

**Universidad Andina Simón Bolívar**

**Sede Ecuador**

**Área de Ambiente y Sustentabilidad**

Maestría de Investigación en Cambio Climático, Sustentabilidad y Desarrollo

**Caracterización espaciotemporal de las sequías meteorológicas y su  
relación con el fenómeno de El Niño en la Provincia de García Rovira,  
Santander, Colombia (1979-2024)**

Hernán Darío Jaimes Calderón

Tutor: Santiago Patricio Bonilla Bedoya

Quito, 2026





## Cláusula de cesión de derecho de publicación

Yo, Hernán Darío Jaimes Calderón, autor del trabajo intitulado “Caracterización espacio-temporal de las sequías meteorológicas y su relación con el fenómeno de El Niño en la Provincia de García Rovira, Santander, Colombia (1979-2024)”, mediante el presente documento dejo constancia de que la obra es de mi exclusiva autoría y producción, que la he elaborado para cumplir con uno de los requisitos previos para la obtención del título de Magíster de Investigación en Cambio Climático, Sustentabilidad y Desarrollo en la Universidad Andina Simón Bolívar, Sede Ecuador.

1. Cedo a la Universidad Andina Simón Bolívar, Sede Ecuador, los derechos exclusivos de reproducción, comunicación pública, distribución y divulgación, durante 24 meses a partir de mi graduación, pudiendo por lo tanto la Universidad, utilizar y usar esta obra por cualquier medio conocido o por conocer, siempre y cuando no se lo haga para obtener beneficio económico. Esta autorización incluye la reproducción total o parcial en los formatos virtual, electrónico, digital, óptico, como usos en red local y en internet.
2. Declaro que en caso de presentarse cualquier reclamación de parte de terceros respecto de los derechos de autor/a de la obra antes referida, yo asumiré toda responsabilidad frente a terceros y a la Universidad.
3. En esta fecha entrego a la Secretaría General, el ejemplar respectivo y sus anexos en formato impreso y digital o electrónico.

01 de abril de 2026

Firma:  \_\_\_\_\_



## Resumen

La provincia de García Rovira presenta alta variabilidad en su régimen hídrico, siendo especialmente susceptible a la ocurrencia de sequías meteorológicas. Su economía, de carácter agropecuario, depende directamente de la disponibilidad hídrica, lo que la convierte en un territorio vulnerable frente a estos eventos. Sin embargo, la región carece de estudios climatológicos detallados que faciliten una planificación adecuada frente a la variabilidad y el cambio climático. En este contexto, el objetivo de la investigación fue caracterizar la variabilidad espacio-temporal de las sequías meteorológicas en la provincia de García Rovira (Santander, Colombia) y evaluar su relación con el fenómeno El Niño-Oscilación del Sur (ENSO) durante el período 1979-2024.

Se emplearon registros de precipitación mensual de 21 estaciones meteorológicas del IDEAM. La metodología incluyó: la evaluación del porcentaje de datos faltantes ( $\leq 10\%$ ), análisis de consistencia estableciendo un umbral del 99,997 % de probabilidad de ocurrencia, mediante distribución Gamma y pruebas de bondad de ajuste (Anderson-Darling, Lilliefors y Shapiro-Wilk), evaluación de tendencias con Mann-Kendall y correlaciones de Pearson. Los valores ausentes se estimaron por regresión múltiple o estadística descriptiva. La climatología mensual se determinó mediante análisis de tendencia central y dispersión, y su distribución espacial mediante interpolación Kriging. Las sequías meteorológicas se identificaron con el Índice Estandarizado de Precipitación (SPI-1), caracterizando su duración, intensidad, magnitud, frecuencia y distribución espacial. Finalmente, se analizó su relación con el fenómeno de El Niño aplicando el coeficiente de correlación de Pearson entre los índices SPI y ONI.

Los resultados evidencian alta variabilidad de la precipitación tanto a escala estacional como interanual (CV promedio del 49,11 %), caracterizada por un régimen bimodal y un gradiente occidente-oriente influenciado por el desplazamiento de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT). Las sequías meteorológicas son recurrentes y espacialmente diferenciadas: los eventos de mayor intensidad y magnitud se concentran en el norte y occidente, mientras que la mayor frecuencia se presenta en el sur. No se encontró relación estadísticamente significativa entre El Niño y las sequías en la región.

Palabras clave: Sequia, precipitación, climatología, variabilidad, estadística, correlación, espacial, cambio climático, bimodal, SPI, ONI, ENSO, IDEAM, ZCIT



Este trabajo está dedicado de manera especial a Evangelina Ramírez Abril y Timoleón Calderón Vargas, cuyo intelecto y visión ecológica han marcado profundamente mi formación personal y profesional. Su legado orientó mi mirada hacia el uso sostenible de los recursos naturales desde las bases comunitarias y fortaleció mi compromiso para enfrentar los grandes desafíos sociales y ecológicos de nuestro tiempo con conciencia y determinación como son: el cambio climático, el deterioro ambiental, la salud, la migración, el hambre, la paz entre otros.

También dedico este trabajo a toda la comunidad de la provincia de García Rovira, tierra que me vio nacer y fuente de inspiración para realizar esta investigación, con la convicción de su utilidad en los diferentes procesos que se desarrollan en la provincia, especialmente en el ámbito rural, donde el sector agropecuario se ve altamente afectado por la presencia de sequías.



## Agradecimientos

Agradezco primeramente a Dios por la vida y permitirme consolidar este logro tan importante para el proyecto de vida que me he trazado.

Agradezco profundamente, y de manera especial, a mi familia: a mi abuela Evangelina Ramírez; a mi madre Rosalba Calderón; a mi padre Pedro Jesús; a mi tío Luis Antonio Calderón, a mi esposa Mónica Lizeth; a mis hijos Carlos Gerard y Monserrat Ariana; a mis hermanos César Leonardo, Karol Tatiana y Karen Julieth, por su apoyo y motivación incondicional en todo momento.

Extiendo un especial agradecimiento al profesor Rony Alexander Ortiz Aponte, a quien considero mi maestro. Su apoyo en este proceso académico ha sido fundamental. Valoro profundamente su visión, intelectualidad y amistad.

Expreso un agradecimiento especial a la Universidad Andina Simón Bolívar (UASB) por la calidad del programa, por el apoyo financiero brindado, el cual fue fundamental para alcanzar este logro académico e intelectual. Asimismo, agradezco a la excelente planta de docentes y al personal administrativo, quienes siempre estuvieron atentos a las diferentes inquietudes que se presentaron, ofreciendo respuestas claras y oportunas.

Agradezco al Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) por facilitar los datos de las variables climáticas cuantificadas en la región a través de la red de estaciones de la provincia, los cuales constituyeron el insumo fundamental para el desarrollo de esta investigación.



## Tabla de contenidos

Figuras y tablas .....	15
Siglas y abreviaturas.....	17
Glosario .....	19
Introducción .....	21
Capítulo primero Fundamentos teóricos .....	23
1. Definiciones de la sequia .....	23
2. La sequía paleoclimática .....	25
3. Las sequías en el contexto global .....	25
4. La sequía en el territorio colombiano .....	26
5. Tipos de sequía.....	26
5.1. Sequía meteorológica .....	26
5.2. Sequía agrícola.....	27
5.3. Sequía hidrológica .....	27
5.4. Sequia socioeconómica.....	27
6. Causas y determinantes de la sequía .....	27
6.1. Causas directas .....	27
6.1.1. Circulación atmosférica .....	27
6.1.2. Fenómeno El Niño-Oscilación del Sur (ENSO) .....	29
6.1.3. Variabilidad de la actividad solar .....	31
6.2. Causas indirectas .....	31
6.2.1. La deforestación .....	31
6.2.2. Cambio de uso del suelo .....	32
6.2.3. Calentamiento global .....	32
7. Impactos de la sequia .....	34
7.1. Impactos sociales.....	34
7.2. Impactos ambientales.....	34
7.3. Impactos económicos .....	35
8. Índices para la caracterización de la sequia .....	35
8.1. Índice Estandarizado de Precipitación (SPI).....	36

8.2.	Índice estandarizado de precipitación y evapotranspiración (SPEI) .....	37
8.3.	Índice de sequía de Palmer .....	38
8.4.	Porcentaje de precipitación normal (PNN) .....	38
8.5.	Deciles de precipitación .....	39
9.	Características principales de la sequía .....	39
10.	Precipitación.....	40
11.	Climatología .....	40
Capítulo segundo Procesos metodológicos .....		41
1.	Definición del área de estudio .....	41
2.	Fases de la investigación.....	42
2.1.	Obtención, depuración, completitud y validación de los valores de precipitación mensual .....	43
2.1.1.	Organización de los datos .....	46
2.1.2.	Completitud de los datos .....	46
2.1.3.	Evaluación de la distribución probabilística de la precipitación .....	47
2.1.3.1.	Prueba de bondad de ajuste para la distribución Gamma.....	47
2.1.3.2.	Prueba de distribución normal .....	50
2.1.3.3.	Prueba de distribución log-normal .....	51
2.1.4.	Análisis de consistencia de los datos .....	53
2.1.4.1.	Procedimientos basados en una distribución Gamma .....	53
2.1.4.2.	Procedimiento basado en una distribución normal .....	54
2.1.4.3.	Procedimiento basado en distribución log-normal .....	54
2.1.5.	Estimación de datos faltantes .....	55
2.1.5.1.	Estimación de datos faltantes mediante regresión múltiple .....	55
2.1.5.2.	Estimación de datos faltantes mediante el método de razones ....	57
2.1.5.3.	Estimación de datos faltantes mediante técnicas estadísticas .....	57
2.1.6.	Homogeneidad de los datos.....	58
2.1.7.	Distribución espacial .....	60
2.2.	Determinar la climatología mensual de la precipitación y su variabilidad .	61
2.2.1.	Datos atípicos .....	61
2.2.2.	Prueba de normalidad.....	62
2.2.3.	Representatividad estadística .....	62

2.2.4.	Distribución espacial de la climatología mensual de la precipitación	64
2.3.	Caracterización espacio-temporal de las sequias meteorológicas y análisis de la relación con el fenómeno de El Niño .....	66
2.3.1.	Cálculo de las sequias meteorológicas.....	66
2.3.2.	Caracterización temporal de las sequias meteorológicas.....	69
2.3.3.	Caracterización espacial de las sequias meteorológicas .....	70
2.3.4.	Relación entre el fenómeno de El Niño y las sequias meteorológicas	70
3.	Automatización de la metodología .....	72
Capítulo tercero Resultados de la investigación .....		75
1.	Preprocesamiento de los datos de precipitación mensual .....	75
1.1.	Distribución de probabilidad de la precipitación mensual .....	75
1.2.	Análisis de datos inconsistentes.....	75
1.3.	Estimación de datos faltantes .....	76
1.4.	Homogeneidad de las estaciones meteorológicas.....	77
1.5.	Distribución espacial de las estaciones meteorológicas.....	78
1.5.1.	Análisis de unidad climática y distribución altitudinal.....	78
1.5.2.	Análisis de distancia mínima entre estaciones.....	79
1.5.3.	Análisis de representatividad espacial.....	80
2.	Climatología mensual de la precipitación y su variabilidad .....	81
2.1.	Normalidad de los datos de precipitación mensual.....	82
2.2.	Resumen estadístico de los datos de precipitación .....	84
2.3.	Distribución espacial de la precipitación mensual .....	85
3.	Calculo y caracterización de las sequias meteorológicas y análisis de su relación con el fenómeno de El Niño .....	86
3.1.	Prueba de distribución Gamma de los datos de precipitación .....	86
3.2.	Caracterización temporal de las sequias meteorológicas .....	87
3.3.	Caracterización espacial de las sequias meteorológicas .....	88
3.4.	Caracterización del fenómeno de El Niño.....	90
3.5.	Relación del fenómeno de El Niño y las sequias meteorológicas .....	91
4.	Automatización de los resultados .....	92
Capítulo cuarto Discusión de los resultados .....		95
1.	Depuración, completitud y validación de la precipitación mensual.....	95

2.	Climatología y variabilidad de la precipitación mensual .....	98
3.	Cálculo y caracterización de las sequías meteorológicas y análisis de la relación con el fenómeno de El Niño .....	101
	Conclusiones .....	107
	Obras citadas .....	109
	Anexos .....	119

## Figuras y tablas

Figura 1. Diagrama resumen del marco teórico, donde se sintetizan sus causas directas e indirectas, los tipos de sequía, los impactos y los métodos para su caracterización .....	24
Figura 2. Esquema de la circulación general de la atmósfera .....	28
Figura 3. Representación de la dinámica de los vientos alisos alterada en el océano Pacífico lo cual corresponde al fenómeno de El Niño .....	30
Figura 4. Proyecciones regionales al año 2100 del cambio climático ante diferentes escenarios del calentamiento global, respecto al periodo preindustrial (1850-1900).....	33
Figura 5. Representación del área de estudio, las estaciones meteorológicas y el relieve .....	42
Figura 6. Diagrama resumen de la metodología de la investigación .....	43
Figura 7. Plataforma del IDEAM para descargar datos meteorológicos .....	45
Figura 8. Representación del gráfico de cajas y bigotes (Boxplot) .....	62
Figura 9. Representación gráfica de la correlación entre las estaciones .....	76
Figura 10. Resultados del análisis promedio vecino cercano .....	79
Figura 11. Resultados del análisis de representatividad espacial .....	80
Figura 12. Valor de la precipitación mensual que mejor se ajustó a una distribución normal .....	82
Figura 13. Mayor ajuste a una distribución Gamma (p-Value Gamma = 0,9991).....	83
Figura 14. Mayor ajuste a una distribución log-normal (p-Value log-normal = 0,9992).....	83
Figura 15. Representación del régimen bimodal de la precipitación mensual .....	84
Figura 16. Representación del régimen unimodal de la precipitación mensual .....	84
Figura 17. Climatología de la precipitación mensual .....	86
Figura 18. Representación de las sequías en la Provincia de García Rovira .....	87
Figura 19. Número total de eventos de sequias .....	88
Figura 20. Duración de las sequias .....	88
Figura 21. Intensidad máxima de las sequias .....	88
Figura 22. Magnitud máxima de las sequias .....	88
Figura 23. Eventos Moderadamente Secos .....	89
Figura 24. Eventos Severamente Secos .....	89
Figura 25. Eventos Extremadamente Secos .....	89
Figura 26. Representación de los eventos de fenómeno de El Niño en el tiempo.....	90

Tabla 1 Estaciones meteorológicas tenidas en cuenta en la investigación .....	44
Tabla 2 Estructura para ordenar los datos de precipitación .....	46
Tabla 3 Clasificación del coeficiente de correlación de Pearson .....	56
Tabla 4 Clasificación del SPI según su intensidad.....	68
Tabla 5 Clasificación del SPI según su magnitud .....	69
Tabla 6 Clasificación del ONI según su intensidad .....	72
Tabla 7 Resultado del Análisis de Distribución de Probabilidad de los Datos .....	75
Tabla 8 Características de los Datos Inconsistentes .....	76
Tabla 9 Resultado Test de Lilliefors.....	77
Tabla 10 Resultado del método de estimación de datos faltantes .....	77
Tabla 11 Resultado de la Prueba de Mann Kendall .....	77
Tabla 12 Estaciones por unidad climática .....	78
Tabla 13 Distribución altitudinal de las estaciones.....	79
Tabla 14 Resultados del análisis promedio vecino cercano .....	79
Tabla 15 Estaciones meteorológicas consideradas en el estudio .....	81
Tabla 16 Resultado del test de Lilliefors para la climatología .....	82
Tabla 17 Resultado de la Prueba Gamma .....	86
Tabla 18 Caracterización del fenómeno de El Niño .....	90
Tabla 19 Número de eventos de El Niño .....	91
Tabla 20 Resultado de las correlaciones entre ONI y SPI.....	91

## Siglas y abreviaturas

COP	Cooperación de las Partes
CPC	Centro de Predicción Climática
DANE	Departamento Administrativo Nacional de Estadística
ENSO	El Niño Oscilación del Sur
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación
GDM	Monitor Global de Sequías (EE. UU.)
GEI	Gases de efecto invernadero
IDEAM	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales
IGAC	Instituto Geográfico Agustín Codazzi
IPCC	Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático
NMDC	Centro Nacional de Mitigación de Sequías de Estados Unidos
NOAA	Administración Nacional Oceánica y Atmosférica de Estados Unidos
OMM	Organización Meteorológica Mundial
ONI	Índice Oceánico de El Niño
ONU	Organización de las Naciones Unidas
PIB	Producto interno bruto
PPN	Porcentaje de precipitación normal
SIG	Sistemas de información geográfica
SPEI	Índice estandarizado de precipitación y evapotranspiración
SPI	Índice estandarizado de precipitación
TSM	Temperatura superficial del mar
UNCED	Conferencia de las Naciones Unidas en Medio Ambiente y Desarrollo
UNCCD	Convención de las Naciones Unidas para la Lucha contra la Desertificación
ZCIT	Zona de Convergencia Intertropical



## Glosario

**Anomalía:** Es la desviación de una variable climática con respecto a su valor promedio considerado como normal en un periodo de tiempo.

**Cambio climático:** Corresponde a cambios en la variabilidad climática de las componentes atmosféricas, con respecto a los comportamientos considerados como normales en un periodo de tiempo para un área específica.

**Cartografía:** Corresponde a la creación de mapas con el objetivo de representar los diferentes componentes que conforman el planeta tierra.

**Ciclo hidrológico:** Corresponde al intercambio de materia y energía entre la atmosfera y la hidrosfera.

**Clima:** Se conoce como el comportamiento regular o normal de las diferentes componentes atmosféricas en un periodo de tiempo y espacio determinados.

**Correlación:** Es la evaluación de la Interdependencia o relación en el comportamiento entre dos variables cuantificables.

**Desertificación:** Corresponde a la degradación de los suelos principalmente por la interacción entre el aprovechamiento insostenible y la variabilidad climática, es más frecuente en zonas áridas.

**Estación del Sur (ENSO):** Es un ciclo oceánico-atmosférico irregular, que se presenta en las corrientes de agua del océano Pacífico. Este ciclo está compuesto por dos fases: El Niño y La Niña.

**Escasez de agua:** Se refiere a la falta del recurso hídrico para satisfacer las demandas en determinada zona.

**Índice Oceánico de El Niño (ONI):** Este índice mide la temperatura del océano pacífico, lo cual permite determinar las fases de fenómeno de El Niño, fenómeno de La Niña y periodos normales.

**Interpolación:** Es un método estadístico espacial que permite estimar valores de una variable en áreas desconocidas a partir de valores en puntos conocidos. para el caso de esta investigación datos de precipitación mensual en milímetros.

**Precipitación:** Es una fase del ciclo hidrológico en la cual las moléculas de agua tanto líquidas como sólidas caen a la Tierra.

**Presión atmosférica:** o presión barométrica, la cual se produce por el peso o la fuerza que ejerce la atmósfera sobre la tierra. Está estrechamente relacionada con los cambios en el clima.

**Probabilidad:** Es la confianza o convencimiento sobre las posibilidades de ocurrencia que tiene cualquier factor medible, este concepto es de tipo estadístico.

**Regionalización de datos:** Es la clasificación o agrupación de los datos teniendo en cuenta una o varias características en común, para el caso de esta investigación características de la precipitación.

**Sequía:** Se produce cuando la precipitación es menor a los valores considerados como normales para un periodo de tiempo y un área específica.

**Radiación solar:** Es la energía emitida por el sol que llega a la Tierra.

**Variabilidad climática:** Corresponde a los cambios o las oscilaciones que presentan las diferentes componentes atmosféricas ya sea de forma natural o antrópica. La variabilidad climática se presenta en lapsos de tiempo diarios, mensuales, estacionales, interanuales e interdecadales.

**Zona árida:** Es una condición natural y permanente en determinada zona donde se presenta déficit hídrico.

**Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT):** Es una zona dinámica en el Ecuador, donde se bifurcan los vientos alisos que provienen del polo Norte y del polo Sur.

## Introducción

El cambio climático está modificando los patrones atmosféricos globales y regionales, afectando la distribución y la variabilidad de las precipitaciones, así como el incremento de la temperatura media del planeta. Estos cambios inciden directamente en la duración, intensidad, frecuencia y comportamiento espacial de las sequías meteorológicas, generando impactos significativos sobre los ecosistemas y sectores estratégicos como la agricultura, el abastecimiento hídrico y la seguridad alimentaria (IPCC 2007). Así mismo el aumento en la ocurrencia y severidad de las sequías favorece la propagación de incendios forestales, configurando un ciclo de retroalimentación positiva que amplifica los efectos del cambio climático (Lloret y Siscart 1995; Ortega-Gaucin 2012).

La Convención de las Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación (UNCCD), en su informe Retrato global de la sequía (2023), advierte que la humanidad enfrenta una emergencia planetaria sin precedentes, cuyos impactos apenas comienzan a manifestarse. Entre las cifras más alarmantes se destacan: la afectación del 70 % de los cultivos en la región del Mediterráneo entre 2016 y 2018, la pérdida del 33 % de las tierras de pastoreo en Sudáfrica, pérdidas económicas por 70 000 millones de dólares en África durante los últimos 50 años y recientemente, una reducción del 44 % en la producción de soja en Argentina en el año 2023 (IPCC 2023).

Colombia no es ajena a estas problemáticas: solo en 2015 las sequías ocasionaron pérdidas estimadas en 3,1 billones de pesos, equivalentes al 0,7 % del Producto Interno Bruto (PIB) (Melo et al. 2017). En el caso particular de la provincia de García Rovira, los eventos de sequía han provocado desabastecimiento de agua para consumo humano y pérdidas agrícolas de hasta un 80 % (Ortiz 2020).

El clima colombiano está determinado principalmente por su ubicación tropical, la influencia de los vientos alisios, la dinámica de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), la interacción de los océanos Pacífico y Atlántico, la presencia de la cordillera de los Andes, la cuenca amazónica y la diversidad de ecosistemas y tipos de suelo (Mejía et al. 1999). Debido a estas características físicas y a la escala temporal de análisis (décadas), los componentes más influyentes del sistema climático son la atmósfera y la hidrosfera. En este contexto, el fenómeno de El Niño se constituye como un factor determinante en la ocurrencia de sequías en Colombia, al alterar los patrones normales de circulación

atmosférica y reducir de manera considerable la precipitación en amplias zonas del país (Hurtado 2012; Vega Viviescas 2019; Trujillo Osorio 2018). Investigaciones previas (González López, Carvajal Escobar y Loaiza Cerón 2016; Torres y Díaz-Granados 2018) han demostrado que los eventos de El Niño intensifican la magnitud y duración de las sequías, especialmente en regiones con alta dependencia de las lluvias estacionales.

A diferencia de otras zonas del país, como la macrocuenca Magdalena-Cauca (Vega Viviescas 2019) o la cuenca del río Sumapaz (Torres y Díaz-Granados 2018), en la provincia de García Rovira no existen estudios sistemáticos sobre la caracterización del clima, la identificación de sequías ni la influencia del fenómeno de El Niño (ENSO). Esta carencia de información limita el diseño e implementación eficaz de estrategias de adaptación al cambio climático y la formulación de medidas preventivas frente a crisis hídricas, dificultando la mitigación de sus efectos (Barros, Menéndez y Nagy 2005).

En este marco, la presente investigación tiene como objetivo general caracterizar la variabilidad espacio-temporal de las sequías meteorológicas en la provincia de García Rovira (Santander, Colombia), mediante el Índice Estandarizado de Precipitación (SPI) y evaluar su relación con el fenómeno de El Niño-Oscilación del Sur (ENSO) durante el periodo 1979-2024, como aporte a la planificación de estrategias de adaptación al cambio climático.

Para alcanzar este propósito, se plantean los siguientes objetivos específicos:

1. Depurar, completar y consolidar la base de datos de precipitación mensual del periodo 1979-2024 en la provincia de García Rovira, con el fin de garantizar su consistencia y aplicabilidad en los análisis climáticos.
2. Determinar la climatología y la variabilidad de la precipitación mensual en la provincia de García Rovira, como base para la identificación de las sequías meteorológicas.
3. Caracterizar espacial y temporalmente los eventos de sequías meteorológicas en la provincia de García Rovira y determinar su relación con el fenómeno de El Niño-Oscilación del Sur (ENSO).

Este análisis busca generar insumos científicos que fortalezcan la planificación territorial y la toma de decisiones informadas por parte de comunidades, instituciones y entidades que inciden en el territorio, en ámbitos como la gestión del riesgo climático, la formulación de políticas públicas y la implementación de estrategias de adaptación que contribuyan a reducir la vulnerabilidad regional frente a los efectos del cambio climático.

## **Capítulo primero**

### **Fundamentos teóricos**

#### **1. Definiciones de la sequía**

La sequía no cuenta con una definición única, para lo cual autores como (Rivera 2014; Vega Jácome 2018 y Quispe Quispe 2012) coinciden en que su conceptualización depende de los objetivos del estudio y de las características ecológicas, económicas y sociales propias de área de estudio, como lo menciona (Quispe Quispe 2012). Por ejemplo, las sequías que afectan los países del África subsahariana difieren notablemente de las sequías que se presentan en los Andes tropicales (Valarezo Aguilar 2017). En el contexto de la presente investigación, se tienen en cuenta las definiciones propuestas por entidades reconocidas en el tema.

La OMM “define la sequía como un periodo de condiciones meteorológicas anormalmente secas, suficientemente prolongado como para que la falta de precipitación cause un grave desequilibrio hidrológico” (Quispe Quispe 2012, 13).

En el documento de la UNCCD, la Organización de las Naciones Unidas (ONU) “define la sequía como el fenómeno que se produce naturalmente cuando las lluvias han sido considerablemente inferiores a los niveles normales registrados, causando un agudo desequilibrio que perjudica los sistemas de producción de recursos de tierras” (Salinas Alvarado 2017, 11).

Teniendo en cuenta los conceptos propuestos por entidades reconocidas en el estudio de las sequías, se construyó una definición que responde a los objetivos de esta investigación. En este sentido, se identifican dos tipos principales de definiciones: conceptual y operacional (Valiente 2001; Zuluaga 2009; Paredes-Trejo 2012).

La definición conceptual entiende la sequía como una variabilidad natural del ciclo hidrológico. Se trata de un fenómeno climático complejo que ocurre cuando los valores de precipitación se sitúan por debajo de los valores representativos de un área determinada, conocidos como valores normales o promedios (Rivera 2014; Valarezo Aguilar 2017; Vega Viviescas y Rodríguez 2018). Cuando este déficit se prolonga, se evidencian dificultades para satisfacer las distintas demandas del recurso hídrico, tanto en el ámbito ecológico como en el social (Vega Viviescas y Rodríguez 2018; Paredes-Trejo et al. 2018). Los impactos asociados dependen de la capacidad de gestión

del recurso hídrico en cada región, pudiendo manifestarse de manera inmediata o con cierto retraso; además, pueden mantenerse incluso después de que se restablezcan los niveles normales de precipitación (Paredes-Trejo et al. 2018). La sequía no presenta patrones fijos, sino que se manifiesta de forma irregular en el tiempo y el espacio. Es un fenómeno de evolución lenta, por lo cual cada episodio presenta características únicas (Poquet, Belda y García-Haro 2008; Olivares Campos et al. 2016). Su complejidad radica en la dificultad de caracterizar y comprender su comportamiento, lo que limita la capacidad de anticipar, cuantificar y mitigar sus impactos, generando elevados costos a escala regional, nacional y mundial (Rivera 2014; Olivares Campos et al. 2016). Cabe destacar que las sequías pueden presentarse en todas las regiones y bajo diferentes condiciones climáticas, en cualquier época del año (Rivera 2014). Sin embargo, tienden a ser más intensas y frecuentes en las zonas tropicales y ecuatoriales. En el contexto del cambio climático, se prevé que estos eventos se vuelvan más frecuentes y severos en las próximas décadas (Rivera 2014; Arriaga et al. 2017; Paredes-Trejo et al. 2018).

Por su parte, la definición operacional de sequía se orienta a la descripción cuantitativa y espacial del fenómeno. Esta considera aspectos como el inicio y finalización del evento, su frecuencia, intensidad media, intensidad máxima, magnitud y distribución espacial, entre otras características (Valiente 2001; Crespo Pichardo 2006; Loaiza Cerón 2014; Rivera 2014).

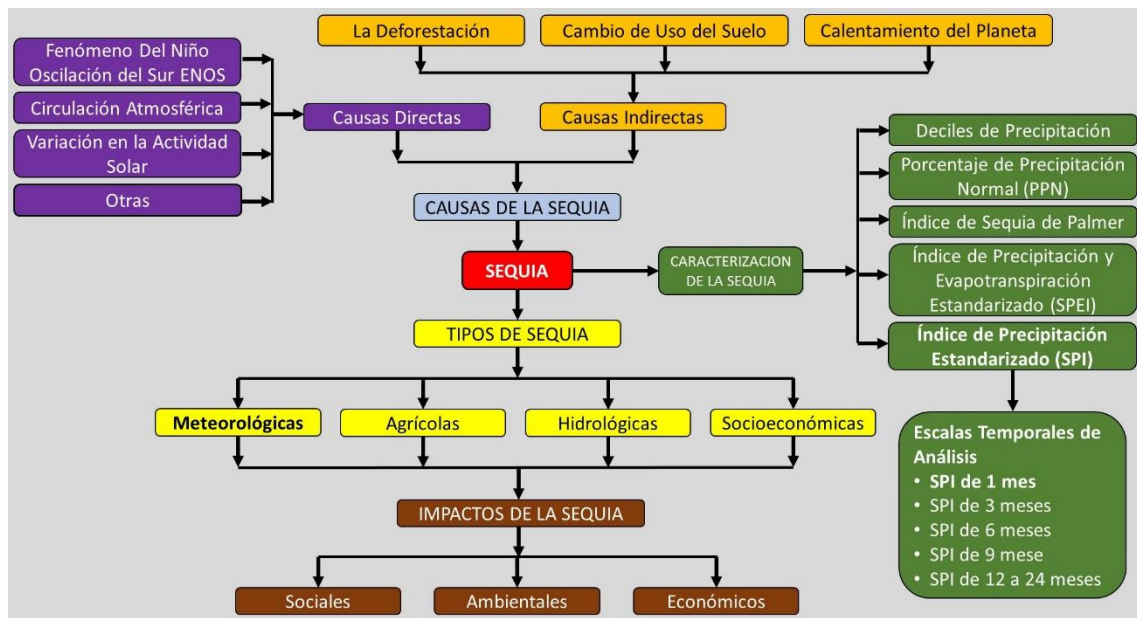


Figura 1. Diagrama resumen del marco teórico, donde se sintetizan sus causas directas e indirectas, los tipos de sequía, los impactos y los métodos para su caracterización  
Fuente: Elaboración propia a partir de los conceptos investigados

## **2. La sequía paleoclimática**

Los diversos impactos de las sequías han sido registrados a lo largo de la historia en escritos, mitos y leyendas, evidencias que han sido corroboradas por la ciencia arqueológica. Los registros más antiguos de las sequías se encuentran plasmados en textos religiosos, como en el libro de Jeremías 14:1-6 (629 a.C.), donde se documenta su impacto en el pueblo de Judá (Ortega-Gaucin 2012).

Diversos estudios han evidenciado que las sequías han sido determinantes en la generación de conflictos sociales e, incluso, en la desaparición de civilizaciones enteras. Entre los casos más representativos se encuentran la civilización de Acadia en Mesopotamia; las culturas Tiwanaku y Moche en Sudamérica; los Anasazi en Norteamérica; y las culturas Tolteca y Maya en Mesoamérica (Ortega-Gaucin 2012).

Evidencias paleoclimáticas, como los sedimentos del lago Tana en Etiopía, muestran variaciones hídricas en los últimos 17 000 años, incluida una sequía extrema hace 4200 años que pudo contribuir al colapso del imperio egipcio. Esta crisis alcanzó tal gravedad que se registraron episodios de canibalismo, situación comparable con sequías severas que aún afectan regiones de África (Ortega-Gaucin 2012).

Entre 1996 y 2011, la Universidad de Columbia realizó un análisis dendrocronológico de trescientos árboles en Asia, identificando cuatro sequías severas ocurridas durante los últimos setecientos años. La más intensa, registrada entre 1644 y 1647, habría contribuido al colapso de la dinastía Ming (Ortega-Gaucin 2012). De manera similar, los anillos de especies forestales como la teca y el ciprés en Vietnam revelan periodos de sequía asociados con el debilitamiento y posterior declive de antiguos reinos en Vietnam, Tailandia y Birmania (Ortega-Gaucin 2012).

En la época reciente la sequía más severa registrada ocurrió durante la era victoriana, entre 1876 y 1878, afectando vastas regiones de la India, China e Indonesia. Este evento provocó hambrunas generalizadas, epidemias de cólera y la muerte de aproximadamente treinta millones de personas, además de desencadenar tensiones sociales y levantamientos contra el dominio colonial francés (Ortega-Gaucin 2012).

