the American Water Resource Association* (34) 1, 73-89
- Beven K. & Binley E., (1992), The future of distributed models: model calibration and uncertainty prediction, *Hydrological Process* (6), 279-298
- Birkel C, Soulsby C, Tetzlaff., (2012) Modelling the impacts of land-cover change on streamflow dynamics of a tropical rainforest headwater catchment, *Hydrological Sciences Journal* (57) 8, 1543-1561, DOI: 10.1080/02626667.2012.728707
- Birkel C., (2006), Sequía hidrológica en Costa Rica ¿Se han vuelto más severas y frecuentes en los últimos años?, *Revista Reflexiones* 85 (1-2) 107-116

- Bocanegra-Díaz J., (2017) Hydrological drought assessment in the Tempisque-Bebedero Catchment sistema in Costa Rica, tesis para obtener el grado de maestría en ciencias ambientales, Universidad de Köln.
- Bonilla A., (2014). Patrones de sequía en Centroamérica. Su impacto en la producción de maíz y frijol y uso del índice normalizado de precipitación para los sistemas de alerta temprana. Global Water Partnership. http://www.gwp.org/globalassets/global/gwp-cam_files/patrones-de-sequia_fin.pdf
- Brenes D., (2015), Caracterización de fuentes de contaminación y estrategia de manejo ambiental de la microcuenca del río Jaboncillal, San José, Costa Rica (Tesis Licenciatura), consultado en línea http://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/4032/estrategias_manejo_microcuenta_jaboncillal.pdf?sequence=1
- Calvo J & Calvo A., (2015), Estimación del impacto del cambio del uso de la tierra y el clima en las caudales medios de la cuenca alta del Río tempisque, Costa Rica, Conference: Communicating the Value of the Guanacaste Conservation Area., At Área de Conservación Guanacaste. Guanacaste, Costa Rica, Volume: 1
- Calvo J, Jiménez J, Gonzales E, Pizarro P, Jiménez A., (2008), Determinación preliminar del caudal ambiental en el río Tempisque, Costa Rica: el enfoque hidrológico con limitación de datos, *Kurú: Revista Forestal* (13) 5.
- Castro-Llanos D., & Carvajal-Escobar Y., (2013). Análisis de tendencia en la precipitación pluvial anual y mensual en el departamento del Valle del Cauca. *Memorias 11(20)* 9-18.
- Chaves M., Rojas A., Rojas J. & Aguilar F, “*Hydrologic Modeling Analysis from Land Use Scenario Changes in Quebrada Seca and Bermudez Watershed*”. World Conference on Computers in Agriculture and Natural Resources, University of Costa Rica, San Jose Costa Rica, July 27th-30th, 2014
- Chávez P., (1988) An Improved Dark-Object Subtraction Technique for Atmospheric Scattering Correction of Multispectral Data, *Remote Sensing of Environment* 24 459-479
- DeFries R, K.N Eshleman, (2004), Land-use change and hydrologic processes: a major focus for the future, *Hydrological Processes*, (18) 2183-2186, doi:10.1002/hyp.5584

- Dwarakish G, Ganasri B, (2015), Impact of land use change on hydrological systems: A review of current modeling approaches, *Cogent Geoscience*, (1)1
- Edwards K.A, Blackie J.R, (1981), Results of east African catchment experiments 1958-1974, *Tropical Agricultural Hydrology* 163-200
- Enfield DB, Mestas-Nunez AM, Trimble PJ (2001) The Atlantic multidecadal oscillation and its relationship to rainfall and river flows in the continental U.S. *Geophys Res Lett* 28:2077–2080. doi:10.1029/2000GL012745
- Fallas-López B., Alfaro E., (2012). Uso de herramientas estadísticas para la predicción estacional del campo de precipitación en América Central como apoyo a los Foros Climáticos Regionales. 1: Análisis de tablas de contingencia. *Revista de Climatología* (12) 11-21
- FAO, (2009), Harmonized World Soil Database, consultado en línea <http://www.fao.org/docrep/018/aq361e/aq361e.pdf>
- Farr, T. G., et al. (2007), The Shuttle Radar Topography Mission, *Rev. Geophys.*, 45, doi: 10.1029/2005RG000183
- Fernández W, Ramírez P, (1991), El Niño, La Oscilación del Sur y sus efectos en Costa Rica, una revisión, *Tecnología en Marcha* 11(1): 3-10
- Funk C., Peterson P., Landsfeld M., Pedreros D., Verdin J., Shukla S., Husak G., Rowland J., Harrison L., Hoell A., Michaelsen J., (2015) The climate hazards infrared precipitation with stations-a new environmental record for monitoring extremes *Scientific Data* 2,doi:10.1038/sdata.2015.66
- Gayathri D., Ganasri B., Dwarakish G., (2015) A Review on Hydrological Models, *Aquatic Procedia* (4) 1001-1007
- Gendhz N, (2015), Modeling sensitive river catchment: The applications of the HBV-light model to seven Irish Catchment, consultado en línea de https://www.researchgate.net/publication/325578512_Modelling_Climate_Sensitive_River_Catchments_The_application_of_the_HBV-Light_model_to_seven_Irish_Catchments

Gupta, H., Kling, H., Yilmaz K., Martinez G. (2009) Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling, *Journal of Hydrology* 377, 80–91, doi:10.1016/j.jhydrol.2009.08.003

Gutiérrez C., Lücke O, Solórzano R.,(1995) Integración de la Conservación con el desarrollo en el proyecto de riego Arenal-Tempisque, CATIE-IUCN

Guzman-Arias, (2013), Base para la Planificación del Recurso Hídrico Superficial en la Cuenca Alta y Media del Río Tempisque, Costa Rica (Tesis Doctoral), recuperado en línea <http://docinade.com/wp-content/uploads/2015/04/Base-para-la-Planificaci%C3%B3n-del-Recurso-H%C3%ADdrico-Superficial-en-la-Cuenca-Alta-y-Media-del-R%C3%ADo-Tempisque-Costa-RicaIsabel-Guzm%C3%A1n-Arias.pdf>

Hall C., (1984) Costa Rica: Una interpretación geográfica con perspectivas históricas. San José, Editorial Costa Rica

Hamed K, Rao A, (1998), A modified Mann-Kendall test for autocorrelated data, *Journal of Hydrology*, 204 182-196

Hamed K., (2008) Trend detection in hydrologic data: The Mann-Kendall trend test under the scaling hypothesis, *Journal of Hydrology* (349) 350-363

Hann C., (1979) Statistical Methods in Hydrology, Iowa State University Press. United States

