

Universidad de Costa Rica

Facultad de Ciencias

Escuela de Física

Departamento de Física Atmosférica, Oceánica y Planetaria



Trabajo Final de Graduación para la Licenciatura en Meteorología

Modalidad: Tesis

**Estudio del inicio y término de la estación lluviosa en el Pacífico Norte de
Costa Rica en el periodo 1950-2020**

Sustentante:

Kendall Ugalde Castro

Estudio del inicio y término de la estación lluviosa en el Pacífico Norte de Costa Rica en el periodo 1950-2020

Tesis de grado presentada en setiembre de 2022 a la Escuela de Física, Facultad de Ciencias de la Universidad de Costa Rica, como requisito final para optar por el grado de Licenciatura en Meteorología.

Tribunal Examinador

Dra. Ana María Duran Quesada

Presidenta del Tribunal

Dr. Eric Alfaro Martínez

Director de Tesis

Dr. Hugo Hidalgo León

Miembro del Comité de Tesis

Dr. Tito Maldonado Mora

Miembro del Comité de Tesis

Dr. Erick Rivera Fernández

Miembro del Tribunal de Tesis

Dedicatoria

A mi familia.

Agradecimientos

Al Dr. Eric Alfaro Martínez y al Dr. Hugo Hidalgo León por sus directrices y aportes que permitieron realizar esta tesis, además de fungir como profesores durante varios de los cursos de la Licenciatura en Meteorología.

Al Dr. Tito Maldonado Mora por sus aportes al revisar esta tesis, así como el trabajo que realizó para proporcionar una de las bases de datos necesarias para el desarrollo de esta investigación.

A los proyectos EC497 (FEES-CONARE), B9454 (Fondo de Grupos) y C0610 (Fondo de estímulo) inscritos a la Universidad de Costa Rica dentro de los cuales se enmarca este trabajo.

A todos los profesores y compañeros de la Escuela de Física de la Universidad de Costa Rica que durante el transcurso de la carrera en Meteorología han influenciado en mi formación académica.

Resumen

Dado el amplio sistema montañoso que cubre Costa Rica, se definen dos sistemas climáticos según sus regímenes de precipitación y temperatura: uno en la vertiente Caribe y otro en la vertiente Pacífico. Esta última caracterizada por una época seca y húmeda definidas, por lo que es posible determinar las fechas del inicio y término de la estación lluviosa (IELL y TELL, respectivamente). La región Pacífico norte de Costa Rica forma parte del Corredor Seco Centroamericano, siendo afectada por condiciones áridas que influyen en gran parte de la actividad productiva de Guanacaste, la depende del recurso hídrico, por tanto, ampliar el conocimiento sobre el IELL y TELL y su variabilidad climática es muy importante. Esta investigación analiza el IELL y TELL en Guanacaste y su relación con fuentes de variabilidad climática, usando datos de alta resolución espacial y temporal.

El primer capítulo contextualiza las condiciones de la región, justifica la investigación, detalla las fuentes de variabilidad climática que afectan la región como El Niño-Oscilación de Sur (ENOS), la Oscilación Multidecenal del Atlántico (OMA) o la Corriente en Chorro de Bajo Nivel del Caribe o CLLJ por sus siglas en inglés y revisa investigaciones previas sobre la estación lluviosa en la región.

En el segundo capítulo se describen los datos usados, principalmente el reanálisis ERA5 y el conjunto de datos CHIRPS por su siglas en inglés. Además, se explican los métodos aplicados para determinar las fechas del IELL y TELL y los estadísticos para correlacionar estas fechas con las diferentes fuentes de variabilidad climática.

En el tercer y cuarto capítulo se presentan los principales resultados caracterizando climatológicamente el IELL y TELL, mostrando comportamientos similares entre los conjuntos de datos usados. Las correlaciones entre el IELL y TELL con fuentes de variabilidad climática coinciden con trabajos previos para los datos de CHIRPS, donde una OMA negativa, un ENOS positivo y un CLLJ intenso favorecen eventos secos como IELL tardíos o TELL tempranos, mientras condiciones contrarias favorecen eventos húmedos. Sin embargo, no se obtienen correlaciones significativas entre ERA5 y los índices OMA y ENOS.

Finalmente, en el sexto capítulo se presentan las conclusiones y recomendaciones para futuros trabajos relacionados a esta temática.

Índice general:

Hoja de aprobación	i
Dedicatoria.....	ii
Agradecimientos	iii
Resumen.....	iv
Lista de abreviaturas:	xii
Capítulo 1.....	1
Introducción.....	1
1.1 Justificación.....	2
1.2. Fuentes de variabilidad climática que modulan el IELL y el TELL.....	3
1.2.1. El Niño-Oscilación del Sur (ENOS).....	4
1.2.2. Oscilación Multidecenal del Atlántico (OMA).	5
1.2.3. La corriente en chorro de bajo nivel del Caribe (CLLJ).	5
1.3. Antecedentes de estudios sobre el inicio y término de la estación lluviosa.....	6
1.4. Objetivos de la investigación.	12
1.4.1. Objetivo General.	12
1.4.2. Objetivos específicos:.....	12
Capítulo 2.....	14
Datos y metodología	14
2.1. Datos.	14
2.1.1. Datos de precipitación y velocidad zonal del viento del reanálisis ERA5.	14
2.1.2. Datos de precipitación de CHIRPS.	15
2.1.3. Datos de precipitación de observaciones sobre Guanacaste.....	15
2.2. Metodología.	16
2.2.1. Método para determinar el IELL, TELL, DES y DELL.	16
2.2.2. Validación de datos de CHIRPS vs estaciones de precipitación en Guanacaste.....	21

2.2.3. Cálculo de características estadísticas y tendencias para el IELL, TELL, DES y DELL.....	22
2.2.4. Índices de fuentes de variabilidad climática.....	24
2.2.5. Análisis de componentes principales (CP) aplicado sobre las series de IELL, TELL, DELL y DES.....	29
2.2.6. Análisis de tablas de contingencia.....	30
Capítulo 3.....	32
Caracterización de la estación lluviosa y seca a partir de la base de datos de CHIRPS..	32
3.1. Validación de los datos CHIRPS contra estaciones meteorológicas.	32
3.2. Caracterización del IELL, TELL, DELL y DES en la región con datos de CHIRPS.....	38
3.3. Fuentes de variabilidad climática que modulan el IELL, TELL, DELL y DES en la región.....	44
Capítulo 4.....	52
Caracterización de la estación lluviosa y seca a partir de la base de datos de ERA5 con reducción de escala	52
4.1. Caracterización del IELL, TELL, DELL y DES en la región a partir de datos de ERA5.....	52
4.2. Caracterización del IELL, TELL, DELL y DES en la región a partir de datos de ERA5+CHIRPS.	58
4.3. Influencia de las fuentes de variabilidad climática que afectan el IELL, TELL, DELL y DES en la región con datos de ERA5+CHIRPS.....	64
Capítulo 5.....	66
Conclusiones y recomendaciones	66
5.1. Conclusiones.	66
5.2. Recomendaciones.....	68
Referencias.....	70
Anexos.	76

Índice de Figuras:

Figura 1.1. Región de estudio que abarca toda la provincia de Guanacaste incluyendo la península de Nicoya.....	4
Figura 2.1. IELL y TELL para la estación meteorológica de Hacienda la Ceiba durante el año 2000.....	19
Figura 2.2. Ciclo anual para el índice del CLLJ calculado a partir de los datos de viento zonal de ERA5	26
Figura 2.3. Índice OMA para 1950-2020 promediado en los periodos de abril-mayo para el IELL, de octubre-noviembre para el TELL, de noviembre (año anterior)-abril (año posterior) para la DES y de mayo-octubre para la DELL.....	26
Figura 2.4. Índice N3.4 para 1950-2020 promediado en los periodos de abril-mayo para el IELL, de octubre-noviembre para el TELL, de noviembre (año anterior)-abril (año posterior) para la DES y de mayo-octubre para la DELL.....	27
Figura 2.5. Índice OMA-N3.4 para 1950-2020 promediado en los periodos de abril-mayo para el IELL, de octubre-noviembre para el TELL, de noviembre (año anterior)-abril (año posterior) para la DES y de mayo-octubre para la DELL.....	27
Figura 2.6. Índice ATN para 1950-2020 promediado en los periodos de abril-mayo para el IELL, de octubre-noviembre para el TELL, de noviembre (año anterior)-abril (año posterior) para la DES y de mayo-octubre para la DELL.....	28
Figura 2.7. Índice ATN-N3.4 para 1950-2020 promediado en los periodos de abril-mayo para el IELL, de octubre-noviembre para el TELL, de noviembre (año anterior)-abril (año posterior) para la DES y de mayo-octubre para la DELL.....	28
Figura 2.8. Índice CLLJ para 1950-2020 promediado en los periodos de abril-mayo para el IELL, de octubre-noviembre para el TELL, de noviembre (año anterior)-abril (año posterior) para la DES y de mayo-octubre para la DELL.....	29
Figura 3.1. Mediana del día juliano del IELL y TELL, y mediana de la cantidad de días de la DES y DELL de la base de datos de CHIRPS en la región de Guanacaste	39

Figura 3.2. Desviación estándar para las series de IELL, TELL, DES y DELL de la base de datos de CHIRPS en la región de Guanacaste	41
Figura 3.3. Rango Intercuartílico para las series del IELL, TELL, DES y DELL de la base de datos de CHIRPS en la región de Guanacaste	42
Figura 3.4. Tendencias para las series del IELL, TELL, DES y DELL de la base de datos de CHIRPS en la región de Guanacaste.....	43
Figura 3.5. Primeras 20 CP asociadas al IELL, TELL, DES y DELL obtenidas a partir de la base de datos de CHIRPS en la región de Guanacaste	45
Figura 3.6. Correlación de Pearson entre el IELL, TELL, DES y DELL con su respectiva CP1 asociada para los datos de CHIRPS en la región de Guanacaste	46
Figura 3.7. Correlación de Pearson entre el IELL, TELL, DES y DELL con su respectiva CP2 asociada para los datos de CHIRPS en la región de Guanacaste	47
Figura 4.1. Precipitación media diaria ($\text{mm}\cdot\text{día}^{-1}$) para los datos de ERA5 con reducción de escala (1950-1980), izquierda y CHIRPS (1981-2020), derecha.....	52
Figura 4.2. Mediana del día juliano del IELL y TELL, y mediana de la cantidad de días de la DES y DELL de la base de datos de ERA5 en la región de Guanacaste	53
Figura 4.3. Desviación estándar para las series de IELL, TELL, DES y DELL de la base de datos de ERA5 en la región de Guanacaste para el periodo 1950-1980	55
Figura 4.4. Rango Intercuartílico para las series de IELL, TELL, DES y DELL de la base de datos de ERA5 en la región de Guanacaste para el periodo 1950-1980.	56
Figura 4.5. Tendencias para las series del IELL, TELL, DES y DELL de la base de datos de ERA5 en la región de Guanacaste.....	57
Figura 4.6. Mediana del día juliano del IELL y TELL, y mediana de la cantidad de días de la DES y DELL de la base de datos de ERA5+CHIRPS en la región de Guanacaste	60
Figura 4.7. Desviación estándar para las series de IELL, TELL, DES y DELL de la base de datos de ERA5+CHIRPS en la región de Guanacaste para el periodo 1950-2020.....	61
Figura 4.8. Rango Intercuartílico para las series de IELL, TELL, DES y DELL de la base de datos de ERA5+CHIRPS en la región de Guanacaste para el periodo 1950-2020.....	62

Figura 4.9. Tendencias para las series del IELL, TELL, DES y DELL de la base de datos de ERA5+CHIRPS en la región de Guanacaste	63
Anexo 1. Caso donde la metodología de Bombardi modificada obtiene un TELL incorrecto debido a que es muy temprano	76
Anexo 2. Caso donde la metodología de Bombardi modificada obtiene un TELL en el cual existen precipitaciones considerables posteriores a la fecha del TELL hacia final de año.	76

Índices de Tablas:

Tabla 2.1. Datos de estaciones sobre Guanacaste con datos de resolución temporal diaria para el periodo de 1980-2019. La mayoría de estaciones meteorológicas fueron suministradas por el IMN.	15
Tabla 3.1. Comparativa de precipitación mensual entre datos de estaciones meteorológicas (Tabla 2.1) y datos de CHIRPS.	32
Tabla 3.2. Percentiles 25, 50 y 75 (P25, P50 y P75 respectivamente) para el IELL, TELL, DES y DELL de cada estación meteorológica (Tabla 2.1).....	33
Tabla 3.3. Error Medio Absoluto (EMA) entre los datos de estaciones meteorológicas (Tabla 2.1) y CHIRPS para el IELL, TELL, DELL y DES.....	34
Tabla 3.4. Correlación de Spearman entre los datos de estaciones meteorológicas (Tabla 2.1) y CHIRPS para el IELL, TELL, DELL y DES.	35
Tabla 3.5. Sesgo (β) entre los datos de estaciones meteorológicas (Tabla 2.1) y CHIRPS para el IELL, TELL, DELL y DES.	35
Tabla 3.6. Variabilidad (γ) entre los datos de estaciones meteorológicas (Tabla 2.1) y CHIRPS para el IELL, TELL, DELL y DES.	36
Tabla 3.7. Índice Kling-Gupta Efficiency (KGE) entre los datos de estaciones meteorológicas (Tabla 2.1) y CHIRPS para el IELL, TELL, DELL y DES.	36
Tabla 3.8. Índice de Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) entre los datos de estaciones meteorológicas (Tabla 2.1) y CHIRPS para el IELL, TELL, DELL y DES.	37
Tabla 3.9. Percentiles 25, 50 y 75 para el IELL, TELL, DES y DELL de las métricas estadísticas: mediana, desviación estándar, rango intercuartil y tendencias para CHIRPS	44
Tabla 3.10. Porcentaje de la variabilidad explicada por la CP1 y CP2 asociada al IELL, TELL, DES y DELL.....	45
Tabla 3.11. Correlación de Pearson entre la CP1 asociada al IELL, TELL, DES y DELL y los índices OMA, N3.4, OMA-N3.4 y CLLJ en su respectivo periodo.....	48

Tabla 3.12. Tablas de contingencia para la CP1 de la DELL de CHIRPS según los índices OMA-N3.4 y CLLJ.....	50
Tabla 4.1. Percentiles 25, 50 y 75 para el IELL, TELL, DES y DELL de las métricas estadísticas: mediana, desviación estándar, rango intercuartil y tendencias para ERA5.	57
Tabla 4.2. Comparaciones entre los estadísticos del IELL, TELL, DES y DELL calculados con CHIRPS (Figuras 3.1-3.4) y ERA5 (figuras 4.2-4.5), usando el <i>EMA</i> , <i>r_s</i> y <i>KGE</i>	58
Tabla 4.3. Percentiles 25, 50 y 75 para el IELL, TELL, DES y DELL de las métricas estadísticas: mediana, desviación estándar, rango intercuartil y tendencias de ERA5+CHIRPS	63
Tabla 4.4. Porcentaje de la variabilidad explicada por la CP1 y CP2 asociada al IELL, TELL, DELL y DES.....	64
Tabla 4.5. Correlación de Pearson entre la CP1 asociada al IELL, TELL, DES y DELL contra los índices ATN, N3.4, ATN-N3.4 y CLLJ en su respectivo periodo.....	64
Tabla 4.6. Tablas de contingencia para la CP1 de la DELL de ERA5+CHIRPS según los índices OMA-N3.4 y CLLJ	65

Lista de abreviaturas:

AN: Arriba de lo Normal

ATN: Atlántico Tropical Norte

BN: Bajo lo Normal

CA: Constructed Analogs

CHIRPS: Climate Hazards group Infrared Precipitation with Stations

CLLJ: Caribbean Low-Level Jet

CP: Componente Principal

CP1: Componente Principal 1

CP2: Componente Principal 2

CSC: Corredor Seco Centroamericano

DELL: Duración de la Estación Lluviosa

DES: Duración de la Estación Seca

EMA: Error Medio Absoluto

ENOS: El Niño-Oscilación del Sur

IELL: Inicio de la Estación Lluviosa

KGE: Kling-Gupta Efficiency

N: Normal

NSE: Nash-Sutcliffe Eficiency

N3: Niño3

N3.4: Niño 3.4

OMA: Oscilación Multidecenal del Atlántico

P25: Percentil 25

P33: Percentil 33

P50: Percentil 50

P67: Percentil 67

P75: Percentil 75

TELL: Término de la Estación Lluviosa

TSM: Temperatura Superficial del Mar

ZCIT: Zona de Convergencia Intertropical

Capítulo 1

Introducción

Dada la localización geográfica de Costa Rica, en la franja tropical, no presenta las marcadas estaciones climáticas de las latitudes más altas debido a los cambios de temperatura superficial a lo largo del año. Asimismo, la compleja orografía y las interacciones de los diferentes fenómenos atmosféricos que afectan al país, caracterizan las variaciones de las estaciones climáticas de Costa Rica según sus regímenes de precipitación y temperatura. El país está dividido en dos vertientes dado el amplio sistema de cordilleras que se extienden desde el noroeste al sureste, dando como resultado un régimen de precipitación representativo para la vertiente del Pacífico y otro para la vertiente del Caribe (Durán-Quesada et al., 2020; Maldonado et al., 2018).

La vertiente del Pacífico presenta dos estaciones climáticas características. Una estación seca y otra lluviosa, la transición de estación seca a lluviosa ocurre alrededor del mes de mayo y la transición de estación lluviosa a seca alrededor de noviembre (Alfaro, 2002), con un periodo de disminución de las precipitaciones entre julio y agosto conocido como “El Veranillo” (Alfaro, 2014; Alfaro & Hidalgo, 2017; García-Franco et al., 2022; Maldonado et al., 2016a; Ramírez, 1983). La cantidad de precipitación varía a lo largo de toda la estación lluviosa y depende de los sistemas ciclónicos, sistemas de vientos provenientes del océano Pacífico Ecuatorial, las brisas marinas o la influencia de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) (Maldonado et al., 2018; Muñoz et al., 2002; Quirós & Hidalgo, 2016a, 2016b).

La estación seca se puede definir como el periodo en que la precipitación no supera la evapotranspiración (Hernández & Fernández, 2015; Ramírez, 1983), mientras que lo contrario sucede durante la época lluviosa. Las fechas de inicio (IELL) y término (TELL) de la estación lluviosa se pueden considerar como las fechas en que ocurren las transiciones de estación seca a lluviosa, y de lluviosa a seca respectivamente, además la duración de la estación lluviosa (DELL) se puede considerar como el periodo abarcado desde el IELL hasta el TELL, mientras la duración de la estación seca (DES) como el periodo abarcado desde el TELL hasta el IELL del siguiente año. El Instituto Meteorológico Nacional [IMN] (2008) estima el IELL y el TELL cerca de mayo y octubre respectivamente para

gran parte de la vertiente del Pacífico en Costa Rica. Además, es importante destacar que en América Central tanto el IELL y el TELL muestran una dependencia latitudinal (Alfaro, 2002; Díaz, 2019; Gramzow & Henry, 1972), por lo que también es importante considerar la localización de la zona a estudiar.

En Costa Rica, la región Pacífico Norte que cubre la zona noroeste del país, se caracteriza por ser una de las regiones con menor riqueza hídrica, el caudal de sus principales ríos puede ser afectados notablemente si se prolonga la estación seca. Costa Rica es un país que genera gran parte de su energía eléctrica a partir de fuentes renovables, las represas hidroeléctricas son altamente dependientes de las precipitaciones, por lo que el conocimiento de las fechas del IELL y TELL es muy importante, especialmente en una zona con condiciones secas predominantes, esto se aplica de igual forma para actividades productivas como la agricultura y ganadería cuya dependencia de los recursos hídricos es muy alta, así como también el abastecimiento de agua potable para consumo humano.

La región forma parte del llamado Corredor Seco Centroamericano (CSC), se trata de una franja que se extiende a lo largo de la vertiente Pacífico de América Central, desde Chiapas en México o la parte oeste de Guatemala hasta Guanacaste en Costa Rica (Calvo et al., 2018; Gotlieb et al., 2019). El CSC está caracterizado por un clima especialmente árido, bajos recursos hídricos y un bosque tropical seco. Como indica Calvo et al. (2018) las condiciones secas características del CSC se deben a diversos factores como el papel del relieve en la distribución de humedad, la formación del sistema montañoso en dirección noroeste-sureste o el complejo mecanismo de circulación de los vientos alisios en la región, estos últimos muy ligados a la intensidad de la corriente en chorro de bajo nivel del Caribe (CLLJ, por sus siglas en inglés). Además, que fuentes de variabilidad climática como El Niño-Oscilación del Sur (ENOS) y la Oscilación Multidecenal del Atlántico (OMA), han mostrado influencia en la modulación de las precipitaciones (Hidalgo et al., 2019).

1.1 Justificación.

Toda información relevante a los regímenes de precipitación es de vital importancia en Costa Rica, debido a que estas determinan las estaciones climáticas del país, conocimiento sobre extensiones tanto de la estación lluviosa como la seca pueden ayudar a los diferentes

sectores de la población a tomar medidas preventivas ante eventuales eventos hidrometeorológicos.

Gran parte de las actividades productivas en Costa Rica son influenciadas por factores climáticos y las actividades agrícolas o de productividad energética son altamente dependientes de las precipitaciones, vientos o temperaturas. Según indica el Instituto Costarricense de Electricidad [ICE] (2019), para diciembre de 2017 hasta un 66% de la energía eléctrica se produjo a través plantas hidroeléctricas, el resto se produce con plantas térmicas (16%), geotérmicas (6%), de biomasa (1%), eólicas (11%) y solares (0.2%), estas dos últimas también muy dependientes de condiciones climáticas. Por lo que es importante destacar que alrededor de dos tercios de la energía producida necesita disponibilidad de recursos hídricos, que podría ver afectada su productividad ante eventuales extensiones de la estación seca.

Debido a las condiciones especialmente áridas presentes en la región Chorotega al encontrarse dentro del CSC (Quesada et al., 2019), es de vital importancia realizar estudios pertinentes a los regímenes de precipitación en esta región. Como indica el Ministerio de Agricultura y Ganadería [MAG] (2020), en la región Chorotega del país fuentes de variabilidad climática como ENOS, tienen implicaciones negativas en actividades dependientes de los recursos hídricos como ganadería y cultivos, por ejemplo, las sequías que afectaron al país entre 2014 y 2016, generaron pérdidas económicas de hasta 30 millones de dólares, especialmente en el sector agrícola (MAG, 2020). Ampliar el conocimiento en cuanto al IELL, TELL, DES y DELL y su relación con fuentes de variabilidad climática, puede resultar en información importante para los entes encargados del manejo adecuado de los recursos hídricos. En la Figura 1.1 se aprecia la región de estudio de interés, abarcando toda la provincia de Guanacaste y la región de la provincia de Puntarenas perteneciente a la península de Nicoya.

1.2. Fuentes de variabilidad climática que modulan el IELL y el TELL.

Diversos estudios se han llevado a cabo en relación al IELL y TELL tanto en Costa Rica como en la región centroamericana (e.g. Alfaro, 2002; Alfaro & Cid, 1999; Díaz, 2019; Gramzow & Henry, 1972; Nakaegawa et al., 2015; Orrego León et al., 2021; Rivera et al., 2019). Se han utilizado diferentes metodologías para determinar las fechas del IELL y el

TELL, y han sido relacionadas con fuentes de variabilidad climática como las temperaturas superficiales del mar (TSM) de los océanos Pacífico y Atlántico (e.g. Alfaro, 2002; Alfaro et al., 1998; Alfaro & Cid, 1999; Enfield & Alfaro, 1999). Por lo que es importante destacar estos estudios en la región y sus principales resultados, además de las fuentes de variabilidad climática a estudiar.

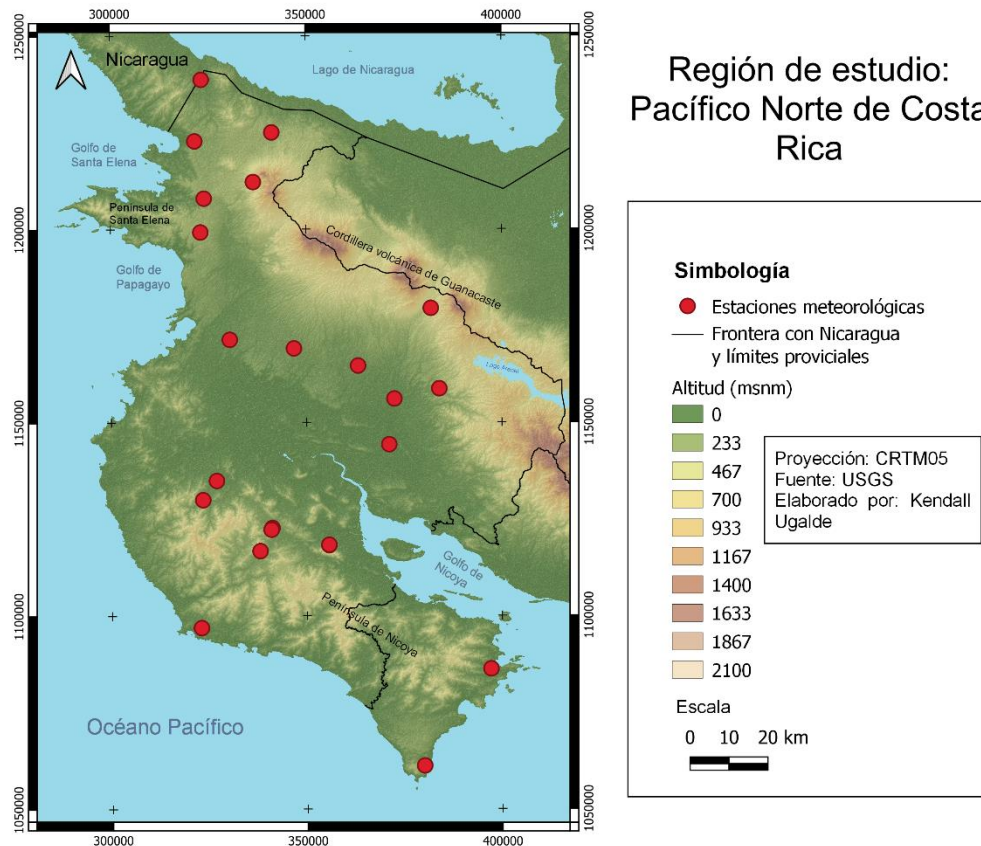


Figura 1.1. Región de estudio que abarca toda la provincia de Guanacaste incluyendo la península de Nicoya, los puntos rojos representan la posición de las estaciones meteorológicas de la base de datos del IMN usadas en el análisis (sección 2.1.3).

1.2.1. El Niño-Oscilación del Sur (ENOS).

Como se detallará más adelante existen diversas fuentes de variabilidad climática que pueden influenciar el IELL y TELL sobre América Central. Como indican Maldonado et al. (2018) en su revisión sobre diversos fuentes de variabilidad climática que afectan América Central, ENOS se compone de un acople atmosférico y oceánico. La parte

oceánica corresponde a las anomalías de TSM sobre el Pacífico Tropical del Este (PTE) y, la parte atmosférica a un gradiente de presión a nivel del mar entre el hemisferio oriental y occidental del Pacífico ecuatorial. El fenómeno se compone de tres fases, una fase cálida conocida como El Niño, una fase fría conocida como La Niña y una tercera fase de condiciones neutras que ocurren aproximadamente con un periodo de dos a siete años.

Maldonado et al. (2018) mencionan que la variabilidad del ENOS se centra sobre el Pacífico ecuatorial, sin embargo, múltiples estudios han encontrado teleconexiones entre el fenómeno y diversas condiciones climáticas. Como, por ejemplo, la frecuencia de ciclones tropicales en el océano Atlántico (Alfaro, 2007) y el aumento o descenso de precipitaciones durante la estación lluviosa sobre la vertiente del Pacífico de América Central (Maldonado et al., 2013), específicamente fases frías (cálidas) del ENOS se asocian al incremento (descenso) de precipitaciones (Maldonado et al., 2018).

1.2.2. Oscilación Multidecenal del Atlántico (OMA).

Otro fenómeno de variabilidad climática importante en la región es la OMA, esta corresponde a un modo con periodo de aproximadamente 70 años sobre la TSM en el océano Atlántico (Maldonado et al., 2018). Se ha encontrado que la OMA también puede afectar las sequías provocadas por el ENOS, donde una OMA positiva (negativa) puede inducir condiciones húmedas (secas) en la vertiente del Pacífico de América Central, además puede modular el tamaño de la Piscina Cálida del Atlántico, e influir en el desarrollo de ciclones tropicales en la cuenca del Atlántico (Alfaro, 2007; Maldonado et al., 2017).

1.2.3. La corriente en chorro de bajo nivel del Caribe (CLLJ).

Los trabajos de Amador (1998) y Amador (2008) describen la CLLJ como una corriente de movimiento rápido sobre el mar Caribe, su núcleo se encuentra alrededor de los 15° N y 75° O a una altura de unos 925 hPa con un distinguido ciclo anual, una considerable extensión de este a oeste que puede alcanzar velocidades de entre 10-15 ms⁻¹, con los vientos más intensos durante el invierno y verano.

El CLLJ es uno de los elementos más importantes para explicar la actividad convectiva de julio a noviembre en la región de los mares intra americanos (Maldonado et al., 2018). El CLLJ tiene influencia sobre las lluvias de la vertiente Caribe, sin embargo, Hidalgo

et al. (2015) proponen un mecanismo que relaciona al CLLJ con las precipitaciones del Pacífico. El modelo indica que cerca de las costas del Caribe de Costa Rica y Nicaragua en la salida de los vientos del CLLJ, se presentan intensos procesos convectivos que propician condiciones húmedas y el ascenso de las masas de aire, en altos niveles atmosféricos cerca de los 200 hPa un hundimiento genera descenso de aire seco hacia el Caribe y al PTE, provocando un desplazamiento al sur de la ZCIT. De tal manera que este patrón de circulación se acentúa (suprime) cuando la ZCIT se desplaza hacia el sur (norte). Además, es conocido que una fase cálida (fría) del ENOS fortalece (debilita) el CLLJ, por lo que existe una conexión entre ambos fenómenos y las precipitaciones sobre el Pacífico de América Central (Quirós & Hidalgo, 2016a).

1.3. Antecedentes de estudios sobre el inicio y término de la estación lluviosa.

Uno de los primeros trabajos centrados en el estudio del IELL y el TELL en América Central fue la investigación de Gramzow y Henry (1972), el método aplicado en la investigación consiste en calcular acumulados de lluvia cada cinco días (también llamados pñtadas). El IELL se determina como la primera pñtada en el acumulado de precipitación que supera 25 mm, mientras que el TELL corresponde a la última pñtada en que se tuvo un acumulado de 25 mm de precipitación. El criterio de los 25 mm representa la precipitación de una tormenta de mesoescala, además de tratarse de un valor central en el conjunto de datos. Sin embargo, este umbral de 25 mm también se considera, ya que esta es la cantidad de evaporación esperada en cinco días (Hernández & Fernández, 2015), según las estimaciones de evaporación de $5-8 \text{ mm día}^{-1}$ determinadas por Gray (1993) para la región de los Mares Intra-Americanos.