## **3. Las sequías en el contexto global**

A escala global, las sequías se consideran una amenaza permanente para la supervivencia de la humanidad, cuyo impacto se intensifica en los distintos escenarios de cambio climático, tanto presentes como futuros, afectando a todas las civilizaciones y culturas del planeta (Ortega-Gaucin 2012; Rivera 2014). Una de sus manifestaciones más

evidentes se refleja en el incremento de los procesos migratorios en diversas regiones del mundo (Rivera 2014).

#### **4. La sequía en el territorio colombiano**

El primer evento de sequía documentado en Colombia data de 1925, atribuida al fenómeno de El Niño-Oscilación del Sur (ENSO), y se extendió hasta 1926, generando un deterioro económico y un fuerte malestar social que influyó en el cambio de gobierno en 1930 (Barrero 2005). Desde entonces, la mayoría de las sequías severas en el país han estado asociadas al fenómeno de El Niño, con eventos recurrentes entre 1951 y 1992, particularmente críticos en 1972, 1976, 1977, 1991 y 1992. La sequía de 1992 provocó un prolongado racionamiento de energía y pérdidas agrícolas significativas (Carvajal Escobar, Jiménez y Materón 1998).

En tiempos recientes, el episodio de 2014-2016, considerado uno de los más intensos a nivel mundial, ocasionó graves impactos, entre ellos: una reducción del 40 % de las lluvias, un incremento de la temperatura llegando hasta los 5 °C en varias regiones del país, la muerte de entre 32 000 y 45 000 bovinos, niveles históricamente bajos en el río Magdalena, desabastecimiento de agua en más de 200 municipios y la pérdida de 188 650 hectáreas de bosque a causa de incendios forestales. El Estado asignó cerca de 425 millones de dólares estadounidenses para la implementación de medidas de prevención y atención de emergencias (Redacción Semana 2014; Redacción El Tiempo 2016).

#### **5. Tipos de sequía**

Según Wilhite y Glantz (1985), las sequías pueden clasificarse en cuatro categorías: meteorológicas, agrícolas, hidrológicas y socioeconómicas, derivadas de la sistematización de más de ciento cincuenta conceptos de sequía propuestos desde diferentes disciplinas científicas, según el enfoque desde el cual se analiza el fenómeno (Valiente 2001; Zuluaga 2009; Rivera 2014; Valarezo Aguilar 2017; Vega Jácome 2018).

##### **5.1. Sequía meteorológica**

Periodo anormal, natural y recurrente de baja precipitación en comparación con los valores normales en una región (Rivera 2014; Salinas Alvarado 2017; Vega-Viviescas y Rodríguez 2018). La sequía meteorológica es la primera en manifestarse y origina los demás tipos de sequía; por tanto, puede considerarse la más relevante (Rivera 2014; Valarezo Aguilar 2017). Este tipo de sequía debe analizarse con detalle, ya que la

precipitación, por su naturaleza, presenta una alta variabilidad temporal y espacial, lo que impide establecer un valor estadístico fijo que represente adecuadamente dicha variable climática (Zuluaga 2009; Torres y Díaz-Granados 2018).

### **5.2. Sequía agrícola**

Deficiencia de humedad en el suelo que limita el desarrollo de las especies vegetales y animales, afectando especialmente a los cultivos, por ser fundamentales para la seguridad y soberanía alimentaria de las comunidades (Valiente 2001; Ortega-Gaucin 2012 y Quispe Quispe 2012).

### **5.3. Sequía hidrológica**

Déficit de agua, tanto superficial como subterránea, que limita la capacidad de un sistema de gestión hídrica para satisfacer las demandas del recurso en sus distintos usos y sectores (Valiente 2001; Ortega-Gaucin 2012; Salinas Alvarado 2017; Vega-Viviescas y Rodríguez 2018).

### **5.4. Sequía socioeconómica**

Se presenta cuando hay escasez de agua afectando las diferentes actividades humanas vitales y económicas (Rivera 2014).

## **6. Causas y determinantes de la sequía**

Las causas de las sequías son diversas y obedecen a la dinámica entre factores naturales y antrópicos modificando el comportamiento normal del ciclo hidrológico. Las sequías se han podido agrupar en sequías directas e indirectas (Ortega-Gaucin 2012).

### **6.1. Causas directas**

Son las causas físicas, atmosféricas y astronómicas que originan la reducción de la precipitación o del contenido de humedad con respecto a los valores normales (Ortega-Gaucin 2012).

#### **6.1.1. Circulación atmosférica**

La circulación atmosférica hace referencia al movimiento a gran escala de las masas de aire, originado por el calentamiento desigual de la superficie terrestre e influido por factores como la distribución de los continentes, los océanos, la orografía y la

radiación solar (Ortega-Gaucin 2012). Este fenómeno genera variabilidad en las variables meteorológicas, especialmente en la precipitación, la cual influye directamente en la ocurrencia de sequías (Quispe Quispe 2012 y Vega Jácome 2018). Los movimientos del aire se comportan de la siguiente manera: en la zona ecuatorial, comprendida entre los 30° N y 30° S de latitud, el aire presenta temperaturas más elevadas que en el resto de la superficie terrestre, lo que provoca su ascenso en dirección hacia los polos. Durante este desplazamiento, la temperatura del aire disminuye, lo que produce su descenso alrededor de los 30° N y 30° S. Al calentarse nuevamente, los vientos se dividen: una parte retorna hacia la zona ecuatorial, mientras que otra se dirige hacia los polos. Los vientos que se desplazan hacia los polos convergen aproximadamente en las latitudes de 60° N y 60° S, donde son forzados a ascender al encontrarse con las masas de aire frío procedentes del este, para luego continuar su desplazamiento hacia las regiones polares (Paredes-Trejo 2012).

En la línea ecuatorial, los vientos se dividen entre el hemisferio norte y el hemisferio sur, fenómeno que da origen a la ZCIT. Esta franja es dinámica y su desplazamiento oscila entre los 20° N y los 20° S, acorde a los desplazamientos del Sol. El desplazamiento de la ZCIT provoca variaciones climáticas en las regiones a su paso (Paredes-Trejo 2012).

En Colombia, la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) está estrechamente vinculada con la unimodalidad y la bimodalidad del régimen de precipitación. Este comportamiento se debe a que la ZCIT atraviesa el territorio nacional en dos periodos del año: entre abril y mayo, cuando se desplaza hacia el norte, y entre octubre y noviembre, cuando retorna hacia el sur. Dicho patrón explica la presencia de dos épocas de incremento en la precipitación (Mejía et al. 1999).

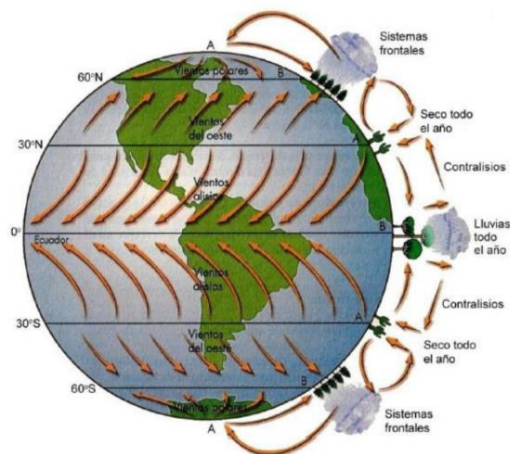


Figura 2. Esquema de la circulación general de la atmósfera  
Fuente: Tomado de Ortega-Gaucin (2012)

### **6.1.2. Fenómeno El Niño-Oscilación del Sur (ENSO)**

El océano y la atmósfera intercambian de manera continua materia y energía a través del ciclo hidrológico, en magnitudes considerablemente superiores a las de otros componentes del sistema climático. Esta interacción dinámica convierte a ambos medios en los principales moduladores de la variabilidad climática del planeta, especialmente en escalas temporales que van de meses a décadas (Montealegre Bocanegra y Pabón Caicedo 2000).

La componente atmosférica conocida como Oscilación del Sur corresponde a la variación interanual de la presión atmosférica entre el centro de altas presiones del Pacífico oriental ubicado cerca de la isla de Pascua y el centro de bajas presiones situado en Indonesia y Australia. Este proceso implica el desplazamiento de masas de aire entre el Pacífico y la región australiana, y se encuentra estrechamente vinculado con las fases cálida y fría del fenómeno El Niño y La Niña, razón por la cual recibe el nombre de El Niño-Oscilación del Sur (ENSO).

El Fenómeno ENSO constituye un ciclo acoplado océano-atmósfera con una periodicidad aproximada de entre tres y ocho años (Ortega-Gaucin 2012). Se caracteriza por alteraciones en la temperatura superficial del mar en el Pacífico ecuatorial, central y oriental, especialmente frente a las costas de Perú, Ecuador y el sur de Colombia (Melo et al. 2017; Montealegre Bocanegra 2014). Este fenómeno altera la dinámica de los vientos en el océano Pacífico y puede modificar la circulación atmosférica global, generando importantes variaciones en el clima, especialmente en los patrones de precipitación a escala planetaria (Vega-Viviescas y Rodríguez 2018).

En condiciones normales del océano Pacífico, los vientos alisios desplazan las aguas superficiales y las masas de aire caliente hacia el oeste, mientras que en el este ascienden aguas frías desde el fondo oceánico (Vega-Viviescas y Rodríguez 2018). Durante El Niño, las aguas superficiales se calientan anormalmente, la diferencia de presión este-oeste disminuye, los vientos alisios se debilitan y el núcleo de convección profunda se desplaza del oeste al centro del Pacífico tropical. En contraste, en La Niña ocurre el proceso inverso (Montealegre Bocanegra 2014; Trujillo Osorio 2018).

En este contexto, el fenómeno de El Niño se reconoce como un factor determinante en la ocurrencia de sequías en Colombia (Hurtado M. 2012; Vega Viviescas 2019), intensificándolas especialmente en regiones dependientes de lluvias estacionales (González López, Carvajal Escobar y Loaiza Cerón 2016; Torres y Díaz-Granados 2018).

Existen relaciones estadísticamente significativas ( $p < 0,005$ ) entre el ONI y la precipitación mensual, en particular durante los meses más secos (Ramírez-Builes y Jaramillo-Robledo 2009). El Niño ha provocado reducciones drásticas en la precipitación, desencadenando sequías extremas en regiones como la Andina y la Caribe (Montealegre Bocanegra 2014).

En el Valle del Cauca, los caudales fluviales han mostrado mínimos históricos durante eventos de El Niño, aunque la relación no es estrictamente lineal (Carvajal Escobar, Jiménez y Materón 1998). En la cuenca del río Cali, por ejemplo, la oferta hídrica disminuyó hasta un 40 % en dichos eventos (Ávila Díaz, Carvajal Escobar y Gutiérrez Serna 2014).

El Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) identificó, mediante correlación de Pearson y análisis compuesto, que la región Andina presenta los mayores niveles de correlación entre El Niño y la disminución de la precipitación, con reducciones de hasta un 90 % durante eventos intensos (Arango et al. 2010). Las sequías más severas en esta región han coincidido con eventos de El Niño, como los presentados en los años 1972, 1976, 1977, 1991 y 1992 (Carvajal Escobar, Jiménez y Materón 1998).

Finalmente, se ha concluido que la intensidad y extensión territorial de la sequía en Colombia está estrechamente ligada con la presencia del fenómeno de El Niño (Hurtado M. 2012).

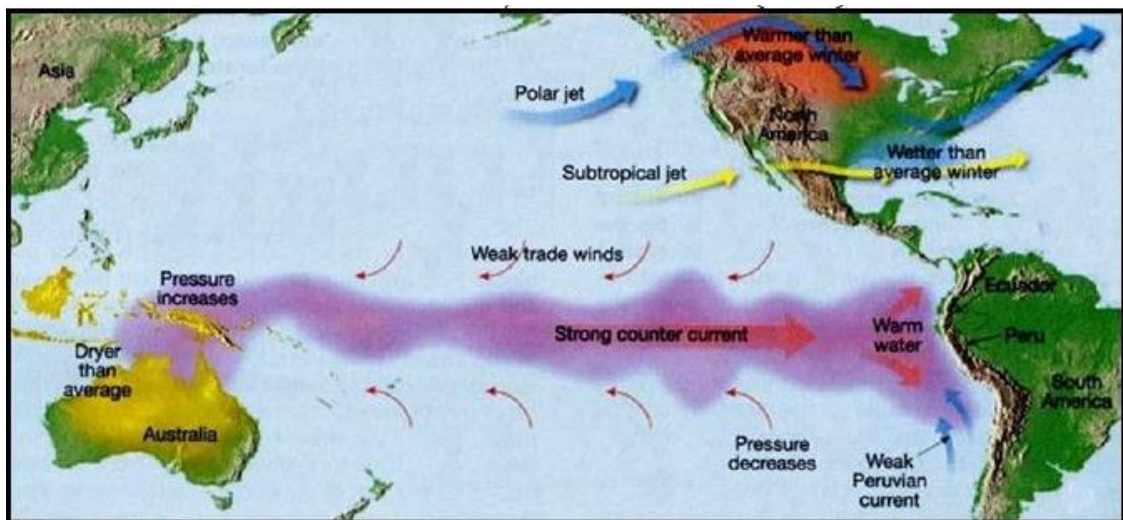


Figura 3. Representación de la dinámica de los vientos alisos alterada en el océano Pacífico lo cual corresponde al fenómeno de El Niño  
Fuente: Tomado de Ortega-Gaucin (2012)

### **6.1.3. Variabilidad de la actividad solar**

El Sol constituye la principal fuente de energía del sistema terrestre, y su actividad magnética promedio está estrechamente vinculada con las variaciones del clima y la ocurrencia de sequías. El ciclo solar, asociado a la aparición y disminución de las manchas solares, presenta una periodicidad aproximada de once años y modula la cantidad de radiación que alcanza la Tierra, influyendo en variables climáticas como la temperatura y la presión atmosférica. Estas fluctuaciones afectan la circulación general de la atmósfera, generando una reducción en la precipitación durante los periodos de mínima actividad solar (Agosta 2004; Ortega-Gaucin 2012).

Un estudio realizado en la península de Yucatán (México) evidenció una correlación entre la variabilidad de la actividad solar, con un ciclo aproximado de 206 años, y un patrón recurrente de sequías con una periodicidad cercana a los 208 años (Hodell et al. 2001).

## **6.2. Causas indirectas**

Las causas indirectas comprenden los procesos antrópicos y de degradación ambiental que incrementan la vulnerabilidad de los ecosistemas y sociedades frente a la falta de agua. Aunque no originan directamente la sequía, agravan sus efectos y prolongan su duración (Ortega-Gaucin 2012).

### **6.2.1. La deforestación**

La deforestación constituye uno de los procesos antrópicos más determinantes en la alteración del balance hídrico y en la intensificación de las sequías. En los últimos 8000 años se ha perdido más del 50 % de la cobertura forestal original del planeta, siendo Europa y África los continentes históricamente más afectados por la tala y conversión de bosques (Duque Escobar 2011; Ortega-Gaucin 2012). Durante la década de 1990, Brasil registró la tasa de deforestación más alta del mundo, con pérdidas anuales cercanas a 22 264 km<sup>2</sup> de selva tropical.

En el contexto colombiano, la deforestación responde principalmente a la expansión de la frontera agropecuaria, la extracción ilegal de madera y la falta de control ambiental efectivo, factores que ocasionan una pérdida anual cercana a 8 km<sup>2</sup> de bosque (Duque Escobar 2011). La eliminación de la cobertura arbórea reduce la evapotranspiración, incrementa la temperatura superficial y modifica los flujos locales de energía, afectando la formación de nubes y la distribución espacial de la precipitación.

Esta degradación ecológica disminuye la capacidad del suelo para infiltrar y almacenar agua, lo que intensifica el déficit hídrico y contribuye a la recurrencia de las sequías meteorológicas. En consecuencia, la deforestación no solo implica la pérdida de biodiversidad, sino también una alteración directa del ciclo hidrológico regional y del equilibrio climático (Duque Escobar 2011; Ortega-Gaucin 2012; Agosta 2004).

### **6.2.2. Cambio de uso del suelo**

El cambio del uso del suelo constituye otro factor indirecto que agrava la ocurrencia de sequías al modificar la estructura física y funcional de los ecosistemas. La sustitución de bosques, humedales o coberturas naturales por sistemas agrícolas, urbanos o ganaderos reduce la capacidad de los suelos para capturar y retener humedad, favoreciendo la desertificación, aumentando la vulnerabilidad frente a la escasez de agua (Duque Escobar 2011; Ortega-Gaucin 2012).

Estos procesos alteran los flujos de energía y humedad entre la superficie y la atmósfera, generando un incremento en la radiación térmica emitida hacia la atmósfera y afectando la convección local. Como resultado, se modifican los patrones de formación de nubes, en particular el desarrollo de nubes cúmulos continentales sobre las marítimas y se produce un déficit de precipitación regional (Escobar 2011; Ortega 2012).

De acuerdo con Agosta (2004), tales dinámicas representan una de las hipótesis más consistentes para explicar la variabilidad climática reciente, aunque la complejidad de los factores involucrados impide aún establecer con precisión su peso relativo en el sistema climático terrestre. No obstante, la evidencia disponible indica que los cambios en el uso del suelo, junto con la deforestación, constituyen mecanismos de retroalimentación positiva que amplifican los impactos de las sequías, especialmente en regiones con alta presión antrópica sobre los recursos naturales.

### **6.2.3. Calentamiento global**

Hasta la década de 1970, la mayoría de los climatólogos atribuía la variabilidad climática principalmente a factores naturales, como la actividad solar y volcánica. Sin embargo, a partir de registros desde el siglo XIX y con mayor evidencia en el siglo XX, se constató un aumento sostenido de la temperatura global. El IPCC (2007) reportó un incremento de 0,74 °C en la temperatura media global entre 1906 y 2005, mientras que en el año 2023 informo un aumento de 1,1°C respecto al periodo preindustrial con récords recurrentes de los años más cálidos (IPCC 2023).

Ante la aceleración del calentamiento, difícil de explicar únicamente por la variabilidad natural, surgió la hipótesis de la influencia antrópica. Hoy la comunidad científica reconoce la existencia de una variabilidad antrópica, atribuida al aumento de gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera principalmente  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$  y  $\text{O}_3$  generados por la quema de combustibles fósiles, la deforestación y la actividad agropecuaria. El  $\text{CO}_2$  es el principal responsable: sus concentraciones pasaron de 315 ppm en 1958 a 384 ppm en 2008, con una tendencia creciente. En su informe de 2023, el IPCC señaló que las concentraciones de gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera han alcanzado niveles sin precedentes. El dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) superó las 415 partes por millón (ppm) en 2022, el metano ( $\text{CH}_4$ ) alcanzó 1 866 partes por mil millones (ppb), el valor más alto registrado en los últimos 800 000 años y el óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ) llegó a 333 ppb, la concentración más elevada observada incluso en los registros paleoclimáticos (IPCC 2023).

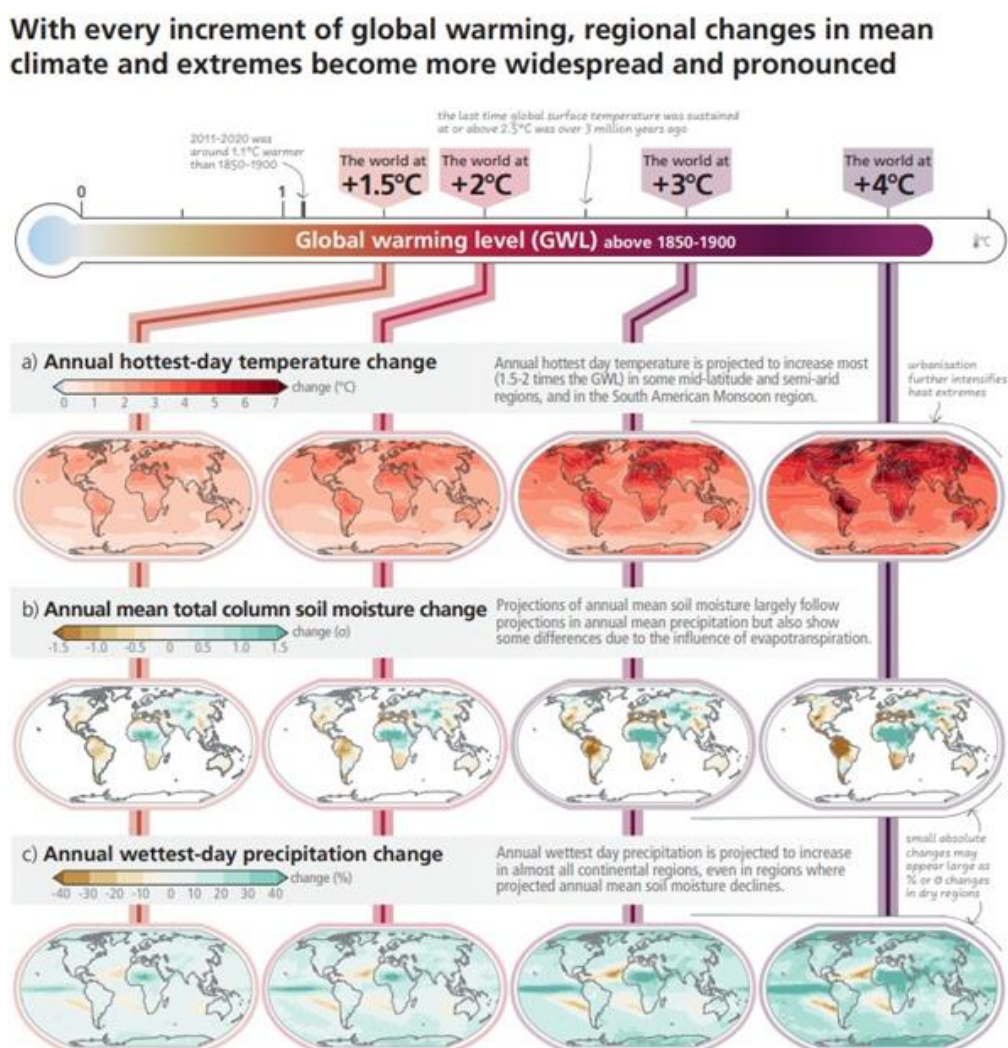


Figura 4. Proyecciones regionales al año 2100 del cambio climático ante diferentes escenarios del calentamiento global, respecto al periodo preindustrial (1850-1900)

Fuente: IPCC (2023). AR6 Reporte de síntesis: Cambio climático 2023

Otras evidencias del calentamiento global provienen de observaciones satelitales, oceanográficas, biológicas, glaciológicas y sedimentológicas, consolidando el consenso científico de que el cambio climático actual es inducido por la actividad humana (Martín Vide 2007; Duque Escobar 2011 y Ortega-Gaucin 2012).

Además de la comunidad científica y sus miles de investigadores, diversas figuras de relevancia mundial han reconocido la existencia del calentamiento global y su origen antrópico. Entre ellas destacan el papa Francisco, quien en su encíclica *Laudato Si* (2015) exhorta a una acción ética y colectiva frente a la crisis climática; el expresidente de los Estados Unidos Barack Obama, impulsor de políticas internacionales de mitigación; y el presidente de Colombia Gustavo Petro, quien ha incorporado la agenda climática como eje central de su discurso político en el siglo XXI.

## **7. Impactos de la sequía**

Las sequías suelen reconocerse más por sus impactos que por sus características mismas, debido a que comprometen directamente la posibilidad de sustentar la vida (Ortega-Gaucin 2012). Aunque su desarrollo es lento y menos dramático que fenómenos como avalanchas o tornados, sus efectos son más extensos y devastadores (Crespo Pichardo 2006; Ortega-Gaucin 2012). En efecto, las sequías representan el segundo fenómeno natural con mayor impacto sobre la población mundial, siendo superadas únicamente por las inundaciones (Rivera 2014).

El NMDC clasifica los impactos de las sequías en tres categorías principales: sociales, ambientales y económicos (Ortega-Gaucin 2012).

### **7.1. Impactos sociales**

Entre los impactos más significativos se encuentran la escasez de alimentos, la desnutrición, el incremento de enfermedades, el aumento de la pobreza, los conflictos sociales por el acceso y uso del agua, el desempleo, la migración y el abandono de tierras fértiles, entre otros. Estos efectos no dependen únicamente de la disminución de la precipitación, sino también del nivel de desarrollo, las condiciones de vida y la capacidad de resiliencia de las comunidades afectadas (Ortega-Gaucin 2012 y Loaiza Cerón 2014).

### **7.2. Impactos ambientales**

La sequía impacta de manera directa en los distintos ciclos naturales de la Tierra, generando daños irreversibles en la flora y la fauna especialmente en las especies

endémica, acelerando los procesos de erosión hídrica y eólica, y alterando el ciclo hidrológico tanto en la calidad como en la cantidad del agua disponible. Asimismo, contribuye al incremento de la contaminación atmosférica, al deterioro del paisaje, al avance de la desertificación y al aumento de la vulnerabilidad de los ecosistemas. (Ortega-Gaucin 2012 y Salinas Alvarado 2017).

En lo que respecta a los ecosistemas forestales, las sequías debilitan las especies florísticas, reducen su productividad y las hacen más susceptibles al ataque de patógenos y plagas, lo que, junto con otros factores, puede provocar la mortalidad de rodales en amplias extensiones (Lloret y Siscar 1995). No obstante, el impacto más severo se relaciona con los incendios forestales, cuya incidencia aumenta significativamente durante los periodos de sequía (Vélez Muñoz 1995; Loaiza Cerón 2014).

### **7.3. Impactos económicos**

En el ámbito económico, los sectores agropecuario y forestal son los primeros en experimentar los efectos de la sequía, lo que se traduce en una disminución de los rendimientos y pérdidas significativas en la producción. Esta situación repercute directamente en las actividades industriales, al incrementar los precios de las materias primas en el mercado. Asimismo, la sequía eleva los costos de generación energética en especial la hidroeléctrica y dificulta el abastecimiento de agua. En términos generales, puede afirmarse que este fenómeno impacta de manera transversal a todos los sectores de la economía (Crespo Pichardo 2006; Ortega-Gaucin 2012; Salinas Alvarado 2017; Loaiza Cerón 2014).

## **8. Índices para la caracterización de la sequía**

Para la cuantificación y caracterización de las sequías, la literatura científica propone una amplia gama de indicadores, entre los que se incluyen la precipitación, la temperatura, la evapotranspiración, los caudales fluviales, los niveles de aguas subterráneas, los volúmenes de embalses, la humedad del suelo y la cobertura vegetal, entre otros. La mayoría de los autores coinciden en que la precipitación constituye el indicador fundamental, a partir del cual se han desarrollado diversos índices de sequía. En la actualidad, gracias al uso de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y al avance de las tecnologías informáticas, se dispone de una gran variedad de índices. La elección del índice más apropiado depende de la disponibilidad de información y de los

objetivos específicos de cada investigación (Organización Meteorológica Mundial 2012; Organización Meteorológica Mundial y Asociación Mundial para el Agua 2016).

### 8.1. Índice Estandarizado de Precipitación (SPI)

El SPI fue desarrollado en 1992 por McKee, Doesken y Kleist en la Universidad Estatal de Colorado (EE. UU.) y presentado en 1993 durante la Octava Conferencia sobre Climatología Aplicada. Su fundamento radica en la relación entre la sequía, su frecuencia, duración y escala temporal de análisis.

El cálculo se basa únicamente en los registros de precipitación, posteriormente se transforman en una distribución de probabilidad Gamma y por último se estandarizan los valores. De esta forma, el valor promedio de precipitación corresponde a cero, los valores negativos indican sequía y los valores positivos condiciones húmedas. El SPI puede aplicarse a diferentes escalas temporales y permite caracterizar distintos tipos de sequía, siempre que se cumplan los niveles de confianza estadística en las estimaciones. No obstante, el índice no permite detectar posibles variaciones atribuidas al cambio climático, debido a que no tiene en cuenta la temperatura como variable de cálculo (Organización Meteorológica Mundial 2012 y Organización Meteorológica Mundial y Asociación Mundial para el Agua 2016).

Ecuación 1. Función de densidad Gamma

$$f(x; k, \theta) = \frac{1}{\theta^k \Gamma(k)} x^{k-1} e\left(-\frac{x}{\theta}\right), \quad \text{para } x, k, \theta > 0$$

Ecuación 2. Estandarización de los valores de precipitación Gamma

$$\text{SPI} = -\left(t - \frac{c_0 + c_1 t + c_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3}\right), \quad t = \sqrt{\ln\left(\frac{1}{[H(x)]^2}\right)}$$

Las ecuaciones y sus variables se explican con mejor detalle en la metodología.

El SPI permite caracterizar diversos impactos de sequía debido a su cálculo en distintas escalas temporales como son:

- SPI de 1 mes: cuantifica el déficit hídrico a corto plazo, está asociado principalmente a sequías meteorológicas. Su interpretación requiere un análisis

riguroso de la climatología regional (Organización Meteorológica Mundial 2012).

- SPI de 3 meses: útil para análisis estacionales, permite detectar déficit de humedad del suelo a corto y mediano plazo; siendo más eficaz y conveniente que el índice de severidad de Palmer (Organización Meteorológica Mundial 2012).
- SPI de 6 meses: evidencia la precipitación en diferentes estaciones y, según la región y la época, refleja caudales de aguas superficiales (Organización Meteorológica Mundial 2012).
- SPI de 9 meses: Detecta deficiencias de humedad a mediano plazo; valores inferiores a -1,5 indican un fuerte impacto en el déficit de humedad del suelo (Organización Meteorológica Mundial 2012).
- SPI de 12 a 24 meses: permite identificar déficit hídrico a largo plazo y su relación con el recurso hídrico tanto superficial como subterráneo (Organización Meteorológica Mundial 2012).

## 8.2. Índice estandarizado de precipitación y evapotranspiración (SPEI)

Es el complemento del SPI, ya que considera tanto la precipitación como la temperatura en su cálculo. Esto incrementa su relevancia, dado que la variación de la temperatura influye en la ocurrencia de sequías al intensificar los procesos de evapotranspiración. Su cuantificación se basa en determinar la diferencia entre la precipitación y la evapotranspiración (Loaiza Cerón 2014).

Ecuación 3. Balance climático mensual

$$D_i = P_i - PET_i$$

Ecuación 4. Acumulación del balance a escala k-meses

$$X_{i,j}^k = \sum_{l=13-k+j}^{12} D_{i-1,l} + \sum_{l=1}^j D_{i,l}$$

Ecuación 5. Función de densidad de probabilidad log-logística

$$f(x) = \frac{\beta}{\alpha} \left( \frac{x - \gamma}{\alpha} \right)^{\beta-1} \left[ 1 + \left( \frac{x - \gamma}{\alpha} \right)^{\beta} \right]^{-2}$$

Ecuación 6. Transformación a SPEI

$$\text{SPEI} = - \left( t - \frac{c_0 + c_1 t + c_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3} \right), \quad t = \sqrt{\ln \left( \frac{1}{p^2} \right)}$$

### 8.3. Índice de sequía de Palmer

Este índice fue desarrollado por Palmer en 1965 para medir las condiciones de humedad, utilizando diversas variables para determinar la disponibilidad de agua. Es eficaz en la identificación de sequías meteorológicas, menos preciso para las sequías agrícolas y no cuantifica las sequías hidrológicas. Clasifica la sequía en cinco categorías, desde incipiente hasta extrema. Su aplicación principal se ha dado en Estados Unidos, debido a las condiciones climáticas propias de la región. Entre sus limitaciones destacan su carácter uniescalar, que impide el cálculo en diferentes escalas temporales, y su baja confiabilidad en zonas montañosas, con microclimas o climas extremos (Loaiza Cerón 2014).

### 8.4. Porcentaje de precipitación normal (PNN)

Es un índice que cuantifica las desviaciones de la precipitación respecto a su promedio a largo plazo. Aunque es ampliamente utilizado, puede conducir a interpretaciones erróneas cuando se aplica en regiones extensas. Este índice puede calcularse en diferentes escalas temporales y su estimación consiste en dividir cada valor de precipitación entre el promedio de la serie de tiempo y multiplicarlo por 100. De esta manera, se considera que la precipitación es normal (100 %) cuando coincide con el valor promedio. Una de sus principales desventajas es que, debido a la naturaleza de los datos de precipitación, suele existir una diferencia entre la media y la mediana, siendo esta última, en teoría, un valor más representativo (Rivera 2014; Trujillo Osorio 2018).