Hidalgo H., Alfaro E., Amador J., Batisdas A., (2019) Precursors of quasi-decadal dry-spells in the Central America Dry Corridor, *Climate Dynamics* doi: <https://doi.org/10.1007/s00382-019-04638-y>

Hidalgo H., Alfaro E., Quesada-Montano B., (2017), Observed (1970-1999) Climate variability in Central America using high resolution meteorological data set with implication to climate change studies, *Climatic Change* (141), 13-28

Hidalgo, HG., Alfaro, EJ., Mora, NP., Durán-Quesada, AM., Amador, JA., Muñoz, AG (2016). La sequía en Guanacaste: ¿Qué tan grande es?, obtenido de <https://ojoalclima.com/la-sequia-guanacaste-tan-grande/>

Hidalgo HG, Durán-Quesada AM, Amador JA, Alfaro EJ (2015) The Caribbean low-level jet, the inter-tropical convergence zone and precipitation patterns in the intra Americas

- sea: a proposed dynamical mechanism. *Geografiska Annaler, series a. Phys Geogr* 97:41–59. doi:10.1111/geoa.1208
- Hornbeck J.W, Pierce R.S, Federer C.A, (1970), Streamflow changes after forest clearing in New England, *Water Resources Research* (6), 1124– 1132
- Instituto Meteorológico Nacional (IMN), (2008), Clima, variabilidad y Cambio Climático, consultado en línea http://www.cambioclimaticocr.com/multimedia/recursos/mod-1/Documentos/el_clima_variabilidad_y_cambio_climatico_en_cr_version_final.pdf
- Instituto Meteorológico Nacional (IMN), (2013), Descripción del Clima Cantón de Liberia, recuperado en línea <https://www.imn.ac.cr/documents/10179/20909/Climatolog%C3%ADa+Cant%C3%B3n+de+Liberia>
- Instituto Meteorológico Nacional (IMN), (2016), Climatología Aeropuerto Daniel Oduber, consultado en línea <https://www.imn.ac.cr/documents/10179/38326/Climatolog%C3%ADa+del+Aeropuerto+Daniel+Oduber+%28Liberia%29/21b01b3d-699f-463d-a2d0-06606fe9f609>
- Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC), (2011), Características Sociales y Demográficas, consultado en línea http://www.inec.go.cr/sites/default/files/documentos/inec_institucional/estadisticas/resultados/reoblaccenso2011-10.pdf.pdf
- Jiménez C., Calvo-Alvarado J., Jackson J., (2015) Performance of two hydrological models in predicting daily Flow under a climate change scenario for mountainous catchments in northwestern Costa Rica, *Mountain Research and Development* 35 (3) 240-253.
- Jiménez J., González E., (2001) La Cuenca del Río Tempisque, Perspectivas para un Manejo Integrado, Organización de Estudios Tropicales. San José, Costa Rica.
- Kaiser H.F. (1958) The varimax criterion for analytic rotation in factor analysis. *Psychometrika*, 23, 187-200
- Kalnay and Coauthors (1996) The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project, *Bulletin of American Meteorology Society.*, 77, 437-470, 1996.

- Kendall M., (1975), Rank Correlation Methods, Griffin, London.
- Kling, H., Fuchs, M., and Paulin, M (2012) Runoff conditions in the upper Danube basin under an ensemble of climate change scenarios, *Journal of Hydrology*, 424–425, 264–277, doi:10.1016/j.jhydrol.2012.01.011
- Li, Liu, Zhang, Zheng, (2009), Impacts of land use change and climate variability on hydrology in an agricultural catchment on the Loess Plateau of China, *Journal of Hydrology*, 377 35-42.
- Lørup, Refgaard, Mazvimavi, (1997), Assessing the effect of land use change on catchment runoff by combined use of statistical tests and hydrological modelling: Case studies from Zimbabwe, *Journal of Hydrology* 205 147-163.
- Machiwal D, Kumar M. (2012), *Hydrologic Time Series Analysis*, Netherlands, Springer.
- Magaña V., Amador J., Medina S., (1999). The mid-summer drought over Mexico and Central America. *Journal of Climate*. 12, 1577-1588.
- Mann H., (1945) Nonparametric test against trend, *Econometrica* 13 245-259
- Mann H.B & Whitney D.R., (1947), On a test of whether one of two random variables is stochastically larger than the other, *The Annals of Mathematical Statistics* 18 50-60
- Mantua N, Hare S, Wallace J, Francis R (1997) A Pacific interdecadal climate oscillation with impacts on salmon production. *Bull Amer Meteor Soc* 78:1069–1079. doi:10.1175/1520-0477(1997)0782.0.CO;2
- Marsik M, Waylen P, Quesada M, (2015), Changing discharge contribution to the rio Grande de Tárcoles, en *Monitoring and Modelling Dynamic Environments: (A Festschrift in Memory of Professor John B. Thornes)* (eds A. P. Dykes, M. Mulligan and J. Wainwright), John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, UK. doi: 10.1002/9781118649596.ch10
- Massey F., (1951) The Kolmogorov-Smirnov test for goodness of fit, *Journal of American Statistical Association* 46 (13) 68-78
- McKee, T.B., N.J. Doesken and J. Kleist, (1993) The relationship of drought frequency and duration to time scale. In: *Proceedings of the Eighth Conference on Applied Climatology*,

- Anaheim, California, 17–22 January 1993. Boston, American Meteorological Society, 179–184
- Méndez M, (2013), Predicción del impacto del cambio temporal en el uso del suelo sobre cuencas hidrológicas de alta pendiente en Costa Rica, *Tecnología en Marcha* (26)3,
- Méndez M, (2016), Evaluación cuantitativa, espacial y temporal de los recursos hídricos de la cuenca del Río Agua Caliente mediante la construcción y análisis de balances hídricos, consultado en línea <http://repositoriotec.tec.ac.cr/handle/2238/6831>
- Méndez P., Martínez J., (2010) Análisis de tendencias hidroclimáticas de dos cuencas representativas de isla de Puerto Rico, *Revista Geográfica de América Central* 20 (2) 101-125
- Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG), (2014), Plan Estratégico 2015-2018, consultado en línea <http://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/e14-10870.pdf>
- Mora J, (2016), El río Tempisque, un gigante que muere en silencio en Costa Rica, consultado en línea <http://latinclima.org/articulos/el-rio-tempisque-un-gigante-que-muere-en-silencio-en-costa-rica>
- Nash J.E & Sutcliffe J.V., (1970) River Flow forecasting through conceptual models Part 1- A discusión of principles, *Journal of Hydrology* 10 282-290
- Oliver MA, (1990), Kriging: A Method of Interpolation for Geographical Information Systems, *International Journal of Geographic Information Systems* 4, 313–332.
- Onstad A., Jamieson G., (1970) Modelling the effects of land use modifications on runoff, *Water Resources* 6 (5), 1287- 1295.
- Peters G.,(2001) La cuenca del Tempisque, una perspectiva histórica, consultado en línea <https://archive.tropicalstudies.org/images/downloads/biological-stations/palo-verde/publications/libro-cueca-tempisque/capitulo-1.pdf>
- Quesada L., Calvo O., Hidalgo H., Pérez-Briceño P., Alfaro E., Dynamical delimitation of the Central America Dry Corridor (CADC) using drought indices and aridity values, en elaboración