Gramzow y Henry (1972) determinaron que la temporada lluviosa en América Central inicia más temprano en los países al sur, en las costas Caribe de Costa Rica y Panamá, para posteriormente moverse al este, mientras que inicia de forma tardía en las costas al norte de Honduras. La temporada lluviosa finaliza más temprano en las montañas de El Salvador, Honduras y Nicaragua, además de que en las costas Pacífico tiende a finalizar la estación lluviosa antes que en las costas del Caribe.

Alfaro et al. (1998) estudiaron la estación lluviosa sobre América Central con un criterio más complejo para determinar el IELL y el TELL. Redujeron las series de tiempo en

péntadas y determinaron el IELL cuando alguna de las péntadas supera los 25 mm de precipitación, incluyendo la condición de que al menos una de las siguientes dos péntadas supere los 25 mm, además la péntada anterior y posterior a esta última deben superar los 0.5 mm de precipitación acumulada, esto debido a que la resolución de los instrumentos de medición usados en la investigación es de 0.1 mm. El TELL se definió de la misma forma, pero revisando las series de tiempo en orden inverso.

Alfaro et al. (1998) buscaron correlaciones entre el IELL y TELL contras las TSM del Atlántico norte (ATN) y sur (ATS), el Índice de Oscilación del Sur (IOS) y las TSM del Pacífico ecuatorial, específicamente el área 6° N - 6° S y 150° O - 90° O correspondiente a la región Niño3 (N3), aunque tradicionalmente se usa el área 5° N - 5° S y 150° O - 90° O (Alfaro et al., 1998; Trenberth & Stepaniak, 2001). El índice del ATN mostró correlación negativa con el IELL, especialmente en el enero anterior, así eventos cálidos (fríos) se correlacionaron a comienzos tempranos (tardíos) de la estación lluviosa, posiblemente debido a bajas presiones sobre el ATN que afectan el posicionamiento de la ZCIT en América Central. De igual forma tanto el índice IOS como el N3 mostraron correlación positiva en diciembre y negativa en marzo (antes del TELL). Por tanto, eventos cálidos (fríos) en el PTE se correlacionan a comienzos tempranos (tardíos) de la estación seca, posiblemente asociados a una migración temprana o tardía de la ZCIT. Además, se debe destacar que no se encontraron correlaciones significativas del IELL y el TELL con el ATS.

Adicionalmente, Enfield y Alfaro (1999) encontraron que el ATN también modula el TELL, ya que un ATN cálido (frío) se asocia a un TELL más tardío (temprano), de manera que el ATN influencia la duración de la estación lluviosa. Se debe destacar que tanto el ATN y N3 afectan el TELL de modo que signos iguales en estos índices oceánicos tienden a contrarrestar sus efectos, por lo que es importante estudiar el comportamiento simultáneo de ambos océanos. Estos resultados se apreciaron al sur de América Central sobre la vertiente del Pacífico de Costa Rica y Panamá.

Alfaro y Cid (1999) utilizaron un método similar al de Alfaro et al. (1998) para determinar el IELL y el TELL, sin embargo, consideraron péntadas anteriores a la primera que superó los 25 mm (para el IELL) o posteriores a la última (para el TELL). Los resultados de

Alfaro y Cid (1999) son muy similares a trabajos previos, por ejemplo un ATN cálido (frío) se relaciona a un IELL temprano (tardío) o un PTE cálido (frío) se relaciona a un TELL temprano (tardío). También se determinó que una DELL más larga (más corta) se relaciona a un ATN cálido (frío). De manera que estos resultados destacan la importancia de los Océanos Pacífico y Atlántico como pronóstico de la estación lluviosa en la región de América Central.

Alfaro (2002) encontró una dependencia latitudinal del IELL y el TELL. El IELL presentaba valores tempranos (tardíos) en la parte sur (norte) de América Central, mientras el TELL mostraba un comportamiento opuesto. La mayor parte de la variabilidad en la región está asociada a una combinación de sistemas como la migración latitudinal de la ZCIT, la variación estacional de la radiación solar que influye sobre el flujo de calor latente y la interacción de los vientos de bajo nivel con la orografía. Además Alfaro (2002), logró determinar las fechas en que se espera el IELL y el TELL en gran parte de América Central usando un conjunto de 94 estaciones pluviométricas.

Fallas y Alfaro (2012) estudiaron el ciclo de precipitaciones de América Central agrupando estaciones mediante el método de componentes principales (CP). Encontraron dos modos principales, uno que obedece al régimen del Pacífico y el otro al del Caribe. Se utilizaron múltiples índices oceánicos para analizar la predictibilidad de la estación lluviosa. En este estudio no se realizó análisis de péntadas, sino que se trabajó con diferentes períodos que caracterizan la estación lluviosa en América Central.

En el trabajo de Fallas y Alfaro (2012) determinaron que la combinación de diversos índices oceánicos o atmosféricos como la Oscilación Decenal del Pacífico (ODP), OMA, N3 o la Oscilación del Atlántico Norte (OAN) pueden ser muy útiles en el pronóstico de la estación lluviosa. Índices combinados como OMA-(ODP+N3), ODP+N3, N3 y OMA-ODP dieron resultados confiables en el adelanto o atraso del IELL. Mientras que índices como OMA, OMA-N3, N3, OMA-(ODP+N3) mostraron resultados significativos en la predicción de los atrasos y adelantos del TELL.

Hernández y Fernández (2015) calcularon los promedios en péntadas de precipitación sobre las seis regiones climáticas de Costa Rica. Posteriormente calcularon los promedios en péntadas de la evapotranspiración de referencia, mediante el método FAO Penman-

Monteith desarrollada por Food Agriculture Organization (FAO). Se graficaron ambas curvas y se definió la estación lluviosa como aquel periodo donde la precipitación supera la evaporación. Hernández y Fernández (2015) lograron definir fechas del IELL y el TELL, pero los resultados no coinciden perfectamente con trabajos previos, aunque mantienen un comportamiento similar. Se deben destacar las diferencias metodológicas, ya que gran parte de los trabajos previos se basan únicamente en datos de precipitación y umbrales límites determinados, sin embargo, Hernández y Fernández (2015) no utilizaron umbrales y se basaron en diferencias entre la evapotranspiración y la precipitación.

Nakaegawa et al. (2015) estudiaron el IELL y TELL mediante una metodología similar a la expuesta en trabajos antes mencionados como el de Gramzow y Henry (1972) o Alfaro et al. (1998). Aunque se debe destacar que Nakaegawa et al. (2015) usaron un valor umbral de precipitación de $3 \text{ mm} \cdot \text{día}^{-1}$, lo que resultaría en unos 15 mm acumulados en cada péntada, aunque se menciona que ese umbral puede cambiar dependiendo de las necesidades del estudio. También se utilizó a modo de comparación un umbral distribuido, donde este se define por la precipitación media anual climatológica. El trabajo se realizó sobre el país de Panamá, dando resultados poco uniformes debido a la gran complejidad geográfica en las regiones del IELL y el TELL, donde podían existir diferencias de hasta 20 péntadas entre el IELL a lo largo de todo el país.

En la tesis de Díaz (2019) se utilizó un método distinto a los anteriores mencionados para estudiar el IELL a lo largo de las costas de la vertiente Pacífico de Mesoamérica. El método consiste en calcular las pendientes del acumulado de precipitación diario cada 10 días entre el 19 de abril y 30 de julio, se busca que la magnitud de esta pendiente supere un valor de dos. Además, al menos 5 días del total de los 10 días usados deben ser superiores a cero. Si se cumplen los criterios se considera el IELL al primer día y a la semana que corresponda esté del intervalo de diez días usados.

Díaz (2019) encontró que el IELL ocurre primero en los países más al sur como Costa Rica y Panamá, y más tarde en zonas al norte de México, con casi dos meses de diferencia. De manera que parece existir una dependencia latitudinal como ya se indicó en trabajos previos. La que puede estar relacionada con el desplazamiento de la ZCIT, donde el retraso

o adelanto en el IELL también puede corresponder a la influencia del fenómeno del ENOS, y la manera en que este afecta la posición de la ZCIT.

Rivera et al. (2019) utilizaron el método descrito por Alfaro et al. (1998) para determinar el IELL y el TELL en zonas cercanas a las costas de Guatemala a diferentes alturas. También utilizaron un segundo criterio conocido como acumulación de perturbaciones, la que define el IELL y el TELL cuando la precipitación excede el respectivo promedio climático anual. Rivera et al. (2019) lograron caracterizar el IELL, TELL y DELL obteniendo resultados similares con ambos métodos, sin embargo, no lograron resultados robustos al relacionar el IELL y el TELL contra los índices del ENOS.

Gouirand et al. (2020) estudiaron el IELL y TELL sobre América Central y el Caribe definiendo sobre la región patrones sinópticos (weather type o WT por sus siglas en inglés) algunos de ellos representativos para la estación lluviosa y otros para la estación seca. Las series de precipitación se analizaron de manera que cuando cierta cantidad de días han presentado WT representativos a la estación lluviosa, con pocos WT representativos a la estación seca, se define la transición de estación seca a lluviosa. Se realizó un procedimiento bastante similar para la transición de época lluviosa a seca, pero con WT representativos a la estación seca.

Este estudio determinó que la transición de la estación seca a la lluviosa (lo mismo que el IELL) sucede de manera bastante abrupta alrededor de mayo, mientras que de la estación lluviosa a la seca (lo mismo que el TELL) sucede de una forma más suave a finales de octubre, sobre todo para países al sur y al este del dominio de estudio. Además, no se encontraron correlaciones significativas entre las transiciones del IELL y el TELL, dando a entender que ambos fenómenos son independientes y obedecen a forzantes distintos. A diferencia de investigaciones previas, en el trabajo de Gouirand et al. (2020) no se encontraron correlaciones significativas entre el IELL y la TSM del Atlántico o Pacífico. Sin embargo, sí encontraron correlaciones similares a las presentadas en trabajos previos para el TELL, es decir un Pacífico ecuatorial cálido (frío) y un Atlántico Tropical Norte frío (cálido) se relaciona con TELL tempranos (tardíos).

El trabajo realizado por Orrego et al. (2021) caracterizó el IELL, TELL y DELL a lo largo de Guatemala, las fechas fueron determinadas bajo un primer criterio donde la

precipitación acumulada en cinco días debía superar la evapotranspiración potencial y un segundo criterio donde se toma el cambio en la pendiente de la diferencia de precipitación y evapotranspiración, este criterio es útil para determinar las fechas del IELL y TELL bajo condiciones secas. Orrego et al. (2021) lograron caracterizar el IELL, TELL y DELL a lo largo de Guatemala, encontrando que el IELL tiende a mantenerse y adelantarse, el TELL a mantenerse y retrasarse, mientras el DELL tiende a mantenerse y aumentar. Además de que ambos criterios representan bastante bien el IELL y TELL en el país y se adaptan a las diferentes regiones climáticas y a su variabilidad anual.

Recientemente Alfaro e Hidalgo (2021) estudiaron el IELL en estaciones ubicadas a lo largo de América Central que presentaran una estación seca y lluviosa definida, usaron el mismo método de trabajos previos (e.g. Alfaro & Cid, 1999; Enfield & Alfaro, 1999; Gramzow & Henry, 1972), pero con datos diarios en lugar de péntadas. Encontraron que el IELL se presenta entre el 26 de abril y 20 de mayo con una variabilidad bastante alta, en algunos casos superiores a un mes y determinaron que un IELL temprano (tardío) tiende a estar relacionado con un primer periodo de precipitaciones (mayo-junio) más húmedo (seco). Además, Alfaro e Hidalgo (2021) observaron estaciones en las regiones norte y sur cuyo IELL ocurría en fechas similares, lo que podría indicar que la migración latitudinal de la ZCIT no explica totalmente la variabilidad del IELL, resultados similares ya se habían visto en el trabajo de Alfaro (2002).

Con respecto a las TSM del Pacífico y Atlántico Alfaro e Hidalgo (2021) encontraron que si las TSM del ATN son cálidas (frías) se debilita (fortalece) el flujo alisio lo que favorece (desfavorece) la formación de sistemas convectivos y la precipitación, mientras que un Pacífico ecuatorial del este cálido (frío) alejan (acercan) la ZCIT al istmo de centroamericano desfavoreciendo (favoreciendo) la formación de sistemas convectivos, además esta respuesta se puede reforzar en fases positivas (negativas) de las TSM del Pacífico Norte.

En el trabajo reciente de Ureña-Mora y Alfaro (2022) se compararon tres metodologías distintas para determinar el IELL y el TELL. La primera es similar a la aplicada en trabajos previos (Alfaro et al., 1998; Alfaro & Cid, 1999; Gramzow & Henry, 1972) con el extra de que las series son suavizadas con una media móvil de peso triangular con una ventana de 31 días, para evitar interrupciones por un posible fortalecimiento del flujo alisio

(Alfaro, 2014). El segundo método es detallado por Bombardi et al. (2017), mientras el tercero es una modificación del segundo llamado Bombardi modificado (estos dos métodos se describen detalladamente en la sección 2.2.1 ya que son utilizados para esta investigación).

Entre los resultados más importantes de Ureña-Mora y Alfaro (2022) se puede destacar que el primer y tercer método presentan medianas similares para el conjunto de estaciones, con mayor variabilidad en la primera, sin embargo, las pruebas estadísticas para estaciones individuales muestran resultados significativamente diferentes. El segundo método difiere con los resultados de las otras dos metodologías y parece detectar falsos IELL, además de extender el TELL y el DELL al sur de América Central y norte de Honduras y Belice, también muestra susceptibilidad a frentes fríos.

1.4. Objetivos de la investigación.

1.4.1. Objetivo General.

Estudiar el comportamiento del IELL, TELL, DES y DELL sobre la provincia de Guanacaste y su relación con algunas fuentes de variabilidad climática que modulan las precipitaciones en América Central, como lo son: ENOS, la OMA, el CLLJ y la diferencia de TSM entre el Pacífico Ecuatorial y el Atlántico Tropical Norte.

1.4.2. Objetivos específicos:

- Determinar las fechas del IELL, TELL, DES y DELL, utilizando la metodología de Bombardi et al. (2017) modificada por Ureña-Mora y Alfaro (2022) sobre datos de precipitación en rejilla que cubren toda la zona de Guanacaste, provenientes de bases de datos como el reanálisis ERA5 (1950-1980) (Hersbach et al., 2020), el conjunto de datos denominado “Climate Hazards group Infrared Precipitation with Stations (CHIRPS)” (1981-2020) (Funk et al., 2015) y la combinación de ambos conjuntos (1950-2020).
- Llevar a cabo análisis estadísticos que permitan validar las fechas del IELL, TELL, DES y DELL de los datos de precipitación de CHIRPS contra datos de observaciones de precipitación sobre Guanacaste provenientes de estaciones meteorológicas.

- Caracterizar estadísticamente las series de tiempo del IELL, TELL, DES y DELL sobre Guanacaste, mediante el cálculo de métricas estadísticas como: la media, la desviación estándar y las tendencias.
- Investigar la forma en que fenómenos como ENOS, OMA, CLLJ y OMA-ENOS pueden modular el IELL, TELL, DES y DELL en la zona de Guanacaste, mediante el uso de análisis estadísticos como correlaciones no paramétricas y llevar a cabo pruebas que permitan establecer la significancia estadística en los resultados.

Capítulo 2

Datos y metodología

A continuación, se detallan las bases de datos que se utilizaron sobre la región de Guanacaste para determinar el IELL y el TELL, las bases de datos consisten tanto de observaciones meteorológicas como conjuntos de datos en rejilla.

2.1. Datos.

2.1.1. Datos de precipitación y velocidad zonal del viento del reanálisis ERA5.

Se utilizaron los datos de precipitación del reanálisis ERA5 (Hersbach et al., 2020) producidos por el Centro Europeo de Previsiones Meteorológicas a Plazo Medio (ECMWF por sus siglas en inglés). El reanálisis ERA5 se basa en el Sistema Integrado de Pronóstico operativo desde el 2016, que aprovecha los desarrollos posteriores al reanálisis ERA-Interim. ERA5 aumenta la resolución espacial a 31 km y su resolución temporal es de una hora, con datos disponibles desde 1950 hasta la actualidad. Comparaciones del ERA5 con otras bases de datos muestran una mejora para diversas variables, como lo es el aumento en la correlación de la media mensual de los datos de precipitación del Proyecto de Climatología de Precipitación Global (GPCP) (Hersbach et al., 2020). También se utilizarán los datos de velocidad del viento zonal a la altura 925 hPa para determinar un índice que permita estudiar el CLLJ basado en la definición de Amador et al. (2010).

El estudio se limitó sobre la región de Guanacaste, por lo que la resolución espacial de 31 km de ERA5 es baja. Sobre los datos de precipitación de ERA5 se aplicó un método de reducción de escala conocido como “Constructed Analogs (CA)” según la metodología de Hidalgo et al. (2008), para obtener una base de datos con una mayor resolución espacial, de unos 5 km. El método construye un análogo de un patrón meteorológico diario de baja resolución espacial combinando patrones meteorológicos de varios días (predictores) de una biblioteca con patrones de alta resolución.

La aplicación de la técnica de CA sobre los datos de ERA5 se hizo para extender el periodo de la base de datos “Climate Hazards group Infrared Precipitation with Stations (CHIRPS)” (Funk et al., 2015) al periodo de ERA5, de 1981-2020 a 1950-2020 y así trabajar con una base de datos que contemple la variabilidad a largo plazo.

2.1.2. Datos de precipitación de CHIRPS.

CHIRPS (Funk et al., 2015) es una base de datos de precipitación que se genera a partir de técnicas de interpolación y registros de precipitación de observaciones al infrarrojo de la duración de nubes frías, esto para caracterizar ubicaciones geográficas con pocos o nulos datos. La resolución espacial de CHIRPS es de 0.05° (alrededor de 5 km) y la resolución temporal es de un día, con datos desde 1981 al 2020 (Funk et al., 2015). Se trabajaron conjuntamente los datos de CHIRPS y los de ERA5 con reducción de escala mediante el método CA para abarcar un periodo de 1950 a 2020. Recientemente, el trabajo de Centella et al. (2020) evaluó diversas bases de datos (incluyendo CHIRPS) sobre la región del Caribe y parte de América Central, obteniendo resultados satisfactorios con los datos de CHIRPS.

2.1.3. Datos de precipitación de observaciones sobre Guanacaste.

La base de datos de CHIRPS se validó comparándose con datos observados de precipitación sobre Guanacaste, la información de las estaciones meteorológica, obtenidas en su mayoría del IMN se presenta en la Tabla 2.1, su ubicación se muestra en la Figura 1.1:

Nombre	Latitud (°)	Longitud (°)	% de dato faltante	Nombre	Latitud (°)	Longitud (°)	% de dato faltante
Santa Cruz	10.26	-85.58	29.6	Nicoya Centro	10.146	-85.452	81.8
Bagaces	10.53	-85.25	16.1	Barco Quebrado	9.916	-85.615	82.5
Liberia	10.59	-85.55	14.1	Dulce Nombre	10.096	-85.478	90.9
Finca las Huacacas	10.57	-85.40	15.0	La Cruz	11.054	-85.633	94.8
Peñas Blancas	11.215	-85.612	37.1	La Maritza	10.959	-85.496	91.1
Copalchí	11.198	-85.618	82.5	Paquera	9.822	-84.938	15.7
Hacienda Verdum	11.075	-85.453	88.7	Cabo Blanco	9.595	-85.093	88.5
Nicoya	10.15	85.45	19.3	Mojica	10.453	-85.165	50.7
Hacienda la Ceiba	10.11	-85.317	59.8	Taboga	10.346	-85.177	78.4
Santa Elena	10.92	-85.611	63.5	Montezuma	10.665	-85.08	87.1
Finca la Ceiba	10.111	-85.317	50.1	Universidad Invenio	10.477	-85.06	91.8
Santa Rosa	10.841	-85.619	80.8				

Tabla 2.1. Datos de estaciones sobre Guanacaste con datos de resolución temporal diaria para el periodo de 1980-2019. La mayoría de estaciones meteorológicas fueron suministradas por el IMN.

Los datos de precipitación de las estaciones meteorológicas presentados en la Tabla 2.1 presentaban datos faltantes por ello, se rellenaron utilizando la metodología expuesta por Ureña et al. (2016), que combinan modelos autorregresivos y CP.

A pesar de que la Tabla 2.1 muestra que hay estaciones con un porcentaje alto de datos faltantes, estas se conservaron en el análisis por dos razones principales. Primero, para ayudar durante el proceso de rellenado de datos por medio de componentes principales, ya que no necesariamente los periodos de datos faltantes en las estaciones coinciden en el mismo periodo de tiempo. Segundo, la Figura 3.5 y la Tabla 3.10 (ver sección 3.3 más adelante), muestran que la variabilidad espacial en el dominio usado en este trabajo, es decir Guanacaste, está explicada por una componente principal con un porcentaje asociado alto de varianza explicada, por lo que el proceso de rellenado de datos faltantes de las estaciones, por medio de componentes principales, representaría esta variabilidad a escala de dominio, pero conservado los estadísticos de tendencia central (media) y de variabilidad (desviación estándar) en la estación (Alfaro & Soley, 2009; Ureña et al., 2016), similar a las técnicas de ajuste de escala temporal como son los generadores de tiempo (weather generators en inglés, e.g. Wilby y Dawson, 2007). Por lo que, debido a las dos razones anteriores, se logra una mejor representación espacial en Guanacaste del impacto de las fuentes de variabilidad climáticas consideradas en el Pacífico ecuatorial del este (Niño 3.4), Atlántico Tropical Norte (OMA y ATN) y el asociado con la Corriente en Chorro de Bajo nivel del Caribe (CLLJ), descritas en la sección 2.2.4. Las consideraciones anteriores deben ser tomadas en cuenta al analizar los resultados de las tablas presentadas más adelante en la sección 3.1, usando los estadísticos de validación descritos en la sección 2.2.2, para cada una de las estaciones en forma individual.

2.2. Metodología.

A continuación, se detallan los métodos aplicados para determinar las fechas del IELL, el TELL, la DES y la DELL en la región.

2.2.1. Método para determinar el IELL, TELL, DES y DELL.

Para determinar el IELL y el TELL se utilizó el método expuesto por Bombardi et al. (2017), para esta técnica se debe considerar la ecuación 2.1.

$$S(n) = \sum_{i=t_0}^n (P(i) - P_C) \quad (2.1)$$

De la ecuación 2.1, $S(n)$ representa la desviación del acumulado de precipitación con respecto a la media anual en el día “ n ”, $P(i)$ es la precipitación diaria en el día “ i ”, P_C es el promedio diario anual de precipitación y “ t_0 ” es la fecha de inicio para los cálculos, los cuales se realizan a lo largo de un año a partir de t_0 . Una vez realizado el cálculo de S , se buscarán los puntos de inflexión en S para encontrar el IELL y el TELL. La curva S se suaviza usando una media móvil de tres días para evitar falsos puntos de inflexión. Posteriormente, se calcula la primera derivada de la curva de S suavizada. El IELL se toma como el primer día en que la derivada pasa de valores negativos a positivos, además de que los valores positivos persistan por tres días. Mientras el TELL se toma como el primer día en que la derivada pasa de valores positivos a negativos, considerando que los valores negativos se mantengan durante tres días. Este criterio se realiza empezando desde el día seleccionado como t_0 . Además, Bombardi et al. (2017) considera necesario eliminar los datos atípicos para evitar falsos puntos de inflexión, define los datos atípicos como aquellos valores que son tres veces el rango intercuartílico por encima o por debajo de la mediana de las series de tiempo. El método de Bombardi et al. (2017) presenta la ventaja de no depender de los umbrales típicamente usados para definir el IELL y el TELL.

En el trabajo de Martínez et al. (2022) se expone un método que utiliza la ecuación 2.1, con la diferencia de que P_C se calcula como el promedio de precipitación diaria usando solamente el año en que se quiere determinar el IELL y TELL, sin embargo, antes de aplicar la ecuación 2.1 el método identifica periodos secos intermitentes que pueden intervenir en la detección del IELL y TELL. Es importante considerar método de Martínez et al. (2022) para futuros trabajos ya que como se describe más adelante en esta misma sección, el periodo de veranillo conllevó algunos inconvenientes en la determinación del IELL y TELL usando el método de Bombardi et al. (2017).

Las modificaciones en la metodología de Bombardi et al. (2017) realizadas por Ureña-Mora y Alfaro (2022) consisten en suavizar la curva de $S(n)$ usando una media móvil de 31 valores (luego de esto, los primeros y últimos 15 días de la serie se rellenan usando su

media) y que la cantidad de días en que la derivada suavizada de $S(n)$ pase de valores negativos a positivos sea de al menos 10 días, Ureña-Mora y Alfaro (2022) llamaron a esta metodología Bombardi modificado.

Para realizar estos cálculos se usaron las rutinas programadas en Scilab detalladas en la propuesta metodológica de Ureña y Alfaro (2020), específicamente la rutina “ifelldataset.sce” que realiza los cálculos sobre un gran conjunto de datos.

El día determinado para iniciar la búsqueda del IELL fue el 1 de abril (día juliano 91 o 92 si es bisiesto), mientras que para determinar el TELL se buscó que este no superara el 30 de noviembre (día juliano 334 o 335 si es bisiesto), esto para evitar que eventos de precipitación invernal como los frentes fríos fueran detectados como posibles fechas para el TELL.

Dado que en la región de Guanacaste la ocurrencia del veranillo causa una disminución en las precipitaciones cerca de los meses de julio y agosto (Alfaro, 2014; Alfaro & Hidalgo, 2017; García-Franco et al., 2022; Maldonado et al., 2016a; Ramírez, 1983), el método de Bombardi et al. (2017) aplicado en el método de Ureña y Alfaro (2020) podría confundir los puntos de inflexión en la curva $S(n)$ debidos al veranillo con posibles IELL y TELL.

La Figura 2.1 muestra el cálculo del IELL y el TELL usando la rutina “acumprecdev.sce” de la metodología de Ureña y Alfaro (2020) que permite una visualización detallada al usuario del método de Bombardi et al. (2017). Según la Figura 2.1 el IELL ocurre el 12 de mayo y el TELL el 10 de noviembre, sin embargo, como se mencionó anteriormente la búsqueda del TELL se limitó a más tardar el 30 de noviembre, lo que provocaría que existan casos donde no sea posible ubicar el TELL a final de año y se asocie un punto de inflexión en fechas no relacionadas al TELL. En la Figura 2.1 se aprecian puntos de inflexión alrededor del día 180 y 210, quizás asociados al veranillo, en el anexo 1 se presenta un caso que llega a confundir un punto de inflexión en esas fechas con el TELL.

Para evitar esto se establecieron umbrales límites para el IELL y el TELL basados en los resultados de la caracterización de los inicios y términos medios del veranillo obtenidos en el trabajo de Alfaro (2014). Además, también es posible que se obtengan fechas tardías

para el IELL y tempranas para el TELL debido a algún fenómeno de variabilidad climática y no necesariamente porque la metodología confunde algún punto de inflexión asociado al veranillo con el IELL o el TELL, por lo que también se utilizó el índice de variabilidad climática asociado al dipolo de las TSM entre el Atlántico y el Pacífico (OMA-ENOS). Se usó este índice ya que muestra los mejores resultados al modular el IELL y TELL en la región de estudio (ver capítulo 3 y 5).

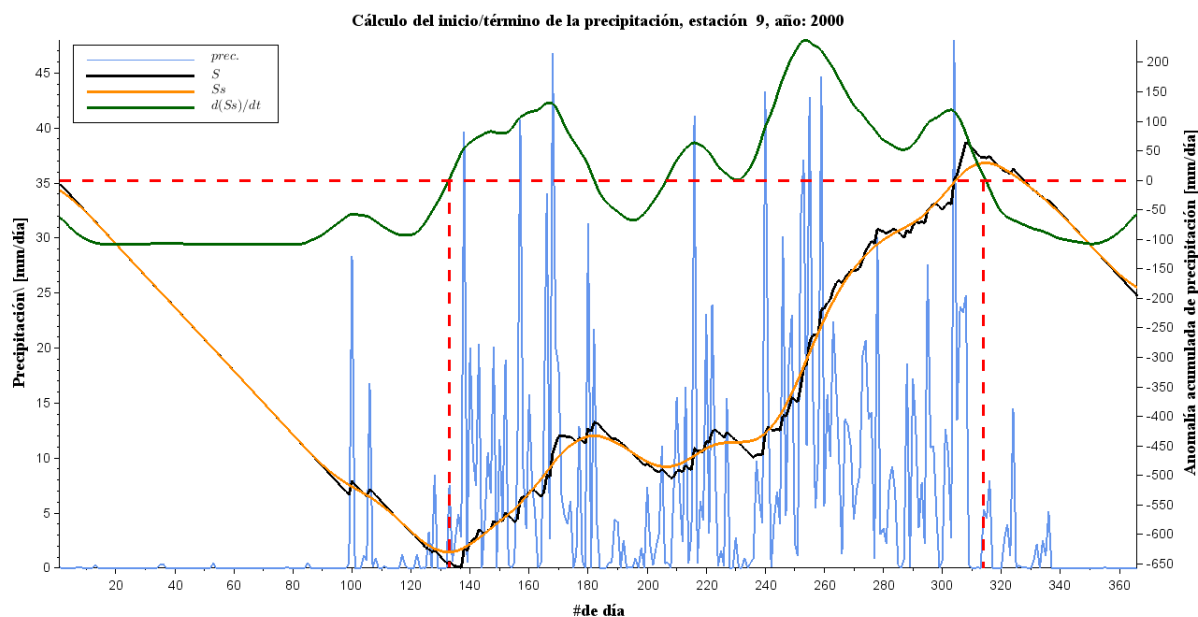


Figura 2.1. IELL y TELL para la estación meteorológica de Hacienda la Ceiba durante el año 2000 obtenidos con el método de Ureña y Alfaro (2020). La curva azul representa la precipitación diaria observada, la curva negra S representa la desviación del acumulado de precipitación con respecto a la media anual, la curva naranja Ss representa S suavizada con una media móvil de 31 días y la curva verde $d(Ss)/dt$ representa la derivada temporal de la curva Ss . Las líneas rojas a trazos verticales representan el IELL y el TELL, el IELL ocurre el 13 de mayo (día juliano 134) y el TELL ocurre el 10 de noviembre (día juliano 315).