Ecuación 7. Porcentaje de precipitación normal (PNN)

$$\text{PNN} = \left( \frac{P_i}{\bar{P}} \right) \times 100$$

Donde:  $P_i$  = precipitación mensual  
 $\bar{P}$  = precipitación media mensual

### 8.5. Deciles de precipitación

Es quizá el índice más sencillo de calcular. Fue propuesto por Gibbs y Maher en 1967 con el objetivo de mejorar el enfoque del Porcentaje de Precipitación Normal (PPN). Este índice ha sido empleado en diversas investigaciones, principalmente en Australia y Sudáfrica. Su cálculo consiste en ordenar los datos de precipitación de mayor a menor y, posteriormente, determinar los deciles. No obstante, presenta la desventaja de requerir una base de datos amplia para garantizar la adecuada estimación de dichos deciles (Rivera 2014; Trujillo Osorio 2018).

Ecuación 8. Posición de k-esimo decil

$$Dk = \frac{k}{10}(n - 1) + 1$$

Donde:  $k$  = k-esimo decil (1, 2, 3, 4, 5)  
 $n$  = tamaño de la muestra

## 9. Características principales de la sequía

De acuerdo con la Organización Meteorológica Mundial (2012), la caracterización de la sequía se realiza mediante los siguientes parámetros fundamentales:

El inicio de un periodo de sequía se establece cuando la precipitación registrada desciende por debajo de los valores normales, y su fin ocurre cuando la precipitación retorna a dichos valores climatológicos. La duración corresponde al periodo continuo, expresado en meses o años, durante el cual persiste esta condición de déficit (Valarezo Aguilar, 2017; Vega Jácome, 2018).

La intensidad media se define como el valor promedio del evento, calculado como la magnitud dividida entre su duración, mientras que la intensidad máxima corresponde al valor más alto alcanzado durante el periodo. La magnitud representa el déficit acumulado de precipitación a lo largo del episodio (OMM, 2012; Valarezo Aguilar, 2017). La frecuencia indica el número de veces que ocurre un evento de sequía en un intervalo de tiempo determinado.

Finalmente, la distribución espacial se determina mediante la interpolación de valores de sequía utilizando Sistemas de Información Geográfica (SIG), lo que permite analizar su extensión regional e identificar áreas homogéneas afectadas por el fenómeno.

## **10. Precipitación**

La precipitación es un componente esencial del ciclo hidrológico, caracterizado por una marcada variabilidad temporal y espacial; es común que en una zona se presenten lluvias mientras en otra cercana no ocurra lo mismo. Por lo tanto, constituye un indicador fundamental en diversos campos, especialmente en la ingeniería, ya que representa la causa principal de los fenómenos hidrológicos más relevantes, y su adecuada cuantificación se considera uno de los mayores desafíos en el estudio del clima (Quispe Quispe 2012).

Corresponde a la fase del ciclo hidrológico en la que el agua, en estado sólido o líquido, se transfiere desde la atmósfera hacia la superficie terrestre. El estado líquido constituye la forma más común del agua (Quispe Quispe 2012). Técnicamente, la precipitación se define como la cantidad de agua acumulada sobre un área determinada: un milímetro de altura sobre un metro cuadrado equivale a un litro de agua (Salinas Alvarado 2017). Su medición se realiza mediante pluviómetros, generalmente con registros diarios (Salinas Alvarado 2017).

## **11. Climatología**

La climatología se define como la ciencia que estudia los fenómenos que interactúan en la atmósfera y analiza el comportamiento promedio de las variables del tiempo atmosférico a partir de series de datos de al menos treinta años (Sánchez 1977). En la actualidad, los avances metodológicos han permitido establecer con mayor precisión la climatología de diversas variables atmosféricas, gracias al desarrollo de las ciencias físicas y matemáticas, en particular de la estadística. Este progreso ha facilitado la aplicación de herramientas estadísticas que contribuyen a una caracterización y comprensión más exacta de los distintos componentes meteorológicos (Sánchez 1976).

La precipitación y sus características inciden en la sociedad en múltiples dimensiones, principalmente en los ámbitos social, ambiental y económico. Para mitigar, reducir o incluso prevenir sus impactos, es fundamental contar con un conocimiento amplio sobre las fluctuaciones y tendencias climáticas, lo que permite anticipar sus posibles efectos. En este sentido, resulta esencial realizar una caracterización estadísticamente robusta (Montealegre Bocanegra y Pabón Caicedo 2000; Rivera 2014).

## **Capítulo segundo**

### **Procesos metodológicos**

#### **1. Definición del área de estudio**

El área de estudio corresponde a la provincia de García Rovira, ubicada en la parte norte de la cordillera de los Andes, en Colombia, específicamente en el sector oriental del departamento de Santander, dentro de la región Andina del país. Esta provincia tiene una extensión aproximada de 2.200 km<sup>2</sup> y está conformada por los municipios de Guaca, San Andrés, Molagavita, Cerrito, Concepción, Málaga, San José de Miranda, Enciso, Macaravita, Carcasí, San Miguel y Capitanejo. Limitando con los departamentos de Boyacá y Norte de Santander.

La provincia presenta un amplio rango altitudinal, que oscila entre 600 y 4000 m s. n. m., lo que genera una marcada heterogeneidad topográfica y climática. Esta variabilidad da lugar a una amplia gama de pisos térmicos, que incluyen zonas cálidas, templadas, frías y muy frías, con condiciones que varían desde sectores áridos hasta áreas superhúmedas, lo que la convierte en un territorio de alta diversidad ambiental y ecológica.

En cuanto a las coberturas de la tierra, predominan los pastos limpios y las áreas de cultivo, donde se desarrollan principalmente actividades económicas de ganadería extensiva y agricultura, que en conjunto ocupan aproximadamente el 51 % del territorio. Les siguen las coberturas seminaturales, conformadas por herbazales, arbustales y bosques de transición, que representan el 40,8 %, mientras que los bosques naturales representan tan solo el 5,8 % del área total.

La selección de la provincia de García Rovira como área de estudio se fundamenta en su relevancia agropecuaria y en su diversidad climática y fisiográfica, así como en la escasa disponibilidad de investigaciones climáticas previas en la región. Estas características convierten al territorio en un escenario propicio para el desarrollo de estudios orientados a comprender la variabilidad espacial y temporal de los fenómenos climáticos y su relación con las condiciones biofísicas del entorno.

Los datos empleados fueron obtenidos de la cartografía climática, ambiental y política oficial de Colombia, disponibles en los portales de datos abiertos de los

principales institutos de investigación del país: el IGAC, IDEAM y el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE).

El área de estudio se delimitó a partir de la capa geográfica de municipios de Colombia. Mediante el uso del software ArcGIS Pro 3.5, se filtró la información para seleccionar los doce municipios que conforman la provincia de García Rovira, conforme a la división político-administrativa oficial de Colombia. La capa resultante fue definida como el área de estudio base para el desarrollo de la investigación.

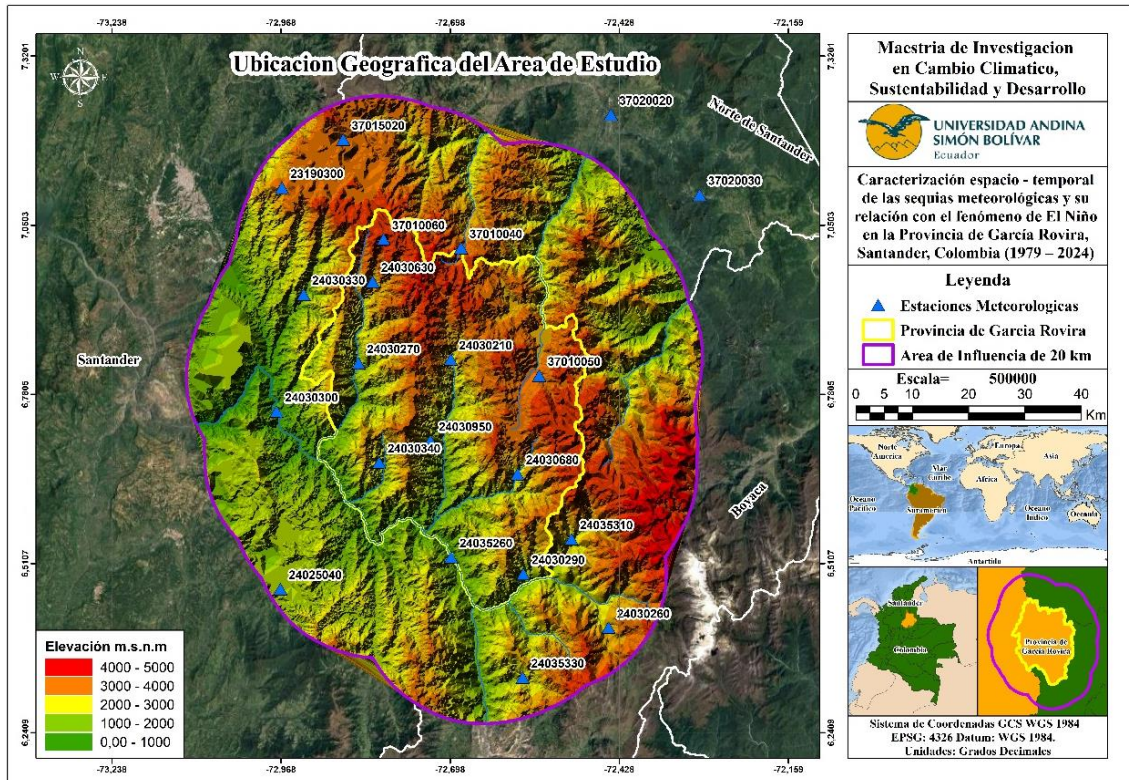


Figura 5. Representación del área de estudio, las estaciones meteorológicas y el relieve  
Elaboración propia

## 2. Fases de la investigación

La investigación adopta un enfoque cuantitativo orientado a la caracterización espacio-temporal de las sequías meteorológicas en la provincia de García Rovira y a la evaluación de su relación con el fenómeno ENSO. La metodología se fundamenta en las directrices del IDEAM y el manual de indicadores e índices de sequía elaborado por la OMM y la GWP (2016), adoptado por el IDEAM (2024). La precipitación mensual es el indicador principal para el cálculo del índice SPI, herramienta reconocida internacionalmente para la identificación y cuantificación de sequías. El procedimiento metodológico comprende la obtención, depuración, completitud y validación de los registros pluviométricos, el análisis de la climatología y su variabilidad, el cálculo del SPI

y la correlación con el índice ONI para determinar la influencia del fenómeno ENSO. Asimismo, el IDEAM, como entidad oficial nacional responsable en materia hidrometeorológica, quien valida los registros meteorológicos del país mediante estudios técnicos que garantizan una adecuada distribución espacial de las estaciones, considerando la diversidad geográfica, orográfica, climática y ecológica del territorio nacional, así como la correcta toma y control de las mediciones. En conjunto, se aplicaron métodos estadísticos y geoestadísticos que aseguran la calidad de los datos y la representatividad espacial de los resultados.

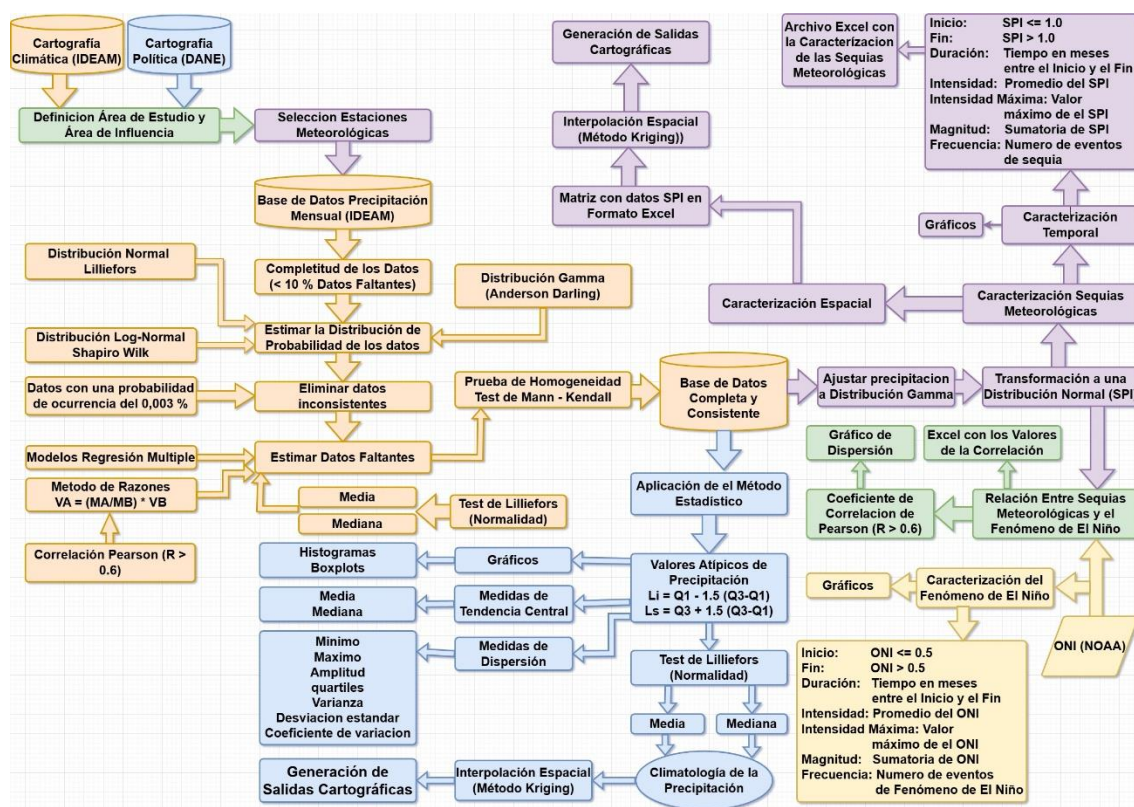


Figura 6. Diagrama resumen de la metodología de la investigación  
Elaboración propia

## 2.1. Obtención, depuración, completitud y validación de los valores de precipitación mensual

La primera medida fue obtener los datos de precipitación mensual para lo cual es fundamental establecer el área de influencia, siguiendo los lineamientos de Guajardo-Panes et al. (2017), quienes indican que deben considerarse estaciones de apoyo ubicadas dentro de un radio no mayor a 20 km desde el perímetro del área de estudio. La delimitación del área de influencia se realizó mediante la herramienta área de influencia del software ArcGIS Pro 3.5.

Posteriormente, a partir de las capas geográficas de estaciones meteorológicas de Colombia, y del área de influencia previamente definida, se aplicó la herramienta recorte en ArcGIS Pro 3.5 para identificar las estaciones ubicadas dentro de dicha área. Estas fueron consideradas viables para el análisis de la variabilidad climática y la caracterización de sequías meteorológicas.

Tabla 1  
Estaciones meteorológicas tenidas en cuenta en la investigación

<b>Id</b>	<b>Nombre</b>	<b>Código</b>	<b>Tipo</b>	<b>Fecha Inst</b>	<b>Longitud</b>	<b>Latitud</b>	<b>Altitud</b>
1	PICACHO EL	23190300	PM	15/07/1967	-72,9664	7,1100	3310
2	ESC MOGOTES	24025040	CP	15/11/1973	-72,9689	6,4700	1673
3	CERRITO	24030210	PM	15/02/1958	-72,6972	6,8361	2440
4	COCUY EL	24030260	PM	15/03/1958	-72,4454	6,4082	2749
5	SAN ANDRES	24030270	PM	15/02/1956	-72,8442	6,8300	1702
6	MACARAVITA	24030290	PM	15/07/1958	-72,5814	6,4939	1856
7	CEPITA	24030300	PM	15/08/1958	-72,9750	6,7531	600
8	TOPE EL	24030330	PM	15/09/1958	-72,9317	6,9397	1449
9	MOLAGAVITA	24030340	PM	15/10/1958	-72,8114	6,6717	2150
10	BARAYA	24030630	PM	15/12/1973	-72,8217	6,9603	2927
11	EL PARAMO	24030680	CP	15/06/1974	-72,5908	6,6533	2371
12	MALAGA 2 AUT	24030950	PG	15/12/1973	-72,7297	6,7064	2237
13	CAPITANEJO	24035260	CO	15/06/1974	-72,6966	6,5207	1160
14	CHISCAS	24035310	CO	15/06/1974	-72,5047	6,5495	2350
15	BOAVITA	24035330	AM	15/08/1978	-72,5823	6,3290	2150
16	PRESIDENTE	37010040	PM	15/10/1972	-72,6808	7,0139	3320
17	TABETA	37010050	PM	15/05/1979	-72,5561	6,8103	3168
18	PORTILLO EL	37010060	PM	15/12/1976	-72,8044	7,0278	3824
19	BERLIN	37015020	CP	15/05/1968	-72,8686	7,1869	3214
20	SAN BERNARDO	37020020	PM	15/10/1973	-72,4419	7,2267	1278
21	CAMPO HERMOSO	37020030	PM	15/09/1958	-72,3003	7,0989	1660

Elaboración propia

Para esta investigación se seleccionó el periodo de tiempo comprendido entre 1979 y 2024, ya que en dicho intervalo se dispone de información mensual de precipitación para todas las estaciones analizadas. La definición de este rango temporal se sustentó en los siguientes criterios:

- Las estaciones meteorológicas se encuentran en estado activo, lo que garantiza la continuidad y consistencia de los registros.
- Se tomó 1979 como año inicial, dado que a partir de esa fecha todas las estaciones cuentan con registros mensuales de precipitación completos y consistentes.
- Se estableció como requisito un mínimo de 30 años de registros continuos de precipitación mensual, en concordancia con estudios sobre sequías que sugieren este umbral para reducir la influencia de las oscilaciones climáticas naturales (Lamb y Changnon 1981). En este sentido, se requieren entre 30 y 50 años de datos para estabilizar el promedio y la distribución de probabilidades, mientras que periodos de 60 a 70 años permiten estimaciones más precisas de la asimetría y la curtosis (Rivera 2014).
- Desde una perspectiva estadística, se requieren al menos 30 datos para aplicar pruebas paramétricas y no paramétricas de manera confiable. En este estudio se dispone de 46 años de información (1979-2024), lo que asegura una base suficiente para obtener resultados estadísticamente robustos.

Definidas las estaciones meteorológicas viables para el estudio, se procedió a la descarga de los registros de precipitación mensual desde el geoportal oficial del IDEAM, disponible en el siguiente enlace: <http://dhime.ideam.gov.co/atencionciudadano/>.

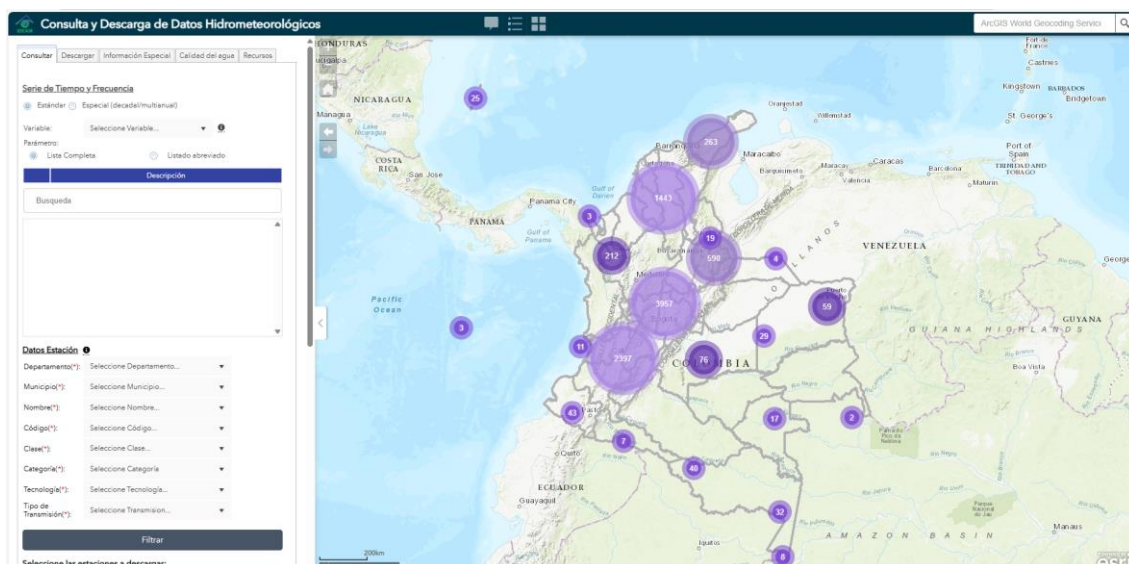


Figura 7. Plataforma del IDEAM para descargar datos meteorológicos

Fuente: Imagen tomada de la plataforma del IDEAM

### 2.1.1. Organización de los datos

Posterior a la descarga de los registros de precipitación mensual de las estaciones meteorológicas seleccionadas, se procedió a la organización y estructuración de la información en un archivo de Microsoft Excel, denominado Precipitacion.xlsx.

El archivo se diseñó en hojas independientes, cada una correspondiente a una estación meteorológica. En cada hoja, los datos se dispusieron en cuatro columnas con la siguiente estructura:

- ID: identificador consecutivo de cada registro.
- Año: año de observación.
- Mes: número del mes, codificado del 1 al 12.
- PP: valor de precipitación mensual, expresado en milímetros (mm).

La organización sistemática de los datos permitió estandarizar la base de información para su posterior análisis estadístico y espacial. Un ejemplo del formato empleado se presenta en la tabla 1.

Tabla 2  
**Estructura para ordenar los datos de precipitación**

ID	Año	Mes	PP
1	1979	4	12
2	1979	5	8
3	1979	6	0
4	1979	7	200
5	1979	8	130
6	1979	9	245
7	1980	10	
8	1980	11	15
9	1980	12	
10	1980	1	0
11	1980	2	15
12	1980	3	23
13	1980	4	0
14	1980	5	48

Elaboración propia

### 2.1.2. Completitud de los datos

Se evaluó la proporción de datos faltantes en los registros de precipitación mensual siguiendo los criterios propuestos por diversos autores (Paredes, Millano y Guevara 2008; Ávila Díaz, Carvajal Escobar y Gutiérrez Serna 2014; Rivera 2014; Guajardo-Panes et al. 2017; Loaiza Cerón 2014). De acuerdo con estos estudios, se considera aceptable un rango hasta del 20 % de valores faltantes, teniendo en cuenta que

cuanto mayor sea la completitud de los registros, mayor será la confiabilidad y estabilidad estadística de los datos observados por cada estación meteorológica (Organización Meteorológica Mundial 2012).

La presente investigación adaptó un umbral máximo del 10 % de datos faltantes, conforme a lo establecido por Ávila Díaz, Carvajal Escobar y Gutiérrez Serna (2014) y Arriaga et al. (2017).

El cálculo de la proporción de datos faltantes se efectuó en el software Microsoft Excel 2016, mediante una regla de tres simple, considerando el número total de meses del registro (552 meses) como el 100 %. A partir de este valor, se determinó el porcentaje correspondiente al número de meses con datos ausentes en cada estación meteorológica.

### **2.1.3. Evaluación de la distribución probabilística de la precipitación**

En esta etapa inicial se analiza el comportamiento estadístico de los datos de precipitación mensual con el propósito de identificar la función de distribución de probabilidad que mejor se ajuste y represente su estructura y comportamiento físico. En consecuencia, se busca definir el tratamiento estadístico más adecuado para su análisis posterior.

Se aplican pruebas de bondad de ajuste a tres distribuciones de probabilidad: Normal, Gamma y Log-normal, ampliamente empleadas en estudios hidrológicos y climáticos. La evaluación se realiza con un nivel de significancia del 5 % ( $\alpha = 0,05$ ), lo que permite determinar si los datos observados se ajustan de manera estadísticamente aceptable a alguna de las distribuciones evaluadas.

La distribución que presente el mejor ajuste estadístico (mayor valor p-Value entre aquellas con  $p \geq 0,05$ ) será utilizada para modelar la precipitación mensual de cada estación. A partir de esta distribución se establecen umbrales probabilísticos que permiten identificar valores con probabilidad de ocurrencia inusualmente baja ( $< 0,003$  %), dichos valores serán posteriormente verificados mediante comparación con los registros de estaciones vecinas para la misma fecha, con el fin de verificar su consistencia.

#### **2.1.3.1. Prueba de bondad de ajuste para la distribución Gamma**

Para determinar si los datos de precipitación mensual siguen una distribución Gamma, se aplica la prueba de bondad de ajuste de Anderson-Darling. Esta prueba no paramétrica se caracteriza por su alta sensibilidad, especialmente en las colas de la distribución, aspecto fundamental para el análisis de eventos extremos como las sequías.

En primer lugar, se define la función de densidad de probabilidad de la distribución Gamma. La precipitación mensual se modela mediante una distribución Gamma con parámetro de forma  $k > 0$  y parámetro de escala  $\theta > 0$ , cuya función de densidad de probabilidad está dada por:

Ecuación 9. Función de densidad de probabilidad (PDF) con parámetro de escala ( $\theta$ )

$$f(x; k, \theta) = \frac{1}{\theta^k \Gamma(k)} x^{k-1} e\left(-\frac{x}{\theta}\right), \quad \text{para } x, k, \theta > 0$$

Ecuación 10. Función de densidad de probabilidad (PDF) parámetro de tasa ( $\beta = 1/\theta$ )

$$f(x; k, \beta) = \frac{\beta^k}{\Gamma(k)} x^{k-1} e(-\beta x), \quad \text{para } x > 0$$

Ecuación 11. Definición de la función Gamma  $\Gamma(k)$

$$\Gamma(k) = \int_0^{\infty} t^{k-1} e^{-t} dt$$

Donde:  $x$  = valor de precipitación mensual  
 $k$  = parámetro de forma (controla la asimetría de la distribución)  
 $\theta$  = parámetro de escala (controla la dispersión de la distribución)  
 $\beta$  = parámetro de tasa (controla la dispersión de la distribución)  
 $\Gamma(k)$  = función Gamma  
 $t$  = variable de integración (variable muda)

Estimación de parámetros mediante el método de máxima verosimilitud (MLE).

Ecuación 12. Estimación del parámetro de forma  $\hat{k}$

$$\ln(\hat{k}) - \psi(\hat{k}) = \ln(\bar{x}) - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln(x_i)$$

Donde:  $x_i$  = precipitación mensual  
 $\bar{x}$  = media aritmética de la precipitación mensual  
 $k$  = parámetro de forma  
 $\psi(\hat{k})$  = función digamma (derivada del algoritmo de la función Gamma)  
 $n$  = número de observaciones con precipitación positiva

Ecuación 13. Cálculo del parámetro de escala  $\hat{\theta}$

$$\hat{\theta} = \frac{\bar{x}}{\hat{k}}$$

Donde:  $\bar{x}$  = media aritmética de la precipitación mensual  
 $k$  = parámetro de forma

Una vez estimados los parámetros de forma, escala y tasa, mediante el método de máxima verosimilitud, se procede al cálculo del estadístico de Anderson-Darling ( $A^2$ ).

Ecuación 14. Estadístico de Anderson - Darling ( $A^2$ )

$$A^2 = -n - \sum_{i=1}^n \frac{(2i-1)}{n} [\log F(y_i) + \log(1 - F(y_{N+1-i}))]$$

Donde:  $n$  = es el tamaño de la muestra  
 $F(y_i)$  = función de distribución acumulada (FDA) de la distribución Gamma estimada con los parámetros  $k$  y  $\theta$ , evaluada en el dato  $y_i$   
 $2i - 1$  = ponderador impar  
 $F(y_{N+1-i})$  = FDA evaluada en el dato simétrico  
 $\log F(y_i)$  = logaritmo natural de la FDA  
 $\log(1 - F(y_{N+1-i}))$  = logaritmo natural de la cola superior

La prueba de bondad de ajuste se implementó de forma automatizada en R Project 4.5.0, utilizando la función `fitdistr()` del paquete MASS para la estimación de parámetros y la función `ad.test()` del paquete goftest para el cálculo estadístico de Anderson-Darling.

La prueba se aplicó con un nivel de significancia de 0,05 bajo el siguiente contraste de hipótesis:

- $H_0$  = Los datos provienen de una distribución Gamma.
- $H_1$  = Los datos no provienen de una distribución Gamma.

El análisis se interpreta de la siguiente manera:

- Si el valor  $p < 0,05$ , se rechaza la hipótesis nula, concluyendo que los datos no siguen una distribución Gamma.
- Si el valor  $p \geq 0,05$ , no se rechaza la hipótesis nula, determinando que no existe evidencia estadística suficiente para afirmar que los datos no provienen de una distribución Gamma.

### 2.1.3.2. Prueba de distribución normal

Para determinar si los datos de precipitación mensual presentan una distribución normal, se aplicó la prueba de bondad de ajuste de Lilliefors, una versión modificada de la prueba de Kolmogórov-Smirnov, adecuada para situaciones en las que los parámetros poblacionales son desconocidos y deben estimarse a partir de la muestra.

El cálculo de esta prueba no paramétrica requiere estimar la media y la desviación estándar muestrales. A continuación, se determina la función de distribución empírica, la cual se contrasta con la función de distribución teórica normal. A partir de esta comparación se calculan las diferencias absolutas entre ambas distribuciones y finalmente se obtiene el estadístico de la prueba de Lilliefors.

Ecuación 15. Media muestral

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$$

Ecuación 16. Varianza muestral

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2$$

Ecuación 17. Desviación Estándar Muestral

$$s = \sqrt{s^2}$$

Ecuación 18. Función de distribución empírica

$$F_n(y_{(i)}) = \frac{i}{n}$$

Ecuación 19. Función de distribución teórica normal

$$F_0(y_{(i)}) = \Phi\left(\frac{y_{(i)} - \bar{y}}{s}\right)$$

Ecuación 20. Diferencias absolutas

$$d_i = |F_n(y_{(i)}) - F_0(y_{(i)})|$$

Donde:

- $d_i$  = estadístico de Lilliefors
- $\bar{y}$  = media muestral
- $n$  = tamaño de la muestra
- $y_i$  = valor  $i$ -ésimo de precipitación mensual de cada mes
- $s^2$  = varianza muestral
- $s$  = desviación estándar
- $i$  = numero de observaciones menores o iguales a  $y_i$
- $\Phi$  = función acumulada de la distribución normal estándar

La prueba se realizó de forma automatizada en R Project 4.5.0, mediante la función `lillie.test()` del paquete `nortest`. El análisis se llevó a cabo considerando un nivel de significancia de 0,05 bajo el siguiente contraste de hipótesis:

- $H_0$  = Los datos provienen de una distribución normal.
- $H_1$  = Los datos no provienen de una distribución normal.

El análisis se interpreta de la siguiente manera:

- Si el valor  $p < 0,05$ , se rechaza la hipótesis nula, concluyendo que los datos no siguen una distribución normal.
- Si el valor  $p \geq 0,05$ , no se rechaza la hipótesis nula, determinando que no existe evidencia estadística suficiente para afirmar que los datos no provienen de una distribución normal.

### 2.1.3.3. Prueba de distribución log-normal

Para determinar si los datos de precipitación mensual presentan una distribución log-normal, se aplicó la prueba de bondad de ajuste de Shapiro-Wilk. Dado que una variable con distribución log-normal se transforma en una variable con distribución normal al aplicar el algoritmo natural, previamente se realizó una transformación logarítmica a los valores de precipitación y posteriormente se aplicó la prueba de Shapiro-Wilk.

Ecuación 21. Transformación logarítmica

$$Y_i = \ln(X_i)$$

Donde:

- $X_i$  = valor de precipitación mensual  $> 0$
- $Y_i$  = valor de transformación para el análisis

Ecuación 22. Media logarítmica

$$\bar{Y}_{\ln X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln(X_i)$$

Ecuación 23. Desviación estándar logarítmica

$$\sigma_{\ln X} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\ln(X_i) - \bar{Y}_{\ln X})^2}$$

Ecuación 24. Estadístico de Shapiro-Wilk

$$W = \frac{(\sum a_i Y_{(i)})^2}{\sum (Y_i - \bar{Y})^2}$$

Donde:

$Y_i$  = estadísticos de orden (valores ordenados de  $Y_i$ )

$\bar{Y}$  = media muestral de  $Y_i$  (datos transformados)

$a_i$  = coeficientes tabulados que dependen del tamaño muestral  $n$

$n$  = tamaño de la muestra

La prueba se implementó de forma automatizada en R Project 4.5.0 mediante la función `shapiro.test()` del paquete `base stats`. Este procedimiento permite evaluar si los datos transformados provienen de una distribución normal y por ende si los datos originales siguen una distribución log-normal sin requerir el conocimiento previo de la media y la desviación estándar poblacionales. El análisis se llevó a cabo considerando un nivel de significancia de 0,05 bajo el siguiente contraste de hipótesis:

- $H_0$  = Los datos provienen de una distribución log-normal.
- $H_1$  = Los datos no provienen de una distribución log-normal.

El análisis se interpreta de la siguiente manera:

- Si el valor  $p < 0,05$ , se rechaza la hipótesis nula, concluyendo que los datos no siguen una distribución log-normal.
- Si el valor  $p \geq 0,05$ , no se rechaza la hipótesis nula, determinando que no existe evidencia estadística suficiente para afirmar que los datos no provienen de una distribución log-normal.