- Quesada-Montano B., Westerberg I., Fuentes-Andino D., Hidalgo H., Halldin S., (2019) Can climate variability information constrain a hydrological model for an ungauged Costa Rican catchment?, *Hydrological Processes*, 1-17 doi: 10.1002/hyp.11460
- Quirós E, Hidalgo HG, (2016a), Variabilidad y Conexiones climáticas de la zona de convergencia intertropical del Pacífico Este, *Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos (15)-1*, 21-36
- Quirós E, Hidalgo HG, (2016b), Interacción de la Zona de Convergencia Intertropical del Pacífico Este con Sistemas Tropicales, *Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos (15)-2*, 33-47
- Rayner N, Parker D, Horton E, Folland C, Alexander L, Rowell D, Kent E, Kaplan A, (2003) Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century, *J. Geophys. Res.*, 108 (D14), 4407, doi:10.1029/2002JD002670
- Razavi T., Switzman H., Arain A., Coulibaly P., (2016) Regional climate change trends and uncertainty analysis using extreme indices: A case study of Hamilton, Canada, *Climate Risk Management (13)* 43-63
- Retana, J. & Solano, J. (2000). Relación entre las inundaciones en la cuenca del Tempisque el fenómeno de la Niña y los rendimientos de arroz de secano en Guanacaste. Nota Técnica. Instituto Meteorológico Nacional. Gestión de Desarrollo. San José, Costa Rica.
- Ryberg K, Lin W, Vecchia A, (2014) Impact of Climate Variability on Runoff in the North-Central United States, *Journal of Hydrologic Engineering 19-(1)* 148-158
- Saha et al, (2010), The NCEP Climate Forecast System Reanalysis, *Bulletin of American Meteorological Society, (91) 8*, 1015-1057
- Seibert J., Vis M.J, (2012), Teaching hydrological modeling with a user-friendly catchment runoff model software package, *Hydrology and Earth System Sciences, 16* 3315-3325
- Seibert, J. and McDonnell, J.J., (2010) Land-cover impacts on streamflow: A change-detection modeling approach that incorporates parameter uncertainty, *Hydrological Sciences Journal, 55(3)*, 316-332

- Seibert, J., (2005) HBV Light Version 2. User's Manual. Department of Physical Geography and Quaternary Geology, Stockholm University, Stockholm
- Siegel S & Tukey JW., (1960), A nonparametric sum of ranks procedure for relative spread in upaired simples, *Journal of the American Statistical Association* 55 429-445
- Siu J.,(2015) El indeseado desarrollo de Santa Cruz, Guanacaste, consultado en línea <https://www.elpais.cr/2015/05/26/el-indeseado-desarrollo-de-santa-cruz-guanacaste/>
- Solano H., (2015) Factura por el fenómeno de El Niño llega a los 28.500 millones de colones en el agro, consultado en línea <https://www.nacion.com/economia/agro/factura-por-el-fenomeno-de-el-nino-llega-a-los-c-28-500-millones-en-el-agro/CTE42L36N5BF3GVNB6KEGGUG7Q/story/>
- Swank W.T, Crossley D.A, (1988), *Forest Hydrology and Ecology at Coweeta, Ecological Studies 66*, Springer-Verlag, New York
- van der Zee, A., J. van der Zee, A. Meyrat, C. Poveda, y L. Picado. (2012) Estudio de caracterización del Corredor Seco Centroamericano (Países CA-4). Tomo I. OCHA. http://reliefweb.int/sites/reliefweb.int/files/resources/tomo_i_corredor_seco.pdf
- Vargas D, (2016), Pronóstico hidrometeorológico en la cuenca del río Reventazón (Programa de posgrado en Ciencias de la Atmósfera, Tesis de Maestría) Sistema de estudios de Posgrado, Universidad de Costa Rica, Ciudad Universitaria Rodrigo Facio Costa Rica.
- Vega J, (2001), Características generales de la cuenca del Río Tempisque, consultado en línea <http://www.ots.ac.cr/images/downloads/biological-stations/palo-verde/publications/libro-cueca-tempisque/capitulo-3.pdf>
- Ven Te Chow, (1994), Hidrología Aplicada, McGraw-Hill, Santafé de Bogotá, Colombia
- Wang W, Shao Q, Yang T, Peng S, Xing W, Sun F, Luo Y, (2013) Quantitative assessment of the impact of climate variability and human activities on runoff changes: a case study in four catchments of the Haihe River basin, China, *Hydrological Processes* (27)1158-1174 doi: 10.1002/hyp.9299

- Westerberg I., Birkel C., (2015) Observational uncertainties in hypothesis testing: investigating the hydrological functioning of a tropical catchment, *Hydrological Processes* 29 (23) 4863-4879
- Wilks D, (2011), Statistical Methods in the Atmospheric Sciences, USA, *Academic Press*
- Wolter, K., & Timli M.S., (1993) Monitoring ENSO in COADS with a seasonally adjusted principal component index. Proc of the 17th Climate Diagnostics Workshop, Norman, OK, NOAA/NMC/CAC, NSSL, Oklahoma Climate Survey, CIMMS and School of Meteorology., University of Oklahoma. 52-57
- Wolter, K., & Timli M.S., (1998) Measuring the strength of ENSO events -how does 1997-1998 rank? *Weather* 53, 315-324.
- Yuan F, Sawaya K, Loeffelholz B, Bauer M, (2005), Land Cover Classification and Change Analysis of the Twin Cities (Minnesota) Metropolitan Area by multitemporal Landsat remote sensing, *Remote Sensing and Environment* (98) 317-328
- Yue S., Wang C., (2002) Applicability of prewhitening to eliminate the influence of serial correlation on the Mann-Kendall test, *Water Resources Research* 38 (6) doi: 10.1029/2001WR000861
- Zambrano-Bigiarini M., Nauditt A., Birkel C., Verbist K., Ribbe L., (2017) Temporal and spatial evaluation of satellite-based rainfall estimates across the complex topographical and climatic gradients of Chile. *Hydrology and Earth System Sciences* 21 1295-1320 doi:10.5194/hess-21-1295-2017