Los criterios aplicados para determinar si un IELL se podría considerar tardío o se debía eliminar fueron: cuando el índice OMA-ENOS (ver sección 2.2.4 para detalles de cómo se calculó este índice) para el año en curso era superior a su percentil 67 (P67) el IELL se elimina si ocurría luego del 11/06, en caso contrario el IELL se mantiene, aunque podría

considerarse tardío, mientras que si el índice OMA-ENOS era inferior a su P67 el IELL se elimina si ocurría luego del 21/07, esta fechas corresponden al percentil 25 y 75 (P25 y P75) respectivamente para la caracterización del inicio del veranillo del trabajo de Alfaro (2014). El índice OMA-ENOS usado en este caso corresponde a un promedio en los meses de abril y mayo en los que se espera que ocurra con mayor frecuencia el IELL. El uso del P67 del índice OMA-ENOS se debe a que como se detalla en las secciones 3.3 y 3.5, valores positivos de la OMA-ENOS tiende a propiciar IELL tempranos, por lo que es poco probable (aunque no imposible) que durante eventos por encima del P67 de la OMA-ENOS los IELL se atrasen.

Los criterios asociados para determinar si un TELL era temprano o se debía eliminar fueron: cuando el índice OMA-ENOS era superior a su P67 el TELL se elimina si ocurría antes del 30/08, en caso contrario el TELL se mantiene, aunque se podría considerar temprano, mientras que si el índice OMA-ENOS era inferior a su P67 el TELL se elimina si ocurría antes del 28/07, esta fechas corresponden al P75 y P25 respectivamente para la caracterización del final del veranillo del trabajo de Alfaro (2014). El índice OMA-ENOS usado en este caso corresponde a un promedio en los meses de octubre y noviembre en los que se espera que ocurra con mayor frecuencia el TELL. Se usa como umbral nuevamente el P67 dado que valores positivos del índice OMA-ENOS tiende a favorecer TELL tardíos (secciones 3.3 y 4.3), por tanto, es poco probable (no imposible) la ocurrencia de TELL tempranos cuando la OMA-ENOS está por encima de su P67.

Para el TELL puede ocurrir la situación en que los eventos convectivos asociados a la estación lluviosa finalicen cerca de fechas en que eventos de precipitación invernal como frentes fríos afecten notoriamente la región, esto no es algo que el método de Bombardi modificado pueda identificar. Además, se encontraron casos en que los criterios anteriores para determinar IELL tardíos o TELL tempranos no funcionaron de manera adecuada, ya que cumplían los criterios anteriores y el punto de inflexión asignado al TELL no parecía representar el TELL real (en el anexo 2 se presenta un caso). Para solventar esto se aplicó la rutina “acumprecdev.sce” de Ureña y Alfaro (2020) a cada año en el que se obtuvo un TELL extremo para revisar si el TELL era representativo, requiriendo una visualización individual a gráficas similares a la Figura 2.1, por lo que se realizó solo en la base de datos

de las estaciones meteorológicas y no con CHIRPS ni ERA5, ya que sería un trabajo muy demandante revisar visualmente todos los TELL extremos de bases de datos tan extensas.

Finalmente, una vez obtenidos los datos definitivos para el IELL y el TELL, se calculó tanto la DELL como la DES. La DELL se calculó como la cantidad de días entre el IELL y el TELL para cada año, mientras que la DES se calcula como la cantidad de días entre el TELL y el IELL del año posterior, como la época seca en el país ocurre en medio de la transición de año y como la mayoría de días de la misma ocurren a inicio de año, se tomó el año respectivo para la DES como el año en que acaba la misma, es decir el índice DES asociado a la época seca que ocurre finalizando 1981 e iniciando 1982 se tomará como la DES de 1982 y no de 1981, esto provocará que las series de DES siempre tengan un dato menos con respecto a las del IELL, el TELL y la DELL.

Toda la metodología anterior se aplicó a cuatro bases de datos distintas: la primera que contempla las estaciones meteorológicas con periodo de 1980-2019, la segunda con los datos directamente de CHIRPS con periodo de 1981-2020, la tercera con los datos de ERA5 con reducción de escala con periodo de 1950-1980 y la cuarta con los datos de ERA5 y CHIRPS concatenados con periodo de 1950-2020 (ERA5+CHIRPS).

2.2.2. Validación de datos de CHIRPS vs estaciones de precipitación en Guanacaste.

Los datos de estaciones meteorológicas que validan los datos de CHIRPS se presentan en la Tabla 2.1. Para empezar, se buscó el punto en la rejilla de CHIRPS más cercano a la posición geográfica de cada estación meteorológica, para ello simplemente se calculó la distancia euclidiana entre la respectiva estación y todos los puntos de CHIRPS, usando como punto más cercano el que presentara la distancia euclidiana mínima, de manera que se comparan las series de tiempo de ambos puntos. Se validó tanto la precipitación mensual como los respectivos índices del IELL, TELL, DELL y DES.

Para la comparativa se utilizaron parámetros como el error medio absoluto (*EMA*), el coeficiente de correlación de Pearson (r_p), el coeficiente de correlación de Spearman (r_s), el sesgo (β), la variabilidad (γ), el índice de eficiencia Kling-Gupta modificado (*KGE*) y el índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe (*NSE*).

El índice *KGE* se detalla en la ecuación 2.2, en los trabajos de Quesada-Hernández (2019) y de Zambrano-Bigiarini et al. (2017) recomiendan el uso de este índice ya que es capaz de reproducir dinámicas temporales medidas por el coeficiente de correlación de lineal (r) y preservar el volumen y distribución medidas por β y γ .

$$KGE = 1 - \sqrt{(r - 1)^2 + (\beta - 1)^2 + (\gamma - 1)^2} \quad (2.2)$$

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(S_i - \bar{S})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})^2}} \quad (2.3)$$

$$\beta = \frac{\mu_S}{\mu_O} \quad (2.4)$$

$$\gamma = \frac{CV_S}{CV_O} = \frac{\sigma_S/\mu_S}{\sigma_O/\mu_O} \quad (2.5)$$

Los valores de r pueden rondar entre -1 y 1, mientras que se espera que los valores de β , γ y *KGE* presenten valores cercanos a 1 si los datos en rejilla (p.e. CHIRPS) representan de manera correcta los observados.

El índice *NSE* se detalla en la ecuación 2.6, el valor del *NSE* puede variar entre 1 y $-\infty$, donde los valores más cercanos a 1 indican mejor representación de los datos en rejilla (Quesada-Hernández, 2019).

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^T (Q_m^t - Q_o^t)^2}{\sum_{i=1}^T (Q_o^t - \bar{Q}_o)^2} \quad (2.6)$$

2.2.3. Cálculo de características estadísticas y tendencias para el IELL, TELL, DES y DELL.

Una vez que los datos de precipitación (ERA5, CHIRPS y ERA5+CHIRPS) fueron sometidos a la metodología para determinar el IELL, TELL, DELL y DES, se calcularon algunos parámetros estadísticos para caracterizar el comportamiento climatológico de los fenómenos en la región para cada periodo. Estos fueron la media aritmética y mediana como

medidas de localización y la desviación estándar y rango intercuartílico como medidas de dispersión.

Las tendencias se calcularon mediante el método de mínimos cuadrados como una regresión lineal simple. Como se define en Wilks (2019) a partir de una variable independiente y una variable dependiente se busca una ecuación lineal que represente el conjunto de datos (ecuación 2.7).

$$\hat{y} = a + bx \quad (2.7)$$

De la ecuación 2.7 el parámetro \hat{y} representa la variable dependiente, los cuales serían los índices de estudio (IELL, TELL, DELL y DES) en cada punto en rejilla, mientras el parámetro x se trata de una serie de tiempo sucesiva, como cada índice del IELL, el TELL, la DELL y la DES está asociada a un año, la sucesión sucesiva sería simplemente 1981, 1982, 1983, ..., 2020 en el caso de CHIRPS. El parámetro a representa el intercepto con el eje y, mientras el parámetro b representa la pendiente de la ecuación, en este caso b sería la tendencia, los valores positivos indican una tendencia hacia fechas más tardías para el IELL y el TELL, y caso contrario valores negativos indican una tendencia hacia fechas más tempranas para el IELL y el TELL, para la DELL y las DES representaría duraciones más cortas (tendencias negativas) o más largas (tendencias positivas). Wilks (2019) define el cálculo de b según la ecuación 2.8.

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n [(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})]}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (2.8)$$

Para evaluar la significancia estadística de las tendencias se usó un prueba t-student definida en Wilks (2019) como:

$$t = \frac{b - \mu_0}{\sqrt{\text{var}(b)}} \quad (2.9)$$

De la ecuación 2.9 el parámetro b representa la pendiente obtenida a partir de la ecuación 2.8, mientras el parámetro μ_0 se define como cero debido a que se supone inicialmente una hipótesis de que las series no presentan una tendencia (hipótesis nula). Una vez obtenido el valor de t se compara contra la distribución t-student para determinar si las

tendencias son significativas o no, además debido a que estas pueden ser tanto positivas como negativas se usa una prueba de dos colas con un $\alpha = 0.05$.

2.2.4. Índices de fuentes de variabilidad climática.

Las fuentes de variabilidad climática a estudiar que pueden influenciar en la época lluviosa y seca en la región de interés son: el ENOS, la OMA, el CLLJ y el dipolo entre las TSM del Pacífico y el Atlántico.

En el caso de ENOS, se tomó la región del Niño 3.4 (N3.4) correspondiente al área entre las latitudes 5° N - 5° S y longitudes 170° O - 120° O (Trenberth & Stepaniak, 2001), el índice de las anomalías del N3.4 se encuentra disponible en la dirección web <https://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/indices/ersst5.nino.mth.81-10.ascii>. Para la OMA se usaron dos índices distintos, el primero para analizar únicamente la base de datos de CHIRPS y se tomó del sitio web <https://psl.noaa.gov/data/correlation/amon.us.long.data>, mientras que para las bases de datos de ERA5 y ERA5+CHIRPS se tomó el índice del sitio web <https://psl.noaa.gov/data/correlation/tna.data>, el primer índice abarca prácticamente todo el Atlántico norte (0-70° N) y el segundo abarca solo el Atlántico Tropical Norte (ATN, 5.5° N - 23.5° N), en un principio se usó solamente el primer índice (OMA) para ambos conjuntos, sin embargo, los datos de ERA5 no mostraron correlación ante este índice por lo que se optó usar el ATN para estos casos al representar una región más tropical y cercana a América Central.

Para calcular el dipolo entre las TSM del Atlántico y el Pacífico se usaron los índices N3.4 y OMA (ATN en caso de ERA5 y ERA5+CHIRPS). Para comparar ambos fenómenos se obtuvieron las anomalías normalizadas tanto las series del N3.4 y la OMA (ATN), es decir, a cada dato de la serie se le restó su media y se dividió entre su desviación estándar, luego simplemente se realizó la resta OMA-N3.4 (ATN-N3.4).

Usando datos de viento del reanálisis de ERA5, se obtuvo el índice referente al CLLJ a partir de datos de viento zonal a la altura de 925 hPa según las características del CLLJ descritas en Amador (2008) y Amador et al. (2010). Se aplicó metodología descrita por Hidalgo et al. (2015), esto es promediar espacialmente la velocidad del viento zonal en la región delimitada por las latitudes 7.5° N - 12.5° N y las longitudes 85° O - 75° O a una

altura de 925 hPa. En la Figura 2.2 se muestra el ciclo anual de este índice calculado en el periodo de 1981-2020, se puede apreciar que los resultados son muy similares a los obtenidos por Hidalgo et al. (2015) donde se usó el reanálisis NCEP/NCAR. La principal diferencia radica en que los valores de vientos zonales presentan una magnitud menor en la Figura 2.2 quizás ligado al uso de distintos periodos, además Foli et al. (2021) indican que NCEP/NCAR tiende a sobrestimar los vientos zonales, aunque en la Figura 2.2 se aprecia claramente el ciclo anual del CLLJ.

Para comparar cada índice de variabilidad climática con cada índice asociado al IELL, TELL, DES y DELL, y considerando que el IELL tiende a ocurrir alrededor de mayo y el TELL alrededor de noviembre (Alfaro, 2002), se calcularon promedios alrededor de estos meses para las fuentes de variabilidad climática. Los índices N3.4, OMA (ATN), OMA-N3.4 (ATN-N3.4) y CLLJ son mensuales, para compararlos contra el IELL se calculó el promedio de los meses abril y mayo, para el TELL fue el promedio de los meses octubre y noviembre, como la DELL se definió como la cantidad de días entre el IELL y TELL se calculó el promedio de los meses mayo, junio, julio, agosto, setiembre y octubre, mientras que para la DES al definirse como la cantidad de días entre el TELL (del año anterior) y el IELL (del año en posterior) se calculó el promedio de los meses noviembre y diciembre del año anterior y enero, febrero, marzo y abril del año posterior, tomando este índice como el asociado al año posterior. De las Figuras 2.3 a 2.8 se observa el comportamiento de estos índices asociados a las fuentes de variabilidad climática en el periodo de 1950-2020.



Figura 2.2. Ciclo anual para el índice del CLLJ calculado a partir de los datos de viento zonal de ERA5 a 925 hPa para la región limitada entre 7.5° N y 12.5° N y entre 85° O y 75° O.

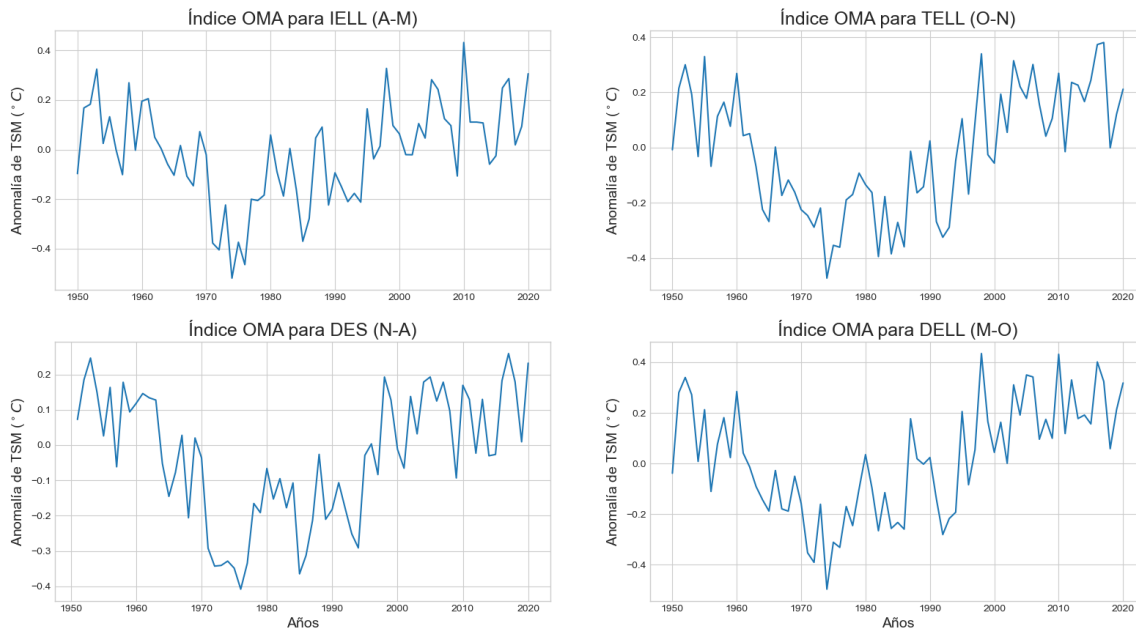


Figura 2.3. Índice OMA para 1950-2020 promediado en los periodos de abril-mayo para el IELL, de octubre-noviembre para el TELL, de noviembre (año anterior)-abril (año posterior) para la DES y de mayo-octubre para la DELL.

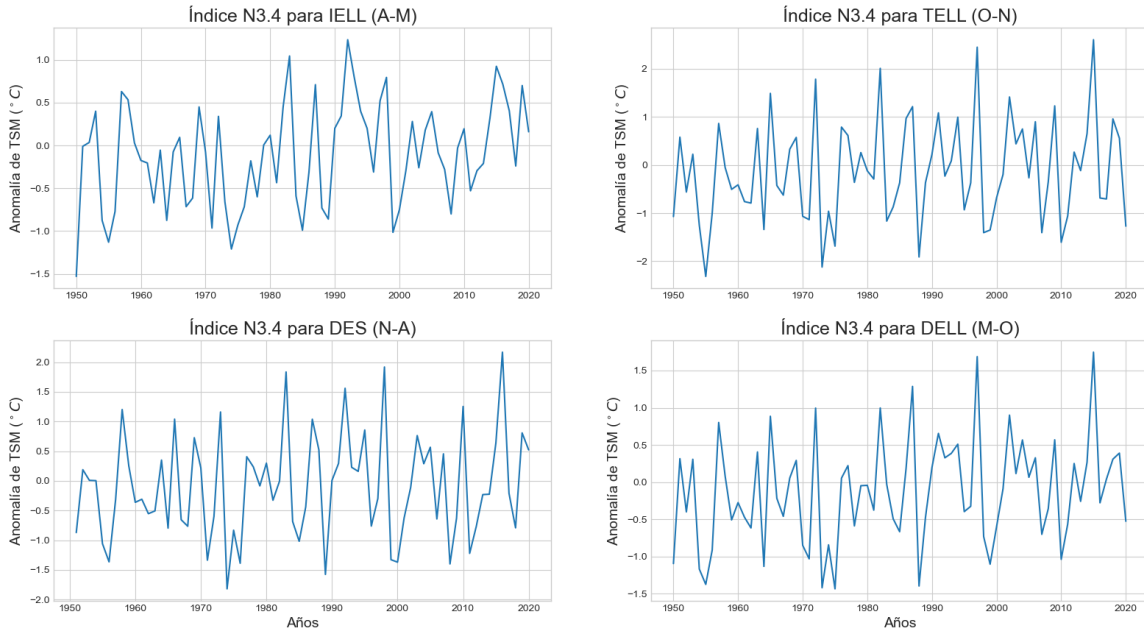


Figura 2.4. Índice N3.4 para 1950-2020 promediado en los periodos de abril-mayo para el IELL, de octubre-noviembre para el TELL, de noviembre (año anterior)-abril (año posterior) para la DES y de mayo-octubre para la DELL.

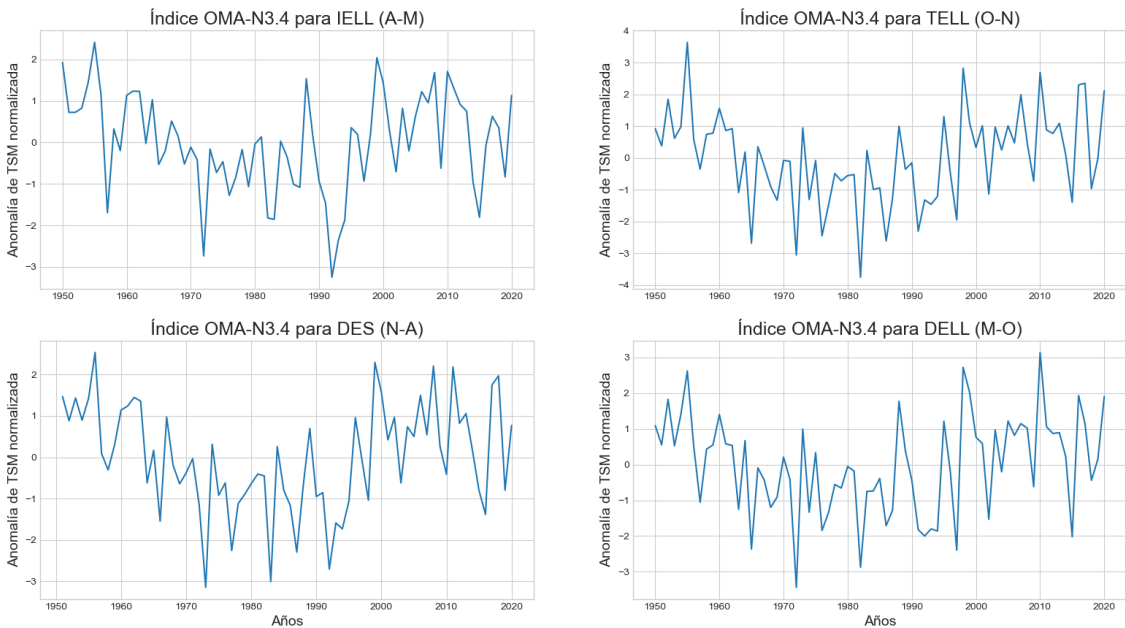


Figura 2.5. Índice OMA-N3.4 para 1950-2020 promediado en los periodos de abril-mayo para el IELL, de octubre-noviembre para el TELL, de noviembre (año anterior)-abril (año posterior) para la DES y de mayo-octubre para la DELL.

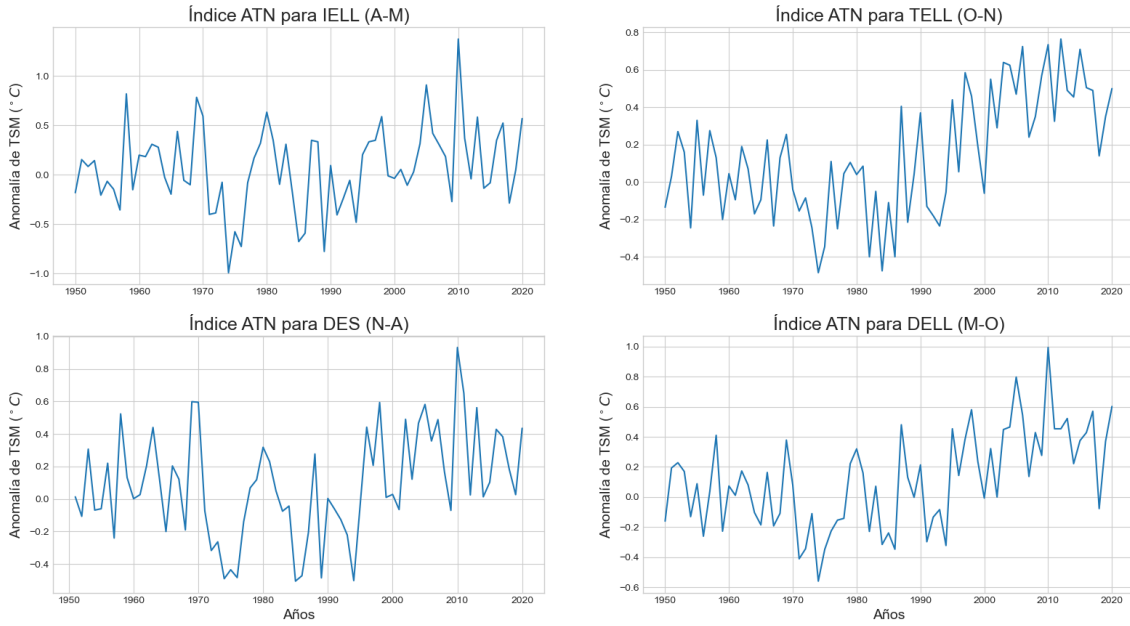


Figura 2.6. Índice ATN para 1950-2020 promediado en los periodos de abril-mayo para el IELL, de octubre-noviembre para el TELL, de noviembre (año anterior)-abril (año posterior) para la DES y de mayo-octubre para la DELL.

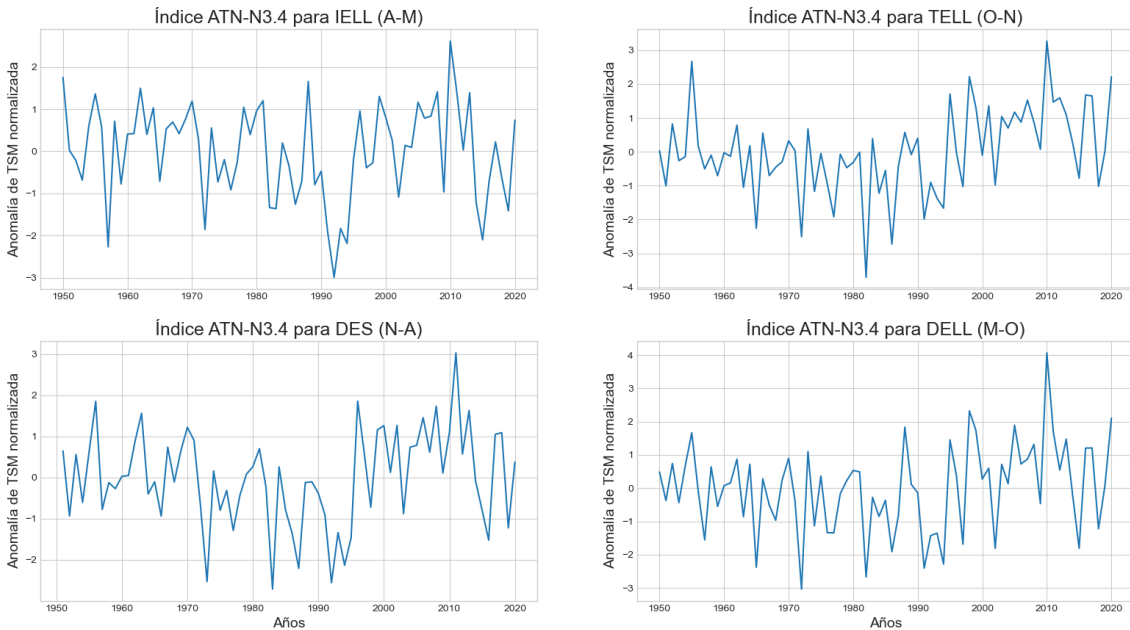


Figura 2.7. Índice ATN-N3.4 para 1950-2020 promediado en los periodos de abril-mayo para el IELL, de octubre-noviembre para el TELL, de noviembre (año anterior)-abril (año posterior) para la DES y de mayo-octubre para la DELL.

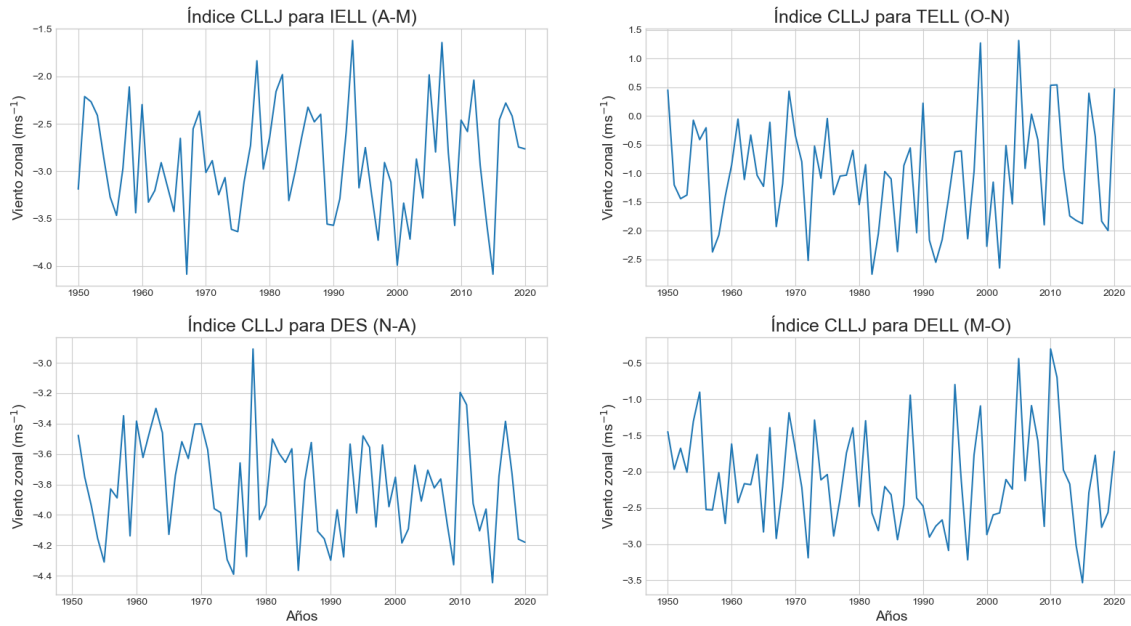


Figura 2.8. Índice CLLJ para 1950-2020 promediado en los periodos de abril-mayo para el IELL, de octubre-noviembre para el TELL, de noviembre (año anterior)-abril (año posterior) para la DES y de mayo-octubre para la DELL.

2.2.5. Análisis de componentes principales (CP) aplicado sobre las series de IELL, TELL, DELL y DES.

Debido a la gran cantidad de series de tiempo que presentan los datos de CHIRPS, ERA5 y ERA5+CHIRPS sobre la región de interés es necesario aplicar algún método que permita la simplificación de los datos para una manipulación más sencilla. Se usó el método de CP y como se indica en Wilks (2019), este consiste en la generación de la matriz de covarianza o correlación del conjunto de datos, luego se calculan los autovalores y autovectores de esta matriz, y posteriormente utilizando la matriz de autovectores y el conjunto original de datos se genera un nuevo conjunto de datos, en el que las primeras variables explican la mayoría de la varianza del conjunto original. Esto ayudó a simplificar significativamente el análisis. En el trabajo de Fallas y Alfaro (2012) se aplicó un análisis de CP para reducir la información de 146 estaciones meteorológicas a lo largo de todo América Central en tan solo 2 nuevas variables, esto muestra la utilidad del método en la manipulación de gran cantidad de datos. Para este trabajo se logran simplificar las series de tiempo para

el IELL, el TELL, el DES y el DELL sobre la región mostrada en la Figura 1.1 con resolución de 0.05° a una única serie de tiempo para cada una (sección 3.3).

Para aplicar el análisis de CP lo primero que se hizo fue calcular las anomalías normalizadas de los índices IELL, TELL, DELL y DES. Posteriormente para cada índice se calculó su matriz de correlación, esto se hizo mediante la paquetería Pandas de Python (McKinney, 2010). A las matrices de correlación se les calcularon los respectivos autovalores y autovectores, esto con las funciones de algebra lineal que ofrece la paquetería NumPy de Python (Harris et al., 2020). Finalmente, para obtener el nuevo conjunto de datos se realiza la multiplicación matricial descrita en la ecuación 2.10.

$$TC = X * E \quad (2.10)$$

De la ecuación anterior TC representa el nuevo conjunto de datos, X representa el conjunto de datos originales, en este caso sería cada índice normalizado y E representa la matriz de autovectores. La metodología anterior fue adaptada a Python a partir de la rutina “EOFMOD.m” programada en Matlab por D.B. Enfield y con correcciones de F. J. Soley. Se calcularon y graficaron los scree-plot como la razón entre el autovalor de cada CP y la suma de todos los autovalores de todas las CP multiplicado por 100 y se toman las CP que explican más varianza según el scree-plot. Posteriormente, se calculó la correlación de Pearson entre las CP con su respectivo índice, los resultados se graficaron en mapas para estudiar las regiones que presentan mayor influencia de las CP, mostrando únicamente las correlaciones significativas al 95%.