#### 2.1.4. Análisis de consistencia de los datos

El análisis de consistencia constituye una etapa fundamental y altamente sensible en la depuración de bases de datos de precipitación mensual. Dado el comportamiento característico de esta variable hidrometeorológica, los métodos basados en los parámetros de la distribución Gamma resultan particularmente idóneos para este fin Rivera (2014).

Para definir el umbral que permita discriminar posibles datos inconsistentes, se considera para cada estación y para cada mes del año la función de distribución de probabilidad que presente el mejor ajuste, así como los parámetros estadísticos propios de dicha distribución.

En las tres distribuciones evaluadas (Gamma, normal y log-normal) se definieron como datos potencialmente inconsistentes aquellos valores cuya probabilidad de ocurrencia es inferior al 0,003 %. Este umbral corresponde en términos de frecuencia esperada aproximadamente a tres eventos cada mil años, lo que representa una ocurrencia excepcionalmente baja.

En cuanto a los valores extremos secos, no se identificaron inconsistencias, dado que en la base de datos los valores faltantes se encuentran codificados como “sin dato”, mientras que los meses sin precipitación se registran con el valor cero (0), lo cual es habitual y estadísticamente válido dentro de las series pluviométricas.

##### 2.1.4.1. Procedimientos basados en una distribución Gamma

Para establecer un umbral que permita identificar datos inconsistentes a partir de los parámetros de una distribución Gamma y el comportamiento de los datos, es necesario, en primer lugar, definir la función de distribución Gamma mediante su ecuación característica. Posteriormente se estiman los parámetros de forma, escala y tasa usando el método de máxima verosimilitud, aplicando las ecuaciones previamente definidas.

Una vez estimados los parámetros, se calcula el umbral superior de inconsistencia ( $x_p$ ) como el cuantil correspondiente a una probabilidad acumulada (0,99997), a partir de la función de distribución inversa.

Ecuación 25. Establecimiento del umbral superior de inconsistencia

$$x_p = F^{-1}(p; \hat{k}, \hat{\theta})$$

$$x_{0.99997} = F^{-1}(0.99997; \hat{k}, \hat{\theta})$$

Donde:  $F^{-1}(p; \hat{k}, \hat{\theta})$  = función de distribución acumulada CDF inversa de la distribución Gamma (función cuantil)

Para este cálculo, únicamente se consideraron los registros con valores de precipitación mayores a cero, siguiendo la metodología propuesta por Rivera (2014). El procedimiento se ejecutó de forma automatizada en R Project 4.5.0, mediante comandos programados para detectar y marcar automáticamente los valores fuera del rango aceptable.

#### 2.1.4.2. Procedimiento basado en una distribución normal

Se consideraron valores potencialmente inconsistentes aquellos datos que superaron la media más cuatro veces la desviación estándar, conforme a la siguiente expresión:

Ecuación 26. Umbral superior bajo parámetros de una distribución normal

$$PP = \bar{x} + 4\sigma$$

Donde: PP = Limite de precipitación inconsistente  
 $\bar{x}$  = Media  
 $\sigma$  = Desviación estándar

Este umbral equivale a un nivel de confianza del 99,997 %, lo que garantiza que los datos conservados representan adecuadamente la variabilidad natural de la precipitación. Para este cálculo, únicamente se consideraron los registros con valores de precipitación mayores a cero, siguiendo la metodología propuesta por Rivera (2014). El procedimiento se ejecutó de forma automatizada en R Project 4.5.0.

#### 2.1.4.3. Procedimiento basado en distribución log-normal

La distribución log-normal es ampliamente utilizada para modelar variables hidrometeorológicas como la precipitación, ya que son valores positivos con asimetría positiva. Una propiedad fundamental de esta distribución es que si una variable aleatoria sigue una distribución log-normal, entonces su logaritmo natural sigue una distribución normal. Para este fin primero se aplicó una transformación logarítmica a los datos de precipitación y luego se estimaron la media y la desviación estándar logarítmica como se definió en las ecuaciones de pasos anteriores. luego se definió un nivel de probabilidad  $p = 0,99997$  como umbral para identificar valores potencialmente

inconsistentes y finalmente se aplica la función inversa exponencial para obtener el umbral en unidades originales de precipitación.

Ecuación 27. Valor crítico normal estándar

$$z_p = \Phi^{-1}(p)$$

$$z_{0.99997} = \Phi^{-1}(0.99997) \approx 4.0$$

Ecuación 28. Umbral en escala logarítmica

$$y_p = \hat{\mu} + z_p \cdot \hat{\sigma}$$

Ecuación 29. Umbral en escala original

$$x_p = \exp(\hat{\mu} + z_p \cdot \hat{\sigma})$$

Donde  $z_p$  = valor crítico (cuantil de la distribución normal)  
 $\Phi^{-1}$  = función inversa de la función de distribución acumulada  
 $p$  = probabilidad acumulada  
 $\hat{\mu}$  = media algorítmica estimada  
 $\hat{\sigma}$  = desviación estándar algorítmica estimada  
 $\text{Exp}()$  = función exponencial

### 2.1.5. Estimación de datos faltantes

La estimación de datos faltantes fue un paso esencial en este estudio, dado que la metodología implementada no admite matrices con valores ausentes. La ausencia de datos puede afectar significativamente los resultados del análisis estadístico y espacial, por lo que se aplicaron procedimientos de estimación de datos faltantes basados en criterios estadísticos robustos y ampliamente utilizados en estudios hidrometeorológicos. A continuación, se describen las técnicas aplicadas de forma jerárquica, donde en primera instancia se tiene en cuenta el método de regresión múltiple, método de razones y finalmente el método basado en estadísticas descriptivas de los datos.

#### 2.1.5.1. Estimación de datos faltantes mediante regresión múltiple

En primera instancia, la estimación de los datos faltantes se realizó mediante modelos de regresión múltiple, considerado una de las técnicas más confiables para la estimación de registros climáticos (Rivera 2014; Valarezo Aguilar 2017). Este método se fundamenta en la relación estadística existente entre las series de precipitación de

diferentes estaciones meteorológicas, evaluada a través del coeficiente de correlación de Pearson ( $R^2$ ).

Para cada estación con datos ausentes, se identificaron aquellas estaciones que presentaron correlaciones altas ( $R^2 > 0,6$ ) con la serie de referencia. Con base en estas, se construyeron modelos de regresión múltiple que permitieron estimar los valores faltantes de precipitación en el mes correspondiente, utilizando como variables predictoras las estaciones con mayor correlación.

Ecuación 30. Coeficiente de correlación de Pearson

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}}$$

Donde:  $X_i, Y_i$  = Valores de precipitación mensual en las dos estaciones  
 $\bar{X}, \bar{Y}$  = media de la precipitación en las dos estaciones

El coeficiente de correlación de Pearson se aplicó para determinar el grado de relación lineal entre las estaciones meteorológicas (Rivera 2014; Pizarro, Ramírez y Flores 2003), dado que constituye una medida ampliamente utilizada en estudios de variabilidad climática y análisis de sequías.

Tabla 3  
**Clasificación del coeficiente de correlación de Pearson**

Valor de $R^2$	Tipo de Correlación
$R^2 = 1$	Correlación perfecta
$0,8 < R^2 < 1$	Correlación muy alta
$0,6 < R^2 < 0,8$	Correlación alta
$0,4 < R^2 < 0,6$	Correlación moderada
$0,2 < R^2 < 0,4$	Correlación baja
$0 < R^2 < 0,2$	Correlación muy baja
$R^2 = 0$	Correlación nula

Fuente: Adaptado de Valarezo Aguilar (2017)

Ecuación 31. Formula general de la regresión lineal múltiple

$$Y = a + b \cdot X_1 + c \cdot X_2$$

Donde:  $Y$  = valor de precipitación estimada en la estación con dato faltante  
 $X_1, X_2$  = valores de precipitación mensual en estación con correlación alta  
 $a, b, c$  = constantes de regresión obtenidas

### 2.1.5.2. Estimación de datos faltantes mediante el método de razones

Cuando una estación meteorológica presenta alta correlación lineal ( $R^2 > 0,6$ ) con otra estación vecina, los valores ausentes se estimaron aplicando el método de razones, el cual relaciona el comportamiento promedio entre ambas series. En este procedimiento, el valor faltante se calculó a partir de los registros reales de la estación correlacionada en la misma fecha, mediante la ecuación propuesta por Crespo Pichardo (2006) y utilizada por Rivera (2014):

Ecuación 32. Método de razones

$$VA = (MA/MB) * VB$$

Donde: VA = Valor estimado para el dato faltante en la estación A  
 MA = Valor de la media en la estación A para el mes faltante  
 MB = Valor de la media en la estación B para el mes faltante  
 VB = Dato real medido en la estación B para la misma fecha del dato faltante en la estación A

### 2.1.5.3. Estimación de datos faltantes mediante técnicas estadísticas

Cuando no fue posible aplicar los métodos anteriores, ya sea por falta de correlación alta entre las estaciones o ausencia simultánea de datos de precipitación mensual en todas ellas, la imputación de datos se efectuó utilizando estadísticos de tendencia central (media o mediana) de la misma serie mensual. La selección del estadístico representativo se basó en los resultados de una prueba de bondad de ajuste test de Lilliefors con un nivel de significancia de 0,05. En función de estos resultados:

- Cuando los datos presentaron distribución normal, los valores faltantes se completaron con el promedio mensual de precipitación.
- Cuando los datos no presentaron distribución normal, se utilizaron los valores de la mediana mensual, al ser el estadístico de tendencia central más robusto para distribuciones diferentes a la normal o gaussiana.

Esta metodología ha sido aplicada por diversos autores, entre ellos Pizarro, Ramírez y Flores (2003), Quispe Quispe (2012) y Rivera (2014).

Ecuación 33. Media muestral

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

Ecuación 34. Mediana muestral

$$\text{Mediana datos impares} = x_{\left(\frac{n+1}{2}\right)}$$

$$\text{Mediana datos pares} = \frac{x_{\left(\frac{n}{2}\right)} + x_{\left(\frac{n}{2}+1\right)}}{2}$$

Donde:  $x$  = valor de la precipitación mensual  
 $n$  = número total de la muestra

El proceso completo de estimación y validación de datos faltantes se desarrolló de forma automatizada en el software R Project 4.5.0, mediante scripts programados específicamente para este propósito, lo que garantizó la reproducibilidad, transparencia y trazabilidad en el manejo de los datos. Entre los comandos y estructuras empleadas se incluyeron la creación de funciones personalizadas conforme a la metodología definida, así como el uso de sentencias de control (if-else, for, break), las funciones cor() y el método de correlación de Pearson, la librería nortest con el comando lillie.test(), y las funciones estadísticas descriptivas mean() y median().

### 2.1.6. Homogeneidad de los datos

La homogeneidad y tendencia de las series temporales de precipitación se evaluaron con el propósito de identificar posibles tendencias monótonas (crecientes o decrecientes) en los registros mensuales de precipitación, sin asumir que los datos provienen de una distribución normal. En caso de detectarse dichas tendencias, fue necesario determinar si estas corresponden a la variabilidad climática natural interanual o si se deben a factores externos, tales como cambios en los instrumentos de medición, el emplazamiento de las estaciones, las condiciones del entorno o las variaciones atribuibles al observador (Guenni, Degryze y Alvarado 2008).

Esta verificación resultó fundamental, dado que los datos meteorológicos son altamente sensibles a las alteraciones instrumentales o de entorno, y constituye un paso

clave en la detección de posibles señales de cambio climático en la región (Guenni, Degryze y Alvarado 2008; Puertas Orozco, Carvajal Escobar y Quintero Ángel 2011).

Para este análisis se aplicó la prueba no paramétrica test de Mann-Kendall, ampliamente reconocida como uno de los métodos más apropiados para evaluar tendencias en series climatológicas y ambientales (da Silva Alves y Nóbrega 2017). Esta prueba permite diferenciar entre cambios atribuibles a la dinámica natural del clima y aquellos derivados de factores externos a la variabilidad interanual (Guenni, Degryze y Alvarado 2008).

Ecuación 35. Estadístico de Mann-Kendall

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(x_j - x_k)$$

Donde:  $n$  = número total de la muestra  
 $x_j, x_k$  = valores de precipitación en los tiempos  $j$  y  $k$  ( $j > k$ )  
 $\text{sgn}()$  = función signo definida como se ve a continuación

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

El procedimiento se desarrolló bajo un nivel de significancia de 0,05, formulando las siguientes hipótesis estadísticas:

- $H_0$ : No existe tendencia monótona en la serie mensual de precipitación (los datos son aleatorios en el tiempo).
- $H_1$ : Existe una tendencia monótona creciente o decreciente en la serie mensual de precipitación.

El análisis se interpretó de acuerdo con los siguientes criterios:

- Si  $p < 0,05$ , se rechaza la hipótesis nula, concluyendo que existe una tendencia (creciente o decreciente) estadísticamente significativa.
- Si  $p \geq 0,05$ , no se rechaza la hipótesis nula, concluyendo que no se encontró evidencia estadística suficiente para afirmar la existencia de una tendencia en la serie mensual de precipitación.

La evaluación de este parámetro y la aplicación de la prueba de Mann-Kendall se realizaron en concordancia con lo planteado en estudios previos (Méndez González, Nívar Cháidez y González Ontiveros 2008; Muñoz Marín 2008; Costa, Ferreira y Cordeiro 2015; Paredes, La Cruz y Guevara 2014; de Alcântara et al. 2019). El análisis se realizó de forma automatizada en el software R Project 4.5.0, empleando funciones personalizadas diseñadas conforme a la metodología definida. Asimismo, se implementaron sentencias de control (if-else, for, break) y se utilizó la librería Kendall, específicamente el comando MannKendall(), para la aplicación de la prueba de tendencia no paramétrica.

### **2.1.7. Distribución espacial**

Con el propósito de obtener resultados más precisos en el análisis espacial, fue fundamental garantizar que las estaciones meteorológicas presenten una distribución homogénea, debido a que tener en cuenta registros de precipitación redundante puede generar resultados errados y sesgos en los resultados (Rivera 2014). Para ello, se consideraron los siguientes criterios metodológicos:

- No deben ubicarse más de cinco estaciones meteorológicas dentro de una misma unidad climática, conforme a lo establecido por Guajardo-Panes et al. (2017). El procedimiento se desarrolló en el software ArcGIS Pro 3.5, empleando las herramientas recorte, intersección y área de influencia, con base en las capas geográficas correspondientes al área de influencia, las estaciones meteorológicas y las unidades climáticas obtenidas del geoportal de datos abiertos del IDEAM.
- Análisis altitudinal: verificación de la existencia de, al menos, una estación meteorológica por cada 500 metros de rango altitudinal.
- Análisis de distancia mínima entre estaciones: evaluación de la separación espacial promedio entre estaciones para determinar la uniformidad de la red de monitoreo. Se realiza en el software ArcGIS Pro 3.5 mediante la herramienta de análisis de patrones denominada promedio de vecinos más cercanos como lo establece ESRI (2025).
- Análisis de representatividad: delimitación de áreas de influencia mediante polígonos de thiessen, con el fin de evaluar la cobertura espacial efectiva de cada estación. En el software ArcGIS Pro 3.5 se determina haciendo uso de la herramienta de proximidad denominada crea polígonos de thiessen Esri (2025).

Como resultado final, se obtiene una base de datos de precipitación mensual completa, depurada y consistente, que constituye el punto de partida para el cálculo de los indicadores y el desarrollo de los objetivos metodológicos establecidos en esta investigación.

## **2.2. Determinar la climatología mensual de la precipitación y su variabilidad**

La climatología de la precipitación mensual se define como el valor más representativo de la precipitación en cada mes y para cada estación meteorológica, entendido como aquel valor con mayor probabilidad de ocurrencia dentro de la distribución estadística de los datos. Para su determinación se aplicó el método estadístico propuesto por Sánchez (1976), el cual integra medidas de tendencia central, dispersión y técnicas probabilísticas con el fin de garantizar la representatividad de los registros y una adecuada descripción del comportamiento histórico de la precipitación.

Dado que la precipitación presenta una marcada estacionalidad, los cálculos estadísticos se realizaron de forma mensual, permitiendo caracterizar de manera más precisa la variación intraanual y los patrones climáticos típicos de cada estación (IDEAM 2015; Vega Viviescas 2019).

### **2.2.1. Datos atípicos**

En primera instancia, se identificaron y eliminaron los valores atípicos presentes en las series mensuales de precipitación. Se consideraron valores atípicos superiores aquellos que superan el límite superior calculado como la suma entre el tercer cuartil (Q3) y 1,5 veces el rango intercuartílico (Q3 – Q1). De forma análoga, los valores atípicos inferiores se definieron como aquellos menores al límite inferior obtenido al restar 1,5 veces el rango intercuartílico al primer cuartil (Q1), como lo establecen (Montgomery y Runger 2018; Pardo, Ruiz y San Martín 2021). Las expresiones empleadas para determinar los dos límites fueron las siguientes:

Ecuación 36. Límites para determinar datos atípicos

$$Ls = Q3 + (1.5 * (Q3 - Q1)) \quad \text{Donde: } Ls = \text{Límite superior}$$

$$Li = Q1 - (1.5 * (Q3 - Q1)) \quad Li = \text{Límite inferior}$$

$$Q1 = \text{Primer cuartil}$$

$$Q3 = \text{Tercer cuartil}$$

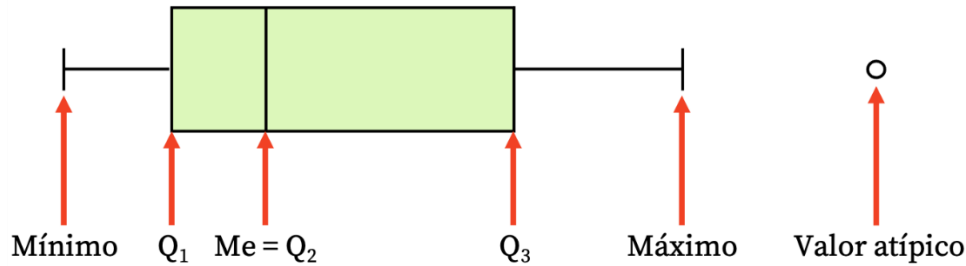


Figura 8. Representación del gráfico de cajas y bigotes (Boxplot)  
Fuente: Tomado de Wikipedia

### 2.2.2. Prueba de normalidad

Con el propósito de determinar el estadístico más representativo para cada serie mensual de precipitación, se aplicó la prueba de normalidad de Lilliefors (Lilliefors 1967). El análisis se realizó con un nivel de significancia de 0,05. De acuerdo con los resultados obtenidos:

- Cuando las series presentaron una distribución normal, se adoptó la media como estadístico representativo de la precipitación mensual.
- Cuando los datos no cumplieron el supuesto de normalidad, se utilizó la mediana, al ser un parámetro más robusto frente a asimetrías o valores extremos (Razali y Wah 2011; Montgomery y Runger 2018).

De esta manera, se estableció un valor climatológico mensual robusto y estadísticamente representativo para cada mes y para cada estación meteorológica, a partir de cálculos realizados de forma independiente para cada mes del año, lo que garantiza una descripción precisa y coherente del comportamiento histórico y estacional de la precipitación en toda la red de observación (Lilliefors 1967; Razali y Wah 2011; Montgomery y Runger 2018).

### 2.2.3. Representatividad estadística

Con el propósito de obtener una caracterización más detallada y confiable de la climatología de la precipitación, se calcularon diversos estadísticos descriptivos y de dispersión, entre ellos: media, mediana, valor mínimo, valor máximo, amplitud, cuartiles, rango intercuartílico, desviación estándar y coeficiente de variación (Sánchez 1976; Sánchez 1977).

Los resultados se representaron gráficamente mediante diagramas de cajas y bigotes (boxplots) para cada mes y cada estación meteorológica, siguiendo las

recomendaciones metodológicas propuestas por Correa y González (2002), lo que permitió visualizar la variabilidad y simetría de la precipitación.

Ecuación 37. Media muestral

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

Ecuación 38. Mediana muestral

$$\text{Mediana impar} = x_{\left(\frac{n+1}{2}\right)}$$

$$\text{Mediana par} = \frac{x_{\left(\frac{n}{2}\right)} + x_{\left(\frac{n}{2}+1\right)}}{2}$$

Ecuación 39. Valor mínimo

$$\text{Min} = x_{(1)}$$

Ecuación 40. Valor máximo

$$\text{Max} = x_{(n)}$$

Ecuación 41. Amplitud o rango

$$A = \text{Max} - \text{Min}$$

Ecuación 42. Cuartiles

$$Q_1 = P_{25}, \quad Q_2 = P_{50}, \quad Q_3 = P_{75}$$

Ecuación 43. Rango intercuartílico

$$\text{IQR} = Q_3 - Q_1$$

Ecuación 44. Varianza muestral

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$$

Ecuación 45. Desviación estándar muestral

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}$$

Ecuación 46. Coeficiente de variación muestral

$$CV = \frac{s}{\bar{x}} \times 100$$

#### 2.2.4. Distribución espacial de la climatología mensual de la precipitación

Finalmente, se determinó la distribución espacial de la climatología de la precipitación en el área de estudio, tanto para cada mes como para el acumulado anual, mediante el método de interpolación espacial Kriging. Asimismo, se generaron las isoyetas correspondientes, que representan las líneas de igual precipitación en el territorio. El método de Kriging fue seleccionado por su idoneidad en el análisis de datos climatológicos, dado que permite suavizar valores extremos, considerar la dependencia espacial entre las observaciones y mejorar la precisión de la estimación (Mejía, Pabón y Ruiz 1999; Poquet, Belda y García-Haro 2008).

Ecuación 47. Análisis de variabilidad espacial semivariograma experimental

$$\gamma_m(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z_m(u_i) - Z_m(u_i + h)]^2$$

Donde:  $Z_m(u_i)$  = precipitación en estación  $i$  para mes  $m$   
 $h$  = distancia entre pares de estaciones  
 $N(h)$  = número de pares separados por distancia  $h$

Ecuación 48. Anisotropía geométrica

$$C(\theta) = C_{(max)\cos}^2(\theta - \varphi) + C_{(min)\sin}^2(\theta - \varphi)$$

Ecuación 49. Anisotropía zonal

$$a(\theta) = \frac{a_1 a_2}{\sqrt{a_1^2 \sin^2(\theta - \varphi) + a_2^2 \cos^2(\theta - \varphi)}}$$

Ajuste del modelo teórico

Ecuación 50. Modelo esférico

$$\gamma(h) = \begin{cases} C_0 + C \left[ 1.5 \frac{h}{a} - 0.5 \left( \frac{h}{a} \right)^3 \right] & \text{si } h \leq a \\ C_0 + C & \text{si } h > a \end{cases}$$

Ecuación 51. Modelo exponencial

$$\gamma(h) = C_0 + C \left[ 1 - \exp\left(-\frac{3h}{a}\right) \right]$$

Ecuación 52. Modelo gaussiano

$$\gamma(h) = C_0 + C \left[ 1 - \exp\left(-\frac{3h^2}{a^2}\right) \right]$$

Ecuación 53. Definir grilla de interpolación

$$\text{Resolución} = \frac{\text{Extensión}}{n} \quad (\text{ej: } 10,000 \text{ m})$$

$$\text{Número de celdas} = \frac{x_{\max} - x_{\min}}{\text{resolución}} \times \frac{y_{\max} - y_{\min}}{\text{resolución}}$$

Ecuación 54. Interpolación kriging ordinario

$$\begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \cdots & Y_{1n} & \mathbf{1} \\ Y_{21} & Y_{22} & \cdots & Y_{2n} & \mathbf{1} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ Y_{n1} & Y_{n2} & \cdots & Y_{nn} & \mathbf{1} \\ \mathbf{1} & \mathbf{1} & \dots & \mathbf{1} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_n \\ \mu \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{01} \\ Y_{02} \\ \vdots \\ Y_{0n} \\ 1 \end{bmatrix}$$

solución

$\gamma_{ij} = \gamma(|u_i - u_j|)$  = semivarianza entre estaciones  $i$  y  $j$

$\gamma_{0i} = \gamma(|u_0 - u_i|)$  = semivarianza entre punto estimado y estación  $i$

$w_i$  = peso óptimo para estación  $i$

$u$  = multiplicador de Lagrange

$$w = \Gamma^{-1} \cdot \gamma_0$$

Ecuación 55. Estimación

$$Z^*(u_0) = \sum_{i=1}^n w_i Z(u_i)$$

Ecuación 56. Varianza del error

$$\sigma^2(u_0) = \sum_{i=1}^n w_i \gamma_{0i} + u$$

Ecuación 57. Validación cruzada

$$\text{MAE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Z(u_i) - Z_{-i}^*(u_i)|$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [Z(u_i) - Z_{-i}^*(u_i)]^2}$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n [Z(u_i) - Z_{-i}^*(u_i)]^2}{\sum_{i=1}^n [Z(u_i) - \bar{Z}]^2}$$

Los cálculos estadísticos y los parámetros geoestadísticos se realizaron de forma automatizada mediante el uso del software R Project 4.5.0, empleando librerías especializadas para el análisis espacial y el modelado geoestadístico, tales como `nortest`, `openxlsx`, `readxl`, `writexl`, `ggplot2` y `sf`. Asimismo, se desarrollaron funciones personalizadas conforme a la metodología definida, y se utilizaron sentencias de control (`if-else`, `for`, `break`), junto con funciones estadísticas descriptivas y de dispersión como `mean()`, `median()`, `min()`, `max()`, `quantile()`, `var()` y `sd()`, entre otras.

### 2.3. Caracterización espacio-temporal de las sequías meteorológicas y análisis de la relación con el fenómeno de El Niño

Teniendo ya definida la climatología de la precipitación mensual se procede a calcular y caracterizar las sequías meteorológicas aplicando el índice SPI y determinar su relación con el fenómeno de El Niño.

#### 2.3.1. Cálculo de las sequías meteorológicas

El cálculo de las sequías meteorológicas puede realizarse mediante diferentes indicadores climáticos, tales como la precipitación, la temperatura o la evapotranspiración. Sin embargo, la selección del índice más adecuado depende de la disponibilidad de información y de los objetivos específicos de la investigación (Organización Meteorológica Mundial 2012; Organización Meteorológica Mundial y Asociación Mundial para el Agua 2016).

En el presente estudio, las sequías se evaluaron mediante el SPI, desarrollado por McKee, Doesken y Kleist (1993), reconocido por la Organización Meteorológica Mundial (2012) como uno de los métodos más robustos y universalmente aplicables para la identificación de sequías meteorológicas en distintas escalas temporales.

El SPI se calculó empleando la librería “SPEI” del software R Project 4.5.0, a partir de series mensuales de precipitación con una extensión temporal continua de 46 años (1979-2024), superando así la longitud mínima de 30 años recomendada para estudios de este tipo (Organización Meteorológica Mundial 2012; Poquet, Belda y García-Haro 2008).

El procedimiento consistió en primera medida en definir la escala temporal de análisis, la cual para el estudio corresponde a un mes, dado que es la escala más adecuada para la identificación y caracterización de sequías meteorológicas (Organización Meteorológica Mundial 2012).

Posteriormente se ajustan los datos de precipitación mensual a una función de distribución de probabilidad Gamma, cuya idoneidad fue verificada mediante pruebas de bondad de ajuste, como las pruebas de Anderson-Darling, Lilliefors y Shapiro-Wilk. Es fundamental estimar los parámetros de escala  $\theta > 0$  y forma  $k > 0$  utilizando el método de máxima verosimilitud.

Ecuación 58. Función de densidad de probabilidad (PDF) con parámetro de escala  $\theta$

$$f(x; k, \theta) = \frac{1}{\theta^k \Gamma(k)} x^{k-1} e\left(-\frac{x}{\theta}\right), \quad \text{para } x, k, \theta > 0$$

Ecuación 59. Definición de la función Gamma  $\Gamma(k)$

$$\Gamma(k) = \int_0^{\infty} t^{k-1} e^{-t} dt$$

Luego de estimar la función de distribución de probabilidad Gamma y sus parámetros se procede a estimar la probabilidad acumulada de que ocurra un valor de precipitación menor o igual a cero, integrando la función de densidad Gamma.

Ecuación 60. Probabilidad acumulada del dato de precipitación mensual

$$F(x) = \int_0^x f(x) dx = \frac{1}{\theta^k \Gamma(k)} \int_0^x x^{k-1} e^{-x/\theta} dx$$

Donde:  $x$  = es el valor de la precipitación mensual  
 $F(x)$  = probabilidad acumulada

Finalmente, los valores de la probabilidad acumulada se transformaron a una distribución normal estandarizada, con media cero y varianza uno, obteniéndose así los valores del SPI (Organización Meteorológica Mundial 2012).

Ecuación 61. Estandarización de los valores Gamma de precipitación

$$Z = \Phi^{-1}(F(x)) = SPI$$

Donde:  $\Phi^{-1}()$  = función inversa de la distribución normal (función cuantil)  
 $F(x)$  = probabilidad acumulada  
 $Z$  = valores estandarizados

Para determinar si los datos de precipitación se ajustaban a una distribución Gamma mediante la prueba de Anderson-Darling y el posterior cálculo del SPI, fue necesario reemplazar los valores de precipitación mensual iguales a cero por un valor mínimo de 0,00001. Esta sustitución se efectuó con el propósito de evitar registros nulos en las bases de datos, conservando valores que tienden a cero sin afectar los resultados estadísticos. Esta decisión metodológica fue necesaria, dado que la distribución Gamma no admite valores iguales a cero, al ser una distribución continua definida únicamente para valores positivos y con asimetría hacia la derecha.

Este índice expresa la desviación estándar de la precipitación observada respecto al valor climatológico esperado, donde los valores negativos indican condiciones de déficit o sequía, mientras que los valores positivos reflejan excesos de precipitación o condiciones húmedas (Loaiza Cerón 2014; Gutiérrez Moreno, Ruiz Gibert y Hallack Alegría 2019).

Tabla 4  
**Clasificación del SPI según su intensidad**

Valor SPI	Clasificación
> 2,0	Extremadamente húmedo
1,50 a 1,99	Muy húmedo
1,00 a 1,499	Moderadamente húmedo
-0,99 a 0,99	Normal
-1,00 a -1,49	Moderadamente seco
-1,50 a -1,99	Severamente seco
< -2	Extremadamente seco

Fuente: Organización Meteorológica Mundial (2012)

Tabla 5  
**Clasificación del SPI según su magnitud**

Valor SPI	Clasificación
-0,1 a -0,9	Periodo normal
-1,0 a -1,9	Sequía leve
-2,0 a -2,9	Sequía poco fuerte
-3,0 a -3,9	Sequía fuerte
-4,0 a -4,9	Sequía muy fuerte
>-5,0	Sequía extremadamente fuerte

Fuente: Organización Meteorológica Mundial (2012)

### 2.3.2. Caracterización temporal de las sequías meteorológicas

La caracterización temporal de los eventos de sequía se realizó a partir del análisis de las propiedades fundamentales definidas para el SPI, las cuales permiten describir su evolución, intensidad y recurrencia. Para ello, se consideraron los siguientes criterios:

- Inicio: corresponde al momento en que el valor del SPI  $\leq -1$ , lo que indica el comienzo de un episodio de sequía (Organización Meteorológica Mundial 2012).
- Finalización: se determina cuando el valor del SPI supera  $-1$  (SPI  $> -1$ ), señalando la finalización del evento de sequía (Organización Meteorológica Mundial 2012).
- Duración: representa el periodo continuo con valores SPI  $\leq -1$ , expresado en meses o años (Valarezo Aguilar 2017 y Vega Jácome 2018).
- Intensidad media: corresponde al valor promedio del SPI durante toda la duración del evento seco (Vega Jácome 2018).
- Intensidad máxima: corresponde al valor más bajo del SPI durante un evento de sequía (Vega Jácome 2018).
- Magnitud: se obtiene mediante la sumatoria de los valores SPI  $\leq -1$  durante el evento, constituyendo un indicador del déficit acumulado de precipitación (Organización Meteorológica Mundial 2012; Valarezo Aguilar 2017).
- Frecuencia: número total de eventos de sequía registrados durante el periodo de análisis (Organización Meteorológica Mundial 2012).
- Distribución espacial: representación cartográfica de los eventos de sequía, obtenida mediante la interpolación de los valores SPI  $\leq -1$  empleando el método de Kriging, el cual permite estimar la variabilidad espacial de las condiciones secas (Mejía et al. 1999; Poquet, Belda y García - Haro 2008).

Los resultados fueron complementados con gráficos de las series temporales del SPI para cada estación meteorológica, que permiten visualizar los periodos de sequía y sus principales características. Estos gráficos se elaboraron siguiendo las recomendaciones metodológicas de Correa y González (2002).