Anexos:

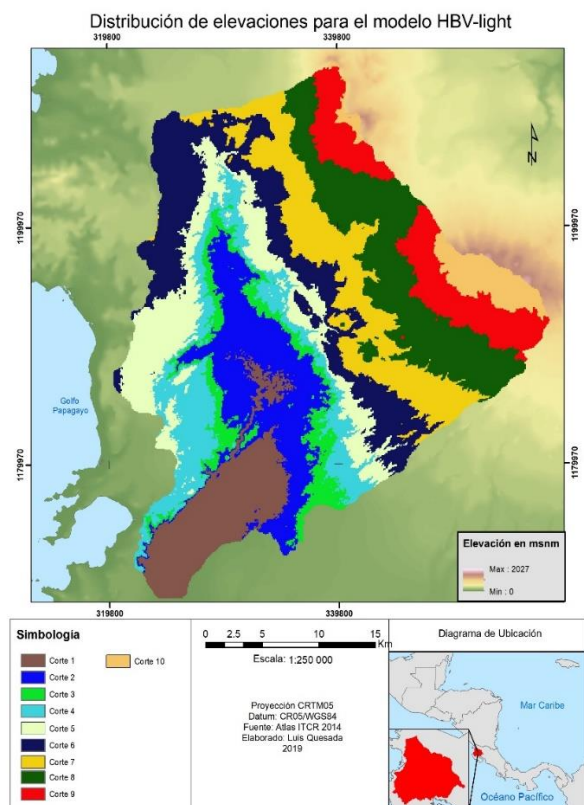
Anexo 1

Estaciones meteorológicas solicitadas al IMN

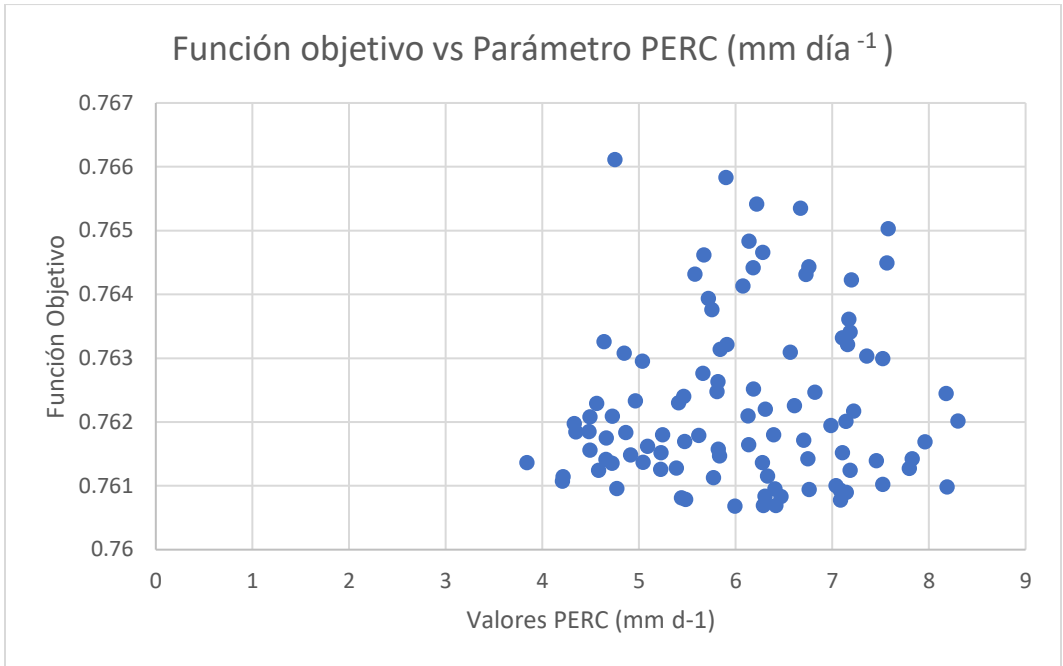
Número	Nombre	Latitud Norte	Longitud Oeste	Altitud (m.s.n.m.)	Periodo	
					Inicio	Final
74008	PELON DE LA BAJURA	10° 29' 08"	85° 24' 42"	40	1/1/1979	9/30/2014
74037	FINCA LAS HUACAS	10° 34' 39"	85° 23' 83"	140	9/10/1986	10/31/2014
74051	AEROP. LIBERIA OESTE 07, AUT.	10° 35' 20,4"	85° 33' 07,7"	89	11/4/1998	12/31/2014
74061	EL CORRAL, PALO VERDE CC. AUT.	10° 20' 51"	85° 21' 04"	10	3/1/2012	12/31/2014
74063	MANGARICA, LLANO LA CRUZ, LIBERIA, AUT.	10° 36' 20,7"	85° 27' 09"	135	3/7/2012	12/31/2014
74067	MIEL, LA GUINEA, AUT.	10° 25' 9,8"	85° 28' 24,37"	87	4/4/2013	12/31/2014
76016	HACIENDA MOJICA, PARTICULAR	10° 27' 09"	85° 09' 54"	13	1/1/1979	12/31/2014
76055	HDA. MOJICA, AUT.	10° 27' 10"	85° 09' 55"	33	5/7/1999	12/31/2014
76057	PARQUE NACIONAL PALO VERDE	10° 20' 38"	85° 20' 18"	9	10/21/2009	12/31/2014
76059	HDA. TABOGA, CAÑAS, AUT.	10° 20' 45"	85° 10' 39"	29	5/6/2011	12/31/2014