2.2.6. Análisis de tablas de contingencia.

El análisis de contingencia es detallado por Alfaro et al. (2004), esta metodología busca una correlación significativa entre una variable dependiente y una independiente mediante el uso de la función de correlación cruzada. El método de tablas de contingencia divide la variable independiente en M categorías y la dependiente en N categorías resultando en una cantidad de categorías conjuntas $M \times N$, para posteriormente calcular las frecuencias empíricas f_0 correspondientes a la cantidad de parejas que pertenecen a cada una de las $M \times N$ categorías conjuntas. Para este se realizaron varias tablas de contingencia tomando como variable dependiente las CP asociadas a los índices IELL, TELL, DELL y DES,

mientras que las variables independientes fueron los índices de variabilidad climática N34, OMA, OMA-N34 y CLLJ en su respectivo periodo.

Alfaro et al. (2004) recomienda el uso de una cantidad baja de categorías para lograr un análisis más estable, lo cual sería $M = N = 3$ resultando en un total de 9 categorías conjuntas. Tal división permite trabajar el conjunto de datos en terciles con un manejo más sencillo de las cantidades de posibles escenarios, además brinda un entendimiento más claro de parte del público en general con términos como condiciones: normales (N), arriba de lo normal (AN) o bajo lo normal (BN).

Para desarrollar el análisis se utilizó el programa detallado en la metodología brindada por Alfaro et al. (2004), el programa también realiza una prueba χ^2 para determinar la discrepancia entre las frecuencias observadas (f_{ij}) y las esperadas (e_{ij}) de la tabla de contingencia como indica la ecuación 2.11:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \frac{(f_{ij} - e_{ij})^2}{e_{ij}} \quad (2.11)$$

La ecuación 2.11 muestra el cálculo de estadístico χ^2 , para el caso de tablas 3 x 3 el número de grados de libertad corresponden a 4. Considerando que la frecuencia total de la tabla es n y que esta sea construida de manera aleatoria, la frecuencia asociada a cada casilla es $n/9$ y se calcula el χ^2 asumiendo la hipótesis nula. De manera que si el χ^2 resultante es mayor que el valor crítico determinado por la distribución χ^2 se rechaza la hipótesis nula indicando que las frecuencias observadas y esperadas difieren significativamente, para este trabajo se usaron valores de $\alpha = 0.05$ considerando resultados significativos al 95%.

Para determinar la significancia estadística de cada categoría de la tabla de contingencia se utilizó una prueba de Montecarlo programada en Matlab por Eric J. Alfaro llamada "tc_siglevs.m". El método toma las variables dependientes e independientes que son puestas a prueba y en base a ellas genera nuevas variables aleatorias, construye una nueva tabla de contingencia cada vez que genera un nuevo par de variables aleatorias y determina las categorías que son más confiables de obtener en cada bucle. El proceso es recomendable de ejecutar en bucles de 10000 a 200000 veces. Esta metodología se ha aplicado en otros trabajos que utilizan tablas de contingencia para estudiar la relación entre fuentes de variabilidad climática e índices de precipitación (e.g. Alfaro, 2014; Alfaro & Hidalgo, 2017).

Capítulo 3

Caracterización de la estación lluviosa y seca a partir de la base de datos de CHIRPS.

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos usando únicamente la base de datos de CHIRPS, abarcando su comparativa contra las estaciones meteorológicas, la caracterización de los índices relacionados a la estación seca y lluviosa y su relación con las diferentes fuentes de variabilidad climática.

3.1. Validación de los datos CHIRPS contra estaciones meteorológicas.

En las tablas siguientes se muestran los resultados de las validaciones de los datos de CHIRPS contra varias estaciones meteorológicas.

<i>Parámetros/Estaciones-CHIRPS</i>	<i>EMA</i>	<i>Spearman</i>	β	γ	<i>KGE</i>	<i>NSE</i>
<i>Santa Cruz – CHIRPS</i>	40,97	0,93	0,91	0,76	0,73	0,83
<i>Bagaces – CHIRPS</i>	70,19	0,87	1,46	1,48	0,31	0,50
<i>Liberia – CHIRPS</i>	44,20	0,94	0,88	0,68	0,64	0,80
<i>Finca las Huacas - CHIRPS</i>	53,80	0,90	0,95	0,80	0,75	0,74
<i>Peñas Blancas – CHIRPS</i>	51,73	0,86	0,99	0,90	0,78	0,63
<i>Colpalchí – CHIRPS</i>	71,12	0,87	0,75	0,55	0,47	0,64
<i>Hacienda Verdum – CHIRPS</i>	108,51	0,82	0,58	0,36	0,19	0,26
<i>Nicoya – CHIRPS</i>	46,46	0,93	1,00	0,95	0,90	0,83
<i>Hacienda la Ceiba - CHIRPS</i>	47,96	0,91	0,96	0,86	0,82	0,79
<i>Santa Elena – CHIRPS</i>	48,61	0,91	1,10	1,11	0,78	0,68
<i>Finca la Ceiba – CHIRPS</i>	45,80	0,92	1,04	1,00	0,88	0,78
<i>Santa Rosa – CHIRPS</i>	44,54	0,92	1,14	1,25	0,68	0,68
<i>Nicoya Centro – CHIRPS</i>	62,04	0,91	0,94	0,79	0,74	0,74
<i>Barco Quebrado – CHIRPS</i>	85,41	0,91	0,71	0,50	0,41	0,67
<i>Dulce Nombre – CHIRPS</i>	86,56	0,91	0,73	0,49	0,41	0,66
<i>La Cruz – CHIRPS</i>	80,46	0,72	1,29	1,52	0,32	0,16
<i>La Maritza – CHIRPS</i>	148,19	0,64	0,58	0,46	0,15	-0,26
<i>Paquera – CHIRPS</i>	61,20	0,92	0,88	0,61	0,58	0,72
<i>Cabo Blanco – CHIRPS</i>	94,56	0,89	0,75	0,52	0,45	0,68
<i>Mojica – CHIRPS</i>	53,29	0,91	1,34	1,48	0,40	0,61
<i>Taboga – CHIRPS</i>	45,76	0,91	1,15	1,15	0,76	0,75
<i>Montezuma – CHIRPS</i>	93,62	0,75	1,09	1,03	0,68	0,40
<i>Universidad Invenio – CHIRPS</i>	202,83	0,07	0,50	0,18	-0,49	-0,40

Tabla 3.1. Comparativa de precipitación mensual entre datos de estaciones meteorológicas (Tabla 2.1) y datos de CHIRPS. En la correlación de Spearman valores en negrita indican significancia estadística al 99%.

De la Tabla 3.1 se aprecia en general una buena correlación entre datos de precipitación en rejilla y los observados (estación meteorológica más cercana al punto en rejilla de CHIRPS). El EMA presenta magnitudes alrededor de los $60 \text{ mm} \cdot \text{mes}^{-1}$ en la mayoría de estaciones, donde las estaciones de Hacienda Verdum, La Maritza y Universidad Invenio

superan los 100 mm·mes⁻¹. El parámetro de Spearman muestra correlaciones positivas con significancia estadística al 99% en todos los casos, a excepción de Universidad Invenio con correlaciones cercanas a cero, con la correlación de Pearson (no mostrada) se obtuvieron resultados muy similares. Respecto a β y γ se aprecia como estos tienden a mantener valores cercanos a 1, con casos como Hacienda Verdum que subestima β y γ o casos como Bagaces y La Cruz que los sobrestima. Además, en la mayoría de estaciones el KGE muestra buenos resultados, con excepciones como Hacienda Verdum y la Maritza con KGE relativamente bajos y Universidad Invenio con magnitud negativa. El parámetro NSE muestra buena correlación con todas las estaciones a excepción de los casos de Hacienda Verdum y La Cruz con NSE bajos e incluso La Maritza y Universidad Invenio con NSE negativos. Cabe destacar que en la tesis de Quesada-Hernández (2019) se realizó una validación entre datos de precipitación de estaciones meteorológicas en la cuenca del Tempisque con datos de CHIRPS obteniendo buenos resultados con parámetros similares.

<i>Estaciones</i>	<i>IELL</i>			<i>TELL</i>			<i>DES</i>			<i>DELL</i>		
	<i>P25</i>	<i>P50</i>	<i>P75</i>	<i>P25</i>	<i>P50</i>	<i>P75</i>	<i>P25</i>	<i>P50</i>	<i>P75</i>	<i>P25</i>	<i>P50</i>	<i>P75</i>
<i>Santa Cruz</i>	124	130	139	303	311	317	172	186	201	173	180	188
<i>Bagaces</i>	119	128	138	297	306	315	175	184	204	162	178	196
<i>Liberia</i>	127	134	139	302	309	317	179	188	209	165	176	184
<i>Finca las Huacas</i>	121	132	137	300	310	316	174	186	202	167	177	192
<i>Peñas Blancas</i>	130	135	143	305	312	318	181	187	202	167	178	190
<i>Colpalchí</i>	130	135	142	312	322	332	167	179	197	177	186	199
<i>Hacienda Verdum</i>	128	135	142	304	315	326	176	184	199	170	181	193
<i>Nicoya</i>	117	128	138	302	309	316	171	187	200	171	182	190
<i>Hacienda la Ceiba</i>	119	130	136	306	312	316	172	184	188	174	184	196
<i>Santa Elena</i>	125	130	138	304	312	317	173	185	196	172	181	193
<i>Finca la Ceiba</i>	122	130	137	305	311	317	174	187	195	173	183	191
<i>Santa Rosa</i>	121	125	132	306	311	321	168	180	187	180	186	192
<i>Nicoya Centro</i>	120	126	135	306	312	321	170	177	187	177	183	194
<i>Barco Quebrado</i>	122	127	134	307	313	319	170	181	187	177	186	191
<i>Dulce Nombre</i>	119	124	130	305	307	311	178	182	190	178	184	188
<i>La Cruz</i>	121	126	129	306	310	315	174	180	185	181	187	191
<i>La Maritza</i>	128	134	142	298	310	321	181	193	206	168	177	190
<i>Paquera</i>	124	130	138	304	310	315	179	186	196	171	180	189
<i>Cabo Blanco</i>	123	130	136	306	310	315	176	185	194	174	180	186
<i>Mojica</i>	123	131	137	307	311	316	175	184	192	176	184	191
<i>Taboga</i>	120	129	135	307	311	316	171	182	191	178	183	193
<i>Montezuma</i>	127	133	140	306	315	332	168	181	194	173	188	198
<i>Universidad Invenio</i>	120	136	139	293	298	303	179	197	207	161	167	188

Tabla 3.2. Percentiles 25, 50 y 75 (P25, P50 y P75 respectivamente) para el IELL, TELL, DES y DELL de cada estación meteorológica (Tabla 2.1).

De la Tabla 3.2 se aprecia que para las estaciones ubicadas en Guanacaste el percentil 50 (P50) del IELL tiende a ocurrir alrededor de la segunda semana de mayo (rondando el día

juliano 130), el P25 indica IELL que pueden ocurrir para finales del mes de abril e inicios de mayo (rondando el día juliano 122), mientras que el P75 muestra IELL que pueden ocurrir hasta las dos últimas semanas de mayo (rondando el día juliano 138), de manera que el IELL ocurre mayormente entre principios y mediados de mayo. Para el TELL el P50 muestra fechas alrededor de la primera semana de noviembre (rondando el día juliano 310), el P25 indica que los TELL pueden ocurrir entre finales de octubre e inicios de noviembre (rondando el día juliano 305), mientras que el P75 indica que los TELL pueden ocurrir hasta la segunda y tercera semana de noviembre (rondando el día juliano 317), por tanto, las fechas del TELL tienden a ocurrir entre principios y mediados de noviembre. El comportamiento de la DES y DELL es simétrico, en ambos casos el P50 muestra duraciones alrededor de 180 días, el P25 alrededor de 170 días y el P75 alrededor de 190 días.

De la Tabla 3.3 a la 3.8 se muestran los mismos parámetros de la Tabla 3.1, pero comparados con los respectivos índices del IELL, TELL, DES y DELL. El EMA (Tabla 3.3) del IELL y TELL varía alrededor de 8 días con excepciones en estaciones como La Maritza o Universidad Invenio que superan las dos semanas. En los índices DELL y DES el EMA varía alrededor de los 12 días con casos como el DELL de La Maritza que alcanza 20 días.

<i>Error medio absoluto (EMA)</i>	<i>IELL</i>	<i>TELL</i>	<i>DELL</i>	<i>DES</i>
<i>Santa Cruz – CHIRPS</i>	5,58	5,64	7,97	8,29
<i>Bagaces – CHIRPS</i>	9,21	12,56	14,29	15,53
<i>Liberia – CHIRPS</i>	5,92	7,45	11,71	12,14
<i>Finca las Huacas - CHIRPS</i>	7,95	9,50	14,97	14,95
<i>Peñas Blancas - CHIRPS</i>	6,12	5,83	8,76	10,36
<i>Colpalchí – CHIRPS</i>	5,37	11,55	14,90	15,11
<i>Hacienda Verdum – CHIRPS</i>	7,17	12,93	15,52	15,29
<i>Nicoya – CHIRPS</i>	8,56	5,00	10,86	11,63
<i>Hacienda la Ceiba - CHIRPS</i>	6,22	6,11	9,06	9,15
<i>Santa Elena – CHIRPS</i>	6,08	7,97	10,47	12,85
<i>Finca la Ceiba – CHIRPS</i>	6,11	5,80	9,00	8,24
<i>Santa Rosa – CHIRPS</i>	7,00	7,92	11,29	13,26
<i>Nicoya Centro – CHIRPS</i>	7,89	4,34	8,78	8,90
<i>Barco Quebrado – CHIRPS</i>	8,85	4,37	9,29	11,09
<i>Dulce Nombre – CHIRPS</i>	7,00	6,27	8,49	9,25
<i>La Cruz – CHIRPS</i>	14,11	5,76	15,97	17,26
<i>La Maritza – CHIRPS</i>	10,40	14,63	20,64	18,13
<i>Paquera – CHIRPS</i>	6,22	8,28	13,27	11,41
<i>Cabo Blanco – CHIRPS</i>	9,09	8,95	15,06	13,66
<i>Mojica – CHIRPS</i>	4,66	8,36	6,64	10,89
<i>Taboga – CHIRPS</i>	6,76	5,76	9,43	9,59
<i>Montezuma – CHIRPS</i>	5,10	19,29	20,81	18,86
<i>Universidad Invenio – CHIRPS</i>	8,73	16,59	17,58	17,00

Tabla 3.3. Error Medio Absoluto (EMA) entre los datos de estaciones meteorológicas (Tabla 2.1) y CHIRPS para el IELL, TELL, DELL y DES.

<i>Correlación de Spearman (rs)</i>	<i>IELL</i>	<i>TELL</i>	<i>DELL</i>	<i>DES</i>
<i>Santa Cruz – CHIRPS</i>	0,81	0,76	0,77	0,87
<i>Bagaces – CHIRPS</i>	0,70	0,33	0,52	0,59
<i>Liberia – CHIRPS</i>	0,64	0,61	0,47	0,66
<i>Finca las Huacas - CHIRPS</i>	0,61	0,44	0,49	0,62
<i>Peñas Blancas - CHIRPS</i>	0,53	0,55	0,68	<i>0,50</i>
<i>Colpalchí – CHIRPS</i>	0,66	0,58	0,74	0,65
<i>Hacienda Verdum – CHIRPS</i>	0,50	0,25	<i>0,49</i>	0,13
<i>Nicoya – CHIRPS</i>	0,42	0,79	0,44	0,60
<i>Hacienda la Ceiba - CHIRPS</i>	0,52	0,68	<i>0,43</i>	0,59
<i>Santa Elena – CHIRPS</i>	0,57	0,63	0,44	0,33
<i>Finca la Ceiba – CHIRPS</i>	0,64	0,65	0,55	0,70
<i>Santa Rosa – CHIRPS</i>	0,43	<i>0,38</i>	0,27	0,25
<i>Nicoya Centro – CHIRPS</i>	<i>0,40</i>	0,80	0,51	0,72
<i>Barco Quebrado – CHIRPS</i>	0,32	0,76	0,56	0,51
<i>Dulce Nombre – CHIRPS</i>	<i>0,37</i>	0,45	0,42	0,55
<i>La Cruz – CHIRPS</i>	0,12	0,53	0,38	0,32
<i>La Maritza – CHIRPS</i>	<i>0,41</i>	0,24	-0,23	0,33
<i>Paquera – CHIRPS</i>	0,70	0,57	0,56	0,62
<i>Cabo Blanco – CHIRPS</i>	0,18	0,42	0,15	<i>0,38</i>
<i>Mojica – CHIRPS</i>	0,66	0,27	0,50	<i>0,40</i>
<i>Taboga – CHIRPS</i>	0,56	0,57	0,44	0,59
<i>Montezuma – CHIRPS</i>	0,71	0,33	0,25	<i>0,46</i>
<i>Universidad Invenio – CHIRPS</i>	0,63	0,10	<i>0,46</i>	0,64

Tabla 3.4. Correlación de Spearman entre los datos de estaciones meteorológicas (Tabla 2.1) y CHIRPS para el IELL, TELL, DELL y DES. Los valores en negrita indican significancia estadística del 99% y en itálica significancia al 95%.

<i>Sesgo (β)</i>	<i>IELL</i>	<i>TELL</i>	<i>DELL</i>	<i>DES</i>
<i>Santa Cruz – CHIRPS</i>	0,98	1,00	1,01	0,99
<i>Bagaces – CHIRPS</i>	1,02	1,02	1,02	0,99
<i>Liberia – CHIRPS</i>	0,97	1,01	1,04	0,97
<i>Finca las Huacas - CHIRPS</i>	0,97	1,00	1,03	0,97
<i>Peñas Blancas - CHIRPS</i>	1,01	1,00	1,01	1,00
<i>Colpalchí – CHIRPS</i>	1,02	0,97	0,92	1,07
<i>Hacienda Verdum – CHIRPS</i>	1,01	1,01	1,01	1,00
<i>Nicoya – CHIRPS</i>	0,99	1,01	1,02	0,98
<i>Hacienda la Ceiba - CHIRPS</i>	0,98	1,00	1,01	0,99
<i>Santa Elena – CHIRPS</i>	1,00	1,00	0,99	1,00
<i>Finca la Ceiba – CHIRPS</i>	0,97	1,00	1,02	0,97
<i>Santa Rosa – CHIRPS</i>	1,02	0,99	0,97	1,03
<i>Nicoya Centro – CHIRPS</i>	1,00	0,99	0,99	1,02
<i>Barco Quebrado – CHIRPS</i>	1,01	1,00	0,99	1,02
<i>Dulce Nombre – CHIRPS</i>	1,01	1,01	1,02	0,98
<i>La Cruz – CHIRPS</i>	1,11	1,00	0,92	1,09
<i>La Maritza – CHIRPS</i>	0,96	1,02	1,07	0,95
<i>Paquera – CHIRPS</i>	0,97	1,00	1,02	0,98
<i>Cabo Blanco – CHIRPS</i>	0,98	1,02	1,05	0,95
<i>Mojica – CHIRPS</i>	1,00	1,00	0,99	1,01
<i>Taboga – CHIRPS</i>	1,01	1,00	0,99	1,01
<i>Montezuma – CHIRPS</i>	1,01	1,00	0,98	1,03
<i>Universidad Invenio – CHIRPS</i>	0,99	1,05	1,08	0,92

Tabla 3.5. Sesgo (β) entre los datos de estaciones meteorológicas (Tabla 2.1) y CHIRPS para el IELL, TELL, DELL y DES.

Variabilidad (γ)	IELL	TELL	DELL	DES
<i>Santa Cruz – CHIRPS</i>	0,82	0,71	0,72	0,72
<i>Bagaces – CHIRPS</i>	0,57	0,46	0,63	0,52
<i>Liberia – CHIRPS</i>	0,85	0,68	0,56	0,74
<i>Finca las Huacas - CHIRPS</i>	0,78	0,61	0,56	0,67
<i>Peñas Blancas - CHIRPS</i>	1,19	0,79	0,81	0,80
<i>Colpalchí – CHIRPS</i>	1,08	0,71	1,07	0,68
<i>Hacienda Verdum – CHIRPS</i>	1,03	0,52	0,53	0,70
<i>Nicoya – CHIRPS</i>	0,81	0,89	0,74	0,82
<i>Hacienda la Ceiba - CHIRPS</i>	1,07	1,06	0,83	1,21
<i>Santa Elena – CHIRPS</i>	0,96	0,57	0,88	0,83
<i>Finca la Ceiba – CHIRPS</i>	1,03	1,08	0,87	1,20
<i>Santa Rosa – CHIRPS</i>	1,33	0,69	1,07	0,91
<i>Nicoya Centro – CHIRPS</i>	0,98	1,13	1,07	0,99
<i>Barco Quebrado – CHIRPS</i>	0,75	0,91	0,80	0,75
<i>Dulce Nombre – CHIRPS</i>	1,24	2,15	1,35	1,51
<i>La Cruz – CHIRPS</i>	1,16	1,20	1,22	0,99
<i>La Maritza – CHIRPS</i>	1,11	0,40	0,57	0,66
<i>Paquera – CHIRPS</i>	0,92	1,70	1,48	1,52
<i>Cabo Blanco – CHIRPS</i>	1,05	1,81	1,34	1,48
<i>Mojica – CHIRPS</i>	1,11	0,75	0,93	1,12
<i>Taboga – CHIRPS</i>	1,04	0,99	1,07	0,91
<i>Montezuma – CHIRPS</i>	1,05	0,73	1,01	0,85
<i>Universidad Invenio – CHIRPS</i>	0,67	0,92	0,67	0,71

Tabla 3.6. Variabilidad (γ) entre los datos de estaciones meteorológicas (Tabla 2.1) y CHIRPS para el IELL, TELL, DELL y DES.

Kling-Gupta Efficiency (KGE)	IELL	TELL	DELL	DES
<i>Santa Cruz – CHIRPS</i>	0,72	0,62	0,65	0,69
<i>Bagaces – CHIRPS</i>	0,48	0,04	0,41	0,40
<i>Liberia – CHIRPS</i>	0,64	0,43	0,41	0,57
<i>Finca las Huacas - CHIRPS</i>	0,62	0,34	0,34	0,53
<i>Peñas Blancas - CHIRPS</i>	0,49	0,53	0,63	0,47
<i>Colpalchí – CHIRPS</i>	0,65	0,48	0,67	0,52
<i>Hacienda Verdum – CHIRPS</i>	0,57	0,04	0,28	-0,01
<i>Nicoya – CHIRPS</i>	0,42	0,78	0,48	0,57
<i>Hacienda la Ceiba - CHIRPS</i>	0,55	0,64	0,50	0,58
<i>Santa Elena – CHIRPS</i>	0,51	0,33	0,49	0,29
<i>Finca la Ceiba – CHIRPS</i>	0,68	0,70	0,66	0,71
<i>Santa Rosa – CHIRPS</i>	0,42	0,15	0,22	0,15
<i>Nicoya Centro – CHIRPS</i>	0,45	0,73	0,56	0,62
<i>Barco Quebrado – CHIRPS</i>	0,39	0,79	0,52	0,44
<i>Dulce Nombre – CHIRPS</i>	0,39	-0,27	0,29	0,34
<i>La Cruz – CHIRPS</i>	0,13	0,45	0,39	0,36
<i>La Maritza – CHIRPS</i>	0,34	0,06	-0,28	0,23
<i>Paquera – CHIRPS</i>	0,72	0,08	0,34	0,40
<i>Cabo Blanco – CHIRPS</i>	0,19	0,02	0,23	0,19
<i>Mojica – CHIRPS</i>	0,70	0,11	0,61	0,34
<i>Taboga – CHIRPS</i>	0,57	0,60	0,39	0,58
<i>Montezuma – CHIRPS</i>	0,77	0,10	0,14	0,24
<i>Universidad Invenio – CHIRPS</i>	0,51	0,04	0,35	0,56

Tabla 3.7. Índice Kling-Gupta Efficiency (KGE) entre los datos de estaciones meteorológicas (Tabla 2.1) y CHIRPS para el IELL, TELL, DELL y DES.

<i>Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE)</i>	<i>IELL</i>	<i>TELL</i>	<i>DELL</i>	<i>DES</i>
<i>Santa Cruz – CHIRPS</i>	0,59	0,55	0,62	0,73
<i>Bagaces – CHIRPS</i>	0,46	-0,15	0,27	0,38
<i>Liberia – CHIRPS</i>	0,28	0,23	0,26	0,35
<i>Finca las Huacas - CHIRPS</i>	0,37	0,19	0,18	0,39
<i>Peñas Blancas - CHIRPS</i>	-0,19	0,29	0,46	0,18
<i>Colpalchí – CHIRPS</i>	0,15	-0,45	-0,86	-0,13
<i>Hacienda Verdum – CHIRPS</i>	0,07	-0,11	0,19	-0,44
<i>Nicoya – CHIRPS</i>	0,08	0,60	0,22	0,30
<i>Hacienda la Ceiba - CHIRPS</i>	0,03	0,24	0,14	0,06
<i>Santa Elena – CHIRPS</i>	0,06	0,23	0,10	-0,17
<i>Finca la Ceiba – CHIRPS</i>	0,26	0,34	0,34	0,31
<i>Santa Rosa – CHIRPS</i>	-0,55	-0,26	-0,82	-0,78
<i>Nicoya Centro – CHIRPS</i>	-0,08	0,41	0,07	0,19
<i>Barco Quebrado – CHIRPS</i>	0,08	0,64	0,25	0,15
<i>Dulce Nombre – CHIRPS</i>	-0,49	-4,22	-1,00	-0,65
<i>La Cruz – CHIRPS</i>	-4,82	-0,30	-2,12	-2,30
<i>La Maritza – CHIRPS</i>	-0,66	-0,08	-1,12	-0,25
<i>Paquera – CHIRPS</i>	0,43	-1,51	-0,71	-0,14
<i>Cabo Blanco – CHIRPS</i>	-0,75	-2,25	-1,91	-1,64
<i>Mojica – CHIRPS</i>	0,37	-0,36	0,27	-0,49
<i>Taboga – CHIRPS</i>	0,10	0,20	-0,32	0,23
<i>Montezuma – CHIRPS</i>	0,51	-0,33	-0,74	-0,35
<i>Universidad Invenio – CHIRPS</i>	0,39	-4,47	-0,81	-0,26

Tabla 3.8. Índice de Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) entre los datos de estaciones meteorológicas (Tabla 2.1) y CHIRPS para el IELL, TELL, DELL y DES.

El coeficiente de Spearman (Tabla 3.4) muestra correlaciones positivas altas con significancia del 95% indicando que en general los datos de CHIRPS se corresponden bien con las observaciones al evaluar los índices del IELL, TELL, DELL y DES. Sin embargo, ciertas estaciones como Bagaces, Hacienda Verdum, Santa Elena, La Cruz, La Maritza, Cabo Blanco, Mojica, Montezuma y Universidad Invenio presentan correlaciones bajas, aunque no son todos sus respectivos índices. Con el coeficiente de Pearson (no mostrado) se obtuvieron resultados muy similares al coeficiente de Spearman.

Los resultados de β (Tabla 3.5) son muy cercanos a 1 en todos los casos con muy pequeñas desviaciones, para el caso de γ los resultados son más diversos, muchas estaciones muestran índices que rondan el valor de 1, sin embargo, muchos otros presentan desviaciones que pueden variar entre 0.5 y 1. A pesar de esto el índice KGE muestra buenos resultados en la mayoría de las estaciones, aunque de igual forma a lo ocurrido en parámetros anteriores, existen casos de estaciones con KGE bastante bajos o incluso negativos, estos casos son las estaciones mencionadas para los parámetros anteriores. Los valores negativos indican una mejor interpretación por parte de la media de las observaciones que de la simulación o simplemente una mala representación de la simulación (Knoben et al., 2019).

La Tabla 3.8 muestra los resultados para el índice NSE, a diferencia de los parámetros analizados anteriormente el NSE no muestra resultados tan alentadores, algunos valores son positivos, pero no cercanos a uno y se tienen muchos valores cercanos a cero e incluso negativos. En general los resultados del NSE indicarían una mala representación de los datos en rejilla, siendo el parámetro menos confiable para validar los datos de CHIRPS contra observaciones para los índices del IELL, TELL, DELL y DES.

De los resultados anteriores se puede concluir una buena correspondencia entre la mayoría de estaciones meteorológicas contra CHIRPS para todos los parámetros, excepto el índice NSE. Sin embargo, es importante aclarar que algunas de las estaciones que muestran discrepancias en ciertos parámetros como Hacienda Verdum o La Maritza presentan datos nulos en algunos de sus índices, lo que puede que puede afectar los parámetros de validación al comparar las series, ya que mayor cantidad de datos nulos puede disminuir el tamaño de las series, aunque esto solo se aprecia en los índices relacionados al IELL y TELL y no en la precipitación, ya que el método de Bombardi modificado puede devolver datos nulos. Finalmente, es importante tener en cuenta que parámetros como el coeficiente de correlación de Pearson o el NSE también pueden ser susceptibles a datos anómalos que se desvían en gran medida entre series comparativas (McCuen et al., 2006).

3.2. Caracterización del IELL, TELL, DELL y DES en la región con datos de CHIRPS.

A continuación, se presentan los resultados estadísticos que caracterizan los índices IELL, TELL, DELL y DES.

De la Figura 3.1 se aprecia que el comportamiento del IELL tiende a mostrar fechas más tempranas en buena parte de Guanacaste cuando estas se comparan con la región al norte del dominio. Se destacan algunos núcleos de IELL que ocurren de manera temprana en zonas centrales de Guanacaste, en cantones como Liberia, Carrillo, Nicoya, Bagaces y una pequeña región de Santa Cruz (en la primera semana de mayo alrededor de los días 5-7 del mes), todos ellos cercanos a la desembocadura del río Tempisque. Otro núcleo de IELL temprano se puede apreciar entre los cantones de Bagaces y Cañas y otro cerca del límite entre el cantón de Abangares y la provincia de Puntarenas. Las regiones periféricas como las costas de la península de Nicoya o las limítrofes a la provincia de Alajuela presentan

IELL un poco más tardíos que las regiones centrales, sin embargo, el IELL más tardío en la región está al norte cerca del cantón La Cruz (alrededor del 19-20 de mayo), denotando que la diferencia en la región entre los IELL más tempranos y tardíos es de unas dos semanas, además de la Tabla 3.9 se observa que el 50% de la mediana del IELL ocurre entre el 8 y 15 de mayo. Se pueden apreciar otros núcleos de IELL tardíos en la provincia de Alajuela y en Nicaragua que se escapan de la región de estudio.