### **2.3.3. Caracterización espacial de las sequías meteorológicas**

El análisis espacial de los eventos de sequía y de sus principales características se realizó mediante el método de interpolación geoestadística Kriging, seleccionado por su capacidad para suavizar valores extremos y generar representaciones espaciales más precisas de la variabilidad de las sequías en la provincia de García Rovira (Poquet, Belda y García-Haro 2008).

Este enfoque permitió modelar la distribución espacial del SPI y caracterizar la dinámica espacial de los eventos secos a lo largo del período 1979-2024.

Se desarrollaron los siguientes productos cartográficos:

- Mapas mensuales del SPI correspondientes al período comprendido entre enero de 1979 y diciembre de 2024, elaborados con el fin de analizar la evolución espacial y temporal de las sequías durante el periodo de estudio, identificando los meses con mayor intensidad y extensión de los eventos secos.
- Mapas temáticos de características de sequía, en los que se representan indicadores como la intensidad, la magnitud y la duración de los eventos de sequía, así como la clasificación de las sequías según categorías que varían desde moderadas hasta severas y extremadamente secas, conforme a los umbrales definidos por la Organización Meteorológica Mundial (2012).

Estos productos constituyeron la base para el análisis espacio-temporal de las sequías meteorológicas en la región, permitiendo identificar patrones de recurrencia y zonas con mayor susceptibilidad a condiciones secas persistentes.

### **2.3.4. Relación entre el fenómeno de El Niño y las sequías meteorológicas**

El fenómeno de El Niño se caracterizó a partir del índice ONI, por sus siglas en inglés, disponibles en el geoportal del Centro de Predicción Climática (CPC) de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA). [https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis\\_monitoring/ensostuff/ONI\\_v5.php](https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php).

Este índice constituye la referencia más utilizada por la comunidad científica internacional para la identificación de los eventos asociados a la variabilidad océano - atmosférica (Arango et al. 2013).

El ONI representa las anomalías de la temperatura superficial del mar (TSM) en la región 3.4 del Océano Pacífico, ubicada frente a las costas de Colombia, Ecuador y Perú, lo que lo convierte en un indicador apropiado para investigaciones relacionadas con las condiciones climáticas de Colombia (Vega Jácome 2018).

La NOAA define los eventos de El Niño como aquellos con valores positivos del ONI, mientras que los eventos de La Niña corresponden a valores negativos. No obstante, para los fines de esta investigación, los valores del ONI fueron invertidos (multiplicados por -1) con el propósito de unificar la convención de signos respecto al SPI, en el cual los valores negativos indican condiciones secas (sequía) y los positivos reflejan condiciones húmedas.

Esta transformación permitió mantener coherencia en la interpretación de ambos índices y facilitó el análisis de correlación entre las anomalías oceánicas y los eventos de sequía en la provincia de García Rovira.

La caracterización de cada evento de El Niño se efectuó siguiendo los criterios metodológicos propuestos por Melo et al. (2017), considerando las siguientes propiedades:

- Inicio: cuando el  $ONI \leq -0,5$  durante al menos tres meses consecutivos.
- Finalización: cuando el  $ONI > 0,5$ .
- Duración: número de meses transcurridos entre el inicio y el fin del evento.
- Intensidad: promedio del ONI durante el evento de El Niño.
- Intensidad máxima: valor ONI mínimo alcanzado en el evento de El Niño.
- Magnitud: sumatoria acumulada de los valores del ONI durante el evento.
- Frecuencia: número total de eventos de El Niño en el periodo de estudio.

Estos parámetros permitieron describir de manera precisa la variabilidad temporal e intensidad de los eventos de El Niño ocurridos entre 1979 y 2024, proporcionando una base comparativa para su correlación con las sequías meteorológicas determinadas mediante el SPI.

Tabla 6  
**Clasificación del ONI según su intensidad**

Valor ONI	Clasificación
-0,50 a -0,99	Fenómeno de El Niño débil
-1,00 a -1,49	Fenómeno de El Niño moderado
-1,50 a -1,99	Fenómeno de El Niño fuerte
< a -2	Fenómeno de El Niño muy fuerte

Fuente: Rivera (2014)

Finalmente, con el propósito de evaluar la relación entre el fenómeno El Niño y la ocurrencia de sequías meteorológicas en la provincia de García Rovira, se aplicó un análisis de correlación lineal entre los índices ONI y SPI correspondientes a las estaciones meteorológicas analizadas. Asimismo, se realizaron correlaciones lineales independientes considerando únicamente los valores del índice ONI asociados a las categorías de Niño débil, moderado, fuerte y muy fuerte, con el fin de identificar la relación entre los distintos tipos del fenómeno El Niño y la ocurrencia de sequías meteorológicas en las diferentes estaciones.

El grado de asociación entre ambos indicadores se determinó mediante el coeficiente de correlación de Pearson ( $R^2$ ), estadístico que permite cuantificar la fuerza y dirección de la relación lineal entre las anomalías oceánicas y las condiciones de sequía. Adicionalmente, se elaboraron diagramas de dispersión, con el fin de visualizar el comportamiento conjunto de los valores del ONI y del SPI, identificando patrones de dependencia entre la variabilidad oceánica del Pacífico y la precipitación regional.

Este procedimiento permitió analizar la influencia del fenómeno de El Niño en la generación, duración e intensidad de las sequías meteorológicas en la región de estudio, contribuyendo a comprender la conexión océano-atmósfera-precipitación que caracteriza la variabilidad climática en la provincia de García Rovira (Arango et al. 2013; Vega Jácome 2018).

### **3. Automatización de la metodología**

El avance tecnológico ha fortalecido los procedimientos de procesamiento y análisis de datos, haciéndolos más rápidos, precisos y reproducibles, lo que ha facilitado la automatización de metodologías estadísticas y climáticas (Febrero-Bande y Oviedo de la Fuente, 2012; Aneiros et al., 2019). En la presente investigación se trabajó con una base de datos extensa de precipitación mensual correspondiente a 21 estaciones meteorológicas durante un periodo de 46 años, lo que implicó un volumen considerable de cálculos estadísticos y espaciales. Bajo estas condiciones, se optó por automatizar

integralmente el flujo metodológico con el propósito de optimizar tiempos de ejecución, reducir errores operativos y garantizar coherencia en la aplicación de los procedimientos analíticos.

La implementación se realizó en R 4.5.0, debido a su robustez para el análisis estadístico y espacial, integrando un ecosistema de paquetes especializados para el manejo de datos (`readxl`, `openxlsx`, `writexl`), pruebas estadísticas (`nortest`, `Kendall`, `goft`, `boot`), cálculo de índices climáticos (SPEI), visualización (`ggplot2`, `corrplot`, `viridis`, `cowplot`, `metR`) y modelación geoespacial (`sf`, `sp`, `raster`, `gstat`, `automap`, `ggspatial`, `lwgeom`, `rgdal`). Todo el procesamiento se desarrolló bajo el sistema de referencia EPSG:9377 (MAGNA-SIRGAS), con el fin de evitar inconsistencias derivadas de proyecciones implícitas.

La arquitectura del código se diseñó de forma modular y secuencial, estructurando cada etapa metodológica como un bloque funcional independiente (depuración y control de calidad, análisis de completitud, imputación de datos faltantes, pruebas de normalidad y tendencia, cálculo del SPI, análisis ENSO y modelación espacial). Estos módulos fueron integrados mediante operaciones vectorizadas y funciones de la familia `apply` (`lapply`, `sapply`, `mapply`), así como estructuras de control (`for`, `if-else` y `while`), permitiendo ejecutar automáticamente los procedimientos por estación, por mes y por periodo de análisis. Este diseño asegura uniformidad en los criterios estadísticos aplicados y elimina la intervención manual repetitiva.

Asimismo, se implementaron rutinas sistemáticas de entrada y salida de información en formatos interoperables (`.xlsx`, `.csv`, `.shp`, `.jpg` y `.pdf`), garantizando compatibilidad entre entornos estadísticos y cartográficos. La parametrización explícita de rutas, variables, escalas temporales y criterios de clasificación permitió estandarizar el entorno de trabajo y facilitar la replicabilidad del estudio.

En síntesis, la automatización no se limitó a la ejecución de cálculos, sino que constituyó la formalización algorítmica de la metodología de investigación. Cada resultado generado, desde la validación estadística de las series hasta la interpolación espacial mediante variogramas y kriging deriva de una secuencia lógica documentada y reproducible, asegurando trazabilidad, coherencia interna y rigor científico.



## Capítulo tercero

### Resultados de la investigación

#### 1. Preprocesamiento de los datos de precipitación mensual

Como resultado se obtuvo una base de precipitación mensual completa y consistente. Para ello fue necesario introducir algunas excepciones metodológicas: se incluyeron dos estaciones ubicadas fuera del área de influencia SAN BERNARDO (código 37020020) y CAMPO HERMOSO (código 37020030), situadas a 8 y 10 km, respectivamente del área de influencia. Asimismo, se mantuvo la estación PORTILLO EL (código 37010060), que presenta un 10,14 % de datos faltantes. Esta decisión metodológica se fundamenta en la escasa densidad de estaciones en el sector oriental del área de estudio, condición que podría introducir sesgos o vacíos de información en los resultados del análisis espacial.

##### 1.1. Distribución de probabilidad de la precipitación mensual

De los tres modelos de distribución de probabilidad analizados, la distribución Gamma fue la que proporciono el mejor ajuste a la base de datos de precipitación mensual.

Tabla 7  
**Resultado del Análisis de Distribución de Probabilidad de los Datos**

Distribución de Probabilidad	Porcentaje de Ajuste a los Datos
Distribución de probabilidad Gamma	89,2 %
Distribución de probabilidad normal	9,52 %
Distribución de probabilidad log-normal	1,98 %

Fuente y elaboración propias

##### 1.2. Análisis de datos inconsistentes

En la estación PORTILLO EL (código 37010060) se identificaron dos datos inconsistentes en julio y agosto de 1998, los cuales fueron eliminados por alejarse significativamente del valor climatológico esperado (10 y 14 desviaciones estándar). El análisis de precipitación en estaciones vecinas (BARAYA, CERRITO, EL PARAMO, entre otras) durante el mismo período no mostró comportamientos anómalos, lo que respaldó la decisión de eliminarlos.

Tabla 8  
**Características de los Datos Inconsistentes**

Estacion	Año	Mes	PP	Distribución	Climatología	Dispersión
PORTILLO EL	1988	Julio	772	Gamma	132,35	10,61 SD
PORTILLO EL	1988	Agosto	1039	Gamma	131,71	14,44 SD

Fuente y elaboración propias

### 1.3. Estimación de datos faltantes

La estimación de datos faltantes se realizó a partir de estaciones vecinas con un comportamiento climático de la precipitación mensual similar que se determina por medio de valores de correlación altos como se observa en la Figura 9.

En los casos en que no fue posible aplicar modelos de regresión múltiple y el método de razones, ya sea por baja correlación entre estaciones o por coincidencia de valores ausentes en las estaciones correlacionadas, se recurrió a métodos basados en estadística descriptiva, para ello, fue necesario determinar previamente si los registros de precipitación mensual seguían una distribución normal o no, aplicando la prueba de Lilliefors. Los resultados obtenidos se presentan en la tabla 9.

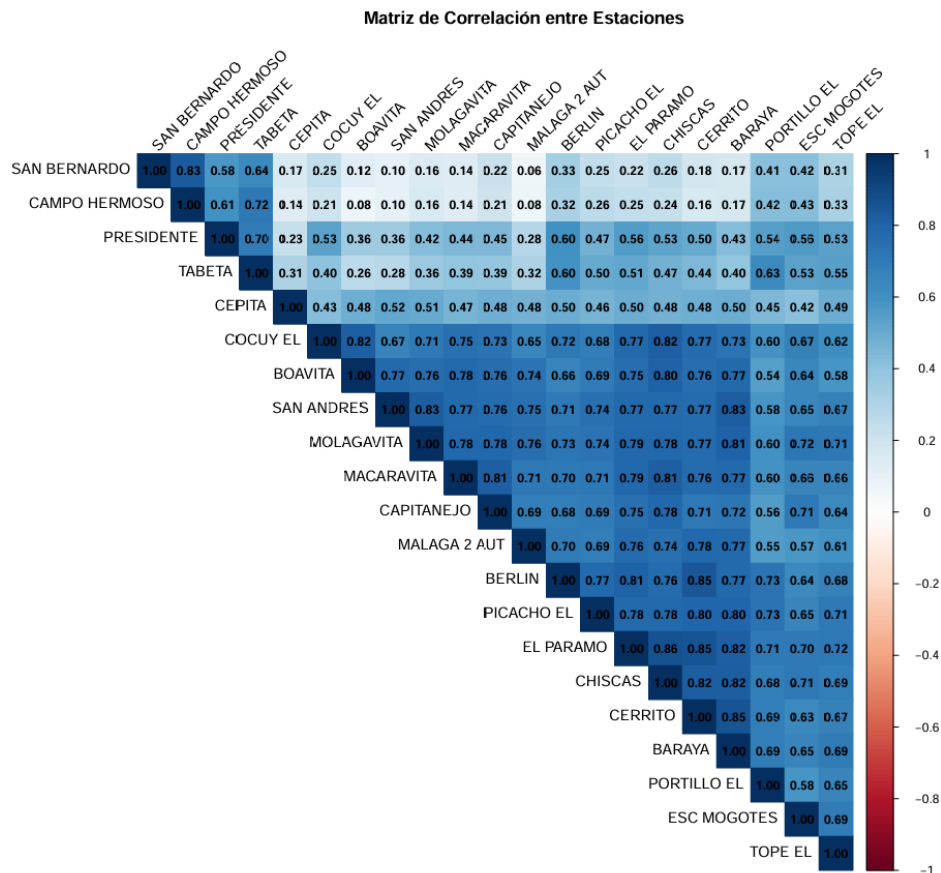


Figura 9. Representación gráfica de la correlación entre las estaciones  
 Elaboración propia

Tabla 9  
Resultado Test de Lilliefors

Test de Lilliefors	Porcentaje
Los datos presentan distribución normal	67,85 %
Los datos no presentan una distribución normal	32,14 %

Fuente y elaboración propia

En total, se analizaron 21 estaciones meteorológicas, las cuales presentaron 318 datos faltantes. Estos fueron estimados mediante los tres métodos definidos. La Tabla 10 resume los resultados obtenidos por cada procedimiento.

Tabla 10  
Resultado del método de estimación de datos faltantes

Método utilizado	Meses estimados	Porcentaje
Regresión lineal múltiple	310 datos	97,48 %
Método de razones	2 datos	0,62 %
Estadísticos de tendencia central	6 datos	1,88 %

Fuente y elaboración propias

#### 1.4. Homogeneidad de las estaciones meteorológicas

Mediante la prueba no paramétrica de Mann-Kendall, aplicada con un nivel de confianza del 95 %, se evaluó la presencia de tendencias significativas en los registros de precipitación de las estaciones meteorológicas analizadas. Analizar la Tabla 11.

Tabla 11  
Resultado de la Prueba de Mann Kendall

Estación	p-Value
PICACHO EL	0,0619
ESC MOGOTES	0,2059
CERRITO	0,9674
COCUY EL	0,3242
SAN ANDRÉS	0,3693
MACARAVITA	0,8294
CEPITA	<b>0,0001</b>
TOPE EL	<b>0,0223</b>
MOLAGAVITA	0,6791
BARAYA	0,6869
EL PÁRAMO	0,2711
MÁLAGA 2 AUT	0,2271
CAPITANEJO	0,0882
CHISCAS	0,2421
BOAVITA	0,7652
PRESIDENTE	<b>0,0016</b>
TABETA	0,1542
PORTILLO EL	0,0563
BERLIN	0,6031
SAN BERNARDO	0,4259
CAMPO HERMOSO	0,8837

Elaboración propia

Tres estaciones presentaron evidencia estadísticamente significativa de tendencia climática, con valores de  $p$  inferiores a 0,05: CEPITÁ (código 24030300), PRESIDENTE (código 37010040) y TOPE EL (código 24030330). A pesar de esta tendencia, se decidió conservarlas en el análisis debido a su ubicación espacial estratégica dentro del área de estudio, lo que contribuye a mejorar la representatividad espacial de los resultados obtenidos mediante el método de interpolación Kriging, utilizado para analizar la distribución espacial de la precipitación y los eventos de sequía meteorológica.

### 1.5. Distribución espacial de las estaciones meteorológicas

Una distribución espacial homogénea de las estaciones meteorológicas resulta fundamental para la caracterización espacial tanto de la climatología de la precipitación como de las sequías meteorológicas, ya que permite reducir sesgos, redundancia y vacíos de información en el análisis. Con el propósito de garantizar dicha representatividad espacial, se aplicaron las siguientes criterios y pruebas metodológicas.

#### 1.5.1. Análisis de unidad climática y distribución altitudinal

Se identificaron las unidades climáticas a las que pertenece cada estación meteorológica, así como su altitud sobre el nivel del mar (m s. n. m.). El diseño de la red garantiza una cobertura mínima de una estación por unidad climática Tabla 12. Asimismo, se aseguró la presencia de al menos una estación meteorológica por cada intervalo altitudinal de 500 metros como se ve en la Tabla 12, con el fin de representar adecuadamente la variabilidad vertical de la precipitación.

Tabla 12  
Estaciones por unidad climática

Unidad Climática	Número de Estaciones
Cálido Árido	1
Frío Húmedo	2
Frío Semihúmedo	5
Muy frío Húmedo	3
Muy frío Semihúmedo	1
Muy frío Superhúmedo	2
Templado Árido	1
Templado Húmedo	1
Templado Semiárido	1
Templado Semihúmedo	3
Templado Superhúmedo	1

Fuente y elaboración propias

Tabla 13  
Distribución altitudinal de las estaciones

Altitud	Número de Estaciones
500 - 1000 m.s.n.m	1
1000 - 1500 m.s.n.m	3
1500 - 2000 m.s.n.m	4
2000 - 2500 m.s.n.m	6
2500 - 3000 m.s.n.m	2
3000 - 3500 m.s.n.m	4
3500 - 4000 m.s.n.m	1

Fuente y elaboración propias

### 1.5.2. Análisis de distancia mínima entre estaciones

El análisis de estadística espacial evidenció que la distribución de las estaciones meteorológicas es adecuada para la realización de los análisis espaciales posteriores. Los resultados del promedio del vecino más cercano indican una distribución significativamente dispersa respecto a una distribución aleatoria. Ver Tabla 14.

Tabla 14  
Resultados del análisis promedio vecino cercano

Resumen de la distancia promedio al vecino más cercano	
Distancia media observada	14490,55 metros
Distancia media esperada	9284,60 metros
Relación de vecino más cercano	1,56
Puntuación z	4,91
Valor p	0,000001

Fuente: Elaboración propia

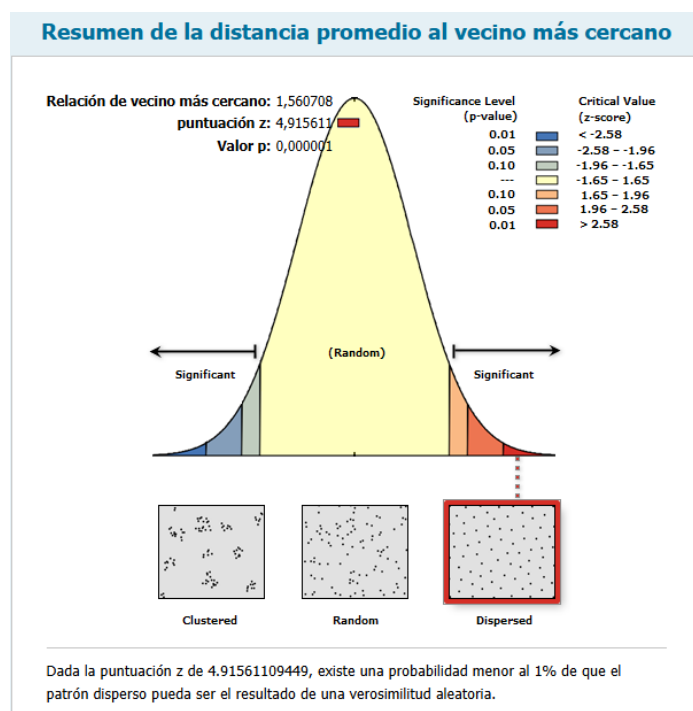


Figura 10. Resultados del análisis promedio vecino cercano

Fuente y elaboración propia

### 1.5.3. Análisis de representatividad espacial

La representatividad espacial de la red de estaciones meteorológicas se evaluó mediante la generación de polígonos de Thiessen, cuyos resultados se presentan en la Figura 11. Las tonalidades más oscuras indican una menor densidad de estaciones meteorológicas, mientras que las tonalidades más claras representan una mayor densidad de estaciones meteorológicas. Se observa una baja densidad de estaciones en la oriental de la provincia de García Rovira.

El análisis arrojó un área media por polígono de 27 115,89 hectáreas, con una desviación estándar de 15 115,69 ha, lo que resulta en un coeficiente de variación (CV) del 55,74 %.

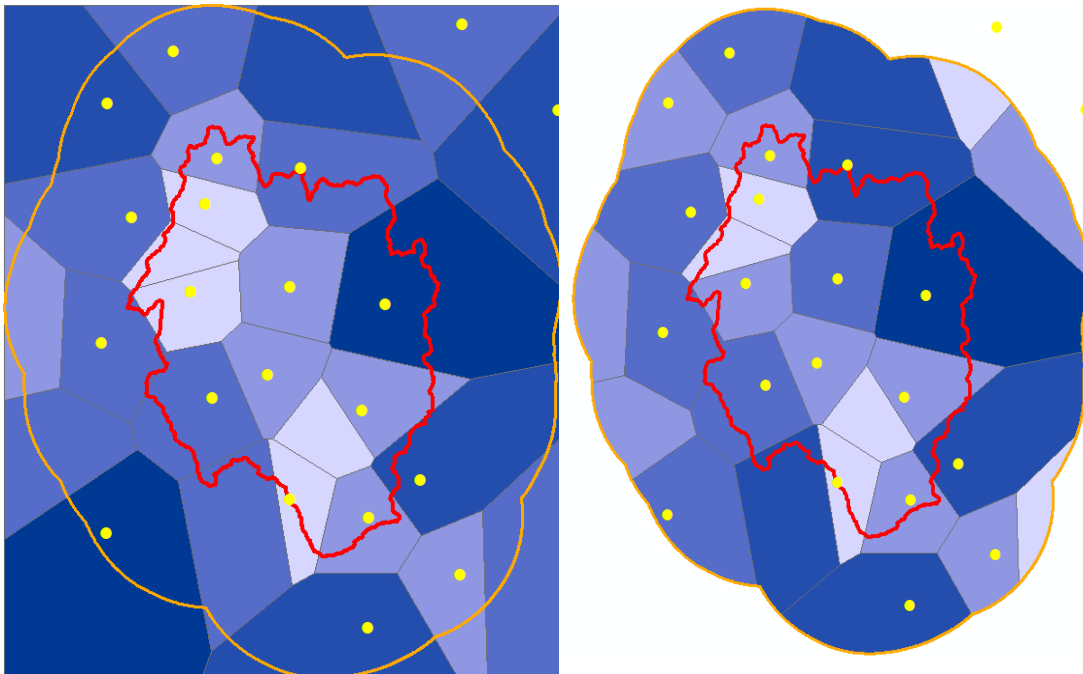


Figura 11. Resultados del análisis de representatividad espacial  
Fuente y elaboración propia

Como resultado del proceso de preprocesamiento de la información, se obtuvo una base de datos de precipitación mensual completa, depurada y consistente, producto de la verificación de calidad, consistencia y homogeneidad de los registros. En la Tabla 15 se presenta un resumen de las 21 estaciones meteorológicas consideradas en el estudio, incluyendo su clasificación climática, porcentaje de datos faltantes y resultados de la prueba de homogeneidad (valor p).

Tabla 15  
Estaciones meteorológicas consideradas en el estudio

ID	Condigo	Nombre Estacion	Clasificación Climática	% Falt	Homo
1	23190300	PICACHO EL	Muy frio Superhumedo	0,7246	0,062
2	24025040	ESC MOGOTES	Templado Humedo	1,6304	0,206
3	24030210	CERRITO	Frio Semihumedo	0,0000	0,967
4	24030260	COCUY EL	Frio Semihumedo	1,8115	0,324
5	24030270	SAN ANDRES	Templado Semihumedo	0,1811	0,369
6	24030290	MACARAVITA	Templado Semiarido	3,2608	0,829
7	24030300	CEPITA	Calido Arido	1,0869	0,000
8	24030330	TOPE EL	Templado Semihumedo	1,0869	0,022
9	24030340	MOLAGAVITA	Frio Humedo	5,4347	0,679
10	24030630	BARAYA	Frio Humedo	1,6304	0,687
11	24030680	EL PARAMO	Muy frio Humedo	1,4492	0,271
12	24030950	MALAGA 2	Frio Semihumedo	4,7101	0,227
13	24035260	CAPITANEJO	Templado Arido	2,3550	0,088
14	24035310	CHISCAS	Frio Semihumedo	3,9855	0,242
15	24035330	BOAVITA	Frio Semihumedo	0,3623	0,765
16	37010040	PRESIDENTE	Muy frio Humedo	7,4275	0,002
17	37010050	TABETA	Muy frio Humedo	7,0652	0,154
18	37010060	PORTILLO EL	Muy frio Superhumedo	10,1449	0,056
19	37015020	BERLIN	Muy frio Semihumedo	0,3623	0,603
20	37020020	SAN BERNARDO	Templado Semihumedo	1,2681	0,426
21	37020030	CAMPO HERMOSO	Templado Superhumedo	1,2681	0,884

## 2. Climatología mensual de la precipitación y su variabilidad

Se aplicó el método estadístico a los registros de precipitación mensual de cada estación meteorológica, considerando el comportamiento observado en los datos, con el propósito de representar de manera robusta la climatología mensual, así como la variabilidad temporal y espacial de la precipitación en la provincia de García Rovira, caracterizada por una marcada estacionalidad. Los resultados obtenidos se presentan a continuación.

### 2.1. Normalidad de los datos de precipitación mensual

Una vez excluidos los valores atípicos de las series de precipitación mensual, se aplicó la prueba de bondad de ajuste de Lilliefors con el fin de determinar si los datos siguen una distribución normal. Esto permitió establecer si la media o la mediana constituye el estadístico de tendencia central más adecuado para representar la climatología mensual de las estaciones meteorológicas. Los resultados obtenidos se presentan a continuación.

Tabla 16  
Resultado del test de Lilliefors para la climatología

Test de Lilliefors	Porcentaje
Los datos presentan distribución normal	78,96 %
Los datos no presentan una distribución normal	21,03 %

Fuente y elaboración propia

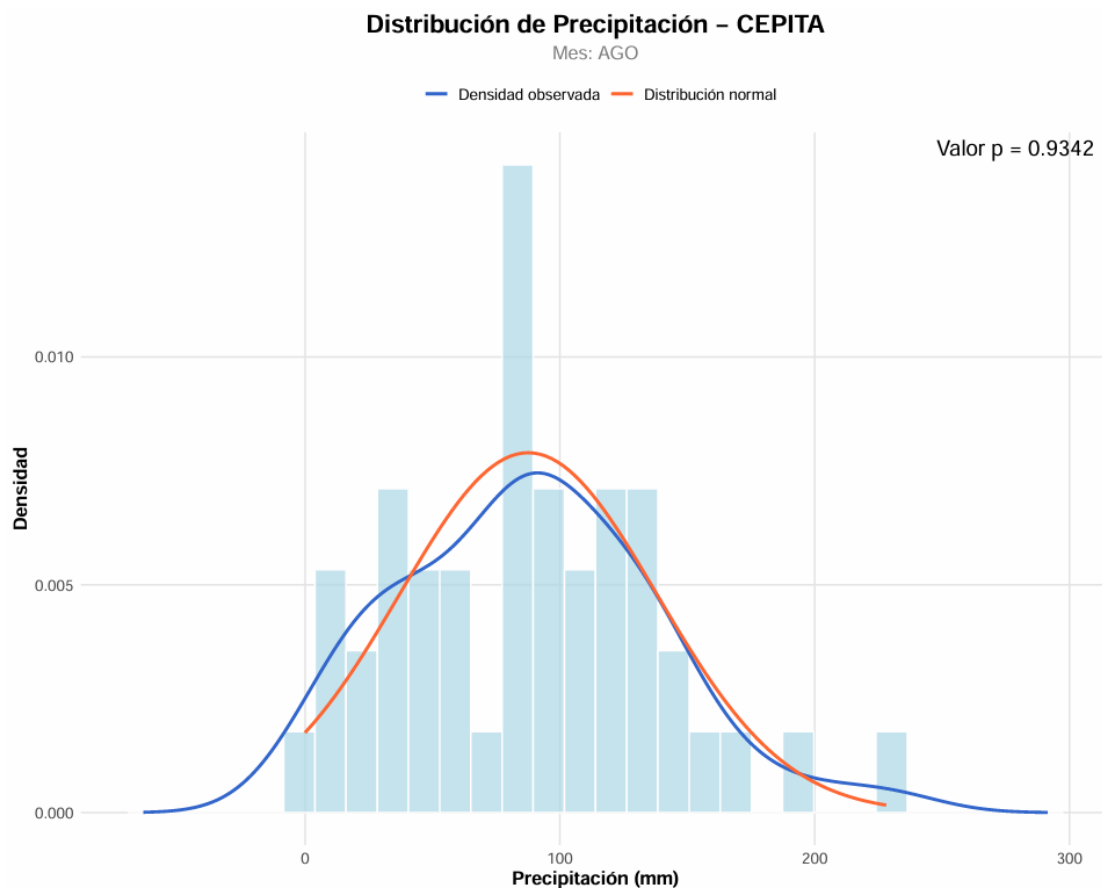


Figura 12. Valor de la precipitación mensual que mejor se ajustó a una distribución normal  
Fuente y elaboración propias

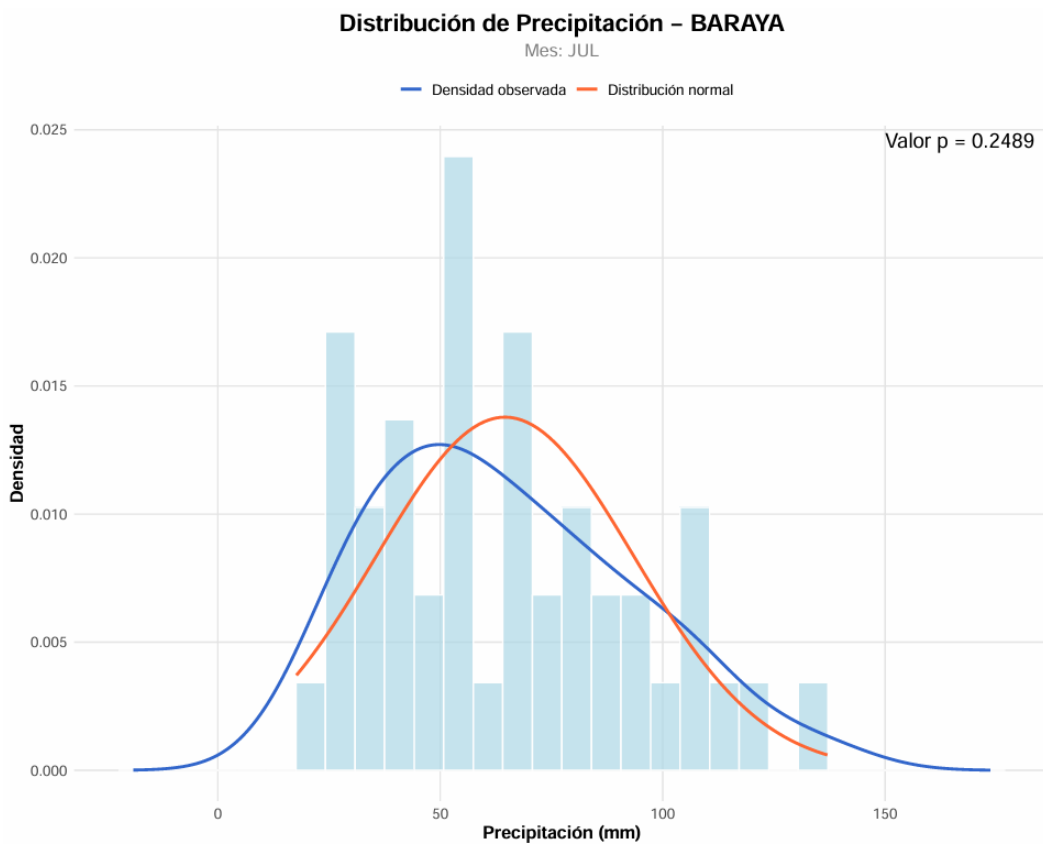


Figura 13. Mayor ajuste a una distribución Gamma (p-Value Gamma = 0,9991)  
Fuente y elaboración propias

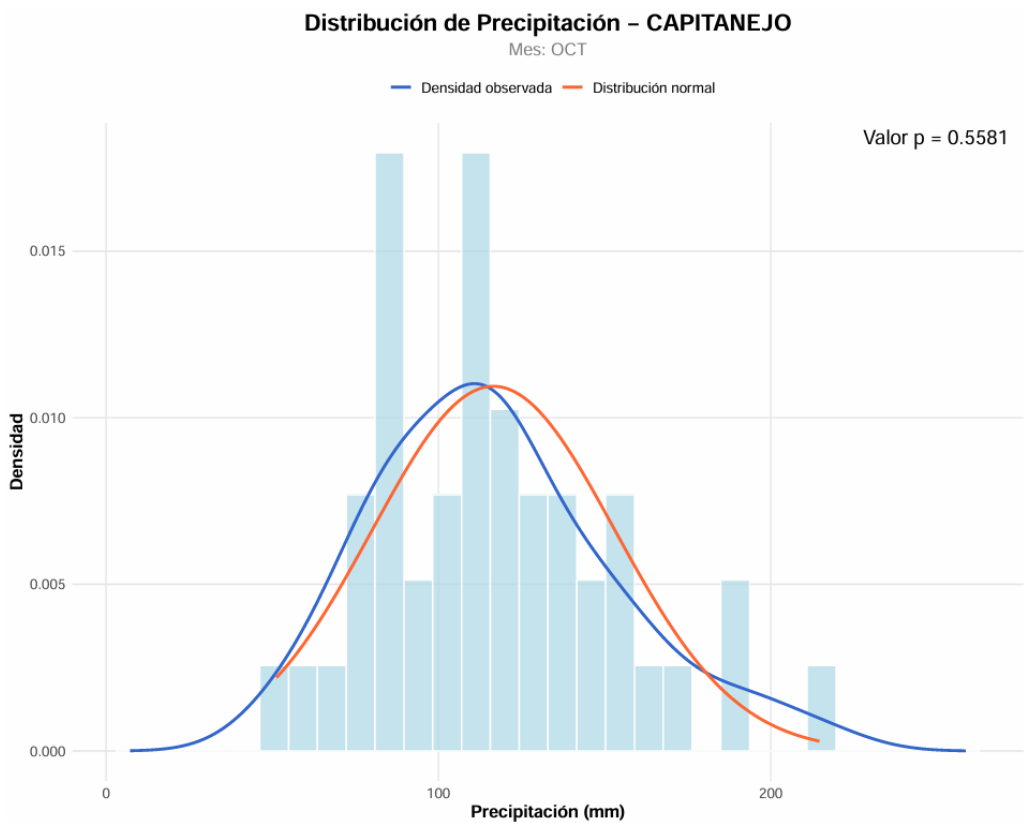


Figura 14. Mayor ajuste a una distribución log-normal (p-Value log-normal = 0,9992)  
Fuente y elaboración propias

## 2.2. Resumen estadístico de los datos de precipitación

A continuación, se presentan los resultados obtenidos mediante la aplicación del método estadístico representados en diagramas de caja y bigotes, los cuales permiten visualizar de forma adecuada las estadísticas descriptivas y la dispersión de los datos por mes y por estación meteorológica.