Fuente: IMN

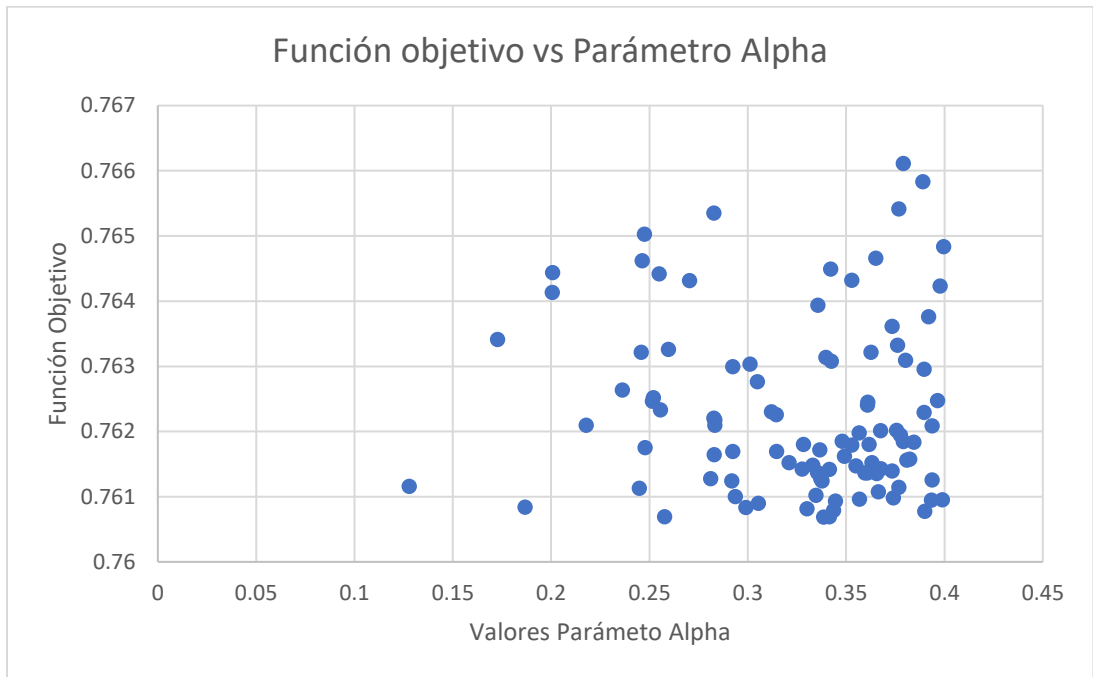
Anexo 2:



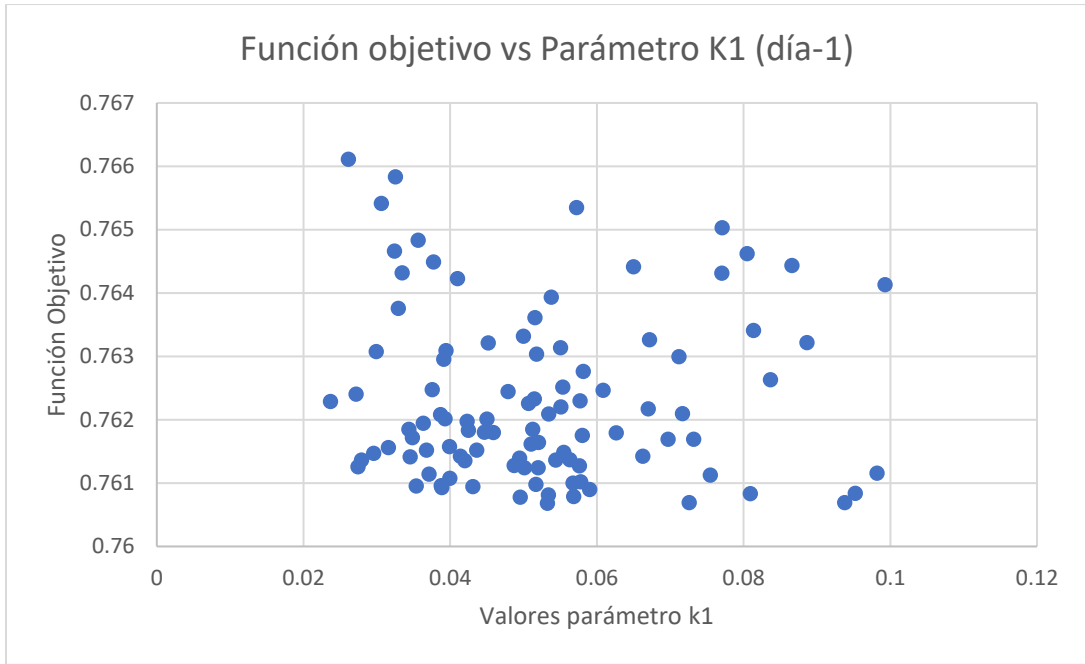
Anexo 3: Análisis de sensibilidad para la calibración del modelo HBV-light