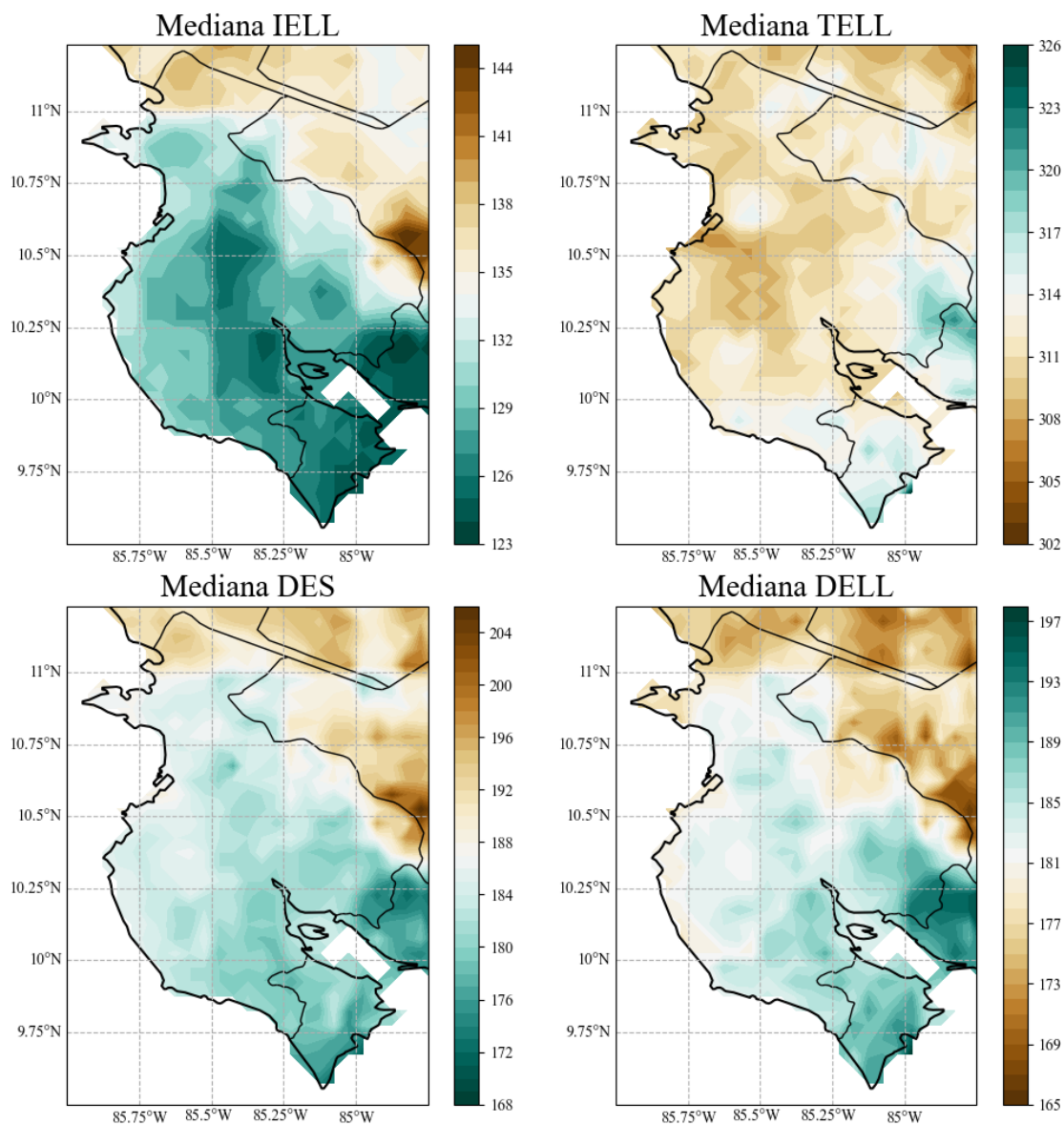


Figura 3.1. Mediana del día juliano del IELL y TELL, y mediana de la cantidad de días de la DES y DELL de la base de datos de CHIRPS en la región de Guanacaste en el periodo 1981-2020.

Con respecto al TELL se observa como casi toda la región tiende hacia condiciones uniformemente secas, sin destacar núcleos tan definidos como en el IELL. Se aprecia una región de TELL más tardíos (13-16 de noviembre) alrededor del cantón de Abangares y la parte sur de la península de Nicoya. También se puede destacar otra región con TELL un poco más tempranos (4-5 de noviembre) cerca de la parte central y norte de Guanacaste, involucrando cantones como Liberia, Carrillo y Santa Cruz, sin embargo, el comportamiento del TELL no es tan marcado como con el IELL donde la diferencia entre los TELL de las regiones más secas y húmedas es inferior a 2 semanas y el 50% de la mediana de los TELL ocurre entre el 7 y 9 de noviembre (Tabla 3.9), destacando aún más uniformidad de los datos.

El comportamiento de la DES y DELL es muy simétrico indicando en general que en una mitad del año se mantienen condiciones secas, mientras que en la otra mitad condiciones lluviosas. La DES tiende a mantenerse alrededor de los 180-185 días en casi toda la provincia, las menores duraciones ocurren al oeste en el límite con Puntarenas rondando los 170-175 días, mientras las mayores duraciones se aprecian al norte alrededor de La Cruz con unos 195-200 días. La DELL muestra un comportamiento similar a la DES ya que es bastante uniforme en la región con DELL alrededor de los 180-185 días, con las duraciones más largas al oeste limitando con Puntarenas de unos 190-195 días y las más cortas al norte (La Cruz) alrededor de los 170-175 días. En estas zonas donde se presentan las máximas y mínimas duraciones las diferencias pueden alcanzar hasta los 20 días, aunque estas abarcan poco territorio de la provincia y se ubican en los extremos de la misma, además de la Tabla 3.9 se aprecia que la mediana de la DES mantiene el 50% de sus datos entre los 182 y 190 días, mientras que la mediana de la DELL entre los 177 y 185 días, de modo que la DES como DELL tienen duraciones similares.

Por otro lado, la media (no mostrada) presenta un comportamiento muy similar a la mediana en la región para el IELL, TELL, DES y DELL, destacando principalmente la aparición de un núcleo de TELL tempranos que ocurren sobre la cordillera de Guanacaste (fuera de la región de estudio con poco alcance sobre Tilarán). Considerando que la mediana es una medida de tendencia central bastante robusta con baja sensibilidad a los datos atípicos, es posible que la región sobre la cordillera de Guanacaste cuyas medias del TELL

son más tempranas tenga la influencia de datos atípicos. Estos podrían responder a algún fenómeno físico, sin embargo, es de destacar lo mencionado en la sección 2.2.1 donde se recomendó revisar cada uno de los TELL en todas las bases de datos debido a la presencia de datos anómalos, lo cual no se hizo debido al tamaño del dominio de los datos de CHIRPS. Esto indica también que ese comportamiento en la media del TELL podría estar ligado a falsas detecciones de un TELL temprano en los cuales los criterios indicados en la sección 2.2.1 no funcionaron de manera adecuada.

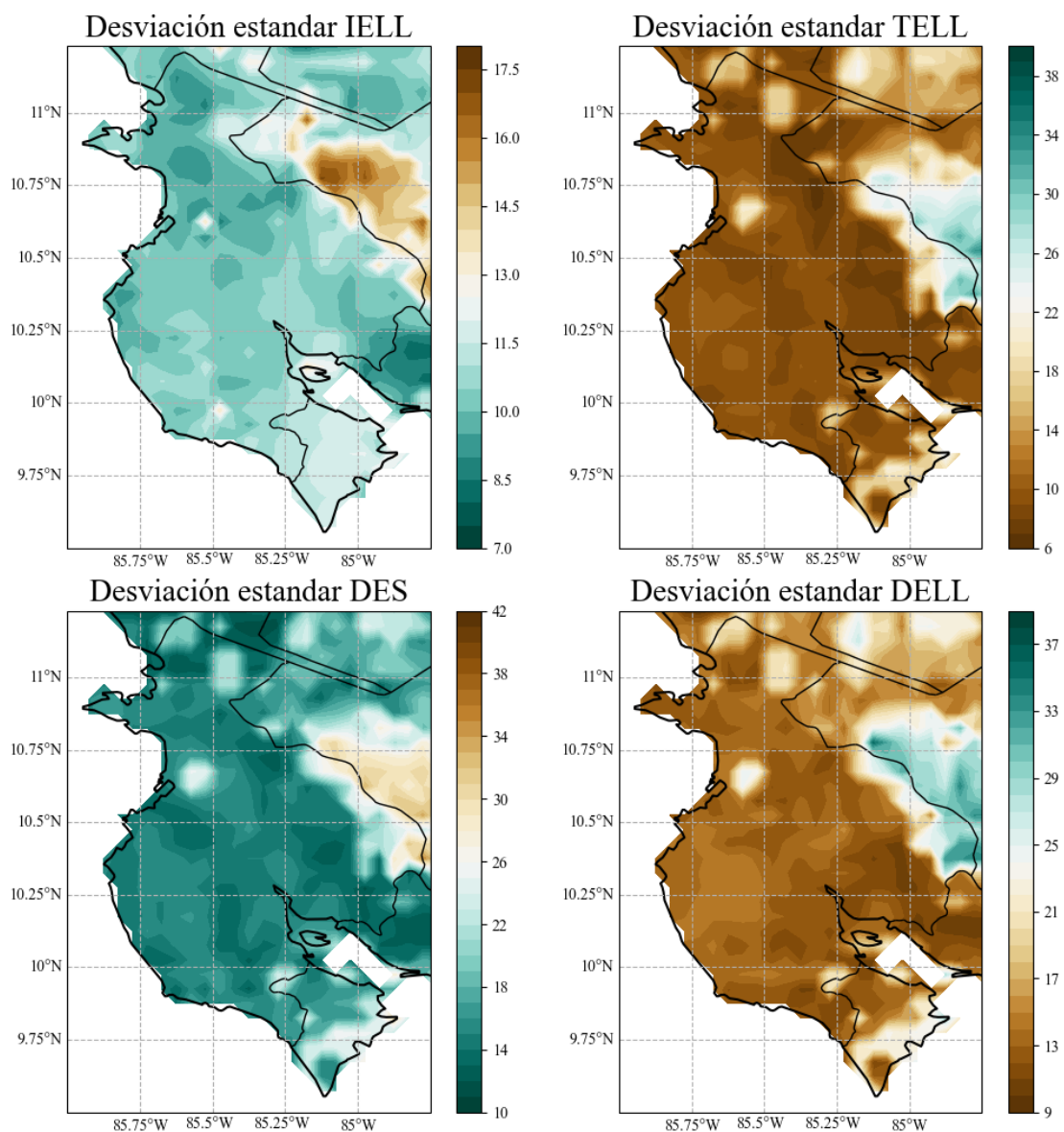


Figura 3.2. Desviación estándar para las series de IELL, TELL, DES y DELL de la base de datos de CHIRPS en la región de Guanacaste para el periodo 1981-2020.

La desviación estándar (Figura 3.2), muestra un comportamiento similar en los cuatro índices, valores que rondan 10-15 días con respecto a la media en prácticamente toda la región, de la Tabla 3.9 se aprecian desviaciones estándar rondando esos valores para los cuatro índices (los más altos para la DES y DELL). La mayor desviación estándar está alrededor de la cordillera de Guanacaste con valores superiores a un mes, pero solo una pequeña parte de Tilarán pertenece a la región de estudio, la alta dispersión podría indicar una región de comportamientos atípicos ya que la desviación estándar es sensible a estos.

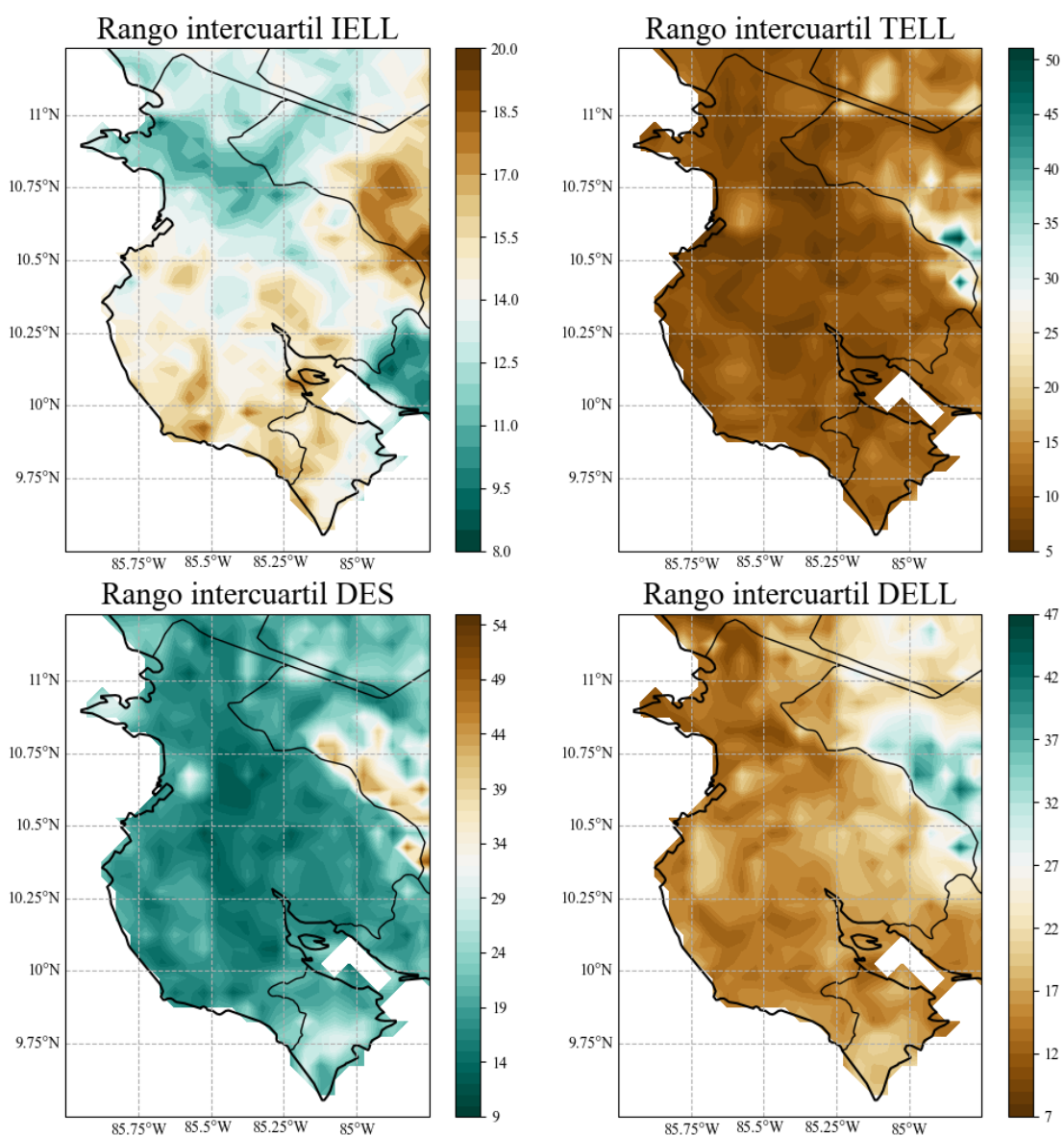


Figura 3.3. Rango Intercuartílico para las series del IELL, TELL, DES y DELL de la base de datos de CHIRPS en la región de Guanacaste para el periodo 1981-2020.

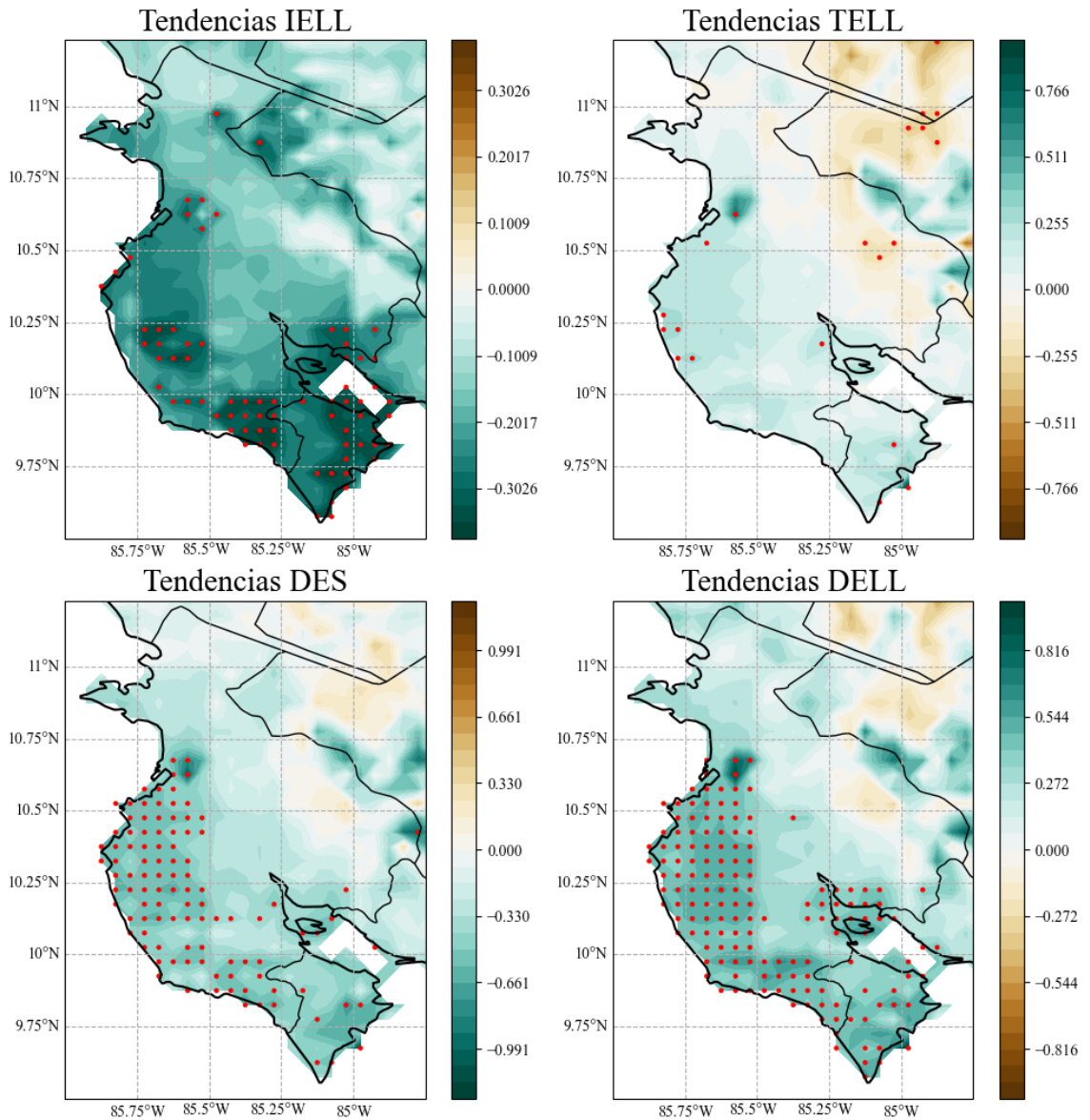


Figura 3.4. Tendencias para las series del IELL, TELL, DES y DELL de la base de datos de CHIRPS en la región de Guanacaste para el periodo 1981-2020. Los puntos rojos representan zonas con significancia estadística del 95%.

Considerando los resultados del rango intercuartílico (Figura 3.3) es posible apreciar como ronda entre dos y tres semanas en los cuatro índices (de la Tabla 3.9 se aprecia que el 50% de los datos ronda estos valores), a excepción de la zona sobre la cordillera de Guanacaste para el TELL, DELL y DES donde el rango intercuartílico presenta valores de hasta 40 días (en zonas muy reducidas), lo cual es una dispersión muy elevada. Esto podría indicar que la mayoría de los datos extremos hacia condiciones secas se ubican en esa región,

aunque pertenecen en su mayoría a la parte de la cordillera en Alajuela, es la misma mostrada en la desviación estándar, sin embargo, las regiones de afectación son más reducidas.

De la Figura 3.4 se puede apreciar una tendencia del IELL hacia valores negativos sobre toda la región, lo que indicaría que en general se esperan IELL más tempranos. Las tendencias con mayor magnitud y significativas se ubican más cerca de la costa en cantones como Santa Cruz, Nicoya, Hojancha, Nandayure, Abangares y la región de Puntarenas en la península. Por otro lado, el TELL muestra pocos puntos con tendencias significativas.

Sobre toda la península de Nicoya se observan tendencias negativas (positivas) para el índice DES (DELL), significativas sobre la parte oeste de la península y algunos puntos al sur sobre la provincia de Puntarenas en la península. El índice DELL también presenta algunos puntos de significancia cerca la región de desembocadura del Tempisque. Indicando en esas regiones tendencia hacia condiciones húmedas, DES más cortos y DELL más largos.

En la Tabla 3.9 se presenta un resumen numérico para las Figuras 3.1, 3.2, 3.3 y 3.4 con los percentiles 25, 50 y 75 (P25, P50 y P75 respectivamente), lo que permite visualizar los umbrales entre los cuales se encuentra el 50% de los datos de la región. Estos resultados muestran un comportamiento interesante, ya que la mediana del IELL, DES y DELL tiende a mantener el 50% de sus valores en un rango de unos 7-8 días, pero el TELL apenas son 2 días indicando la uniformidad de este en Guanacaste.

Parámetros	IELL			TELL			DES			DELL		
	P25	P50	P75	P25	P50	P75	P25	P50	P75	P25	P50	P75
Mediana	128	131	135	311	312	313	182	185	190	177	182	185
Desviación estándar	10,0	10,4	11,3	8,7	9,7	15,0	14,2	15,4	19,2	12,7	14,0	18,4
Rango intercuartil	12,8	14,0	15,3	9,0	10,5	12,3	16,5	18,5	21,5	14,5	16,8	20,5
Tendencias	-0,25	-0,18	-0,12	-0,06	0,06	0,16	-0,42	-0,27	-0,08	0,09	0,24	0,40

Tabla 3.9. Percentiles 25, 50 y 75 para el IELL, TELL, DES y DELL para los estadísticos: mediana, desviación estándar, rango intercuartil y tendencias para CHIRPS.

3.3. Fuentes de variabilidad climática que modulan el IELL, TELL, DELL y DES en la región.

La Figura 3.5 muestra los gráficos scree-plot para las primeras 20 CP asociadas a los índices de la época seca y lluviosa. La Tabla 3.10 muestra en detalle el porcentaje de la

variabilidad explicada por la componente principal 1 y 2 (CP1 y CP2, respectivamente). Donde se aprecia poca variabilidad explicada por la CP2 con respecto a la CP1.

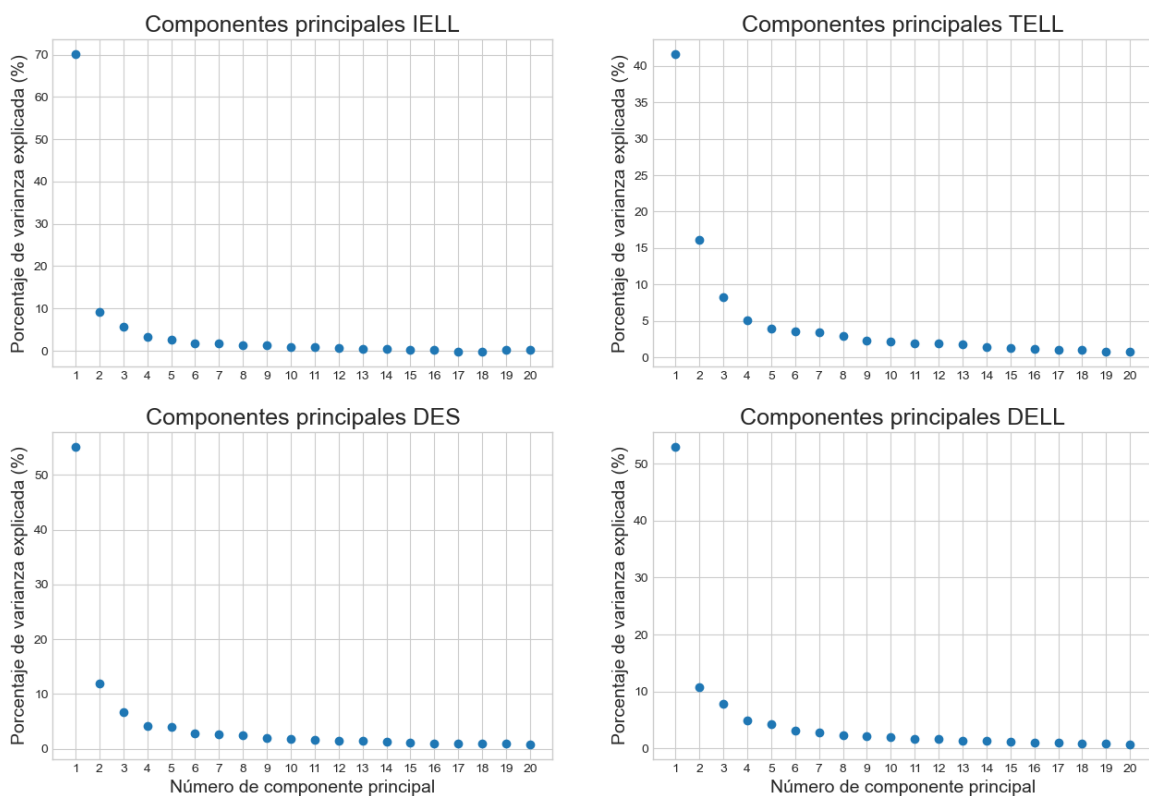


Figura 3.5. Primeras 20 CP asociadas al IELL, TELL, DES y DELL obtenidas a partir de la base de datos de CHIRPS en la región de Guanacaste para el periodo 1981-2020.

<i>% de variabilidad explicada</i>	<i>IELL</i>	<i>TELL</i>	<i>DES</i>	<i>DELL</i>
<i>CP 1</i>	70.04	41.56	55.11	52.96
<i>CP 2</i>	9.11	16.10	11.97	10.75

Tabla 3.10. Porcentaje de la variabilidad explicada por la CP1 y CP2 asociada al IELL, TELL, DES y DELL.

Las Figuras 3.6 y 3.7 muestran la correlación entre la CP1 y CP2 contra su respectivo índice de estación seca o lluviosa. Se puede apreciar como la CP1 presenta una alta correlación contra su respectivo índice (IELL, TELL, DES y DELL) en todo Guanacaste, mientras la CP2 presenta en general correlaciones menores, además de que gran parte de la región no alcanza una significancia estadística superior al 95%. Considerando que la CP1 explica mayor cantidad de varianza en la región, se utiliza únicamente esta para comparar

contra las fuentes de variabilidad climática. La Tabla 3.11 muestra la correlación entre la CP1 asociada al IELL, TELL, DES y DELL y los índices OMA, N3.4, OMA-N3.4 y CLLJ.

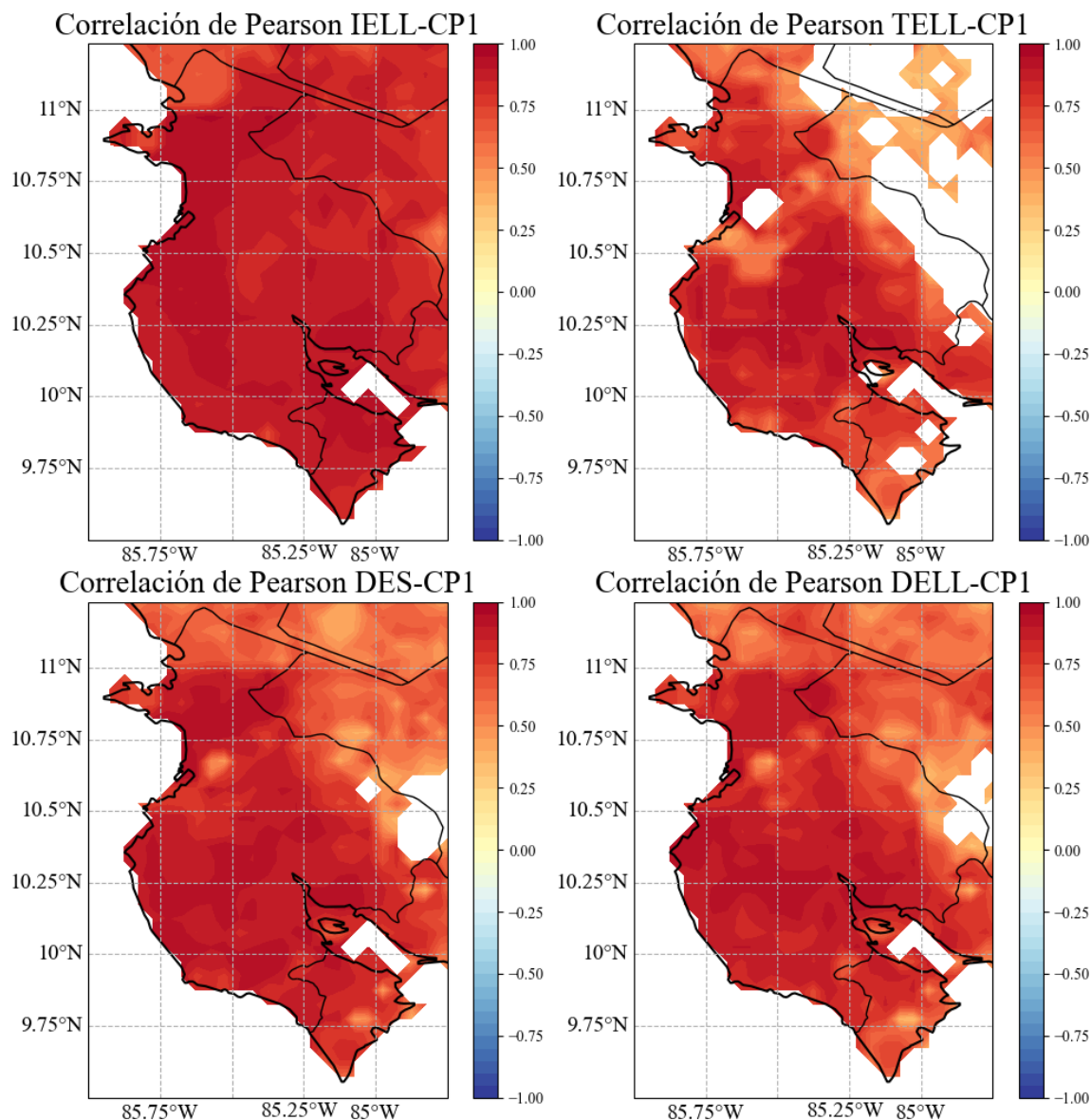


Figura 3.6. Correlación de Pearson entre el IELL, TELL, DES y DELL con su respectiva CP1 asociada para los datos de CHIRPS en la región de Guanacaste en el periodo 1981-2020. Las zonas en blanco representan regiones de significancia estadística inferior al 95%.