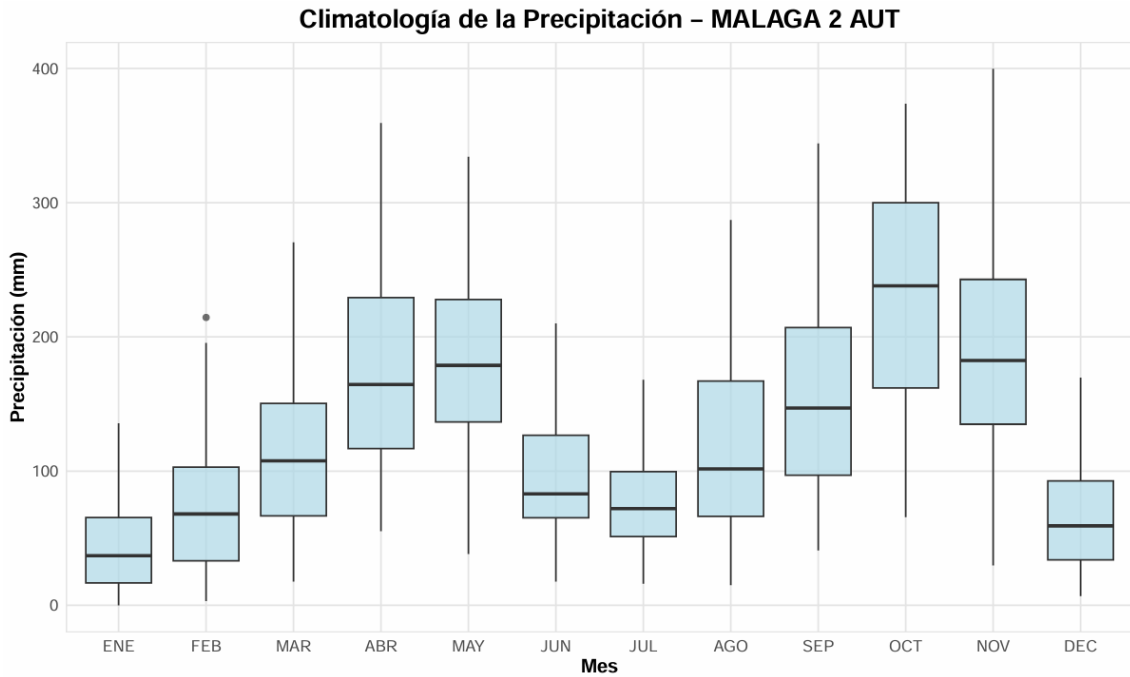


Figura 15. Representación del régimen bimodal de la precipitación mensual  
Fuente y elaboración propias

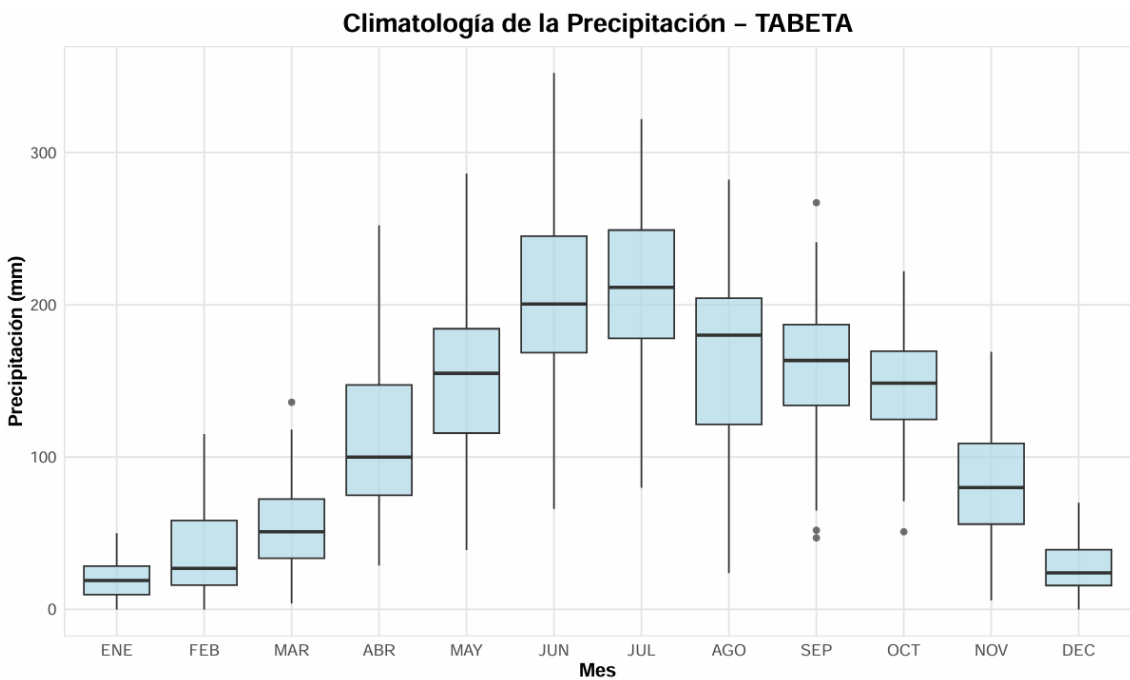
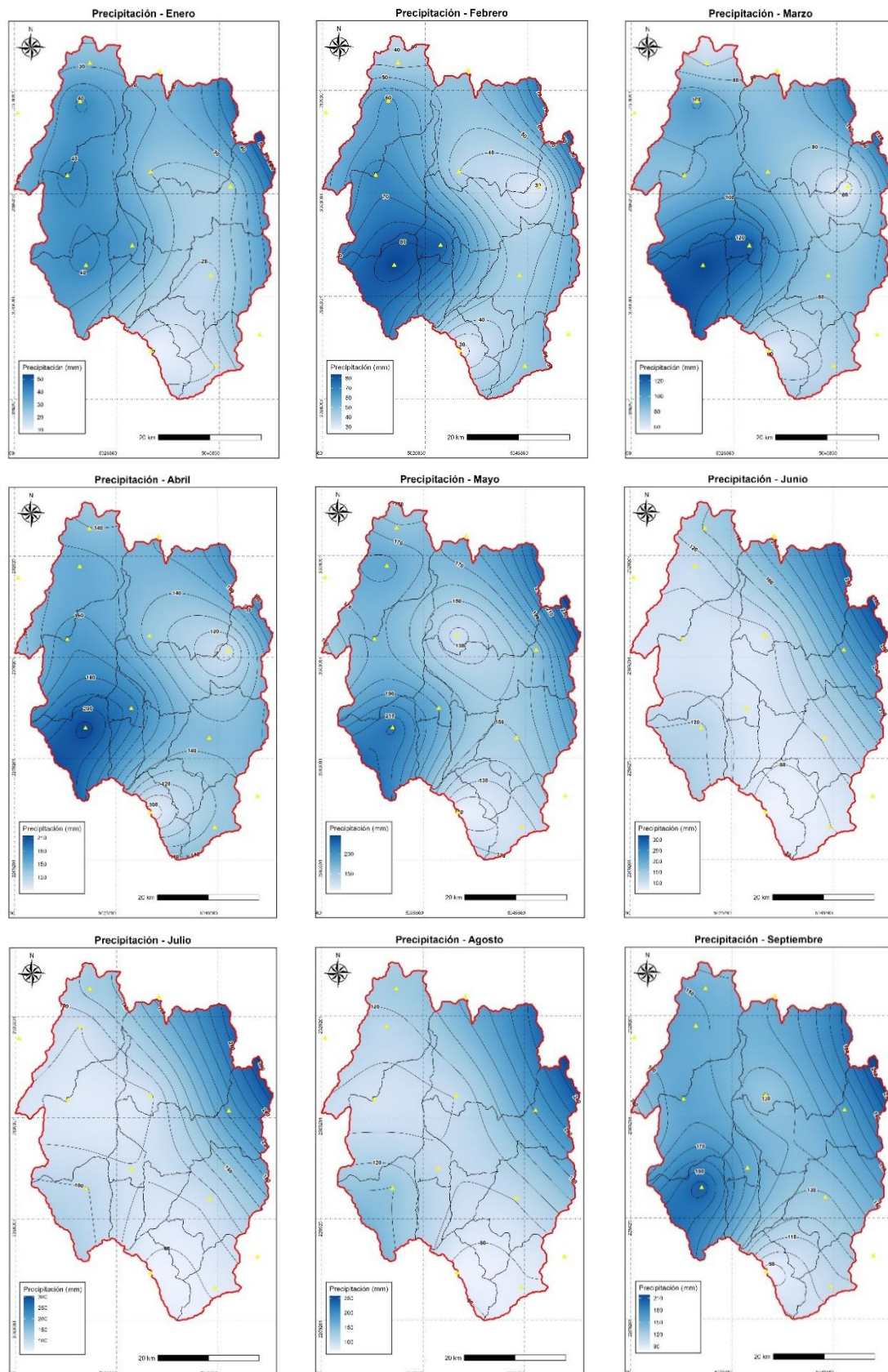


Figura 16. Representación del régimen unimodal de la precipitación mensual  
Fuente y elaboración propias

### 2.3. Distribución espacial de la precipitación mensual

A continuación, se presentan las características espaciales de la climatología de la precipitación mensual en el área de estudio y sus valores en milímetros.



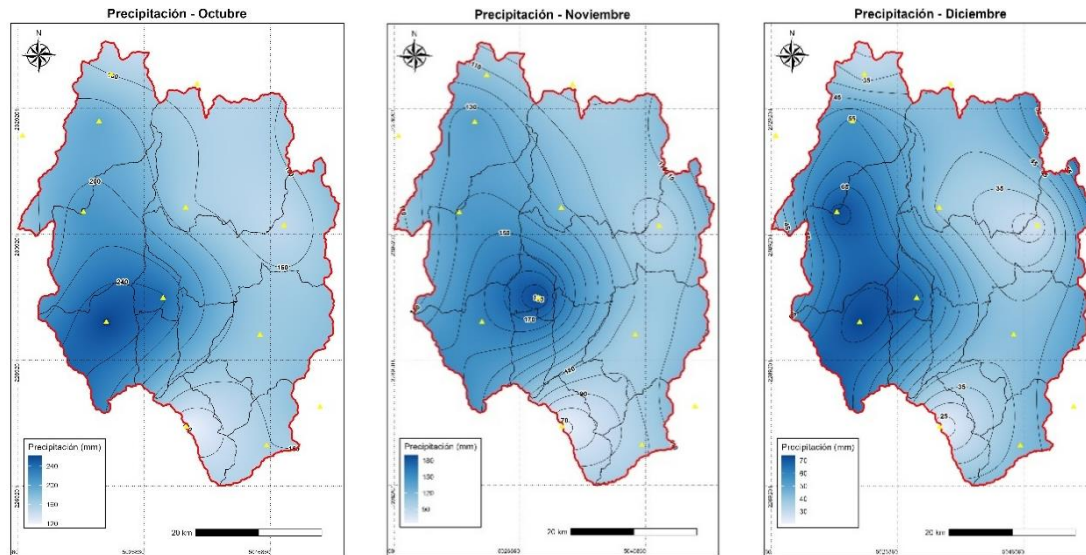


Figura 17. Climatología de la precipitación mensual  
Fuente y elaboración propias

### 3. Cálculo y caracterización de las sequías meteorológicas y análisis de su relación con el fenómeno de El Niño

En primera instancia, se calcularon las sequías meteorológicas a partir del SPI. Posteriormente, se efectuó su caracterización temporal y espacial, con el propósito de identificar los patrones de ocurrencia, duración e intensidad de los eventos secos en la región de estudio. Los resultados obtenidos se representan mediante gráficos y mapas temáticos, que facilitan la interpretación de la variabilidad espacial y temporal de las sequías meteorológicas.

#### 3.1. Prueba de distribución Gamma de los datos de precipitación

Dado que el Índice Estandarizado de Precipitación (SPI) supone que los acumulados de precipitación se ajustan a una distribución Gamma (a escala temporal específica de interés), se evaluó el ajuste de las series mensuales de precipitación de cada estación a dicho modelo probabilístico. Los resultados obtenidos al aplicar la prueba estadística de Anderson Darling se presentan en la Tabla 17.

Tabla 17  
Resultado de la Prueba Gamma

Test de Anderson Darling	Porcentaje
Los datos presentan distribución Gamma	83,33 %
Los datos no presentan una distribución Gamma	16,66 %

Fuente y elaboración propias

### 3.2. Caracterización temporal de las sequías meteorológicas

Tras calcular el SPI, se caracterizaron las sequías meteorológicas determinando para cada evento: inicio, fin, duración, intensidad máxima, intensidad media y magnitud. Los resultados se sintetizan en la Figura 18.

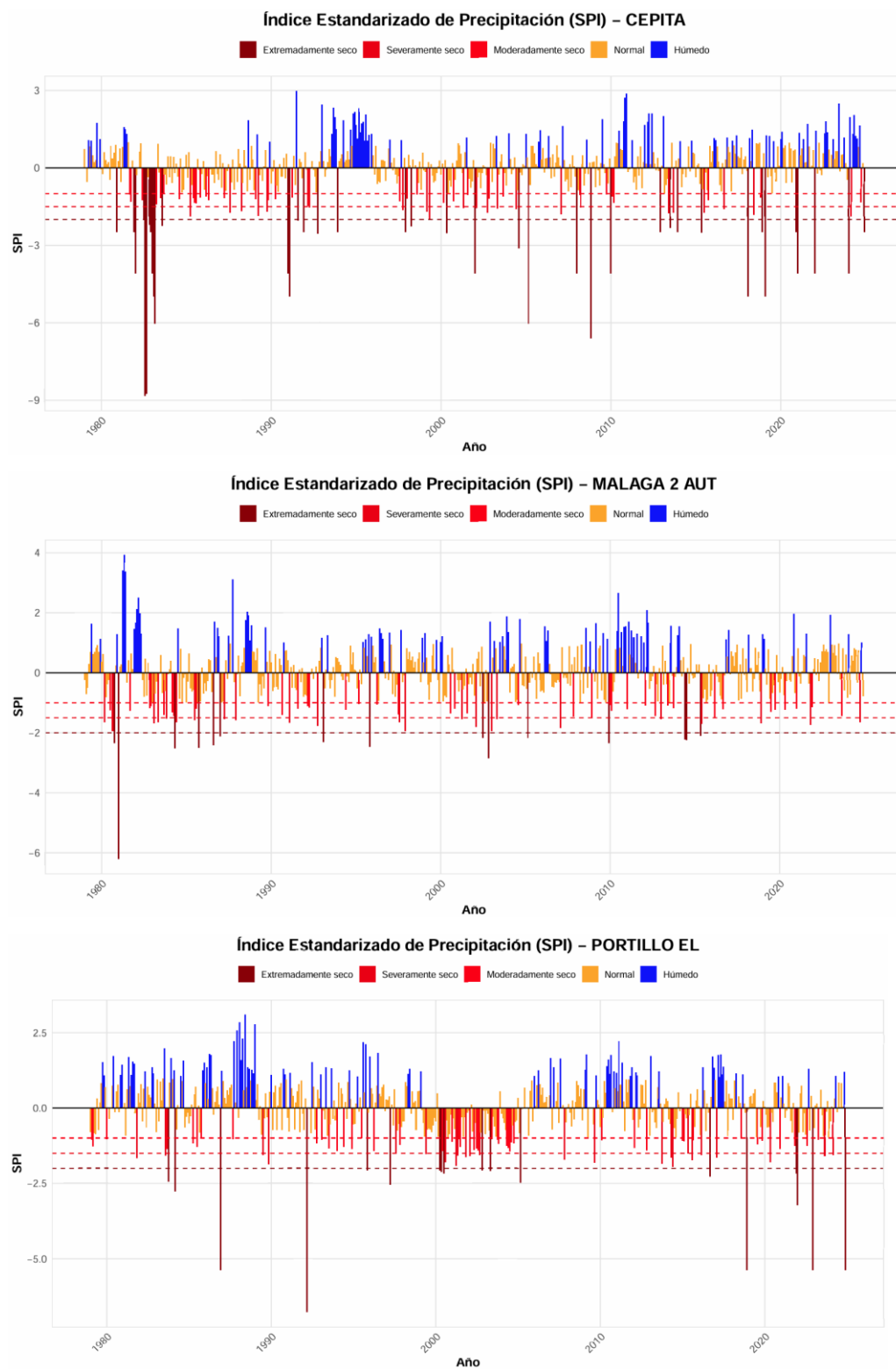


Figura 18. Representación de las sequías en la Provincia de García Rovira Fuente y elaboración propias

### 3.3. Caracterización espacial de las sequías meteorológicas

El comportamiento espacial de las principales características de las sequías meteorológicas son las siguientes.

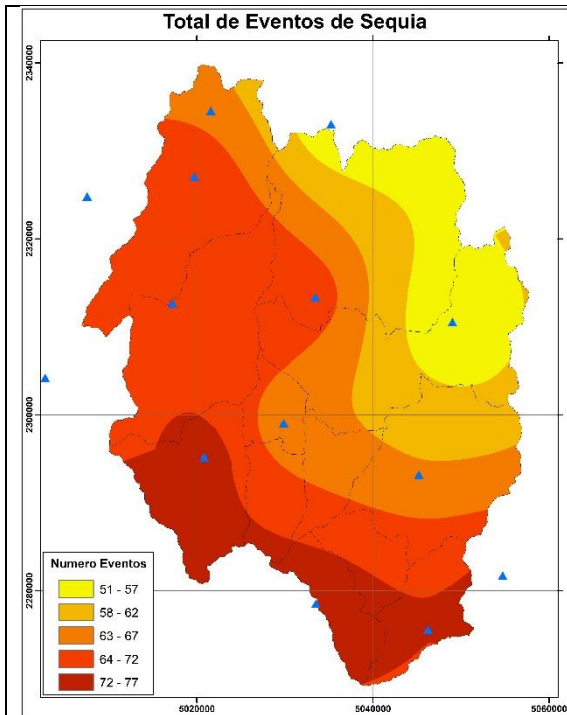


Figura 19. Número total de eventos de sequías  
Fuente y elaboración propia

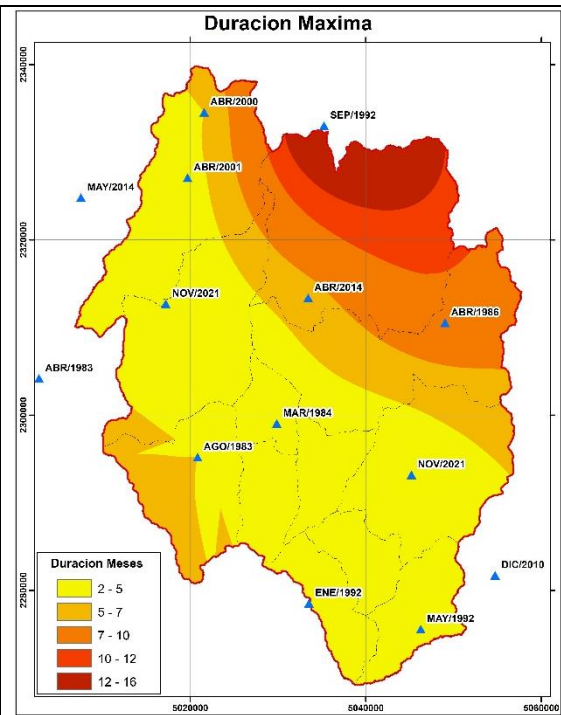


Figura 20. Duración de las sequías  
Fuente y elaboración propia

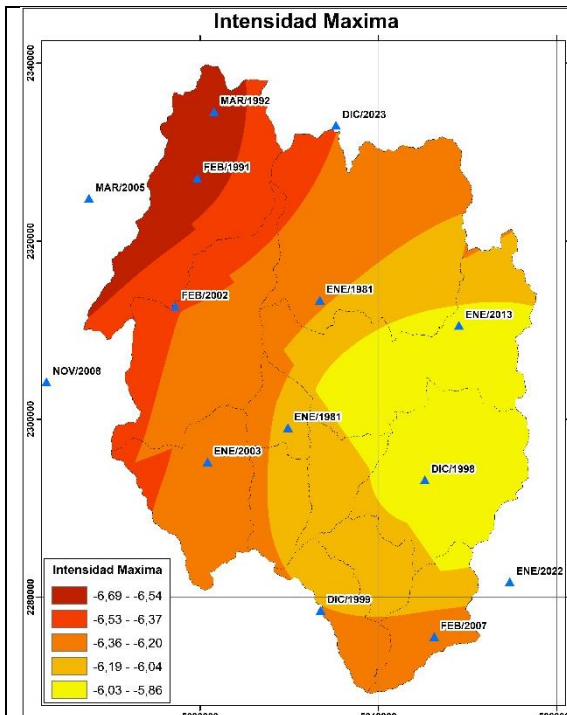


Figura 21. Intensidad máxima de las sequías  
Fuente y elaboración propia

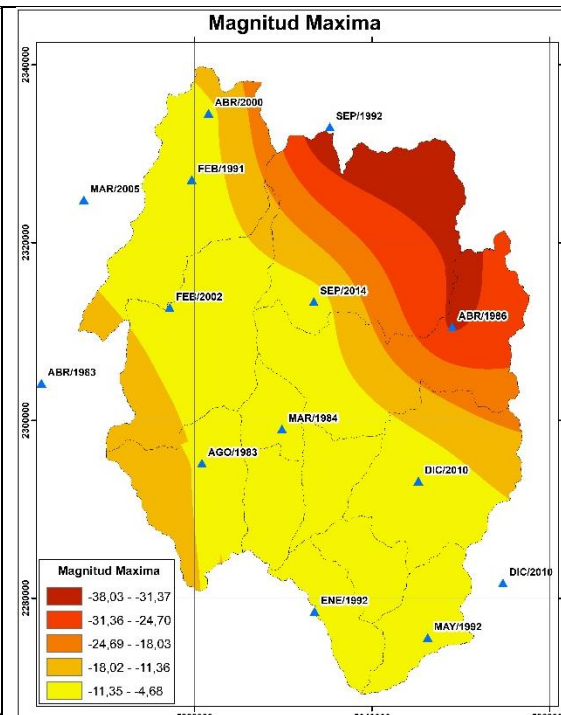


Figura 22. Magnitud máxima de las sequías  
Fuente y elaboración propia

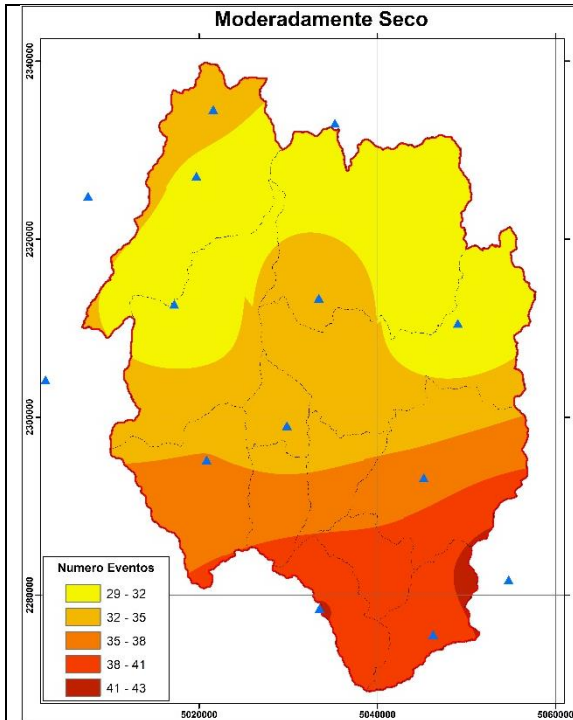


Figura 23. Eventos Moderadamente Secos  
Fuente y elaboración propia

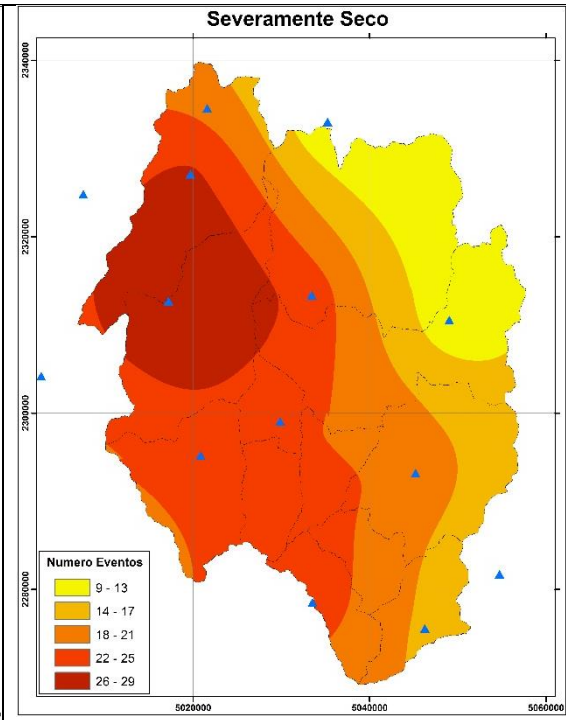


Figura 24. Eventos Severamente Secos  
Fuente y elaboración propia

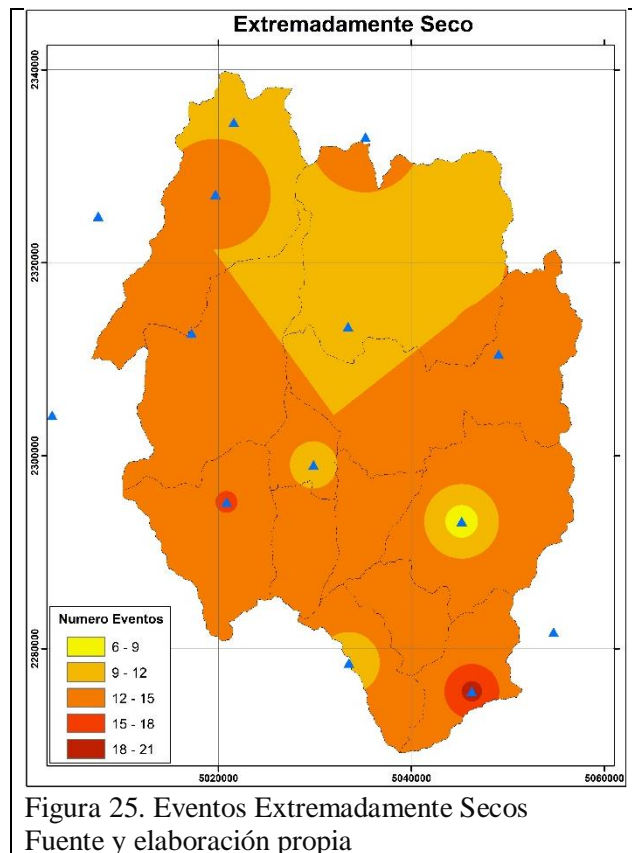


Figura 25. Eventos Extremadamente Secos  
Fuente y elaboración propia

### 3.4. Caracterización del fenómeno de El Niño

A continuación, se presentan las características de todos los eventos del fenómeno de El Niño registrados durante la serie de tiempo analizada, según el índice ONI. Estos resultados se muestran de forma gráfica en la Figura 21 y de manera cuantitativa en la Tabla 18.

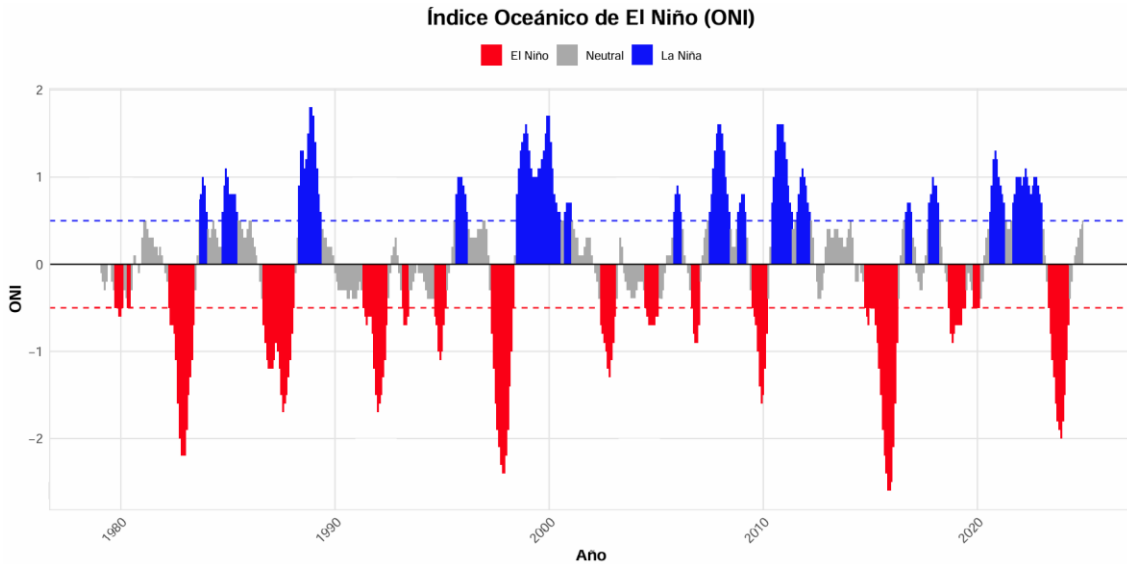


Figura 26. Representación de los eventos de fenómeno de El Niño en el tiempo  
Fuente y elaboración propias

Tabla 18  
Caracterización del fenómeno de El Niño

ID	Inicio	Fin	Duración	Intensidad	Magnitud
1	1979-10	1980-02	5	-0,60	-2,70
2	1982-04	1983-06	15	-2,20	-20,50
3	1986-09	1988-02	18	-1,70	-20,50
4	1991-05	1992-06	14	-1,70	-14,40
5	1993-03	1993-06	4	-0,70	-2,50
6	1994-09	1995-03	7	-1,10	-5,60
7	1997-05	1998-05	13	-2,40	-21,70
8	2002-06	2003-02	9	-1,30	-8,50
9	2004-07	2005-02	8	-0,70	-5,10
10	2006-09	2007-01	5	-0,90	-3,80
11	2009-07	2010-03	9	-1,60	-9,30
12	2014-10	2016-04	19	-2,60	-26,40
13	2018-09	2019-06	10	-0,90	-6,80
14	2019-11	2020-02	4	-0,50	-2,00
15	2023-05	2024-04	12	-2,00	-16,10

Fuente y elaboración propias

A continuación, se presentan los eventos de fenómeno de El Niño por categoría.