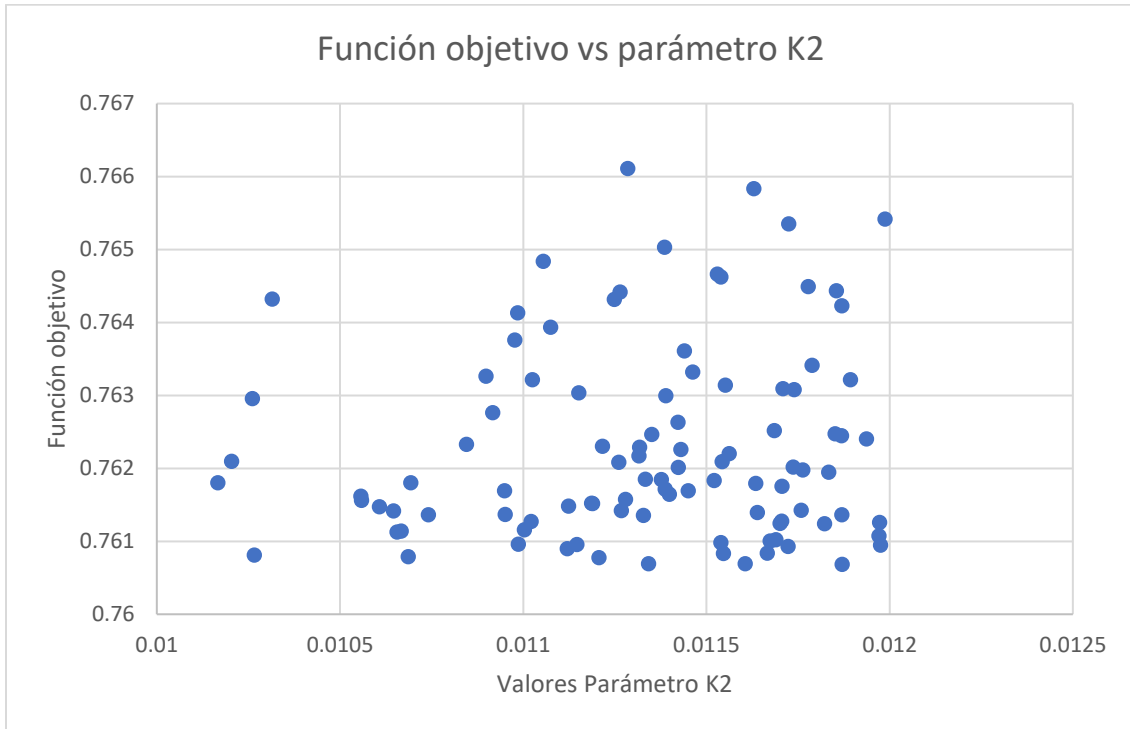
Elaboración Propia



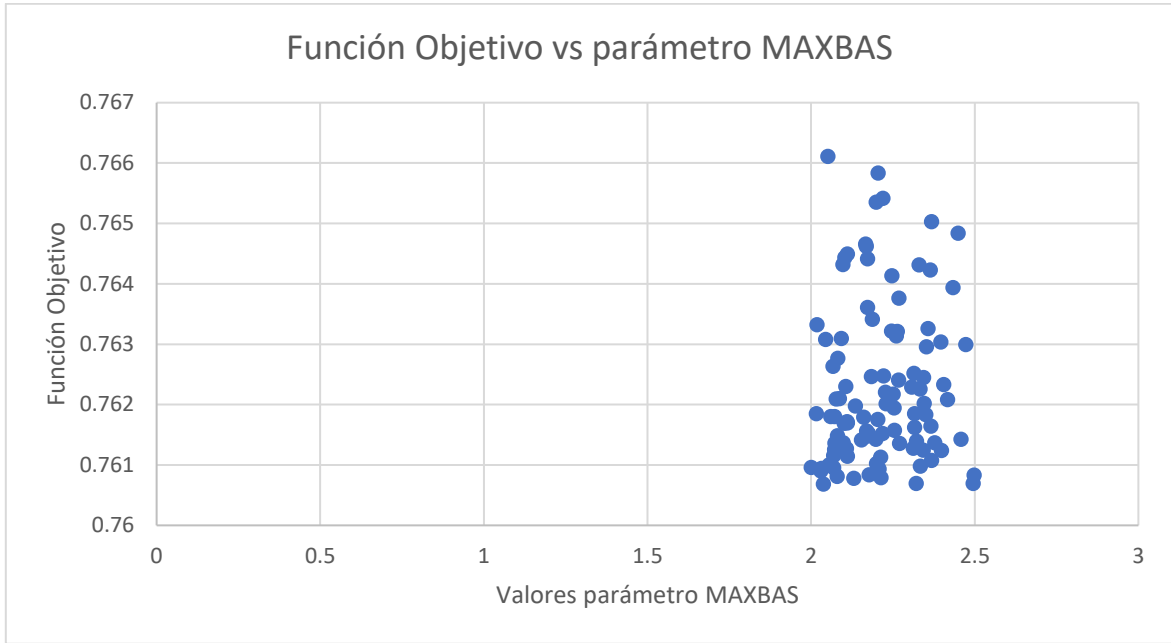
Elaboración Propia



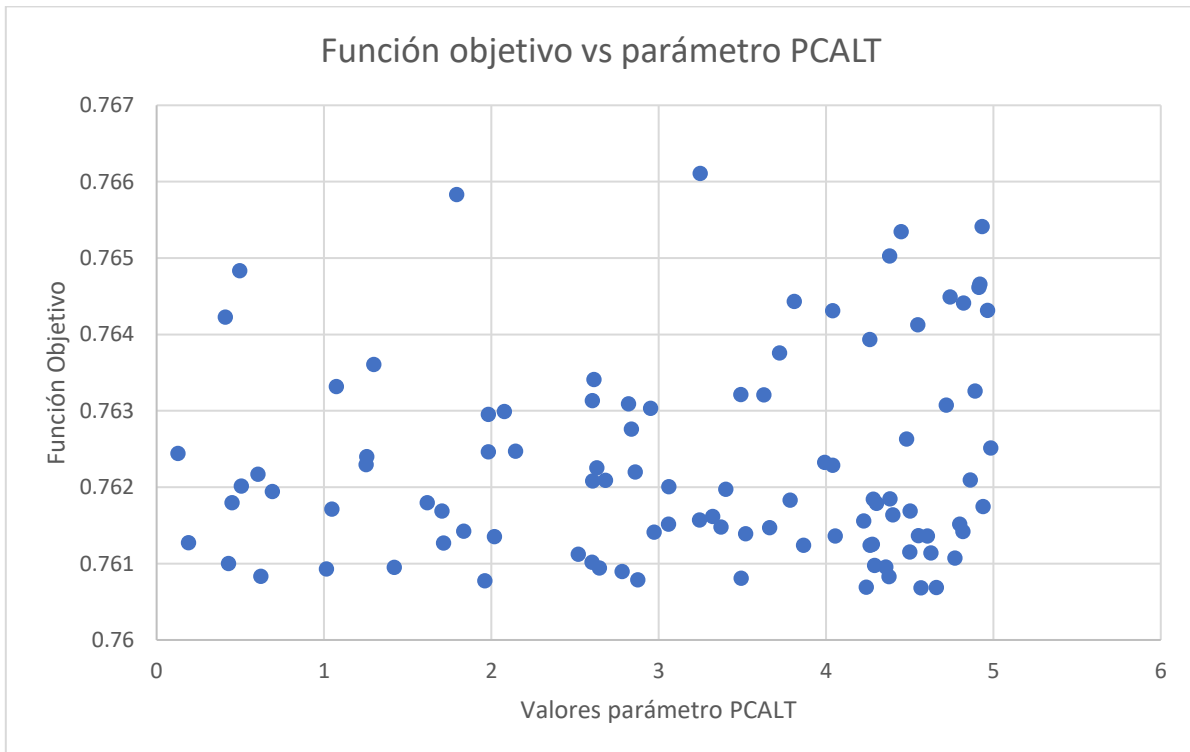
Elaboración propia