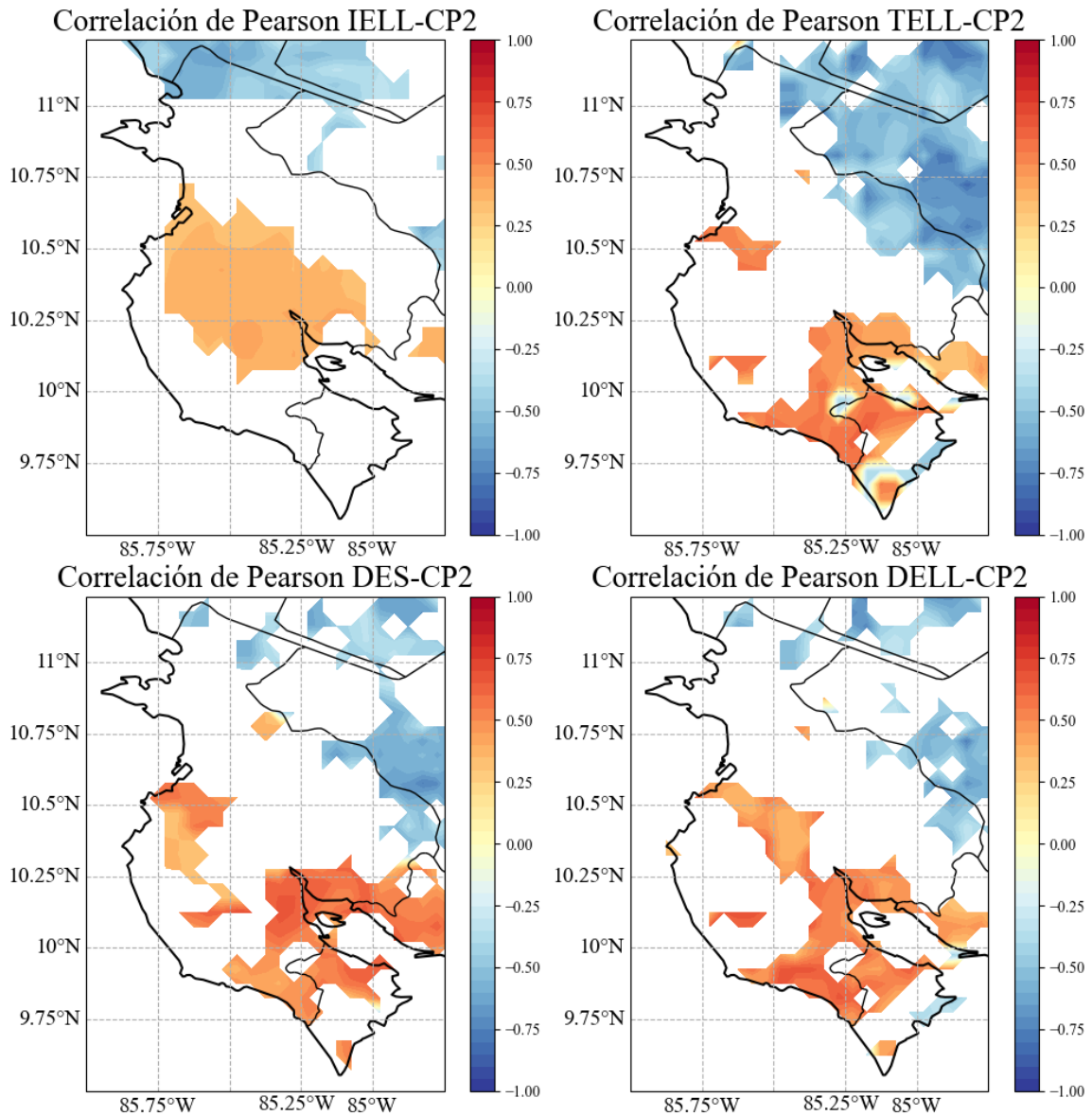


Figura 3.7. Correlación de Pearson entre el IELL, TELL, DES y DELL con su respectiva CP2 asociada para los datos de CHIRPS en la región de Guanacaste en el periodo 1981-2020. Las zonas en blanco representan regiones de significancia estadística inferior al 95%.

<i>Índices</i>	<i>Correlación de Pearson CPI</i>	<i>Índices</i>	<i>Correlación de Pearson CPI</i>
<i>OMA vs IELL</i>	-0,32	<i>OMA-N3.4 vs IELL</i>	-0,46
<i>OMA vs TELL</i>	0,24	<i>OMA-N3.4 vs TELL</i>	0,39
<i>OMA vs DES</i>	-0,33	<i>OMA-N3.4 vs DES</i>	-0,47
<i>OMA vs DELL</i>	0,31	<i>OMA-N3.4 vs DELL</i>	0,54
<i>N3.4 vs IELL</i>	0,27	<i>CLLJ vs IELL</i>	0,36
<i>N3.4 vs TELL</i>	-0,33	<i>CLLJ vs TELL</i>	-0,36
<i>N3.4 vs DES</i>	0,30	<i>CLLJ vs DES</i>	0,32
<i>N3.4 vs DELL</i>	-0,50	<i>CLLJ vs DELL</i>	-0,52

Tabla 3.11. Correlación de Pearson entre la CP1 asociada al IELL, TELL, DES y DELL y los índices OMA, N3.4, OMA-N3.4 y CLLJ en su respectivo periodo. Los valores en negrita representan significancia estadística al 99% y en itálica al 95%.

Comparando el índice de la OMA sobre el Atlántico se encuentran correlaciones significativas con el IELL, DES y DELL. La correlación negativa del IELL sugiere que una OMA positiva (negativa) se asocia a un IELL temprano (tardío). Las correlaciones positivas y negativas de la DES y DELL respectivamente, indican que eventos positivos (negativos) de la OMA se asocian a DELL más largas (cortas), mientras lo contrario ocurre con la DES. Coincidiendo con resultados como los de Alfaro et al. (1998) o Alfaro y Cid (1999).

Con el índice N3.4 sobre el Pacífico Ecuatorial se obtienen correlaciones significativas con el TELL y la DELL, con comportamientos contrarios a los vistos en la OMA. La correlación entre N3.4 y TELL es negativa sugiriendo que el TELL ocurre más temprano (tarde) con eventos positivos (negativos) del N3.4 coincidiendo con resultados previos en el Pacífico ecuatorial (Alfaro & Cid, 1999; Gouirand et al., 2020). El índice DELL presenta una correlación negativa, asociando un N3.4 positivo (negativo) a DELL más cortas (largas).

Las TSM combinadas del Atlántico y Pacífico ecuatorial, muestran mejores resultados que al analizarlas por separado, con correlaciones significativas más altas. Con índices OMA-N3.4 positivos (negativos) se esperan IELL tempranos (tardíos) asociados a un calentamiento (enfriamiento) relativo del Atlántico respecto al Pacífico ecuatorial. Un comportamiento inverso ocurre con el TELL, cuando el índice OMA-N3.4 es positivo (negativo) el TELL ocurre más tarde (temprano). Con respecto a las duraciones, DELL y DES se tiene un comportamiento similar al obtenido con los océanos por separado, el índice

OMA-N3.4 positivo (negativo) implica una DELL más larga (corta) y una DES más corta (larga).

Trabajos previos (Alfaro et al., 1998; Alfaro, 2002) mencionan que la migración latitudinal temprana o tardía de la ZCIT es uno de los moduladores más importante para los IELL y TELL tempranos o tardíos en la región. Alfaro et al. (1998) detalla que eventos cálidos en el Atlántico inducen bajas presiones relativas que disminuyen el flujo alisio asociado al anticiclón del Atlántico Norte, favoreciendo sobre América Central el establecimiento de la ZCIT y propiciando las precipitaciones en la región, mientras que un Pacífico Ecuatorial cálido intensifica el flujo alisio del noreste favoreciendo la migración al sur de la ZCIT disminuyendo las precipitaciones, por lo que se esperan situaciones contrarias con TSM frías en ambos océanos, de manera que si la OMA y ENOS están en fase tienden a anularse sus efectos y caso contrario se fortalecen. Lo anterior se ve reflejado en las correlaciones de los océanos de la Tabla 3.11, especialmente en el índice OMA-N3.4 por lo que el comportamiento en conjunto de ambos océanos tiene mayor relevancia sobre el establecimiento de la época seca y lluviosa que considerar solo uno de ellos.

Para analizar el CLLJ se debe considerar que en general los vientos zonales son hacia el oeste siendo negativos, para facilitar la interpretación de las correlaciones, los vientos zonales se multiplicaron por -1 de forma que una correlación positiva se asocia a una anomalía positiva del CLLJ y por tanto vientos zonales más intensos. De la Tabla 3.11 se puede apreciar como un CLLJ intenso (débil) se relaciona a IELL tardíos (tempranos) y con TELL tempranos (tardíos), mientras una DELL más corta (larga) y una DES más larga (corta) se relaciona a un CLLJ más intenso (débil). Sugiriendo que un CLLJ intenso (débil) induce condiciones secas (húmedas) sobre la provincia de Guanacaste.

Hidalgo et al. (2015) y Quirós y Hidalgo (2016a) encontraron que cuando el CLLJ es intenso la ZCIT tiende a desplazarse hacia el suroeste propiciando condiciones secas en la vertiente Pacífico de América Central, por lo que un CLLJ intenso podría favorecer condiciones como un IELL tardío, un TELL temprano, una DES larga y una DELL corta en Guanacaste, esperando lo contrario con un CLLJ débil. Hidalgo et al. (2015) propusieron un modelo conceptual para explicar tal correlación (esta se describe en la sección 1.2.3 de este trabajo). Esto también se relaciona con el comportamiento del ENOS, ya que

Amador (2008) indica que durante fases cálidas (frías) del ENOS se espera un CLLJ intenso (débil) relacionado con anomalías de precipitación negativas (positivas) en la vertiente Pacífico de América Central. Según explica Maldonado et al. (2016b) esto puede deberse a que eventos ENOS son capaces de modular anomalías de presión superficial a nivel del mar cerca de la costa Este de Estados Unidos y de la baja presión de Aleutianas afectando la intensidad del CLLJ.

		<i>DELL</i>		
		BN (<-6.04)	N	AN (>4.85)
<i>OMA-N3.4 (M-O)</i> $\chi^2=12.47 (0.986)$	BN (<-0.53)	69(9)***	23(3)*	8(1)**
	N	21(3)*	50(7)**	29(4)
	AN (>0.86)	8(1)***	31(4)	62(8)***
		<i>DELL</i>		
		BN (<-6.04)	N	AN (>4.85)
<i>CLLJ (M-O)</i> $X^2=9.63 (0.953)$	BN (<2.10 ms⁻¹)	15(2)**	23(3)*	62(8)***
	N	29(4)	50(7)**	21(3)*
	AN (>2.57 ms⁻¹)	54(7)**	31(4)	15(2)**

Tabla 3.12. Tablas de contingencia para la CP1 de la DELL de CHIRPS según los índices OMA-N3.4 y CLLJ. Los valores entre paréntesis indican las frecuencias absolutas y los asteriscos representan la significancia estadística al 90% (*), 95% (**) y 99% (***).

El análisis de contingencia presentado en la Tabla 3.12 muestra resultados que concuerdan con las correlaciones de Pearson de la Tabla 3.11 para el caso de la DELL con los índices OMA-N3.4 y CLLJ. Estos fueron los índices cuyo análisis fue estadísticamente significativo tanto en la tabla de contingencia como en sus categorías.

Para el índice OMA-N3.4 los escenarios más posibles son (BN, BN), (N, N) y (AN, AN). El primer escenario (BN, BN) indica que bajo condiciones del índice OMA-N3.4 por debajo de su percentil 33 (P33) lo más probable es una DELL más corta de lo normal. El segundo escenario (N, N) sugiere que si el índice OMA-N3.4 se encuentra entre su P33 y P67 se esperaría una DELL normales. Mientras que el tercer escenario (AN, AN) indica que bajo condiciones del índice OMA-N3.4 por encima de su P67 lo más probable es que la DELL sea más larga de lo normal. Aunque también se pueden destacar las condiciones contrarias que serían las categorías (BN, AN) y (AN, BN) que indicarían que bajo un índice OMA-N3.4 negativo (positivo) es muy poco probable que la DELL sea más larga (corta) de lo normal.

Para el caso del CLLJ el comportamiento es contrario destacando los escenarios (BN, AN), (N, N) y (AN, BN). El primer escenario (BN, AN) sugiere que un índice del CLLJ por debajo de su P33 es más probable asociarlo a una DELL más larga de lo normal. El segundo escenario (N, N) indica que si el índice CLLJ se encuentra entre su P33 y P67 no se favorece una DELL más corta o larga. Mientras el tercer escenario (AN, BN) indica que bajo condiciones del índice CLLJ por encima de su P67 lo más probable es que la DELL sea más corta de lo normal. Finalmente, también se deben destacar las condiciones contrarias (BN, BN) y (AN, AN) indicando que bajo un CLLJ débil (intenso) es muy poco probable que la DELL sea más corta (larga) de lo normal.

Capítulo 4

Caracterización de la estación lluviosa y seca a partir de la base de datos de ERA5 con reducción de escala

4.1. Caracterización del IELL, TELL, DELL y DES en la región a partir de datos de ERA5.

La Figura 4.1 representa el promedio de precipitación diaria en el periodo de 1950-1980 en caso de los datos de ERA5 con reducción de escala y de 1981-2020 en caso de los datos de CHIRPS.

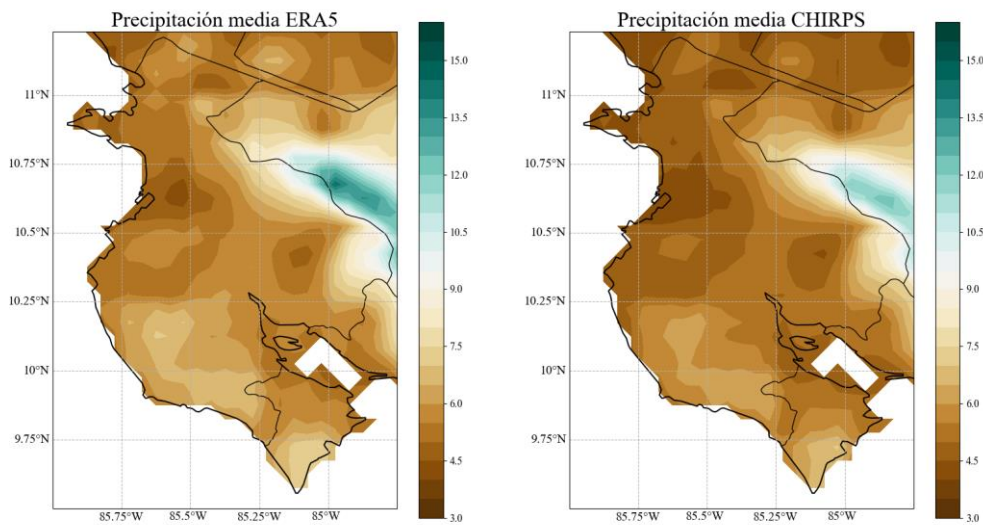


Figura 4.1. Precipitación media diaria ($\text{mm}\cdot\text{día}^{-1}$) para los datos de ERA5 con reducción de escala, izquierda, (1950-1980) y CHIRPS, derecha (1981-2020).

Al aumentar la resolución de los datos de ERA5 por medio del ajuste de escala para que coincidan con la resolución de CHIRPS, se obtuvieron resultados que representan bien la región de Guanacaste en términos climatológicos. En la sección 3.1 se validó que los datos de CHIRPS capturan correctamente las precipitaciones en la región, por lo que es posible validar ERA5 usando CHIRPS. Ambos conjuntos de datos muestran los mismos núcleos de bajas precipitaciones (por ejemplo, los que se encuentran alrededor del cantón de Cañas y Liberia), también se observa un núcleo de altas precipitaciones al norte de la cordillera de Guanacaste, aunque este se escapa de la región de estudio. Los percentiles 25, 50, y 75 de los datos de ERA5 en la Figura 4.1 son $P_{25} = 5.31 \text{ mm}\cdot\text{día}^{-1}$, $P_{50} = 5.75 \text{ mm}\cdot\text{día}^{-1}$ y $P_{75} = 6.61 \text{ mm}\cdot\text{día}^{-1}$, mientras que para el caso de CHIRPS son $P_{25} = 4.73 \text{ mm}\cdot\text{día}^{-1}$, P_{50}

= $5.16 \text{ mm}\cdot\text{día}^{-1}$ y $P75 = 5.96 \text{ mm}\cdot\text{día}^{-1}$ indicando que CHIRPS presenta menores precipitaciones. De los datos que componen la Figura 4.1 se calculó el EMA y el índice KGE obteniendo valores de $0.65 \text{ mm}\cdot\text{día}^{-1}$ y 0.88 respectivamente, indicando que ambos mapas coinciden adecuadamente entre sí. Sin embargo, es conveniente realizar la comparativa con periodos iguales en ambos conjuntos de datos, lo que permitiría correlaciones similares a las presentadas en la sección 3.1 y no solo en climatologías.

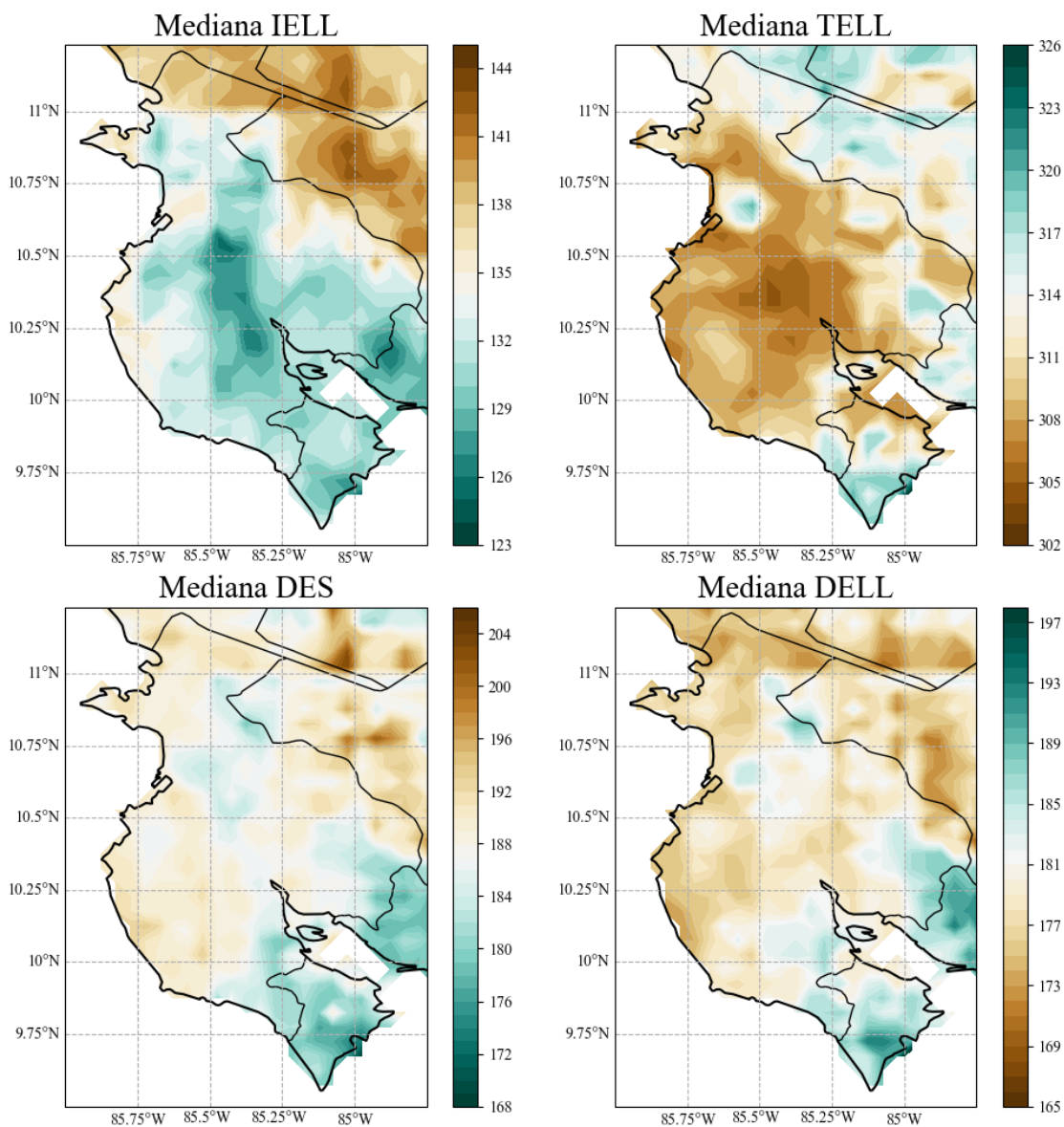


Figura 4.2. Mediana del día juliano del IELL y TELL, y mediana de la cantidad de días de la DES y DELL de la base de datos de ERA5 en la región de Guanacaste para el periodo 1950-1980.

En la Figura 4.2 se presenta la mediana para el IELL, TELL, DES y DELL para los datos de ERA5. Los resultados son muy similares a la Figura 3.1 respectiva a CHIRPS. En ambos conjuntos de datos se aprecian IELL más tempranos en la parte central de Guanacaste que aumentan al trasladarse hacia zonas costeras, la cordillera o la región norte, aunque los núcleos de IELL tempranos son más marcados en CHIRPS. El TELL también muestra similitudes en ambos conjuntos con TELL muy uniformes, sin embargo, las condiciones secas parecen estar un poco más presentes en los datos de ERA5 sobre Guanacaste. Las zonas al sur de la provincia y al norte muestran los TELL más tardíos, aunque poco notorios, mientras los más tempranos se aprecian especialmente en la región central. La media (no mostrada) presenta resultados muy similares a la Figura 4.2.

Con respecto a la comparativa entre la DES y DELL de ambos conjuntos de datos, la mediana y media (no mostrada) muestran gran similitud a los resultados de CHIRPS. Las condiciones secas parecen ser un poco más marcadas con DES un poco más largas y DELL un poco más cortas, a las obtenidas por CHIRPS, lo que podría indicar que ERA5 presenta condiciones más secas, aunque también podría estar relacionado al periodo de 1950-1980. También se debe destacar que en general los cuatro índices no muestran transiciones de condiciones secas a húmedas tan suaves y definidas en sus contornos como sucede con CHIRPS, posiblemente debido a que los datos de ERA5 originalmente tenían una menor resolución.

La desviación estándar y rango intercuartílico (Figura 4.3 y 4.4) rondan las dos y tres semanas en prácticamente toda la región, aunque para la desviación estándar algunas zonas que se escapan de la región de estudio (Provincia de Alajuela y Nicaragua) muestran dispersiones altas que alcanzan el cantón de Tilarán, especialmente la desviación estándar.

Las tendencias (Figura 4.5) de los cuatro índices de ERA5 muestran un comportamiento similar a CHIRPS, hacia condiciones húmedas, sin embargo, las regiones significativas difieren en ambos conjuntos de datos, y para ERA5 solo se pueden considerar relevantes el TELL y DELL. Las regiones significativas del TELL abarcan varios cantones en la región este de la provincia y este del golfo de Papagayo, mientras que las significancias de la DELL también abarcan las regiones anteriores solo que cubren un área un poco más amplia.

En la Tabla 4.1 se presenta un resumen numérico para las Figuras 4.2, 4.3, 4.4 y 4.5 usando los P25, P50 y P75, lo que ayuda a visualizar más claramente el comportamiento medio de cada figura y los umbrales entre los cuales se encuentra cada índice para el 50% de la región, en general mostrando un comportamiento similar a las respectivas figuras.

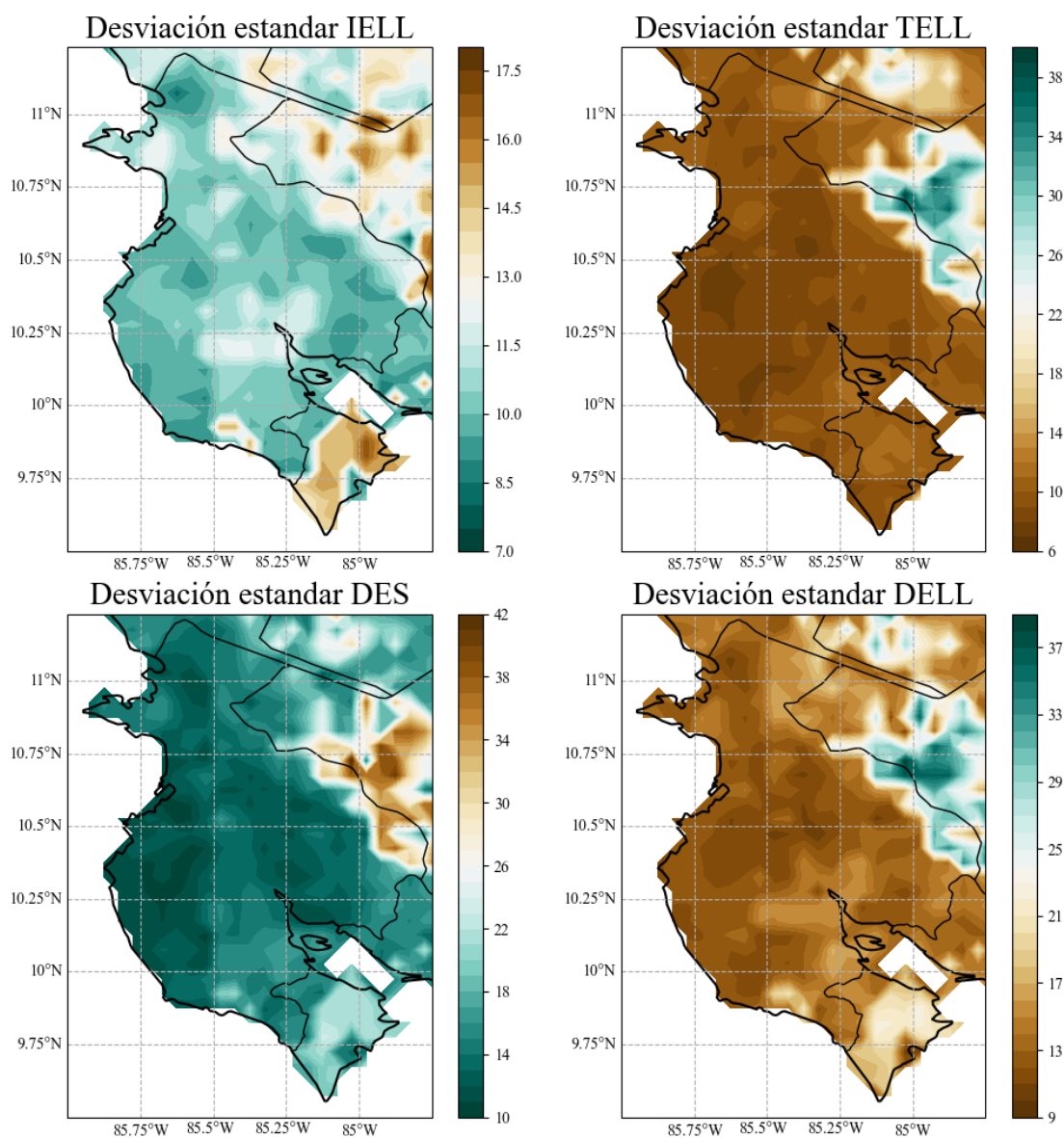


Figura 4.3. Desviación estándar para las series de IELL, TELL, DES y DELL de la base de datos de ERA5 en la región de Guanacaste para el periodo 1950-1980.

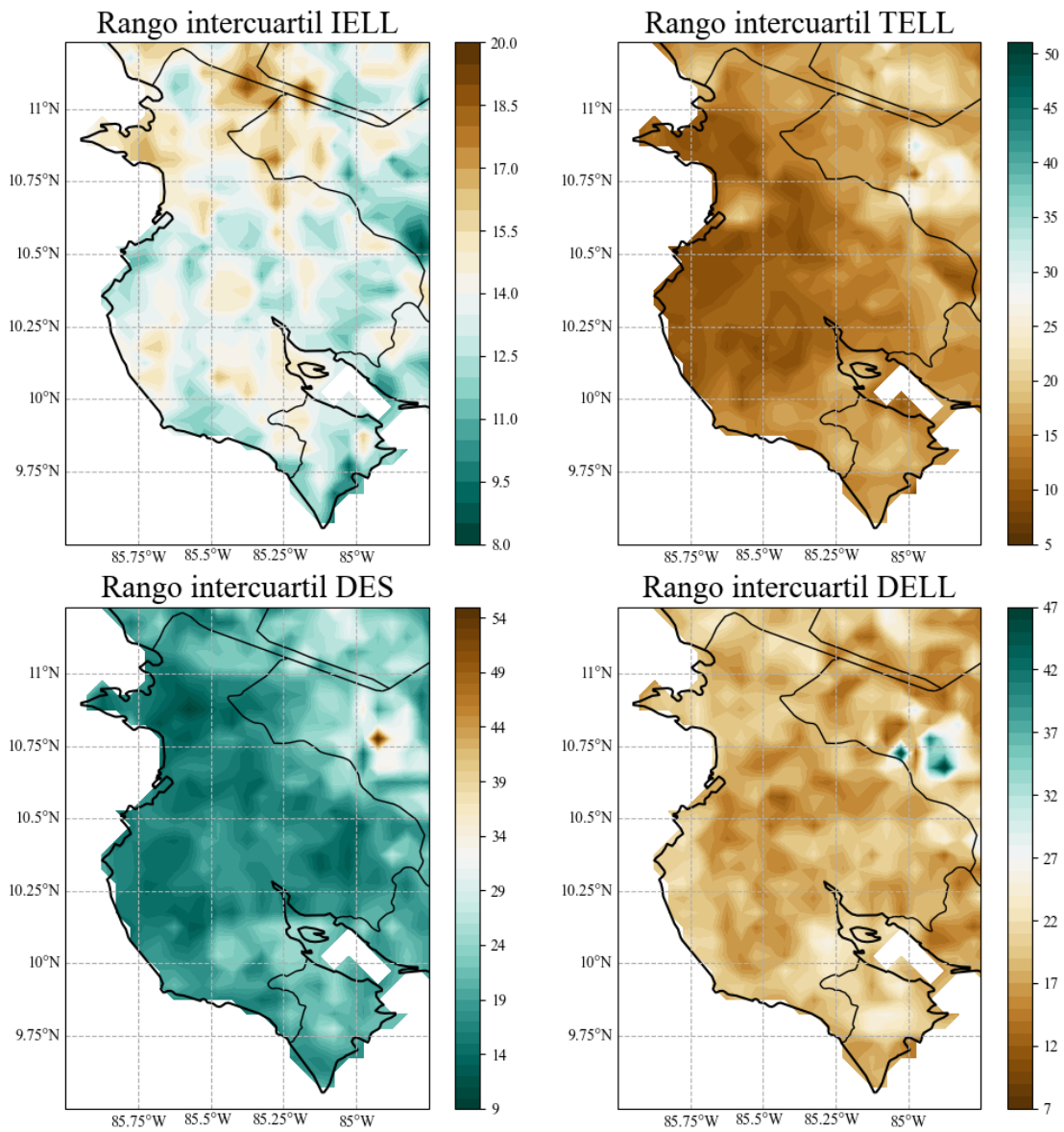


Figura 4.4. Rango Intercuartílico para las series de IELL, TELL, DES y DELL de la base de datos de ERA5 en la región de Guanacaste para el periodo 1950-1980.