Tabla 19  
Número de eventos de El Niño

Clasificación ONI	Total eventos
Fenómeno de El Niño débil	6 eventos
Fenómeno de El Niño moderado	2 eventos
Fenómeno de El Niño fuerte	3 eventos
Fenómeno de El Niño muy fuerte	4 eventos

Fuente y elaboración propia

### 3.5. Relación del fenómeno de El Niño y las sequías meteorológicas

Para evaluar la relación entre las sequías meteorológicas (representadas mediante el SPI) y el fenómeno de El Niño (cuantificado a través del índice ONI), se aplicó el coeficiente de correlación de Pearson. En la Tabla 21 se presentan los resultados obtenidos para diferentes umbrales de intensidad del fenómeno de El Niño. Se calcularon correlaciones considerando lo siguiente: la totalidad de los registros, únicamente los meses con ONI menor a -0,5 (condición débil); ONI menor a -1,0 (condición moderada); y ONI menor a -1,5 (condición fuerte).

Tabla 20  
Resultado de las correlaciones entre ONI y SPI

Estacion	T ONI	N General	N Débil	N Moderado	N Fuerte
PICACHO EL	0,182	0,303	0,280	0,120	0,191
ESC MOGOTES	0,278	0,242	-0,060	0,209	0,212
CERRITO	0,189	0,225	0,261	0,169	0,139
COCUY EL	0,246	0,325	0,178	0,077	0,228
SAN ANDRES	0,140	0,213	0,112	0,253	0,083
MACARAVITA	0,144	0,089	0,096	0,016	-0,027
CEPITA	0,131	0,275	0,238	0,068	-0,139
TOPE EL	0,181	0,287	0,139	0,375	0,038
MOLAGAVITA	0,243	0,236	0,268	-0,117	0,077
BARAYA	0,144	0,226	0,301	0,078	0,109
EL PARAMO	0,224	0,342	0,263	0,172	0,105
MALAGA 2 AUT	0,182	0,210	0,295	0,152	0,061
CAPITANEJO	0,146	0,098	0,031	0,047	-0,015
CHISCAS	0,162	0,178	0,239	0,114	0,168
BOAVITA	0,194	0,113	0,111	-0,066	0,182
PRESIDENTE	0,193	-0,027	0,105	0,049	-0,143
TABETA	0,099	0,148	0,277	0,015	-0,239
PORTILLO EL	0,109	0,129	0,205	0,064	-0,074
BERLIN	0,162	0,264	0,285	0,298	-0,021
SAN BERNARDO	0,036	0,019	0,083	-0,119	0,084
CAMPO HERMOSO	-0,011	0,133	0,221	0,105	0,071

Fuente y elaboración propias

#### **4. Automatización de los resultados**

Como resultado del proceso de automatización, se obtuvieron dos scripts principales desarrollados en el software R Project 4.5.0. El primer script se encarga de ejecutar la totalidad del preprocesamiento y procesamiento estadístico de la información, incluyendo la tabulación mensual para las 21 estaciones meteorológicas, la aplicación de pruebas paramétricas y no paramétricas, y los cálculos fundamentales para la caracterización de sequías. El segundo script gestiona la componente espacial de la investigación, particularmente la interpolación mediante el método Kriging, para generar los mapas de precipitación mensual y de sequías meteorológicas correspondientes a todo el periodo analizado.

En cuanto al rendimiento computacional, utilizando un equipo con 1 TB de almacenamiento, tarjeta gráfica de 4 GB, 32 GB de RAM y 8 núcleos de procesamiento, el primer script se ejecuta en un tiempo inferior a 5 minutos. El segundo script, responsable del procesamiento espacial a escala geográfica detallada, requiere aproximadamente cuatro horas para completar su ejecución, generando un volumen considerable de productos cartográficos.

Como resultado principal del componente espacial, se obtuvieron de forma automatizada la totalidad de los mapas que cubren el periodo de investigación de 46 años (1979-2024). Específicamente, se generaron 552 mapas mensuales de sequías meteorológicas (12 meses  $\times$  46 años), 13 mapas de precipitación mensual y anual, y un número equivalente de ráster producto de la interpolación espacial. Adicionalmente, para la precipitación se crearon las respectivas isoyetas que representan las líneas de igual precipitación en el territorio.

El primer script automatiza la totalidad del trabajo relacionado con la estadística aplicada al preprocesamiento y procesamiento de los datos. Este script permite aplicar las diferentes pruebas paramétricas y no paramétricas definidas en la metodología, entre las que se incluyen:

- Pruebas de bondad de ajuste: Shapiro-Wilk, Anderson-Darling y Lilliefors para determinar la distribución de probabilidad de los datos.
- Pruebas de tendencia: Mann-Kendall para evaluar la homogeneidad de las series temporales.
- Estadísticos descriptivos: Cálculo de desviación estándar, media, mediana, coeficiente de variación, entre otros.

- Índices climáticos: Cálculo del Índice Estandarizado de Precipitación (SPI), que constituye la base para la cuantificación de las sequías meteorológicas.
- Análisis de correlación: Aplicación del coeficiente de correlación de Pearson para evaluar la relación entre el SPI y el Índice Oceánico de El Niño (ONI), así como entre las diferentes estaciones meteorológicas.

Adicionalmente, se desarrollaron funciones personalizadas para automatizar cada etapa metodológica, garantizando la reproducibilidad y consistencia de los procedimientos.

Los productos generados por el primer script incluyen múltiples archivos en formato Excel que contienen:

- La climatología mensual de precipitación para todas las estaciones.
- Los coeficientes de correlación entre estaciones meteorológicas.
- Los valores p-Value de las pruebas paramétricas y no paramétricas aplicadas.
- Los registros identificados como datos inconsistentes.
- Los valores estimados para los datos faltantes y el método de imputación utilizado.
- Los valores del SPI calculados para todas las estaciones durante todo el periodo de tiempo analizado.
- La caracterización temporal de los índices SPI y ONI.
- Los resultados de las correlaciones entre ambos índices.

Asimismo, se generaron los gráficos necesarios en formatos PDF y JPEG para visualizar los resultados, entre los que se incluyen:

- Series temporales del SPI para cada estación meteorológica.
- Representación gráfica del índice ONI durante el periodo de estudio.
- Histogramas de precipitación mensual.
- Comparaciones temporales entre estaciones.
- Matriz de correlaciones entre estaciones.
- Diagramas de caja y bigotes (boxplots) por mes para todas las estaciones, que representan visualmente la climatología mensual de la precipitación.

Como resultado fundamental de todo el proceso automatizado, se consolidaron tres bases de datos estructuradas en formato Excel:

- Base de datos de precipitación mensual: Contiene los registros completos y consistentes de precipitación para las 21 estaciones meteorológicas durante el

periodo 1979-2024, depurados y validados conforme a la metodología establecida, constituyendo un insumo fundamental para futuros procesos y estudios.

- Base de datos de climatología mensual: Compila los resultados de los diferentes estadísticos de tendencia central (media, mediana) y de dispersión (desviación estándar, coeficiente de variación, rango intercuartílico) para cada mes y cada estación meteorológica.
- Base de datos del Índice Estandarizado de Precipitación: Contiene los valores del SPI mensual calculados para las 21 estaciones meteorológicas durante la totalidad del periodo de análisis, permitiendo la identificación y caracterización de los eventos de sequía meteorológica en la provincia de García Rovira.

En síntesis, la automatización implementada no solo optimizó significativamente los tiempos de procesamiento, sino que garantizó la reproducibilidad integral de la metodología, la consistencia en la aplicación de los criterios estadísticos y la generación sistemática de todos los productos requeridos para el análisis espacio-temporal de las sequías meteorológicas y su relación con el fenómeno de El Niño.

Una clara evidencia de las fortalezas de contar con una metodología automatizada fue la agilidad para realizar cambios y obtener resultados de manera automática en tiempos considerablemente reducidos. Un ejemplo de ello fue el cambio de enfoque solicitado durante la defensa de la tesis, el cual implicaba una modificación sustancial y requería volver a realizar todos los cálculos para obtener los nuevos resultados. Dicho ajuste pudo llevarse a cabo de manera muy ágil gracias a que la metodología se encontraba completamente automatizada.

## **Capítulo cuarto**

### **Discusión de los resultados**

#### **1. Depuración, completitud y validación de la precipitación mensual**

La base de datos de precipitación ha sido depurada, completada y evaluada su consistencia según los métodos usados por diferentes autores y adaptados a las particularidades de la investigación.

La presente investigación empleó un total de 21 estaciones meteorológicas ubicadas en la provincia de García Rovira y su área de influencia, las cuales presentan altos niveles de completitud en sus registros. En particular, 17 estaciones (80 %) cumplen con el criterio más riguroso de  $\leq 5$  % de datos faltantes, establecido por Rivera (2014) como umbral de referencia para garantizar la estabilidad estadística en series de precipitación. De acuerdo con la literatura especializada, la presente investigación adoptó un límite máximo del 10 % de datos faltantes, criterio ampliamente utilizado en estudios sobre caracterización de sequías en Colombia y Latinoamérica (Paredes, Millano y Guevara 2008; Ávila Díaz, Carvajal Escobar y Gutiérrez Serna 2014; Loaiza Cerón 2014).

Únicamente la estación PORTILLO (código 37010060) supera marginalmente el umbral establecido, con 10,14 % de ausencias de registros en su serie temporal. No obstante, fue conservada en el análisis debido a su importancia en la representatividad espacial de la precipitación dentro del área de estudio, evitando así una pérdida significativa de cobertura geográfica. Esta decisión metodológica se sustenta en investigaciones que aceptan hasta 20 % de datos faltantes cuando la disponibilidad espacial de estaciones es limitada, con el fin de evitar distorsiones en la interpolación y el análisis espacial de la variabilidad climática (Guajardo-Panes et al. 2017).

En la presente investigación, se aplicó un umbral del 99,997 % para las tres distribuciones de probabilidad empleadas, con el fin de identificar y eliminar datos inconsistentes en las series de precipitación. Este umbral garantiza que los registros señalados como potencialmente inconsistentes tengan una probabilidad extremadamente baja de ocurrencia, inferior al 0,003 %, lo que equivale a la presencia esperada de tres eventos de esta magnitud cada mil años. Adicionalmente, para cada fecha en que se detectaron posibles datos inconsistentes, se analizó el comportamiento de las estaciones

vecinas; si el comportamiento no era similar, se procedió a eliminar el registro de precipitación mensual. Este criterio fue empleado previamente por Rivera (2014).

Para la estimación de datos faltantes se aplicaron tres métodos estadísticos complementarios. En primera instancia, se utilizó el método de regresión múltiple, ampliamente documentado como una técnica robusta para la imputación de datos climáticos, debido a su capacidad para capturar la relación lineal entre estaciones con comportamientos pluviométricos similares (Rivera 2014; Valarezo Aguilar 2017). Mediante este procedimiento se completaron 310 registros, lo que corresponde al 97,48 % del total de valores faltantes.

En segundo lugar, se implementó el método de razones, el cual se fundamenta en la disponibilidad de un valor real en una estación vecina para la misma fecha, siempre que exista una correlación alta entre ambas series. Este método ha demostrado ser eficaz en estudios hidrometeorológicos con buena densidad de estaciones (Pichardo 2006; Rivera 2014). En la presente investigación solo fue necesario estimar 2 registros (0,62 %) mediante esta técnica.

Finalmente, cuando no fue posible establecer un modelo de regresión significativo o cuando también existía ausencia de datos en la estación con mayor correlación, se recurrió a estadística descriptiva, empleando la media o la mediana según el cumplimiento o no de la normalidad de la distribución (Pizarro, Ramírez y Flores 2003; Quispe Quispe 2012; Rivera 2014). A través de este procedimiento se imputaron 6 registros (1,88 %) del total de datos faltantes.

Los resultados permiten evidenciar que el método de regresión múltiple fue el más idóneo en la provincia de García Rovira, dado que la densidad espacial de la red meteorológica incluye al menos dos estaciones por unidad climática y hasta cinco estaciones en algunos casos como lo aplico Guajardo-Panes et al. (2017), lo que garantiza una alta representatividad local y altas correlaciones entre las estaciones de la misma unidad climática. Esta condición asegura modelos estadísticos confiables y una estimación robusta de los datos faltantes utilizados en el cálculo del SPI y en la caracterización de la variabilidad pluviométrica regional.

Para evaluar la presencia de tendencias en las series de precipitación se aplicó la prueba no paramétrica de Mann Kendall, ampliamente reconocida como uno de los métodos más adecuados para analizar tendencias en series climatológicas y ambientales debido a que no requiere normalidad en los datos ni se ve afectada por valores atípicos lo cual es muy adecuado para la investigación debido a que el comportamiento que mejor

representa la precipitación en la provincia de García Rovira es la distribución Gamma (89,2 %) y su alta variabilidad estacional que se refleja con un coeficiente promedio entre todos los meses de todas las estaciones alto ( $CV = 49,11 \%$ ) (da Silva Alves y Nóbrega 2017). Los resultados evidenciaron que las estaciones CEPITA (código 24030300), TOPE EL (24030330) y PRESIDENTE (código 37010040) presentaron valores de  $p\text{-Value} < 0,05$ , lo que indica la existencia de una tendencia estadísticamente significativa en la precipitación mensual durante el periodo analizado.

A pesar de presentar tendencia significativa, las estaciones fueron mantenidas en el análisis debido a su ubicación estratégica dentro de la red meteorológica y a su contribución a la representatividad espacial en la modelación del comportamiento estacional mediante el método Kriging, tanto para la caracterización de la distribución espacial de la precipitación como para la interpolación del SPI. Sin embargo, se recomienda realizar un análisis específico de estas tendencias a fin de determinar si responden a cambios reales en el régimen pluviométrico, posiblemente vinculados a la variabilidad climática y al cambio climático, o si, por el contrario, derivan de factores no climáticos, tales como modificaciones en los instrumentos de medición, reubicación de las estaciones meteorológicas, alteraciones morfológicas en su entorno o errores de observación (Guenni, Degryze y Alvarado 2008).

La red de estaciones meteorológicas utilizada en este estudio presenta una distribución espacial aceptable, aunque se evidencia un vacío de cobertura de estaciones en la zona oriental del área de influencia. Esta condición representa una limitación al momento de aplicar métodos de interpolación espacial para la caracterización espacial de la precipitación mensual y del SPI, ya que la baja densidad de estaciones en ciertos sectores puede incrementar la incertidumbre de los resultados.

El análisis de representatividad mediante polígonos de Thiessen arrojó una media de 27 115,89 ha y una desviación estándar de 15 115,69 ha, lo cual resulta en un coeficiente de variación espacial (CV) del 55,74 %. De acuerdo con Guajardo-Panes et al. (2017), valores de CV superiores al 50 % indican una uniformidad espacial baja o moderada, sugiriendo que algunas estaciones ejercen una influencia territorial excesiva respecto a otras.

El Análisis de Vecino Más Cercano complementa esta evaluación. Se obtuvo una relación  $R = 1,56$ , un valor  $z = 4,92$  y un  $p\text{-Value} < 0,001$ , lo que evidencia un patrón espacial disperso y no aleatorio, así como la posible presencia de anisotropías o zonas con menor densidad de muestreo en la red de estaciones meteorológicas. Este comportamiento

corroborar la necesidad de considerar estructuras de vecindad adecuadas y validación cruzada en los modelos de interpolación geoespacial.

No obstante, otros criterios de distribución espacial se cumplieron satisfactoriamente. Las estaciones se encuentran distribuidas de manera aceptable por unidades climáticas y en un rango altitudinal representativo, conforme a lo recomendado por Guajardo-Panes et al. (2017). Sin embargo, seis unidades climáticas (cálido árido, muy frío semihúmedo, templado árido, templado húmedo, templado semiárido y templado superhúmedo) cuentan con solo una estación meteorológica, lo cual puede reducir su correlación alta con otras estaciones cercanas. Tal situación se evidencia especialmente en las estaciones CEPITA (código 24030300) y CAMPO HERMOSO (código 37020030), ubicadas en el área de estudio, aunque dentro del área de influencia definida para mejorar la densidad espacial del análisis, siguiendo la estrategia metodológica de Guajardo-Panes et al. (2017).

En síntesis, aunque la red meteorológica cumple la mayoría de los criterios técnicos de representatividad espacial, las deficiencias en el sector oriental del área de influencia representan un aspecto crítico a considerar en la interpretación de los resultados del SPI, especialmente en zonas donde los Thiessen presentan mayor extensión y, por tanto, mayor incertidumbre asociada.

## **2. Climatología y variabilidad de la precipitación mensual**

El análisis climatológico de la precipitación mensual en la provincia de García Rovira permitió caracterizar con precisión el comportamiento espacial y temporal del régimen pluviométrico, aplicando herramientas estadísticas consolidadas en estudios hidrometeorológicos (Albentosa Sánchez 1975, Albentosa Sánchez 1976; IDEAM 2015; Vega-Viviescas 2019).

Los resultados evidencian una alta variabilidad intra anual e interanual, propia de la región andina, su relieve montañoso y la dinámica atmosférica tropical. En particular, la región está influenciada por la migración estacional de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) y la circulación atmosférica asociada a ENSO, factores que modulan la estacionalidad y los contrastes pluviométricos (Mejía, Pabón y Ruiz 1999; Arango et al. 2013; Arango et al. 2015; Paredes 2015). Este comportamiento coincide con investigaciones desarrolladas en México y Brasil, donde la variación pluviométrica también se vincula al desplazamiento latitudinal de la ZCIT y al forzamiento ENSO

(Méndez González, Nívar Cháidez y González Ontiveros 2008; da Silva Alves y Nóbrega 2017).

El coeficiente de variación (CV) determinado por meses para todas las estaciones meteorológicas registró valores comprendidos entre 20,02 % y 104,53 %, lo que indica una variabilidad que oscila entre moderada y extremadamente alta. El CV promedio es de 49,11 % lo cual refleja un comportamiento altamente contrastado, con 56,34 % de los meses clasificados en variabilidad moderada y 43,65 % en variabilidad alta. Estos contrastes reafirman la presencia de una estacionalidad bien marcada y la fuerte dependencia del régimen de lluvias respecto a la orografía (Mejía et al. 1999; Arango et al. 2015).

El análisis mediante diagramas boxplot permitió identificar dos configuraciones del régimen pluviométrico en la provincia. La más predominante corresponde a un régimen bimodal (76,19 % de las estaciones), caracterizado por dos temporadas lluviosas claramente definidas: la primera entre los meses de marzo, abril y mayo, y la segunda temporada entre septiembre, octubre y noviembre, intercaladas por dos períodos secos durante diciembre a febrero y la segunda época seca entre junio y agosto. En contraste, un 23,80 % de las estaciones presenta un régimen unimodal, con una única temporada lluviosa continua entre marzo y noviembre, seguida de un período seco concentrado en diciembre, enero y febrero.

La coexistencia de ambos patrones evidencia la influencia de microclimas andinos asociados a los gradientes altitudinales, la compleja configuración del relieve y la respuesta diferenciada al desplazamiento estacional de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), tal como ha sido reportado para otros sectores de la región andina e intertropical (Mejía et al. 1999; Puertas Orozco, Carvajal Escobar y Quintero Ángel 2011; Guenni, Degryze y Alvarado 2008; Márdero et al. 2015).

La distribución espacial de la precipitación mensual muestra un gradiente hídrico Occidente-Oriente. Durante los meses de enero, febrero, marzo y abril, los mayores acumulados de precipitación se registran en el sector occidental y los registros más bajos de precipitación se encuentran en la parte oriental de la región. En los meses de junio, julio y agosto se presenta una inversión del patrón pluviométrico, concentrándose la humedad en la zona oriental y las precipitaciones más bajas en la parte occidental. En los meses de septiembre, octubre, noviembre y diciembre, el régimen retorna gradualmente al patrón inicial nuevamente con las mayores precipitaciones en la parte occidental y un poco en la parte central de la provincia y las precipitaciones más bajas en la parte oriental.

Estos desplazamientos están estrechamente asociados con las reconfiguraciones estacionales de la ZCIT, con registros de precipitación altos en marzo, abril y mayo cuando la ZCIT se dirige al Norte y en septiembre, octubre y noviembre cuando pasa nuevamente por el territorio nacional en su recorrido hasta los 20 °C al Sur, la intensidad del ascenso orográfico y cambios en la convección local, lo que demuestra el rol preponderante de la topografía y la circulación atmosférica regional en la modulación de las lluvias.

El análisis de bondad de ajuste realizado con un nivel de confianza del 95 % mostró que para el 89,2 % de las series mensuales de precipitación no existe suficiente evidencia estadística para determinar que no se ajustan a la distribución Gamma. Este resultado es coherente con las propiedades físicas de la precipitación la cual se caracteriza por ser una variable no negativa y presentar asimetría positiva (Costa, Ferreira y Cordeiro 2015). Este hallazgo resulta fundamental para la correcta estimación del Índice Estandarizado de Precipitación (SPI), ya que es un índice que parte del supuesto de que los datos se ajustan a dicha distribución para el cálculo de probabilidad de la precipitación mensual de cada estación, la estandarización de los valores resultantes y posterior caracterización de las sequías meteorológicas (OMM 2012). Es importante tener en cuenta que para un 10,8 % de las series de datos analizadas, se encontró evidencia estadística significativa que indica un alejamiento de la distribución de probabilidad Gamma.

La caracterización espacial del régimen pluviométrico se realizó mediante el método de interpolación Kriging, dada su capacidad para modelar la dependencia espacial y mejorar la precisión de la estimación suavizando los valores extremos. Su idoneidad en estudios hidroclimáticos ha sido demostrada por el IDEAM en diversas investigaciones territoriales (Mejía, Pabón y Ruiz 1999), así como en estudios internacionales (Guenni et al. 2008; Poquet, Belda y García-Haro 2008). El método IDW es una técnica ampliamente utilizada en investigaciones sobre precipitación, tanto en Colombia como en América Latina (Arango et al. 2013; 2015; Méndez González et al. 2008). No obstante, en la presente investigación se consideró el método Kriging como el más adecuado para la caracterización espacial de la precipitación y de las sequías en la provincia de García Rovira. Se realizó una comparación con el método IDW, dado que este último asigna mayor peso a las áreas cercanas a la estación y reduce progresivamente dicho peso conforme aumenta la distancia, característica que se considera poco idónea para

representar adecuadamente la distribución espacial de la precipitación y las sequías meteorológicas en la provincia.

Se recomienda que, en futuras investigaciones, se realicen comparaciones y pruebas de sensibilidad de los resultados al aplicar diferentes métodos de interpolación. El objetivo es identificar el método más adecuado para caracterizar la distribución espacial de la precipitación mensual en la región

### **3. Cálculo y caracterización de las sequías meteorológicas y análisis de la relación con el fenómeno de El Niño**

La precipitación mensual en la provincia de García Rovira presenta un ajuste estadístico significativo a la distribución Gamma, requisito fundamental para estimar correctamente el Índice Estandarizado de Precipitación (SPI). Este indicador transforma los valores de precipitación a dicha distribución y los estandariza, permitiendo identificar anomalías climáticas asociadas a eventos secos y húmedos de manera objetiva y comparable (McKee et al. 1993; OMM 2012).

En este estudio se empleó el SPI a escala de un mes (SPI-1), resolución adecuada para la detección temprana de sequías meteorológicas vinculadas a déficits pluviométricos de corta duración y cambios atmosféricos regionales. El uso del SPI-1 facilita la identificación rápida de desviaciones respecto al régimen histórico de lluvias, permitiendo el monitoreo continuo y la evaluación de la variabilidad pluviométrica mensual en la región, conforme a lo establecido por la OMM (2012, 2016).

#### **Duración de las sequías**

El análisis de la duración de las sequías meteorológicas en la provincia de García Rovira evidencia una variabilidad temporal y espacial significativa. Los eventos de menor duración, con extensiones de 1 a 6 meses, se presentan de forma recurrente a lo largo del registro histórico. Estas sequías de corta persistencia se distribuyen ampliamente en el territorio, aunque con mayor frecuencia en el sector central y Sur de la provincia, donde los pulsos secos tienden a ser más breves debido a una mayor variabilidad atmosférica local asociado al régimen de lluvias bimodal.

Por el contrario, los eventos de mayor duración muestran una tendencia espacial claramente definida hacia el norte de la provincia, un poco hacia el oriente, donde se registran sequías persistentes entre 9 y 16 meses, destacándose los años 1984, 1991, 1992, 2001, 2015 y 2022. La sequía más prolongada alcanzó una duración de 16 meses, asociada a las condiciones extremas registradas durante los años 1994 y 1996, lo cual coincide con

fases intensas de El Niño que históricamente han generado déficits pluviométricos marcados en Colombia. Esta distribución espacial de la duración de sequías sugiere que el norte de García Rovira posee una mayor susceptibilidad y es donde se pueden presentar las sequías de mayor duración.

### **Intensidad de las sequías**

El análisis de la intensidad máxima del SPI confirma que toda la provincia de García Rovira es susceptible a la ocurrencia de sequías meteorológicas severas y extremas; sin embargo, esta susceptibilidad presenta una marcada variabilidad espacial. La zona occidental concentra los valores más negativos del SPI, lo que la posiciona como el sector de mayor vulnerabilidad frente a sequías de alta intensidad. Hacia el oriente, la severidad de los eventos disminuye progresivamente, lo que indica una mayor capacidad de amortiguación climática.

Los eventos más intensos se registraron principalmente durante los años 1991, 1997, 2002 y 2010, todos ellos asociados a fases cálidas del fenómeno El Niño, ampliamente reconocido como un factor causante directo de anomalías secas en la región andina colombiana (Carvajal, Jiménez y Materón 1998; Ávila Díaz, Carvajal Escobar y Gutiérrez Serna 2014).

### **Magnitud de las sequías**

El análisis de la magnitud máxima del SPI muestra que la totalidad de la provincia de García Rovira es vulnerable a eventos de sequía extremadamente fuertes, alcanzando valores acumulados de SPI cercanos a  $-9$ , lo que refleja periodos de impacto climatológico prolongado y severo sobre el sistema hídrico regional. La distribución espacial evidencia que la zona norte y oriental, concentra las mayores magnitudes de sequía, configurando un patrón territorial de elevada susceptibilidad, mientras que hacia el suroccidente la severidad de las magnitudes disminuye gradualmente, lo cual sugiere mejores condiciones de resiliencia hidrometeorológica asociadas a la influencia orográfica y a un mayor aporte de humedad. Los eventos de mayor magnitud se registraron en los años 1983, 1984, 1991, 1992, 2000, 2002, 2010, 2014 y 2024, los cuales coinciden con fases intensas del fenómeno El Niño, ampliamente documentadas en Colombia como períodos de anomalías secas extremas que afectan la hidrología y disponibilidad hídrica en las regiones andinas (Carvajal, Jiménez y Materón 1998; Ávila Díaz, Carvajal Escobar y Gutiérrez Serna 2014). Este comportamiento revela que la magnitud de los impactos de sequía no solo depende de la intensidad del déficit pluviométrico, sino también de su acumulación temporal, lo que incrementa el riesgo para

sectores productivos como la agricultura y para los sistemas de abastecimiento de agua potable en la zona noroccidental de la provincia.

### **Frecuencia de las sequías**

El análisis de la frecuencia de eventos secos presentó un total que oscila entre 51 y 77 eventos en los 46 años de análisis, lo que nos indica que en todos los años hay presencia de sequías de diferente categoría en la provincia de García Rovira.

En primer lugar, las sequías moderadamente secas constituyen los eventos más recurrentes. La mayor concentración se identifica en el sector Sur de la provincia, donde se registran entre 38 y 43 eventos durante el periodo analizado. En contraste, la zona norte presenta una menor frecuencia, con valores entre 28 y 32 eventos. Este patrón sugiere una mayor sensibilidad climática del Sur a fluctuaciones pluviométricas de corta duración, posiblemente vinculada con la dinámica bimodal del régimen de lluvias.

En cuanto a las sequías severamente secas, se observa una mayor ocurrencia en la zona noroccidental, con registros de 22 a 29 eventos. Las áreas orientales muestran la menor frecuencia (9 a 17 eventos), indicando que esta parte de la provincia cuenta con una mayor capacidad de amortiguación hidrometeorológica.

Finalmente, los eventos extremadamente secos muestran una distribución más homogénea en todo el territorio, con valores entre 9 y 15 eventos. Este comportamiento sugiere que, cuando ocurren sequías extremas, estas tienden a afectar simultáneamente a la totalidad de la provincia, lo cual coincide con lo reportado para Colombia durante episodios intensos del fenómeno El Niño, periodo en que la reducción de precipitación es generalizada y persistente en la región andina (Carvajal, Jiménez y Materón 1998; González López et al. 2016).

### **Relación entre las sequías meteorológicas y el fenómeno de El Niño**

Los resultados obtenidos permiten identificar una clara correspondencia entre los episodios de sequía más significativos en la provincia de García Rovira y las fases cálidas del ENSO. Los años 1982, 1983, 1986, 1988, 1991, 1992, 1994, 1995, 1997, 1998, 2002, 2003, 2009, 2010, 2014, 2016, 2018, 2019, 2023 y 2024 coinciden con periodos en los que se documentó la ocurrencia del fenómeno de El Niño, particularmente aquellos clasificados como fuertes o muy fuertes a escala global.

Estos resultados son coherentes con múltiples estudios hidrometeorológicos en Colombia, los cuales muestran que El Niño induce anomalías secas generalizadas sobre la región Andina, intensificando la recurrencia, severidad y duración de las sequías meteorológicas (Carvajal Escobar, Jiménez y Materón 1998; Zuluaga 2009; Trujillo

Osorio 2018). Asimismo, investigaciones recientes han documentado que los eventos Niño 1982-19883, 1997-1998, 2014-2016 y 2023-2024 se encuentran entre los de mayor impacto hidrológico en el país durante las últimas décadas (Ávila Díaz, Carvajal Escobar y Gutiérrez Serna 2014; Vega Viviescas 2019), lo cual coincide con los episodios de sequía más intensos identificados en esta investigación.

Aunque se observa una mayor respuesta bajo eventos Niño altos y muy altos, también se evidencian sequías relevantes durante episodios Niño moderados, lo cual sugiere que la provincia mantiene una susceptibilidad hidroclimática persistente, incluso ante perturbaciones ENSO de menor magnitud. Esta relación directa confirma que el ENSO continúa siendo el principal forzante climático interanual de las sequías meteorológicas en García Rovira y, en general, en el territorio colombiano.

### **Consistencia con estudios previos**

Los eventos secos más significativos identificados en la provincia de García Rovira se concentran en los periodos 1982, 1983, 1989, 1991, 1992, 1997, 1998, 2002, 2003, 2009, 2010, 2014, 2016, 2018, 2019, 2023 y 2024. Estos episodios coinciden con fases cálidas de ENSO de intensidad fuerte a muy fuerte registradas para Colombia, lo cual respalda la relación directa entre la ocurrencia de sequías meteorológicas extremas y la variabilidad océano-atmosférica del Pacífico tropical (Torres y Díaz-Granados 2018). Para la macro cuenca Magdalena-Cauca, Vega-Viviescas (2019) demostró que las anomalías secas más intensas están moduladas por ENSO mediante alteraciones en la posición de la ZCIT y en los patrones regionales de circulación, comportamiento que coincide con la cronología de déficits pluviométricos extremos determinada en esta investigación.

Los años 1982, 1983, 1991, 1992, 1997, 1998, 2002, 2003 y 2009, 2010 corresponden a los episodios Niño más influyentes sobre las lluvias andinas colombianas documentados por estudios climatológicos del país, por lo que los resultados aquí obtenidos refuerzan la atribución de los eventos secos más severos a los forzamientos atmosféricos de gran escala asociados al ENSO (Arango et al. 2013).

En el ámbito espacial, diversas investigaciones en cuencas andinas de Colombia señalan que la intensidad y magnitud de las sequías se acentúan en sectores expuestos a subsidencia y disminución del aporte de humedad durante episodios Niño, especialmente en zonas de barlovento de la cordillera (Torres y Díaz-Granados 2018). La presente investigación confirma dicho patrón, al registrarse los valores de SPI más negativos en el occidente y noroccidente de la provincia de García Rovira durante fases cálidas intensas.