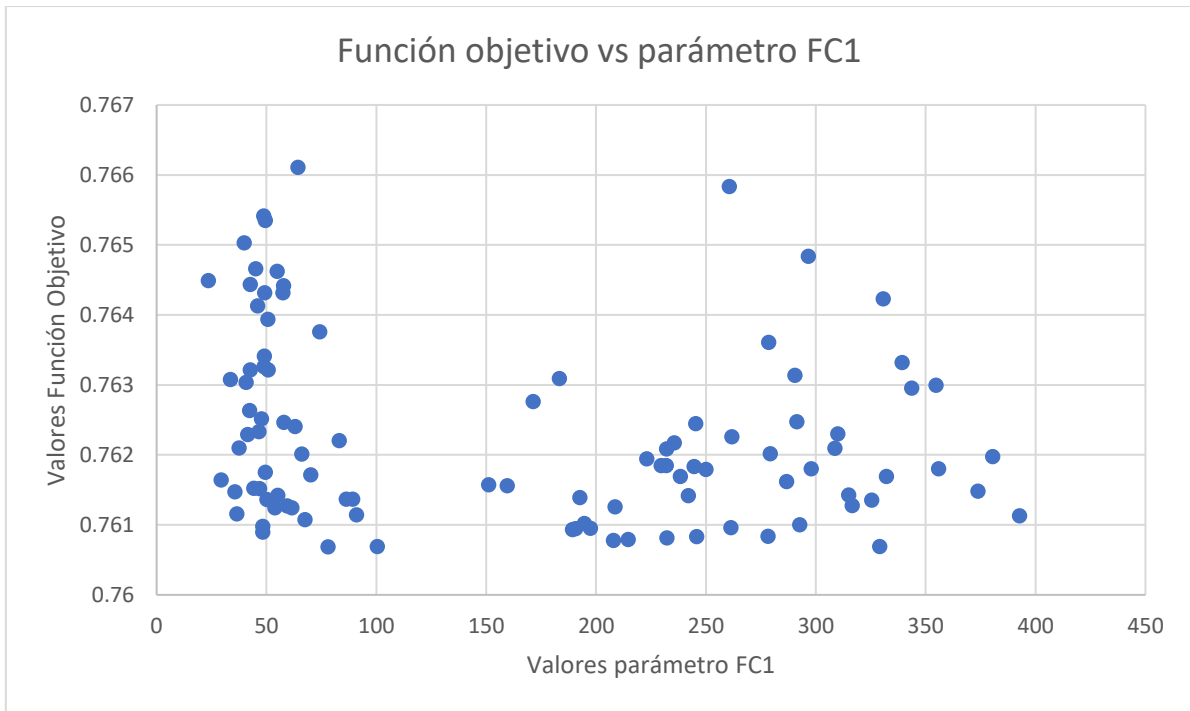
Elaboración Propia



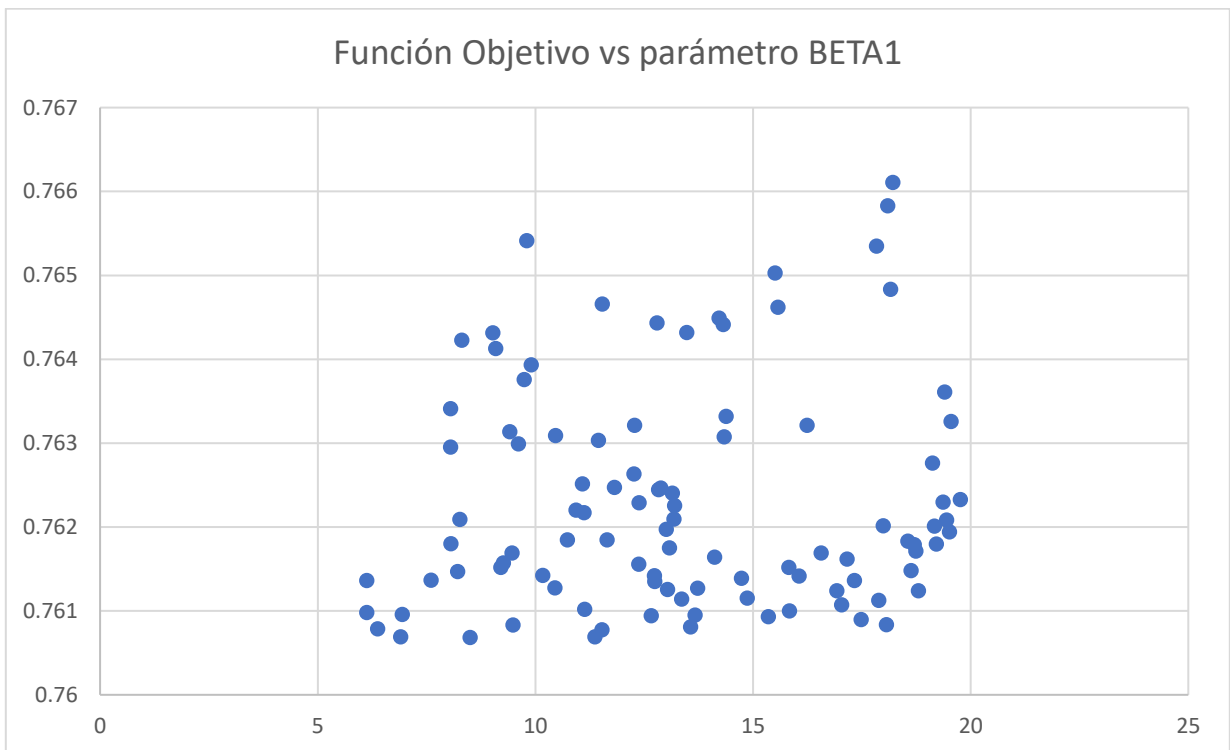
Elaboración propia



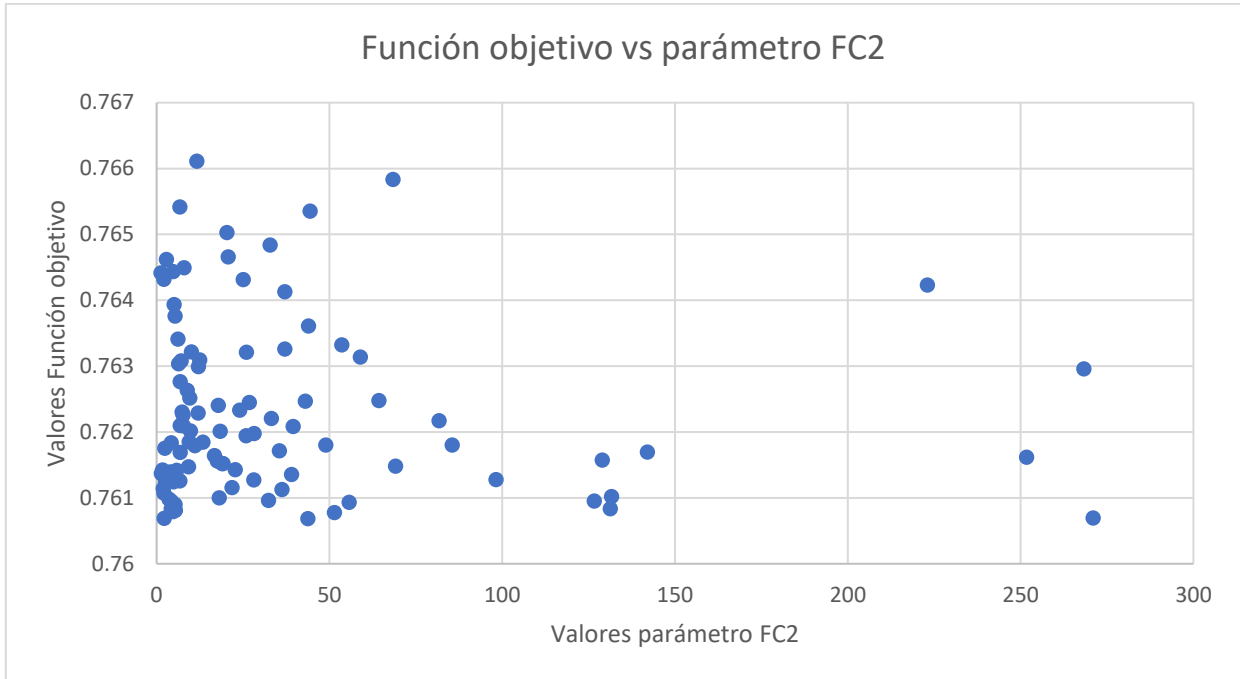
Elaboración propia