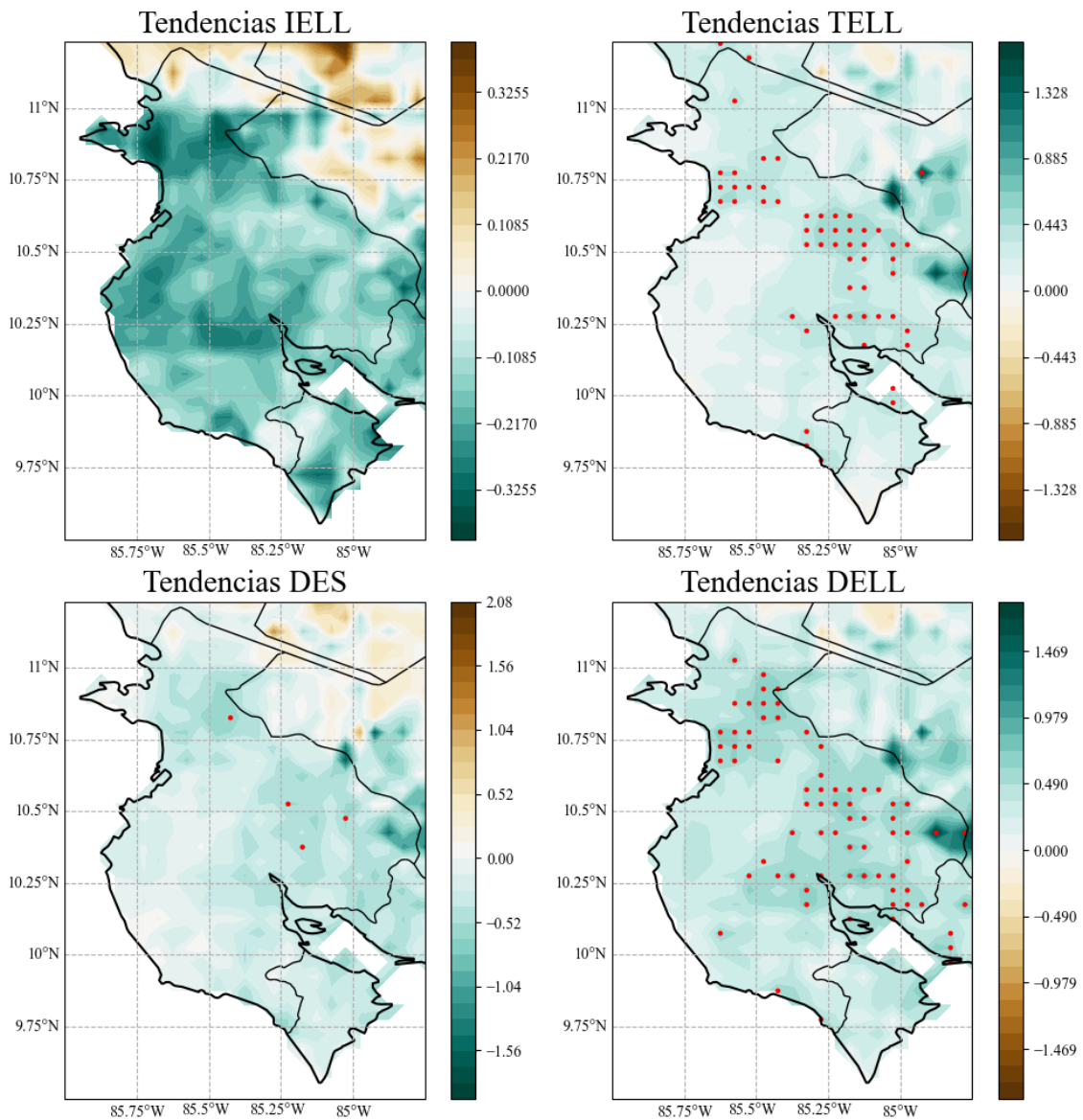


Figura 4.5. Tendencias para las series del IELL, TELL, DES y DELL de la base de datos de ERA5 en la región de Guanacaste para el periodo 1950-1980. Los puntos rojos representan zonas con significancia estadística del 95%.

Parámetros	IELL			TELL			DES			DELL		
	P25	P50	P75	P25	P50	P75	P25	P50	P75	P25	P50	P75
Mediana	131	133	138	308	311	315	185	188	190	176	179	182
Desviación estándar	9,9	10,6	12,14	9,0	9,9	11,3	12,9	14,9	17,3	12,5	14,0	16,6
Rango intercuartil	12,5	13,8	14,8	12,0	15,0	17,0	16,0	18,5	21,5	16,5	18,5	20,5
Tendencias	-0,21	-0,14	-0,05	0,10	0,22	0,33	-0,38	-0,22	-0,05	0,24	0,36	0,50

Tabla 4.1. Percentiles 25, 50 y 75 para el IELL, TELL, DES y DELL para los estadísticos: mediana, desviación estándar, rango intercuartil y tendencias para ERA5.

Parámetros	IELL			TELL			DES			DELL		
	EMA	r_s	KGE	EMA	r_s	KGE	EMA	r_s	KGE	EMA	r_s	KGE
Mediana	2,36	0,93	0,77	2,75	0,46	0,46	4,17	0,77	0,66	4,18	0,76	0,68
Desviación estándar	1,39	0,39	0,40	3,03	0,53	0,64	3,56	0,45	0,51	3,31	0,45	0,64
Rango intercuartil	2,27	-0,29	-0,31	4,55	0,51	0,20	4,06	0,36	0,35	4,70	0,02	0,12
Tendencias	0,11	0,46	-0,56	0,26	-	-3,61	0,27	0,16	-0,05	0,27	0,05	-0,10

Tabla 4.2. Comparaciones entre los estadísticos del IELL, TELL, DES y DELL calculados con CHIRPS (Figuras 3.1-3.4) y ERA5 (figuras 4.2-4.5), usando el EMA, r_s y KGE. En la correlación de Spearman valores en negrita representan significancia estadística al 99%.

Finalmente, en la Tabla 4.2 se presentan una comparación entre los mapas de las Figuras 3.1-3.4 respectivas a CHIRPS y los mapas de la Figuras 4.2-4.5 respectivas a ERA5. En términos climatológicos se puede apreciar que la mediana de ambos conjuntos de datos se corresponde bastante bien entre sí, en general con EMA bajos en los cuatro índices, además de r_s y KGE positivos (r_s significativo al 99%). La desviación estándar también se corresponde bien en los cuatro índices, mostrando valores de dispersión bastante similares entre ambos conjuntos. Sin embargo, para el rango intercuartílico este no es el caso, tanto el TELL como la DES muestran una correspondencia entre ERA5 y CHIRPS, pero el IELL y DELL no, el IELL muestra EMA bajos con un r_s y KGE negativos, además observando las figuras 3.3 y 4.4 se aprecian claras distinciones entre ambos conjuntos, mientras que en la DELL tanto la r_s y KGE son muy cercanos a cero. En el caso de las tendencias el único caso que se puede resaltar es el r_s del IELL positivo (significativo) el resto de índices muestran correlaciones muy bajas o incluso negativas.

En general la correspondencia entre CHIRPS y ERA5 es bastante buena para los índices del IELL, TELL, DES y DELL en el caso de la mediana, media (no mostrada, pero con resultados muy similares a la mediana) y desviación estándar, sin embargo, no sucede lo mismo en todos los casos del rango intercuartílico y para las tendencias solo se tiene un caso significativo a resaltar.

4.2. Caracterización del IELL, TELL, DELL y DES en la región a partir de datos de ERA5+CHIRPS.

Al combinar los conjuntos de datos de ERA5+CHIRPS que abarca el periodo de 1950-2020, se obtienen resultados en los parámetros climatológicos similares a los presentados

en secciones anteriores, lo cual es esperado debido a la similitud entre los resultados anteriores presentados en el capítulo 3 y la sección 4.1, ya que este conjunto no es independiente de los dos anteriores.

La Figura 4.6 representa la mediana para las series del IELL, TELL, DES y DELL. Se aprecia como el IELL tiende a ocurrir antes en las zonas centrales de Guanacaste alrededor de la desembocadura del Tempisque y que aumenta en las zonas periféricas alcanzando los IELL más tardíos cerca de La Cruz. El TELL es bastante uniforme donde los TELL más tempranos ocurre en las zonas centrales y los más tardíos al sur y este de la provincia. Mientras la DES y DELL muestran comportamientos bastante uniformes en todo Guanacaste con las condiciones más secas al norte (no tan marcado para la mediana de la DES). La media (no mostrada) presenta comportamientos bastante similares a la mediana, aunque con mayor presencia de condiciones secas alrededor de la cordillera de Guanacaste.

De igual forma a como ocurría en casos anteriores la desviación estándar y rango intercuartílico (Figuras 4.7 y 4.8) rondan las dos semanas en prácticamente toda la región, con las dispersiones más altas fuera de la región de estudio, aunque abarcando una pequeña zona del cantón de Tilarán.

Con respecto a las tendencias del conjunto ERA5+CHIRPS (Figura 4.9) estas muestran condiciones húmedas en prácticamente toda la región, aunque se aprecia una zona al norte hacia condiciones secas. Sin embargo, solo destaca significativamente al 95% una pequeña zona en el cantón de Abangares en el IELL y DELL (con unos pocos puntos en rejilla de la DES), otra sobre una pequeña parte de Liberia y Santa Cruz en el caso del IELL, para el DELL esta zona es más amplia y abarca casi todos los cantones al sur de Guanacaste, aunque no sobre Liberia, y finalmente una zona en la provincia de Puntarenas ubicada sobre la península de Nicoya en el caso del IELL y DELL.

Al igual que con los datos de CHIRPS y ERA5 la Tabla 4.3 presenta un resumen numérico para las Figuras 4.6, 4.7, 4.8 y 4.9 usando los P25, P50 y P75, permitiendo una visualización clara de los valores medios de cada figura y los umbrales entre los cuales se encuentra cada índice para el 50% de la región.

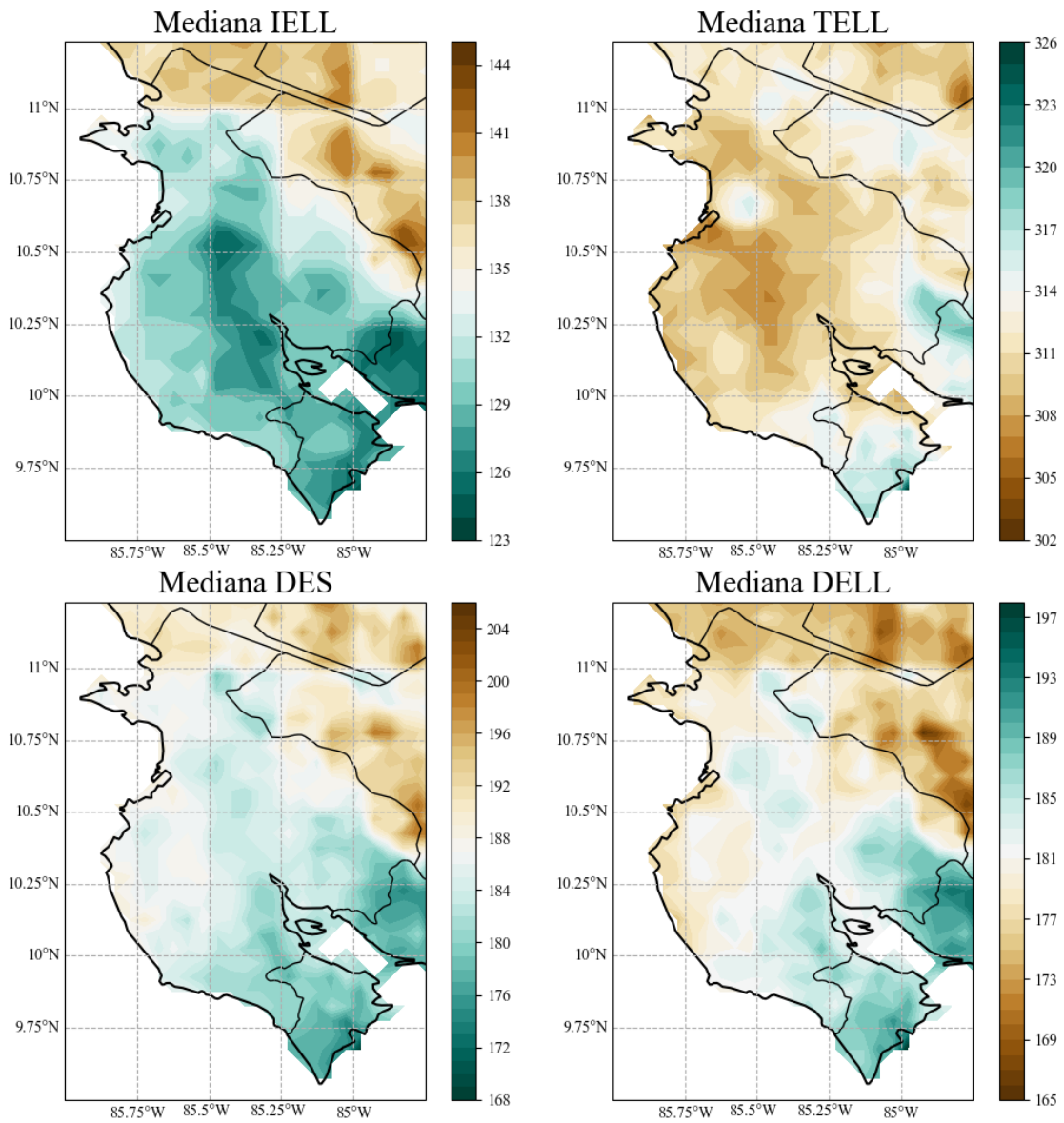


Figura 4.6. Mediana del día juliano del IELL y TELL, y mediana de la cantidad de días de la DES y DELL de la base de datos de ERA5+CHIRPS en la región de Guanacaste para el periodo 1950-2020.

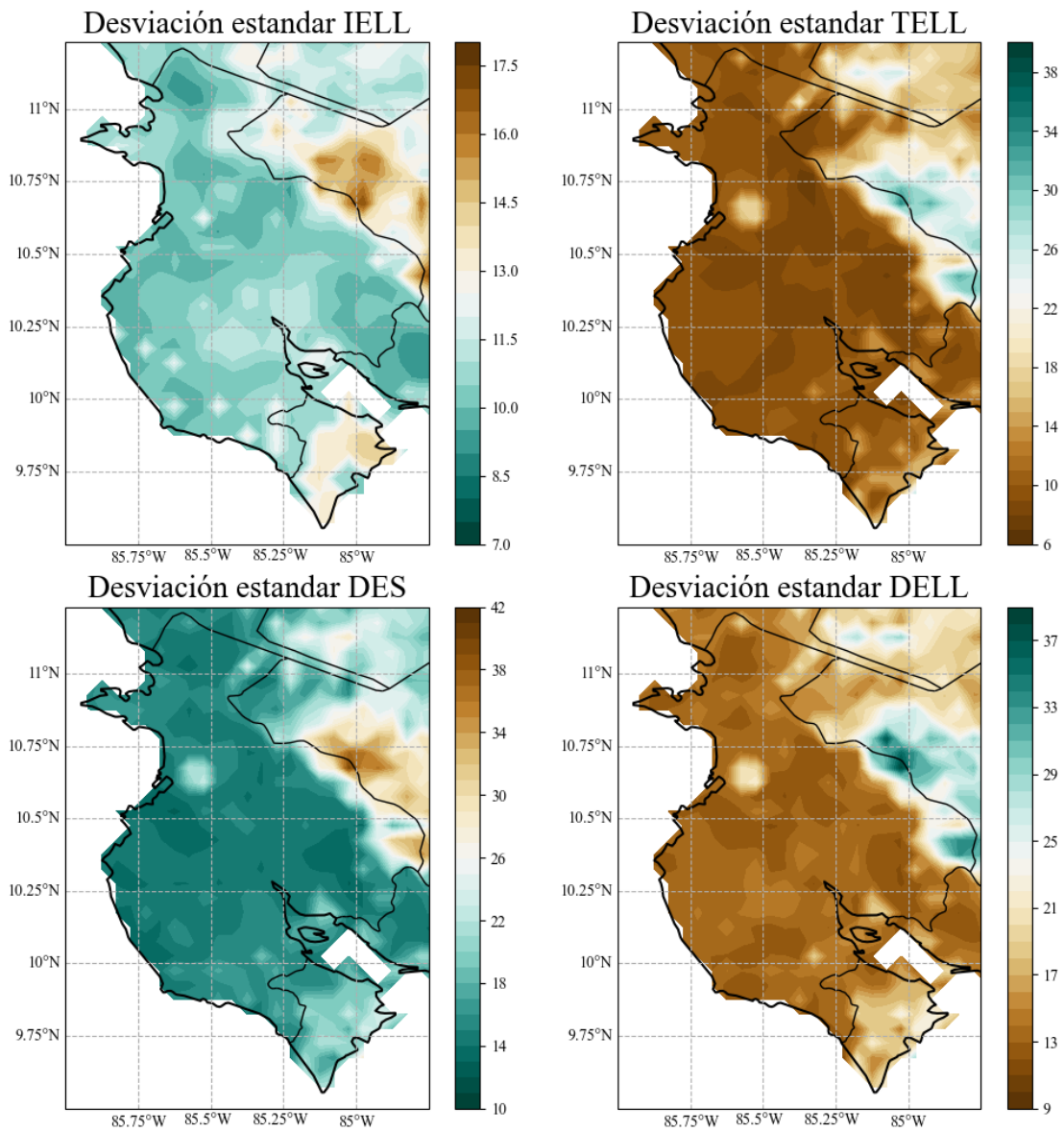


Figura 4.7. Desviación estándar para las series de IELL, TELL, DES y DELL de la base de datos de ERA5+CHIRPS en la región de Guanacaste para el periodo 1950-2020.

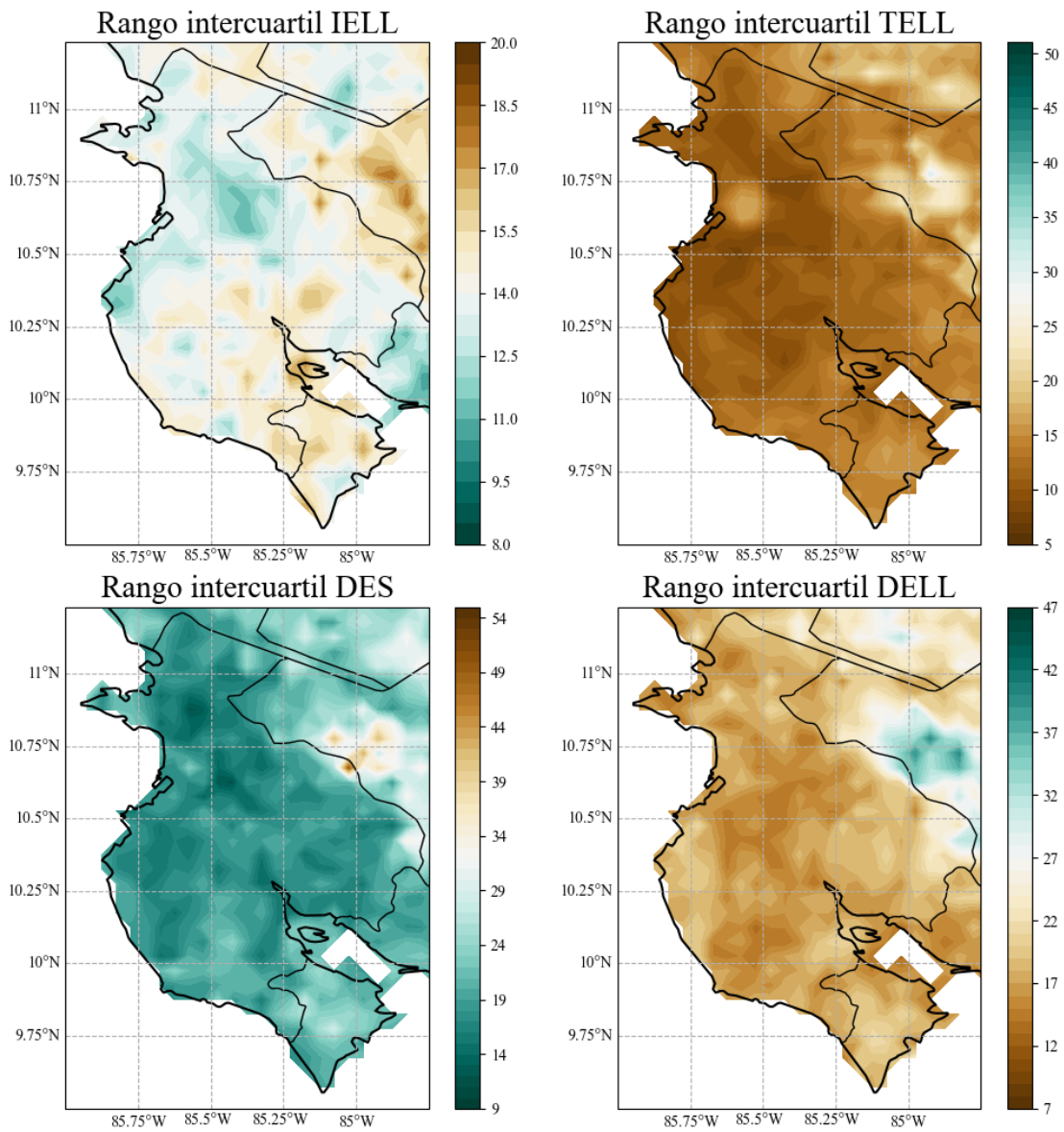


Figura 4.8. Rango Intercuartílico para las series de IELL, TELL, DES y DELL de la base de datos de ERA5+CHIRPS en la región de Guanacaste para el periodo 1950-2020.

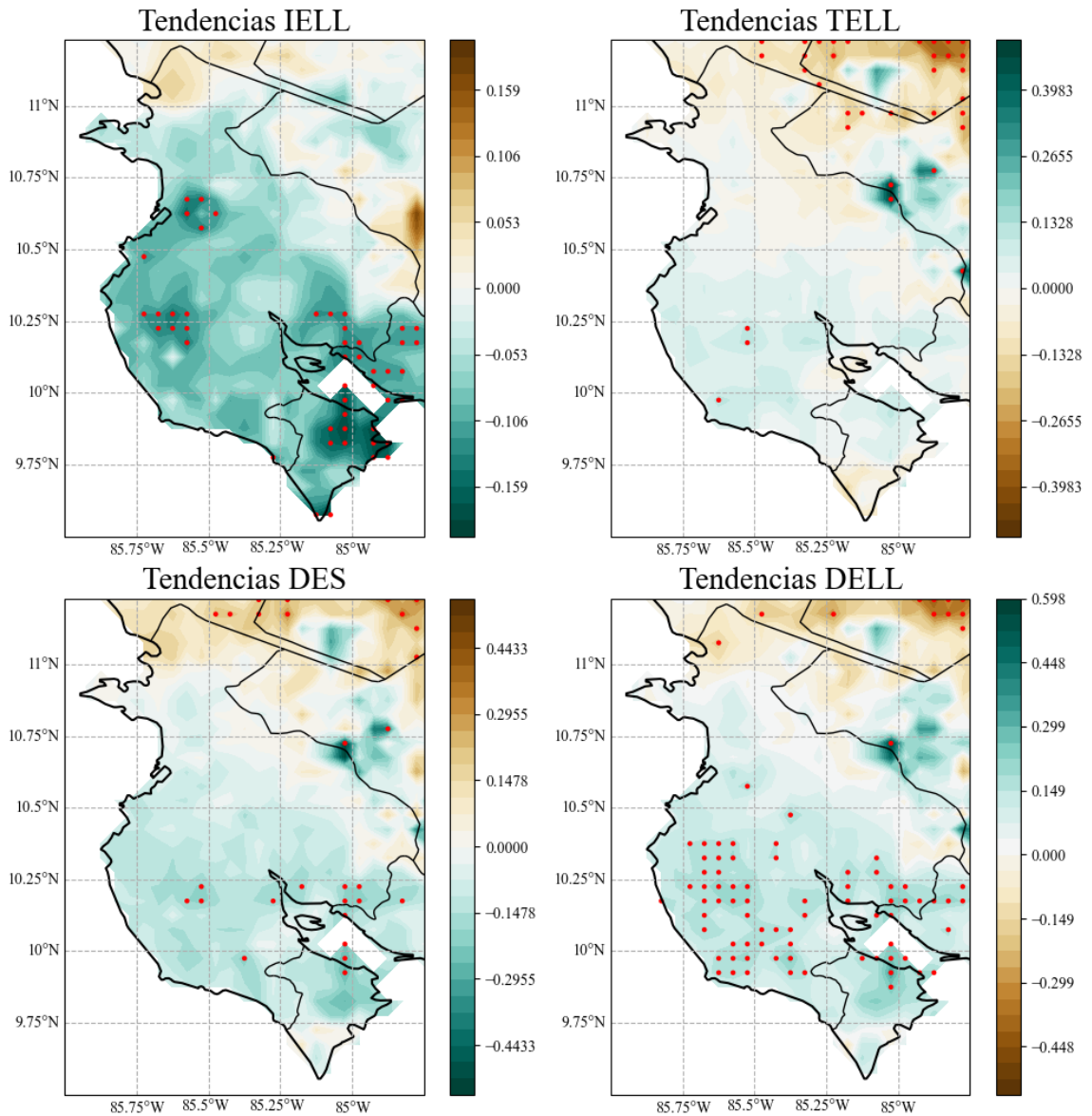


Figura 4.9. Tendencias para las series del IELL, TELL, DES y DELL de la base de datos de ERA5+CHIRPS en la región de Guanacaste para el periodo 1950-2020. Los puntos rojos representan zonas con significancia estadística del 95%.

Parámetros	IELL			TELL			DES			DELL		
	P25	P50	P75	P25	P50	P75	P25	P50	P75	P25	P50	P75
Mediana	129	132	136	310	311	313	183	186	189	176	180	184
Desviación estándar	10,1	10,7	11,8	9,1	9,8	15,4	14,5	15,6	20,4	13,2	14,3	19,0
Rango intercuartil	13,3	14,0	15,0	11,0	13,0	15,0	17,5	19,8	22,5	16,5	18,0	21,0
Tendencias	-0,09	-0,06	-0,01	-0,05	0,00	0,05	-0,12	-0,06	0,04	-0,02	0,08	0,13

Tabla 4.3. Percentiles 25, 50 y 75 para el IELL, TELL, DES y DELL para los estadísticos: mediana, desviación estándar, rango intercuartil y tendencias de ERA5+CHIRPS.

4.3. Influencia de las fuentes de variabilidad climática que afectan el IELL, TELL, DELL y DES en la región con datos de ERA5+CHIRPS.

Al determinar las CP sobre los datos de ERA5+CHIRPS, se encontraron comportamientos similares a los obtenidos para los datos de CHIRPS, la CP1 representa la gran mayoría de la varianza en la región y muestra una alta correlación en la provincia de Guanacaste, mientras la CP2 explica una varianza bastante inferior a la CP1 (Tabla 4.4).

<i>% de variabilidad explicada</i>	<i>IELL</i>	<i>TELL</i>	<i>DES</i>	<i>DELL</i>
<i>CP 1</i>	72.13	45.00	59.85	53.59
<i>CP 2</i>	7.81	11.01	7.84	7.16

Tabla 4.4. Porcentaje de la variabilidad explicada por la CP1 y CP2 asociada al IELL, TELL, DELL y DES.

<i>Índices</i>	<i>Correlación de Pearson CP1</i>	<i>Índices</i>	<i>Correlación de Pearson CP1</i>
<i>ATN vs IELL</i>	-0,17	<i>ATN-N3.4 vs IELL</i>	-0,25
<i>ATN vs TELL</i>	0,04	<i>ATN-N3.4 vs TELL</i>	0,23
<i>ATN vs DES</i>	-0,12	<i>ATN-N3.4 vs DES</i>	-0,31
<i>ATN vs DELL</i>	0,19	<i>ATN-N3.4 vs DELL</i>	0,37
<i>N3.4 vs IELL</i>	0,11	<i>CLLJ vs IELL</i>	0,36
<i>N3.4 vs TELL</i>	-0,25	<i>CLLJ vs TELL</i>	-0,41
<i>N3.4 vs DES</i>	0,23	<i>CLLJ vs DES</i>	0,28
<i>N3.4 vs DELL</i>	-0,30	<i>CLLJ vs DELL</i>	-0,41

Tabla 4.5. Correlación de Pearson entre la CP1 asociada al IELL, TELL, DES y DELL contra los índices ATN, N3.4, ATN-N3.4 y CLLJ en su respectivo periodo. Los valores en negrita representan significancia estadística al 99% y en itálica al 95%.

La Tabla 4.5 muestra las correlaciones de Pearson entre los diferentes índices de variabilidad climática y la CP1 asociada a los índices característicos de estación seca y lluviosa. Se debe destacar el uso del índice ATN en lugar de OMA. Como se puede apreciar no existe correlación significativa entre el ATN y alguno de los cuatro índices, con OMA las correlaciones son incluso inferiores (no mostrado). El índice N3.4 muestra correlaciones negativas significativas contra el TELL y DELL, aunque de menor magnitud a las obtenidas por CHIRPS. El índice ATN-N3.4 muestra buenos resultados (a excepción del TELL) que coinciden a los ya obtenidos por CHIRPS. Mientras que el CLLJ muestra resultados significativos que también coinciden a los de CHIRPS. Estos resultados significativos se pueden relacionar al comportamiento explicado en la sección 3.3 con respecto a CHIRPS.

También se realizó una tabla similar a la 3.11 y la 4.3, pero usando únicamente los datos de ERA5 (no mostrado), en este caso se encontró que no hay correlación significativa entre los índices oceánicos con el IELL, TELL, DES y DELL, aunque el índice del CLLJ si muestra correlaciones significativas con el IELL y TELL. Debido a que las series de CHIRPS involucran más años que los de ERA5 en el conjunto ERA5+CHIRPS, las correlaciones significativas en la Tabla 4.5 probablemente se deben a la contribución de CHIRPS, lo que también indicaría porque son en general inferiores a la Tabla 3.11. Puede que el método de reducción de escala o los mismos datos de ERA5 no son capaces de capturar la variabilidad climática debida a los índices oceánicos. Adicionalmente sería adecuado reducir los datos de ERA5 en el periodo 1981-2020 y realizar comparativas directas entre ERA5 y los índices oceánicos para verificar si las correlaciones se alejan de las obtenidas por CHIRPS, ya que estos representan bien la variabilidad en ese periodo.