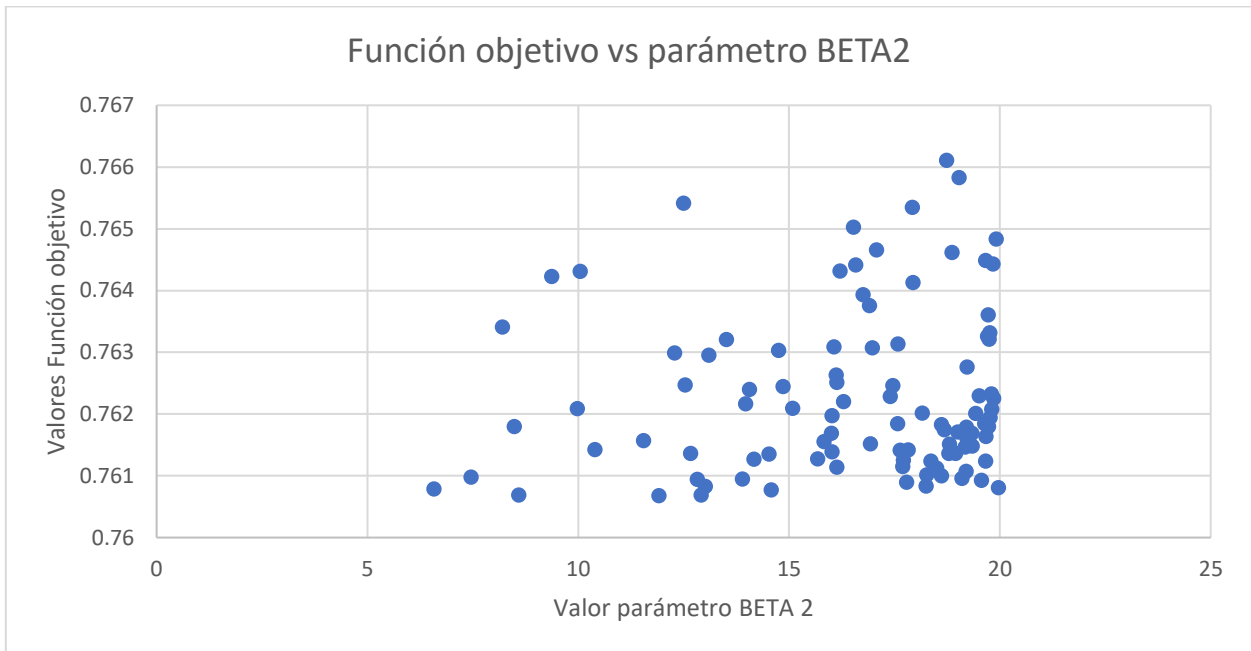
Elaboración Propia



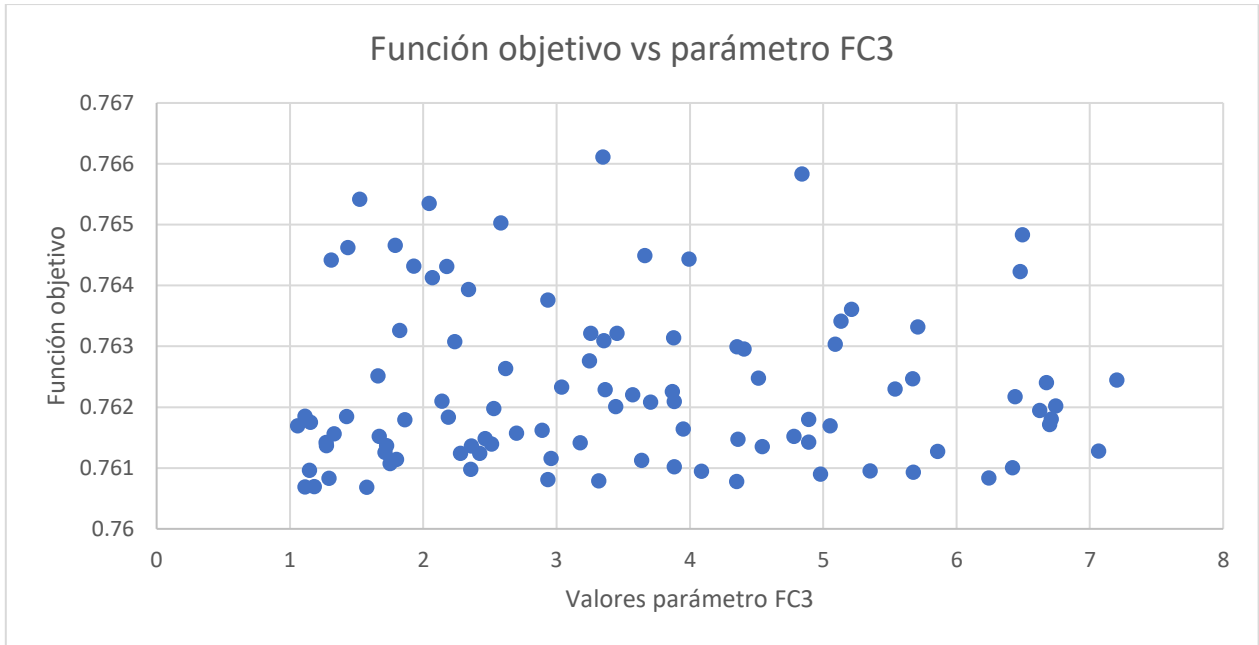
Elaboración Propia



Elaboración Propia



Elaboración Propia



Elaboración Propia