		<i>DELL</i>		
		BN (<-5.94)	N	AN (>5.53)
<i>ATN-N34 (M-O)</i> $\chi^2=11.77 (0.98)$	BN (<-0.42)	63(15)***	21(5)**	17(4)***
	N	22(5)**	43(10)*	35(8)
	AN (>0.58)	17(4)***	33(8)	50(12)***
		<i>DELL</i>		
		BN (<-5.94)	N	AN (>5.53)
<i>CLLJ (M-O)</i> $X^2=11.77 (0.98)$	BN (<1.84 ms⁻¹)	13(3)***	33(8)	54(13)***
	N	35(8)	39(9)	26(6)*
	AN (>2.48 ms⁻¹)	54(12)***	25(6)	21(5)**

Tabla 4.6. Tablas de contingencia para la CP1 de la DELL de ERA5+CHIRPS según los índices OMA-N3.4 y CLLJ. Los valores entre paréntesis indican las frecuencias absolutas y los asteriscos representan la significancia estadística al 90% (*), 95% (**) y 99% (***).

Los resultados del análisis de contingencia para los datos de ERA5+CHIRPS (Tabla 4.6) son similares a los respectivos de CHIRPS (sección 3.3), destacando las correlaciones entre la DELL y los índices ATN-N3.4 y CLLJ. Con respecto a la tabla de contingencia entre la DELL y ATN-N3.4 las categorías más probables son (BN, BN), (N, N) y (AN, AN) sugiriendo que un ATN-N3.4 bajo lo normal (arriba de lo normal) es más probable que propicie una DELL más corta (larga), y un ATN-N3.4 normal implica una DELL dentro lo normal. Mientras la tabla de contingencia entre la DELL y CLLJ muestra un comportamiento contrario donde las categorías más probables son (BN, AN), (N, N) y (AN, BN), esto implica que un CLLJ bajo lo normal (arriba de lo normal) propicia una DELL más larga (corta), y condiciones normales del CLLJ sugieren DELL normales.

Capítulo 5

Conclusiones y recomendaciones

5.1. Conclusiones.

La alta resolución de los datos de CHIRPS y ERA5 con reducción de escala usados en la provincia de Guanacaste, permitieron caracterizar la época seca y lluviosa determinando las fechas del IELL, el TELL, la DES y la DELL. Donde los datos de CHIRPS demostraron representar adecuadamente la precipitación en Guanacaste al compararse con observaciones. Además, a pesar de la diferencia en los periodos de CHIRPS y ERA5, se obtuvieron distribuciones espaciales similares tanto para el IELL, TELL, DES y DELL como en las precipitaciones medias, indicando que los datos de ERA5 con reducción de escala se adecuan bien a la región al compararse contra CHIRPS en términos climatológicos.

En los tres conjuntos de datos usados (CHIRPS, ERA5 y CHIRPS+ERA5) sobre Guanacaste, se encontró que las fechas del IELL ocurren más temprano en cantones centrales de Guanacaste alrededor de la desembocadura del Tempisque, donde las fechas son cada vez más tardías al desplazarse hacia regiones costeras o limítrofes con Alajuela, alcanzado los IELL más tardíos al norte de la provincia. Por su parte las fechas del TELL se distribuyen muy uniformemente, aunque parecen presentar valores más tardíos al sur y valores más tempranos en la zona central y norte de Guanacaste, sin embargo, no muestra núcleos de fechas tempranas o tardías tan marcadas como el IELL. Con respecto a la DES y DELL, su comportamiento es bastante uniforme en gran parte de la región con las condiciones más secas al norte y las más húmedas al sur de la península de Nicoya y al área limítrofe entre Guanacaste y Puntarenas, además el periodo entre ambas duraciones es bastante simétrico, donde aproximadamente una mitad del año presenta estación seca y la otra estación lluviosa, aunque esto varía un poco en las regiones más secas y húmedas de la provincia.

Trabajos previos han logrado caracterizar el IELL y TELL en la región encontrando una dependencia latitudinal (Alfaro, 2002; Díaz, 2019; Gramzow & Henry, 1972), aunque esto se ha realizado en regiones muy extensas que abarcan usualmente todo América Central. En esta investigación gracias a la alta resolución espacial de los datos, se aprecia que entre las zonas más húmedas y secas de la provincia de Guanacaste pueden existir diferencias

de hasta 20 días en la ocurrencia de los eventos, sin embargo, al tratarse de una región tan pequeña no se puede asegurar que ese comportamiento se mantenga en el resto de América Central para atribuir alguna dependencia latitudinal al IELL, TELL, DES o DELL.

Los cuatro índices muestran tendencias hacia condiciones húmedas en los tres conjuntos de datos, lo que indica que se esperan IELL más tempranos, TELL más tardíos, DES más cortas y DELL más largas, sin embargo, las regiones estadísticamente significativas no coinciden espacialmente en las tres bases de datos, lo que se podría atribuir a la diferencia en los periodos entre ERA5 y CHIRPS.

Con el análisis de CP se obtienen varias correlaciones significativas entre los índices de variabilidad climática y la CP1 asociada al IELL, TELL, DES y DELL en los datos de CHIRPS. El índice OMA muestra una correlación positiva significativa con IELL, la DES y la DELL, mientras que el índice N3.4 presenta correlaciones negativas significativas con el TELL y DELL. Sin embargo, las correlaciones más significativas se obtienen con la combinación de ambos índices OMA-N3.4. Los resultados indican que un calentamiento (enfriamiento) relativo del Atlántico con respecto al Pacífico Ecuatorial tiende a favorecer IELL más tempranos (tardíos), TELL más tardíos (tempranos), DES más cortas (largas) y DELL más largas (cortas). Mientras que el índice CLLJ presenta correlaciones inversas, donde un CLLJ más intenso (débil) favorece IELL más tardíos (tempranos), TELL más tempranos (tardíos), DES más largas (cortas) y DELL más cortas (largas). Todo esto posiblemente ligado al movimiento latitudinal de la ZCIT y los eventos convectivos en la región influenciados por las condiciones del océano Atlántico, océano Pacífico y la intensidad del CLLJ.

Por su parte la correlación entre la CP1 asociada al IELL, TELL, DES y DELL del conjunto de datos ERA5+CHIRPS y los índices de variabilidad climática, muestra resultados similares a los de CHIRPS, aunque con menor significancia en los índices oceánicos, esto posiblemente se deba a que por separado los datos de ERA5 no presentan correlación contra los índices oceánicos. De modo que las correlaciones significativas del conjunto de datos ERA5+CHIRPS se debe a la contribución de los datos de CHIRPS, esto podría indicar que ERA5 o el método de reducción de escala aplicado no son capaces de representar la variabilidad asociada a los océanos, aunque si la del CLLJ (al menos para el IELL y

TELL). Sin embargo, se deben tener en consideración los alcances de ERA5, este conjunto tenía originalmente una resolución alta, razón por la cual se aplicó el método de CA sobre los mismos y Guanacaste es una región con cierta complejidad orográfica debido a su diversidad en suelos y a la presencia de ciertas zonas montañosas en la provincia, de modo que la interacción de estos factores y las condiciones atmosféricas pueden ser más complejas y no capturadas por el reanálisis o el método de CA.

Finalmente, los resultados obtenidos tanto en la parte de caracterización de la región como en la parte de variabilidad climática aportan información muy importante sobre la distribución del IELL, TELL, DELL y DES y como estos son modulados por ENOS, OMA y el CLLJ. Es necesario compartir estos hallazgos con los entes encargados en la región, ya que el conocimiento sobre el IELL, TELL, DELL y DES impacta actividades productivas como la agricultura, ganadería y generación eléctrica, además de la disponibilidad hídrica para la población, de modo que tal información podría ayudar en la gestión y toma de decisiones referentes al recurso hídrico en la región.

5.2. Recomendaciones.

Para futuras investigaciones que trabajen con la metodología de Bombardi modificada (Ureña-Mora & Alfaro, 2022) se recomienda la utilización de algún criterio que pueda tratar las precipitaciones ligadas a eventos invernales durante las fechas del TELL, en esta investigación se notó que los criterios usados no funcionaron de manera correcta en las regiones más al oeste que abarcaban poco territorio en la región de estudio. Una alternativa puede ser revisar de manera manual con la rutina “acumprecdev.sce” de la metodología de Ureña y Alfaro (2020) los años que presenten condiciones atípicas y que el investigador sea quien seleccione correctamente las fechas de ocurrencias del TELL. En este trabajo esa revisión se realizó únicamente con los datos de estaciones meteorológicas y no con CHIRPS ni ERA5 por lo demandante de la revisión, pero sería recomendable llevar a cabo la tarea.

Dado que el movimiento latitudinal de la ZCIT es uno de los aspectos más importantes en el desarrollo de los eventos convectivos ligados a la estación lluviosa de la vertiente Pacífico del país, se estudiar en mayor profundidad como la ZCIT se relacionado con los aspectos del IELL, TELL, DELL y DES determinados en este trabajo. En los trabajos de

Quirós & Hidalgo (2016a) y Quirós & Hidalgo (2016b) se determinó un índice para estudiar el momento de la ZCIT, el cual se puede aplicar en futuras investigaciones para estudiar como afecta esta a los aspectos del IELL, TELL, DELL y DES. Aunado a lo anterior se recomienda investigar como otros procesos que influyen en las precipitaciones de la región pueden modular los aspectos anteriores de estación seca y lluviosa.

También se recomienda alguna futura investigación que pueda desarrollar una comparativa más completa sobre los datos de ERA5 con reducción de escala con el método de CA. En esta investigación se obtuvieron buenos resultados al trabajar con CHIRPS, mientras que ERA5 mostró buenos resultados en las climatologías, pero no en las correlaciones de variabilidad climática contra índices oceánicos, por lo que se debería trabajar con datos de ERA5 que abarquen un periodo común con los datos de estaciones meteorológicas y CHIRPS.

Lo anterior permitiría llegar a conclusiones más concisas con parámetros como las tendencias y realizar una comparativa directa entre las medias, las desviaciones estándar y los rangos intercuartílicos de ERA5 y CHIRPS e incluso las estaciones meteorológicas y no solo con las climatologías.

Por último, también permitiría comparar los datos de ERA5 con reducción de escala contra fuentes de variabilidad climática en el mismo periodo de 1981-2020 para verificar si estos logran capturar la variabilidad climática asociada a los océanos como hace CHIRPS, ya que no fue posible determinar si ERA5 no explica de manera eficiente la variabilidad oceánica de la región debido a la propia base de datos, al método de reducción de escala aplicado de CA o al periodo utilizado.

Referencias.

- Alfaro, E. (2002). Some Characteristics of the Annual Precipitation Cycle in Central America and their Relationships with its Surrounding Tropical Oceans. *Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos*, 9(2), 88-103.
- Alfaro, E. (2007). Escenarios climáticos para temporadas con alto y bajo número de huracanes en el Atlántico. *Revista de Climatología*, 7, 1-13.
- Alfaro, E. (2014). Caracterización del “veranillo” en dos cuencas de la vertiente del Pacífico de Costa Rica, América Central. *Revista de Biología Tropical*, 6(4), 1-15. <https://doi.org/10.15517/rbt.v62i4.20010>
- Alfaro, E., & Cid, L. (1999). Análisis de las anomalías en el inicio y el término de la estación lluviosa en Centroamérica y su relación con los océanos Pacífico y Atlántico Tropical. *Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos*, 6(1), 1-13.
- Alfaro, E., Cid, L., & Enfield, D. (1998). Relaciones entre el inicio y el término de la estación lluviosa en Centroamérica y los océanos Pacífico y Atlántico tropical. *Investigaciones marinas*, 26, 59-69. <https://doi.org/10.4067/S0717-71781998002600006>
- Alfaro, E., & Hidalgo, H. (2021). Inicio de la temporada de lluvias en América Central. *Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos*, 20(1), 16-28.
- Alfaro, E., & Hidalgo, H. G. (2017). Propuesta metodológica para la predicción climática estacional del veranillo en la cuenca del río Tempisque en el Pacífico Norte de Costa Rica. *Revista Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos*, 16(1), 62-74.
- Alfaro, E., Soley, F. J., & Enfield, D. (2004). *Uso de una Tabla de Contingencia para Aplicaciones Climáticas (Use of a Contingency Table for Climatic Applications)*. ESPOL y FUNDESPOL. <http://www.kerwa.ucr.ac.cr/handle/10669/76751>
- Alfaro, E., & Soley, J. (2009). Descripción de dos métodos de rellenado de datos ausentes en series de tiempo meteorológicas. *Revista de Matemática: Teoría y Aplicaciones*, 16(1), 60-75. <https://doi.org/10.15517/rmta.v16i1.1419>
- Amador, J. A. (1998). A Climate Feature of the Tropical Americas: The Trade Wind Easterly Jet. *Revista Tópicos meteorológicos y oceanográficos*, 5(2), 91-102.
- Amador, J. A. (2008). The Intra-Americas Sea low-level jet: Overview and future research. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1146, 153-188. <https://doi.org/10.1196/annals.1446.012>
- Amador, J. A., Alfaro, E. J., Rivera, E. R., & Calderón, B. (2010). Climatic Features and Their Relationship with Tropical Cyclones Over the Intra-Americas Seas. En J. B. Elsner, R. E. Hodges, J. C. Malmstadt, & K. N. Scheitlin (Eds.), *Hurricanes and Climate Change: Volume 2* (pp. 149-173). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-90-481-9510-7_9

- Bombardi, R. J., Pegion, K. V., Kinter, J. L., Cash, B. A., & Adams, J. M. (2017). Sub-seasonal Predictability of the Onset and Demise of the Rainy Season over Monsoonal Regions. *Frontiers in Earth Science*, 5. <https://doi.org/10.3389/feart.2017.00014>
- Calvo, O. D., Quesada, L. E., Hidalgo, H. G., & Gotlieb, Y. (2018). Impactos de las sequías en el sector agropecuario del Corredor Seco Centroamericano. *Agronomía Mesoamericana*, 29(3), 695-709. <https://doi.org/10.15517/ma.v29i3.30828>
- Centella, A., Bezanilla-Morlot, A., Taylor, M. A., Herrera, D. A., Martínez-Castro, D., Gouirand, I., Sierra-Lorenzo, M., Vichot-Llano, A., Stephenson, T., Fonseca, C., Campbell, J., & Alpizar, M. (2020). Evaluation of Sixteen Gridded Precipitation Datasets over the Caribbean Region Using Gauge Observations. *Atmosphere*, 11(12), 1334. <https://doi.org/10.3390/atmos11121334>
- Díaz, S. G. (2019). *Inicio de las lluvias de verano en las costas del Pacífico Mesoamericano*. [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México]. <https://repositorio.unam.mx/contenidos/3466119>
- Durán-Quesada, A. M., Sorí, R., Ordoñez, P., & Gimeno, L. (2020). Climate Perspectives in the Intra-Americas Seas. *Atmosphere*, 11(9), 959. <https://doi.org/10.3390/atmos11090959>
- Enfield, D., & Alfaro, E. (1999). The Dependence of Caribbean Rainfall on the Interaction of the Tropical Atlantic and Pacific Oceans. *Journal of Climate*, 12(7), 2093-2103. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1999\)012<2093:TDOCRO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1999)012<2093:TDOCRO>2.0.CO;2)
- Fallas, 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, 61-79.
- Foli, B. A. K., Appeaning Addo, K., Ansong, J. K., & Wiafe, G. (2021). Evaluation of ECMWF and NCEP Reanalysis Wind Fields for Long-Term Historical Analysis and Ocean Wave Modelling in West Africa. *Remote Sensing in Earth Systems Sciences*. <https://doi.org/10.1007/s41976-021-00052-3>
- 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(1), 1-21. <https://doi.org/10.1038/sdata.2015.66>
- García-Franco, J., Chadwick, R., Gray, L., Osprey, S., & Adams, D. (2022). *Revisiting mechanisms of the Mesoamerican Midsummer drought*. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1351433/v1>
- Gotlieb, Y., Pérez, P. M., Hidalgo, H. G., & Alfaro, E. (2019). The Central American Dry Corridor: A Consensus Statement and its Background. *Revista Yu'am*, 3(5), 42-51.

Gouirand, I., Moron, V., & Sing, B. (2020). Seasonal atmospheric transitions in the Caribbean basin and Central America. *Climate Dynamics*, 55(7), 1809-1828. <https://doi.org/10.1007/s00382-020-05356-6>

Gramzow, R. H., & Henry, W. K. (1972). The Rainy Pentads of Central America. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 11(4), 637-642. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1972\)011<0637:TRPOCA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1972)011<0637:TRPOCA>2.0.CO;2)

Gray, C. (1993). *Regional meteorology and Hurricanes*. In: Maul, G. (Ed.) *Climate Change in the Intra Americans Sea*. Edward Arnold, 87-99.

Harris, C. R., Millman, K. J., van der Walt, S. J., Gommers, R., Virtanen, P., Cournapeau, D., Wieser, E., Taylor, J., Berg, S., Smith, N. J., Kern, R., Picus, M., Hoyer, S., van Kerkwijk, M. H., Brett, M., Haldane, A., del Río, J. F., Wiebe, M., Peterson, P., ... Oliphant, T. E. (2020). Array programming with NumPy. *Nature*, 585(7825), 357-362. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2649-2>

Hernández, K. M., & Fernández, W. (2015). Estudio de la evaporación para el cálculo del inicio y conclusión de la época seca y lluviosa en Costa Rica. *Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos*, 14(1), 18-26.

Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Abdalla, S., Abellan, X., Balsamo, G., Bechtold, P., Biavati, G., Bidlot, J., Bonavita, M., ... Thépaut, J.-N. (2020). The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146(730), 1999-2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>

Hidalgo, H. G., Alfaro, E., Amador, J. A., & Bastidas, Á. (2019). Precursors of quasi-decadal dry-spells in the Central America Dry Corridor. *Climate Dynamics*, 53(3), 1307-1322. <https://doi.org/10.1007/s00382-019-04638-y>

Hidalgo, H. G., Dettinger, M., & Cayan, D. (2008). *Downscaling With Constructed Analogues: Daily Precipitation and Temperature Fields Over The United States*. California Energy Commission PIER Final Project Report CEC-500-2007-123. <https://www.semanticscholar.org/paper/Downscaling-With-Constructed-Analogues%3A-Daily-and-Le%C3%B3n-Dettinger/2ccaf3294385bc206b751c466b4d6e2ceecf70af>

Hidalgo, H. G., Durán-Quesada, A. M., Amador, J. A., & Alfaro, E. (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, Physical Geography*, 97(1), 41-59. <https://doi.org/10.1111/geoa.12085>

Instituto Costarricense de Electricidad [ICE]. (2019). *Plan de Expansión de la Generación Eléctrica*. San José, Costa Rica. <https://www.grupoice.com/wps/portal/ICE/electricidad/proyectos-energeticos/plan-de-expansion>

Instituto Meteorológico Nacional [IMN]. (2008). *Segunda Comunicación Nacional de Costa Rica. Estudio sobre Clima, Variabilidad y Cambio Climático en Costa Rica*. San

José, Costa Rica. <http://cglobal.imn.ac.cr/index.php/publications/el-clima-su-variabilidad-y-cambio-climatico-en-costa-rica/>

Knoben, W. J. M., Freer, J. E., & Woods, R. A. (2019). Technical note: Inherent benchmark or not? Comparing Nash–Sutcliffe and Kling–Gupta efficiency scores. *Hydrology and Earth System Sciences*, 23(10), 4323-4331. <https://doi.org/10.5194/hess-23-4323-2019>

Maldonado, T., Alfaro, E., Fallas, B., & Alvarado, L. (2013). Seasonal prediction of extreme precipitation events and frequency of rainy days over Costa Rica, Central America, using Canonical Correlation Analysis. *Advances in Geosciences*, 33, 41-52. <https://doi.org/doi.org/10.5194/adgeo-33-41-2013>

Maldonado, T., Alfaro, E., & Hidalgo, H. G. (2018). A review of the main drivers and variability of Central America's Climate and seasonal forecast systems. *Revista de Biología Tropical*, 66(1-1), S153-S175. <https://doi.org/10.15517/rbt.v66i1.33294>

Maldonado, T., Alfaro, E., Rutgersson, A., & Amador, J. A. (2017). The early rainy season in Central America: The role of the tropical North Atlantic SSTs. *International Journal of Climatology*, 37(9), 3731-3742. <https://doi.org/10.1002/joc.4958>

Maldonado, T., Rutgersson, A., Alfaro, E., Amador, J. A., & Claremar, B. (2016). Interannual variability of the midsummer drought in Central America and the connection with sea surface temperatures. *Advances in Geosciences*, 42, 35-50. <https://doi.org/10.5194/adgeo-42-35-2016>

Maldonado, T., Rutgersson, A., Amador, J., Alfaro, E., & Claremar, B. (2016). Variability of the Caribbean low-level jet during boreal winter: Large-scale forcings. *International Journal of Climatology*, 36(4), 1954-1969. <https://doi.org/10.1002/joc.4472>

Martinez, C., Muñoz, Á. G., Goddard, L., Kushnir, Y., & Ting, M. (2022). An adaptive approach to quantify weather-within-climate rainfall characteristics. *Climate Dynamics*. <https://doi.org/10.1007/s00382-022-06193-5>

McCuen, R. H., Knight, Z., & Cutter, A. G. (2006). Evaluation of the Nash–Sutcliffe Efficiency Index. *Journal of Hydrologic Engineering*, 11(6), 597-602. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0699\(2006\)11:6\(597\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(2006)11:6(597))

McKinney, W. (2010). *Data Structures for Statistical Computing in Python*. 56-61. <https://doi.org/10.25080/Majora-92bf1922-00a>

Ministerio de Agricultura y Ganadería [MAG]. (2020). *Programación Región de Desarrollo Chorotega 2020*. Liberia, Guanacaste. <http://www.mag.go.cr/regiones/chorotega/Caracterizacion-REGION-DE-DESARROLLO-CHOROTEGA.pdf>

Muñoz, A. C., Fernández, W., Gutierrez, J. A., & Zarate, E. (2002). Variación estacional del viento en Costa Rica y su relación con los regímenes de lluvia. *Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos*, 9(1), 1-13.

Nakaegawa, T., Arakawa, O., & Kamiguchi, K. (2015). Investigation of Climatological Onset and Withdrawal of the Rainy Season in Panama Based on a Daily Gridded Precipitation Dataset with a High Horizontal Resolution. *Journal of Climate*, 28(7), 2745-2763. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00243.1>

Orrego León, E. A., Hernández Quevedo, M. P., & Gómez Jordán, R. del C. (2021). Variabilidad del inicio, final y duración de la época lluviosa en Guatemala y su tendencia. *Revista Mesoamericana de Biodiversidad y Cambio Climático–Yu'am*, 5(1), 4-24.

Quesada, L. E., Calvo-Solano, O. D., Hidalgo, H. G., Pérez-Briceño, P. M., & Alfaro, E. (2019). Dynamical delimitation of the Central American Dry Corridor (CADC) using drought indices and aridity values. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 43(5), 627-642. <https://doi.org/10.1177/0309133319860224>

Quesada-Hernandez, L. (2019). *Respuesta de la hidrología superficial de la cuenca del río Tempisque a la variabilidad climática y cambio de cobertura de la tierra*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.22256.20485>

Quirós, E., & Hidalgo, H. G. (2016a). Variabilidad y conexiones climáticas de la zona de convergencia intertropical del Pacífico Este. *Revista Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos*, 15(1), 21-36.

Quirós, E., & Hidalgo, H. G. (2016b). Interacción de la Zona de Convergencia Intertropical del Pacífico Este con Sistemas tropicales. *Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos*, 15(2), 33-47.

Ramírez, P. (1983). *Estudio Meteorológico de los Veranillos en Costa Rica* (Nota de Investigación N.º 5). Instituto Meteorológico Nacional, Ministerio de Agricultura y Ganadería. <https://www.imn.ac.cr/documents/10179/20909/Estudio+sobre+veranillos+en+Costa+Rica>

Rivera, P., Ochoa, W., González, B., & Salguero, M. (2019). Inicio y término de la época lluviosa (IELL, TELL) en los estratos de la zona cañera de Guatemala. *Tikalía*, 37(2), 39-58.

Trenberth, K. E., & Stepaniak, D. P. (2001). Indices of El Niño Evolution. *Journal of Climate*, 14(8), 1697-1701. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2001\)014<1697:LIOENO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2001)014<1697:LIOENO>2.0.CO;2)

Ureña, P., & Alfaro, E. (2020). *Rutinas para la detección del inicio y final de la estación lluviosa utilizando el cálculo de desviación de la precipitación acumulada del promedio diario anual*. Universidad de Costa Rica.

Ureña, P., Alfaro, E., & Soley, F. J. (2016). *Propuestas metodológicas para el rellenado de datos ausentes en series de tiempo geofísicas. Guía Práctica de uso*. Documento Técnico. Centro de Investigaciones Geofísicas, Escuela de Física y Centro de Investigaciones en Ciencias del Mar y Limnología, Universidad de Costa Rica. <http://www.kerwa.ucr.ac.cr/handle/10669/28888>

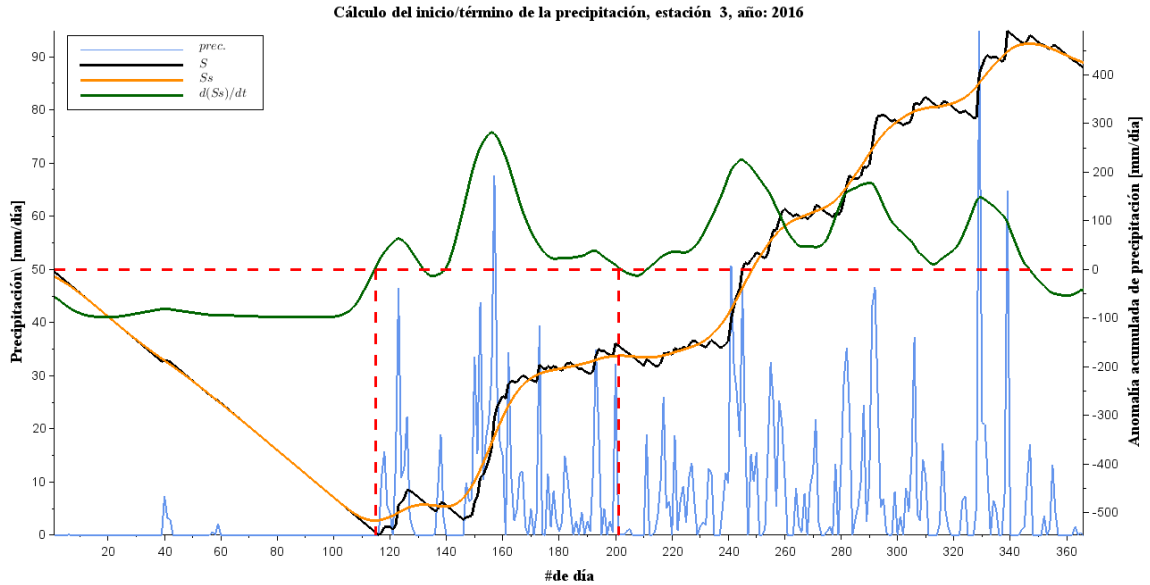
Ureña-Mora, P., & Alfaro, E. (2022). Comparación de métodos de detección del inicio y término de la estación lluviosa basado en datos de precipitación (Comparison of detection methods for the onset and demise of the rainy season based on precipitation). *Revista Tecnológica en marcha. En prensa.*

Wilby, R., & Dawson, C. (2007). SDSM 4.2 – A Decision Support Tool for the Assessment of Regional Climate Change Impacts. *Nota técnica, UK.* <https://sdsm.org.uk/SDSM-Manual.pdf>

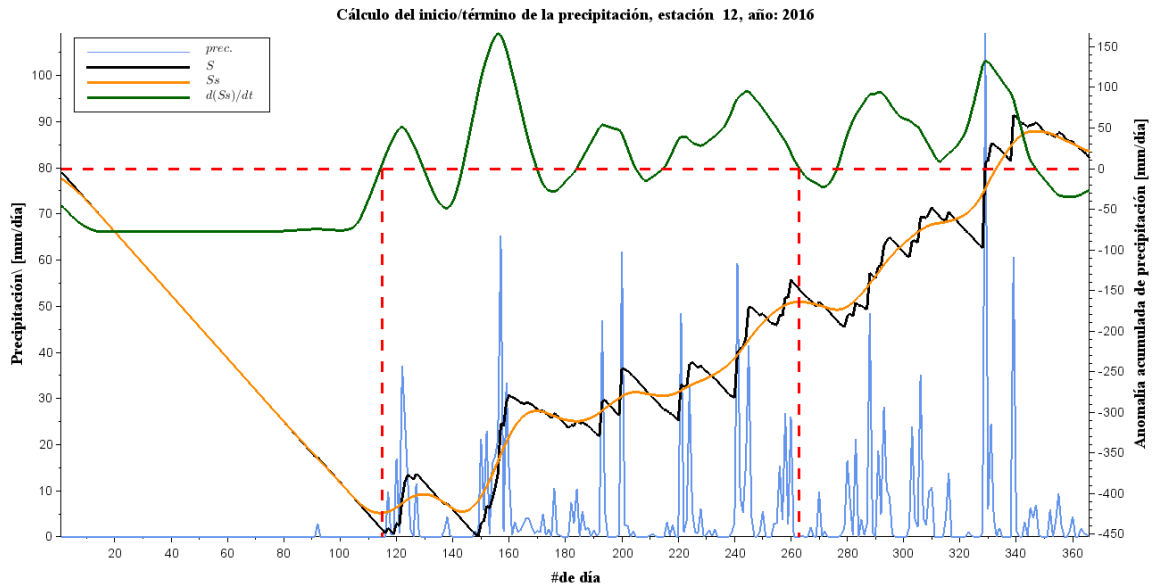
Wilks, D. S. (2019). *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences* (4.^a ed.). Elsevier Science.

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(2), 1295-1320. <https://doi.org/10.5194/hess-21-1295-2017>

Anexos.



Anexo 1. Caso donde la metodología de Bombardi modificada obtiene un TELL incorrecto debido a que es muy temprano, este punto de inflexión posiblemente se asocia al veranillo, y no se detecta el punto de inflexión cerca del día 350, ya que este es posterior al 30 de noviembre.



Anexo 2. Caso donde la metodología de Bombardi modificada obtiene un TELL en el cual existen precipitaciones considerables posteriores a la fecha del TELL hacia final de año.