Asimismo, se observó que las sequías moderadamente secas presentan mayor frecuencia en el Sur del área de estudio, mientras que los eventos extremadamente secos muestran una distribución espacial más homogénea. Este comportamiento se ajusta a lo reportado por Vega-Viviescas (2019), quien indica que las sequías moderadas responden con mayor sensibilidad a variaciones estacionales e interanuales locales, mientras que las sequías extremas son principalmente generadas por forzamientos oceánico-atmosféricos de gran escala, particularmente ENSO.

Desde una perspectiva metodológica, el uso del Índice Estandarizado de Precipitación (SPI), sustentado en el ajuste a la distribución Gamma, es plenamente consistente con las recomendaciones internacionales para la caracterización multiescalar de sequías, así como con aplicaciones realizadas en Colombia y Sudamérica (Rivera 2014; Torres y Díaz-Granados 2018). Estos autores destacan que el SPI reproduce adecuadamente la estructura espacio-temporal de las anomalías secas y su vínculo con modos de circulación planetaria como ENSO, aspecto concordante con los resultados obtenidos.

#### **Coherencia regional y mundial de los ventos de sequia**

Los eventos extremos de 1982, 1983, 1997, 1998, 2014, 2016, 2023 y 2024 muestran una sincronización espacial del déficit pluviométrico en toda la provincia, un comportamiento característico de los episodios El Niño más intensos que han impactado el territorio colombiano durante las últimas décadas (Torres y Díaz-Granados 2018). Este resultado evidencia la alta sensibilidad hidrometeorológica de García Rovira frente a perturbaciones oceánico-atmosféricas de gran escala.

Asimismo, los episodios de sequía más representativos identificados en esta investigación presentan una coincidencia temporal significativa con eventos reportados en diferentes regiones de América Latina, lo cual refuerza la robustez de los hallazgos y confirma la influencia global del ENSO.

Los periodos secos de 1982, 1983, 1991, 1992, 1997 y 1998 coinciden con déficits documentados mediante SPI en la cuenca del río Tijuana (México), asociados a fases fuertes del fenómeno El Niño (Gutiérrez Moreno, Ruiz Gibert y Hallack Alegría 2019). Los eventos de 1997-1998 también fueron catalogados como sequías extremas en dos cuencas de la Sierra Madre Occidental (México) (Arriaga et al. 2017).

Los episodios de 1983, 1989, 1991 y 1995 guardan correspondencia con sequías detectadas en los Llanos de Venezuela (Olivares et al. 2016), demostrando que El Niño induce respuestas secas sincrónicas en el norte de Sudamérica.

Los periodos secos de 2002 y 2003 concuerdan con sequías meteorológicas reportadas en Colombia y atribuidas a un Niño moderado-fuerte (Hurtado 2012), confirmando el control interregional de ENSO sobre la precipitación en América del Sur.

Las sequías de 2009 y 2010 coinciden con eventos extremos en la subcuenca del río Bonito (Honduras) (Veroy 2020) y, en Colombia, con una afectación del 52 % del territorio nacional (Hurtado 2012), lo que evidencia una amplia sincronización espacial del fenómeno.

Las sequías de 2014–2016 corresponden con déficits detectados en zonas semiáridas de Venezuela asociados al evento El Niño 2015–2016 (Olivares Campos et al. 2016), fortaleciendo la relación entre fases cálidas intensas del ENSO y sequías severas.

Los periodos secos de 2017 coinciden con anomalías reportadas mediante SPI/SPEI en la microcuenca del río Chulco (Ecuador) (Salinas Alvarado 2017) y en cuencas de la Sierra Madre Occidental (México) (Arriaga et al. 2017). En este caso, la señal presenta mayor heterogeneidad regional, lo que sugiere una interacción más marcada con factores locales.

Los episodios de 1991 y 1992 evidencian coincidencias con sequías registradas en la Península Ibérica (España) (Poquet, Belda y García-Haro 2008). Estos autores destacan que “las sequías más acentuadas se produjeron a comienzos de la década de 1990”, lo que sugiere una posible sincronía hemisférica, pese a la diferencia en los mecanismos atmosféricos dominantes en Europa. Este resultado confirma la pertinencia del SPI como herramienta comparativa para el análisis de sequías en múltiples contextos climáticos.

No obstante, desde una perspectiva estadística, no se encontró una relación significativa entre las sequías meteorológicas y la presencia del fenómeno de El Niño. Se analizaron la totalidad de las series temporales, así como únicamente los periodos en los que se registró El Niño en sus diferentes categorías, desde débiles hasta muy fuertes y, en todos los casos, las correlaciones obtenidas fueron bajas o muy bajas. Este resultado contrasta con la identificación cualitativa de sequías en años con presencia del fenómeno, por lo que se sugiere explorar otros índices y métodos de correlación, tanto lineales como no lineales, que permitan analizar con mayor profundidad la relación entre las sequías meteorológicas en la provincia de García Rovira y la ocurrencia de El Niño

## Conclusiones

La provincia de García Rovira evidencia una alta susceptibilidad a la ocurrencia de sequías meteorológicas como consecuencia de la elevada variabilidad estacional e interanual de la precipitación, cuyo coeficiente de variación promedio se aproxima al 50 %. La ocurrencia de eventos secos es recurrente en el territorio, registrándose sequías de distinta magnitud cada año y en diferentes sectores de la región. Espacialmente, la zona noroccidental se configura como el sector de mayor vulnerabilidad, al concentrar los eventos más intensos y de mayor magnitud, mientras que en el Sur se presenta una alta frecuencia de sequías moderadas, reflejando una respuesta más sensible ante fluctuaciones pluviométricas de corta duración.

Si bien el coeficiente de correlación lineal de Pearson no evidenció una relación estadísticamente significativa entre las sequías meteorológicas en la provincia de García Rovira y la presencia del fenómeno de El Niño, los análisis temporales y espaciales realizados confirman que los eventos de sequía de categoría fuerte y extrema presentan una sincronización significativa con las fases cálidas del ENSO. Este hallazgo demuestra la influencia directa de este fenómeno como el principal forzante climático interanual de las sequías meteorológicas en la región. La recurrencia de estos eventos, junto con su intensidad y su diferenciada distribución espacial, constituye un factor de riesgo hidrometeorológico permanente que amenaza tanto la sostenibilidad de los sistemas productivos como la seguridad hídrica para el abastecimiento poblacional en la provincia.

La precipitación mensual en la provincia presenta una marcada variabilidad espacio-temporal. La mayor parte del territorio exhibe un régimen bimodal con dos temporadas lluviosas entre marzo-mayo y septiembre–noviembre, y dos periodos secos entre diciembre-febrero y junio-agosto. Un sector menor de la provincia presenta un régimen unimodal con una única estación lluviosa entre marzo y noviembre. Además, se identificó un gradiente hídrico de Occidente a Oriente, cuyo comportamiento estacional está estrechamente controlado por la orografía de la Cordillera Oriental y la migración de la Zona de Convergencia Intertropical.

El preprocesamiento estadístico aplicado permitió garantizar la calidad, completitud y consistencia de las series de precipitación utilizadas. La distribución Gamma fue la que mejor representó el comportamiento de la precipitación mensual, validando la robustez del SPI como herramienta para la identificación de sequías

meteorológicas. Las pruebas de Lilliefors y Mann Kendall se ajustaron adecuadamente a las propiedades estadísticas e hidrológicas de las series, mientras que la regresión múltiple fue el método más idóneo para la imputación de valores faltantes gracias a la adecuada correlación espacial entre estaciones. La interpolación Kriging demostró ser un método eficaz para la representación espacial de la precipitación y de las sequías; no obstante, se recomienda en futuras investigaciones la evaluación comparativa con otros métodos para reducir la incertidumbre geoespacial.

Finalmente, los resultados obtenidos evidencian la necesidad de fortalecer los sistemas de monitoreo y gestión del riesgo en la región. La persistencia de sequías moderadas y la ocurrencia de eventos severos asociados al ENSO exigen estrategias de adaptación que prioricen la planificación territorial, la seguridad hídrica, el manejo del recurso suelo agua y la integración de información climática en la toma de decisiones públicas y sectoriales. Ante escenarios de intensificación de la variabilidad y el cambio climáticos, esta investigación constituye una base científica clave para el diseño de programas de alerta temprana y para la gestión sostenible del recurso hídrico en la provincia de García Rovira.

La automatización de procesos y metodologías completas, como en el caso de la presente investigación, constituye un aspecto fundamental en la investigación científica, ya que facilita la realización de comparaciones, ajustes o modificaciones en cualquier momento y permite obtener nuevamente los resultados de forma casi instantánea. Además, favorece la verificación y reproducibilidad de los resultados por parte de otros investigadores, promoviendo la aplicación del método en diferentes regiones. De igual manera, posibilita el intercambio del código desarrollado, lo que incentiva su evaluación, adaptación y uso por diversas instituciones y comunidades científicas.

## Obras citadas

- Agosta, Eduardo Andrés. 2004. “Variaciones del clima terrestre y rayos cósmicos galácticos durante el ciclo solar de 11 años: Revisión teórica”. *Meteorológica* 29 (1–2): 47-62. <https://www.scielo.org.ar/pdf/meteoro/v29n1-2/v29n1-2a05.pdf>.
- Albentosa Sánchez, Luis Miguel. 1976. “La aplicación del método estadístico en climatología: el régimen anual de precipitaciones en Barcelona”. *Revista de Geografía* 10 (1): 79-104. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=2855664>.
- . 1977. “La aplicación del método estadístico en climatología: 105 años de lluvias en Barcelona (1866–1970)”. *Revista de Geografía* 11: 65-77. <https://www.raco.cat/index.php/RevistaGeografia/article/view/45894/56686>.
- Aneiros, Germán, Ricardo Cao, Ricardo Fraiman, Christian Genest y Philippe Vieu. 2019. “Recent advances in functional data analysis and high-dimensional statistics”. *Journal of Multivariate Analysis* 170: 3-9. <https://doi.org/10.1016/j.jmva.2018.11.007>.
- Arango, C., J. Dorado, D. Guzmán y J. F. Ruiz. 2010. “Climatología trimestral de Colombia”. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), Subdirección de Meteorología, Grupo de Modelamiento de Tiempo, Clima y Escenarios de Cambio Climático.
- . 2013. “Variabilidad climática de la precipitación en Colombia asociada al ciclo El Niño, La Niña-Oscilación del Sur (ENSO)”. *IDEAM, Subdirección de Meteorología*, Grupo de Modelamiento de Tiempo, Clima y Escenarios de Cambio Climático. Acceso el 9 de octubre de 2025.
- Arriaga, Gerardo Esquivel, Palmira Bueno Hurtado, Miguel Agustín Velásquez Valle, Ignacio Sánchez Cohen y Vicenta Constante García. 2017. “Análisis de sequías mediante el índice estandarizado de precipitación (SPI) en dos cuencas de la Sierra Madre Occidental”. *Agrofaz: Publicación semestral de investigación científica* 17 (2): 97-110. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6512478>.
- Ávila Díaz, Álvaro Javier, Yesid Carvajal Escobar y Sergio Enrique Gutiérrez Serna. 2014. “Análisis de la influencia de El Niño y La Niña en la oferta hídrica mensual de la cuenca del río Cali”. *Tecnura* 18 (41): 120-33. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=257031319010>.

- Barrero, Álvaro. 2005. "Análisis de la sequía histórica de 1925–1926." *Meteorología Colombiana* (9): 87–92.  
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8302225>.
- Barros, Vicente, Ángel Menéndez y Gustavo Nagy, eds. 2006. *El cambio climático en el Río de la Plata*. Buenos Aires: Proyecto "Assessments of Impacts and Adaptations to Climate Change (AIACC)", START-TWAS-UNEP.
- Carvajal Escobar, Yesid, Henry Jiménez y Hernán Materón. 1998. "Incidencia del fenómeno ENSO en la hidroclimatología del valle del río Cauca-Colombia". *Bulletin de l'Institut Français d'Études Andines* 27 (3): 747-58.  
<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=12627336>.
- Correa, Juan Carlos, y Nelfi González. 2002. *Gráficos estadísticos con R*. Medellín: Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ciencias, Escuela de Estadística.  
<https://cran.r-project.org/doc/contrib/grafi3.pdf>.
- Costa, Valdeci José, Matheus Ferreira y Marcos Tadeu Andrade Cordeiro. 2015. "Análise de séries temporais climáticas". *Revista de Ciências Agroveterinárias* 14 (2): 169-77.  
[https://www.academia.edu/111032047/An%C3%A1lise\\_de\\_s%C3%A9ries\\_temporais\\_clim%C3%A1ticas](https://www.academia.edu/111032047/An%C3%A1lise_de_s%C3%A9ries_temporais_clim%C3%A1ticas).
- Crespo Pichardo, Guillermo. 2006. *Comparación de dos metodologías para el cálculo del índice de severidad de sequía para doce reservas de la biosfera mexicana*. Tesis de maestría en Ciencias. Texcoco: Colegio de Posgraduados, Programa de Hidrociencias.
- da Silva Alves, Keyla Manuela Alencar, y Ranyére Silva Nóbrega. 2017. "Tendencia pluviométrica y concentración estacional de precipitación en la cuenca hidrográfica del río Moxotó-Pernambuco-Brasil". *Revista Geográfica de América Central* 1 (58): 295-313.  
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6198352>.
- de Alcântara, Lucas Ravellys Pyrrho, Ialy Rayane de Aguiar Costa, Vitor Hugo de Oliveira Barros, Severino Martins dos Santos Neto, Artur Paiva Coutinho y Antônio Celso Dantas Antonino. 2019. "Análise de tendência para dados pluviométricos no município de Toritama-PE". *Journal of Environmental Analysis and Progress* 4 (2): 130-9.  
<https://www.researchgate.net/publication/331410928>.

- Duque Escobar, Gonzalo. 2011. "Calentamiento global en Colombia". Presentación en el Museo Interactivo Samoga, Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales, con motivo del Día Mundial del Medio Ambiente, 5 de junio de 2011. [https://www.researchgate.net/publication/387298959\\_Calentamiento\\_global\\_en\\_Colombia](https://www.researchgate.net/publication/387298959_Calentamiento_global_en_Colombia).
- Esri. 2025a. "Average Nearest Neighbor (Spatial Statistics)-ArcGIS Pro: Calculates a nearest neighbor index based on the average distance from each feature to its nearest neighboring feature". *ArcGIS Pro documentation*. Accedido el 12 de octubre. <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/tool-reference/spatial-statistics/average>.
- . 2025b. "Average Nearest Neighbor (Spatial Statistics)-ArcMap". *ArcGIS Documentation*, Accedido el 12 de octubre. <https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/latest/tools/spatial-statistics-toolbox/average-nearest-neighbor.htm>. nearest-neighbor.htm.
- . 2025c. "Crear polígonos de Thiessen (Analysis)". *Documentación de ArcMap*. <https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/latest/tools/analysis-toolbox/create-thiessen-polygons.htm>.
- Febrero-Bande, Manuel, y Manuel Oviedo de la Fuente. 2012. "Statistical Computing in Functional Data Analysis: The R Package fda.usc". *Journal of Statistical Software* 51 (4): 1–28. [https://www.researchgate.net/publication/260552565\\_Statistical\\_Computing\\_in\\_Functional\\_Data\\_Analysis\\_The\\_R\\_Package\\_fdausc](https://www.researchgate.net/publication/260552565_Statistical_Computing_in_Functional_Data_Analysis_The_R_Package_fdausc).
- González López, Nathalia, Yesid Carvajal Escobar y Wilmar Loaiza Cerón. 2016. "Análisis de sequías meteorológicas para la cuenca del río Dagua, Valle del Cauca, Colombia". *Tecnura* 20 (48): 101-13. [https://www.researchgate.net/publication/326548442\\_Analysis\\_of\\_meteorological\\_drought\\_for\\_Dagua\\_river\\_basin\\_Valle\\_del\\_Cauca\\_Colombia](https://www.researchgate.net/publication/326548442_Analysis_of_meteorological_drought_for_Dagua_river_basin_Valle_del_Cauca_Colombia).
- Guajardo-Panes, Rafael Alberto, Guadalupe Rebeca Granados-Ramírez, Ignacio Sánchez-Cohen, Gabriel Díaz-Padilla y Finlandia Barbosa-Moreno. 2017. "Validación espacial de datos climatológicos y pruebas de homogeneidad: caso Veracruz, México." *Tecnología y Ciencias del Agua* 8 (5): 157–77. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2017-05-11>.
- Guenni, Lelys, Edgard Degryze y Katiuska Alvarado. 2008. "Análisis de la tendencia y la estacionalidad de la precipitación mensual en Venezuela". *Revista Colombiana*

de *Estadística* 31 (1): 41–65.  
[https://www.researchgate.net/publication/5007112\\_Analisis\\_de\\_la\\_tendencia\\_y\\_la\\_estacionalidad\\_de\\_la\\_precipitacion\\_mensual\\_en\\_Venezuela](https://www.researchgate.net/publication/5007112_Analisis_de_la_tendencia_y_la_estacionalidad_de_la_precipitacion_mensual_en_Venezuela).

Gutiérrez Moreno, José Manuel, José Mizaél Ruiz Gibert y Michelle Hallack Alegría. 2019. “Monitoreo de sequía en la Cuenca del Río Tijuana”. *Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Baja California, Campus Mexicali*.  
[https://www.academia.edu/26880302/Monitoreo\\_de\\_sequ%C3%ADa\\_en\\_la\\_Cuenca\\_del\\_R%C3%ADo\\_Tijuana](https://www.academia.edu/26880302/Monitoreo_de_sequ%C3%ADa_en_la_Cuenca_del_R%C3%ADo_Tijuana).

Hodell, David A., Mark Brenner, Jason H. Curtis y Thomas Guilderson. 2001. “Forzamiento solar de la frecuencia de sequías en las tierras bajas mayas”. *Science* 292 (5520): 1367-70. <https://doi.org/10.1126/science.1057759>.

Hurtado M., Gonzalo. 2012. *Sequía meteorológica y sequía agrícola en Colombia: incidencia y tendencias*. Bogotá, D. C.: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), Subdirección de Meteorología.  
<https://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023912/Sequias.pdf>.

IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales). 2015. *Atlas climatológico de Colombia*. Bogotá: IDEAM.

———. 2024. *Indicadores e índices de sequía*. Bogotá D. C.: Grupo de Agrometeorología, Subdirección de Meteorología, IDEAM.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), ed. 2007. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press.  
[https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/05/ar4\\_wg1\\_full\\_report-1.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/05/ar4_wg1_full_report-1.pdf).

———. 2023. *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Editado por Hoesung Lee y José Romero. Ginebra, Suiza: IPCC.  
<https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>.

Lamb, Peter J., y Stanley A. Changnon Jr. 1981. “On the ‘Optimal’ Temperature and Precipitation Normals: The Illinois Situation”. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 20 (12): 1383-90. <https://www.jstor.org/stable/26180360>.

Lilliefors, Hubert W. 1967. “On the Kolmogorov–Smirnov Test for Normality with Mean and Variance Unknown”. *Journal of the American Statistical Association* 62 (318): 399-402. <https://doi.org/10.1080/01621459.1967.10482916>.

- Lloret, Francisco, y Daniel Siscart. 1995. “Los efectos demográficos de la sequía en poblaciones de encina”. *Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales* (2): 77-81.  
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=1216561>.
- Loaiza Cerón, Wilmar. 2014. “Evaluación de sequías meteorológicas y procesos de adaptación de las comunidades agrícolas de la cuenca del río Dagua – Valle del Cauca. Caso de estudio: microcuenca La Centella”. Tesis de maestría, Universidad del Valle. Santiago de Cali.  
<https://bibliotecadigital.univalle.edu.co/entities/publication/09ee4def-1874-4e77-bf30-9f9276e36aae>.
- Martín Vide, Javier. 2007. “La nueva realidad del calentamiento global: un decálogo del cambio climático”. *Revista de Climatología* 7 (1): 3-14.  
<https://www.divulgameteo.es/uploads/Dec%C3%A1logo-CC.pdf>.
- McKee, Thomas B., Nolan J. Doesken, y John Kleist. 1993. “The Relationship of Drought Frequency and Duration to Time Scales.” *Proceedings of the Eighth Conference on Applied Climatology*, 17-22 de enero, Anaheim, California: American Meteorological Society.  
[https://www.academia.edu/127253016/The\\_relationship\\_of\\_drought\\_frequency\\_and\\_duration\\_to\\_time\\_scales](https://www.academia.edu/127253016/The_relationship_of_drought_frequency_and_duration_to_time_scales).
- Mejía, Freddy, Óscar Mesa, Germán Poveda, Jaime Vélez, Carlos Hoyos, Ricardo Mantilla, Janet Barco, Adriana Cuartas, María Montoya y Blanca Botero. 1999. “Distribución espacial y ciclos anual y semianual de la precipitación en Colombia.” *DYNA* 127: 7–15.  
[https://www.academia.edu/410125/Distribucion\\_espacial\\_y\\_ciclos\\_anual\\_y\\_se\\_mianual\\_de\\_la\\_precipitacion\\_en\\_Colombia](https://www.academia.edu/410125/Distribucion_espacial_y_ciclos_anual_y_se_mianual_de_la_precipitacion_en_Colombia).
- Melo León, Sioux Fanny, Leidy Cáterin Riveros Salcedo, Germán Romero Otalora, Andrés Camilo Álvarez, Carolina Díaz Giraldo y Silvia Liliana Calderón Díaz. 2017. *Efectos económicos de futuras sequías en Colombia: estimación a partir del Fenómeno El Niño 2015*. Archivo de Economía n.º 466. Bogotá, D. C.: Departamento Nacional de Planeación, Dirección de Estudios Económicos.  
<https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Estudios%20Econmicos/466.pdf>.
- Méndez González, Manuel, José Nívar Cháidez y Agustín González Ontiveros. 2008. “Análisis de tendencias de precipitación (1920–2004) en México.” *Investigaciones Geográficas* 65 (enero): 38–55.

[https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0188-46112008000100004](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-46112008000100004).

- Montealegre Bocanegra, José Edgar, y José Daniel Pabón Caicedo. 2000. “La variabilidad climática interanual asociada al ciclo El Niño–La Niña–Oscilación del Sur y su efecto en el patrón pluviométrico de Colombia.” *Meteorología Colombiana* 2 (octubre): 7–21. Bogotá, D. C.: *Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM)*.  
[https://www.researchgate.net/publication/281605886\\_La\\_variabilidad\\_climatica\\_interanual\\_asociada\\_al\\_ciclo\\_El\\_Nino-La\\_Nina-Oscilacion\\_del\\_Sur\\_y\\_su\\_efecto\\_en\\_el\\_patron\\_pluviometrico\\_de\\_Colombia](https://www.researchgate.net/publication/281605886_La_variabilidad_climatica_interanual_asociada_al_ciclo_El_Nino-La_Nina-Oscilacion_del_Sur_y_su_efecto_en_el_patron_pluviometrico_de_Colombia).
- Montealegre Bocanegra, José Edgar. 2014. *Actualización del componente meteorológico del modelo institucional del IDEAM sobre el efecto climático de los fenómenos El Niño y La Niña en Colombia, como insumo para el Atlas Climatológico*. Informe final. Bogotá, D. C.: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), Subdirección de Meteorología.
- Montgomery, Douglas C., y George C. Runger. 2018. *Applied Statistics and Probability for Engineers*. 7.<sup>a</sup> ed. Hoboken: John Wiley y Sons.  
[https://spada.uns.ac.id/pluginfile.php/196559/mod\\_resource/content/1/Douglas%20C.%20Montgomery%20Applied%20Statistics%20and%20Probability%20for%20Engineers%203ed.pdf](https://spada.uns.ac.id/pluginfile.php/196559/mod_resource/content/1/Douglas%20C.%20Montgomery%20Applied%20Statistics%20and%20Probability%20for%20Engineers%203ed.pdf).
- Muñoz Marín, Carmen. 2008. *Análisis de la variabilidad en series hidrometeorológicas en una cuenca de cabecera del río Segura: cuenca del río Mundo*. Proyecto Fin de Carrera. Cartagena: Universidad Politécnica de Cartagena, Departamento de Ingeniería Térmica y de Fluidos.  
<https://repositorio.upct.es/entities/publication/3d37f8eb-dbc3-426c-9580-1f833040a94e>.
- Olivares Campos, Barlin Orlando, Adriana Cortez, Raquel Mayela Parra, Deyanira Lobo, Juan Carlos Rey y María Fernanda Rodríguez. 2016. “Análisis temporal de la sequía meteorológica en localidades semiáridas de Venezuela”. *UGCiencia* (22): 11–24.  
[https://www.researchgate.net/publication/312494087\\_Analisis\\_temporal\\_de\\_la\\_sequia\\_meteorologica\\_en\\_localidades\\_semiaridas\\_de\\_Venezuela](https://www.researchgate.net/publication/312494087_Analisis_temporal_de_la_sequia_meteorologica_en_localidades_semiaridas_de_Venezuela).
- Organización Meteorológica Mundial (OMM). 2012. *Guía del usuario sobre el Índice normalizado de precipitación (OMM-Nº 1090)*. M. Svoboda, M. Hayes y D.

- Wood. Ginebra: Organización Meteorológica Mundial. [https://www.droughtmanagement.info/literature/WMO\\_standardized\\_precipitation\\_index\\_user\\_guide\\_es\\_2012.pdf](https://www.droughtmanagement.info/literature/WMO_standardized_precipitation_index_user_guide_es_2012.pdf).
- Organización Meteorológica Mundial (OMM) y Asociación Mundial para el Agua (GWP). 2016. *Manual de indicadores e índices de sequía*. Serie 2 de *Herramientas y directrices para la gestión integrada de sequías* (OMM-Nº 1173). M. Svoboda y B. A. Fuchs. Ginebra: Organización Meteorológica Mundial y Asociación Mundial para el Agua. [https://www.droughtmanagement.info/literature/WMO-GWP\\_Manual-de-indicadores\\_2016.pdf](https://www.droughtmanagement.info/literature/WMO-GWP_Manual-de-indicadores_2016.pdf).
- Ortega-Gaucin, David. 2012. *La sequía en Nuevo León: diagnóstico y estrategias de adaptación*. Monterrey: Instituto del Agua de Nuevo León. [https://books.google.com.pe/books?id=WpAANbM6I\\_kC&printsec=frontcover#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.pe/books?id=WpAANbM6I_kC&printsec=frontcover#v=onepage&q&f=false).
- Ortiz, Heliana. 2020. “Sequía acabó con el 80 % de los cultivos de 12 municipios en Santander”. *Radio Nacional de Colombia*, 29 de mayo. <https://www.radionacional.co/actualidad/Sequía-acabo-con-el-80-de-los-cultivos-de-12-municipios-en-santander>.
- Pardo, Ángel, María Ruiz y José San Martín. 2021. *Introducción a la estadística aplicada con R*. Madrid: Editorial UNED.
- Paredes, Franklin, Jorge Luis Millano y Edilberto Guevara. 2008. “Análisis espacial de las sequías meteorológicas en la región de Los Llanos de Venezuela durante el período 1961-1996.” *Revista de Climatología* (8): 15-27. [https://www.researchgate.net/publication/26520708\\_Analisis\\_espacial\\_de\\_las\\_sequias\\_meteorologicas\\_en\\_la\\_region\\_de\\_Los\\_Llanos\\_de\\_Venezuela\\_durante\\_el\\_periodo\\_1961-1996](https://www.researchgate.net/publication/26520708_Analisis_espacial_de_las_sequias_meteorologicas_en_la_region_de_Los_Llanos_de_Venezuela_durante_el_periodo_1961-1996).
- Paredes, Franklin, Freddy La Cruz y Edilberto Guevara. 2014. “Análisis regional de la frecuencia de las sequías meteorológicas en la principal región cerealera de Venezuela”. *Bioagro* 26 (1): 21-8. [https://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1316-33612014000100003](https://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1316-33612014000100003).
- Paredes-Trejo, Franklin, Humberto Barbosa-Alves, María Alejandra Moreno-Pizani y Asdrúbal Farías-Ramírez. 2018. “Influencia de las sequías sobre el régimen hídrico de los ríos en Venezuela”. En *Ríos en Riesgo de Venezuela*, vol. II, editado

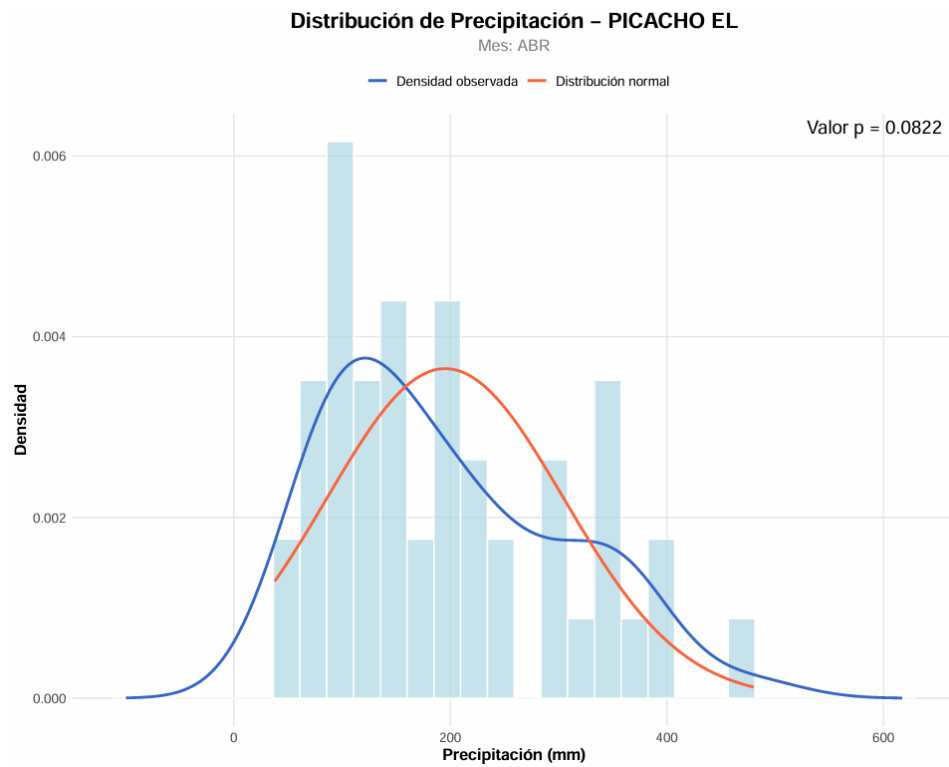
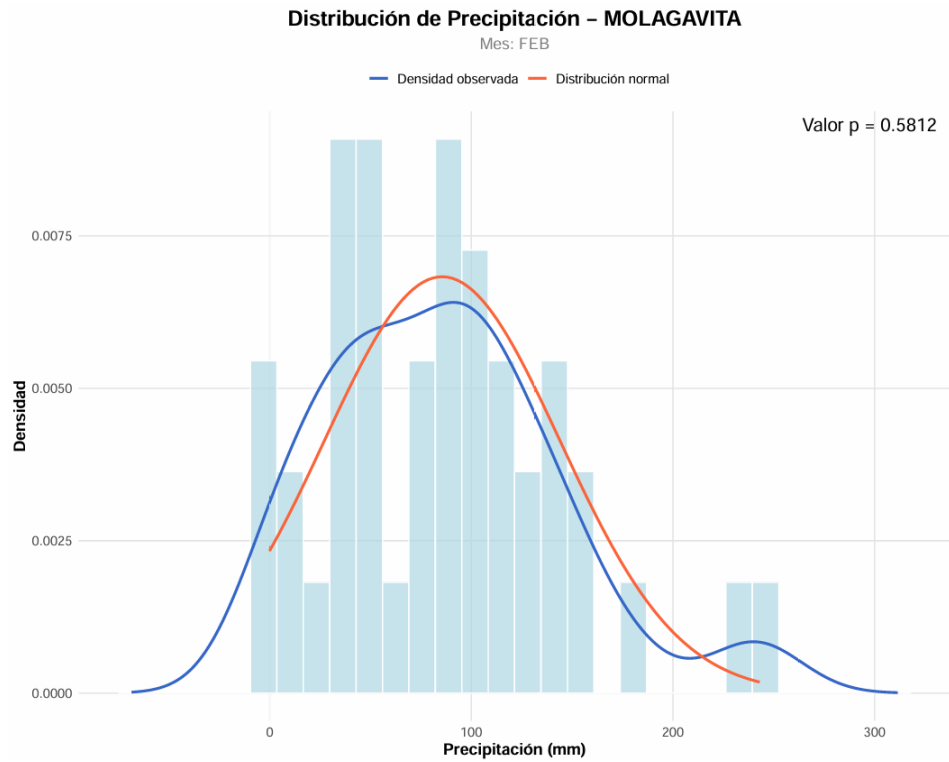
- por D. Rodríguez-Olarte, 171-84. Caracas: Colección Recursos Hidrobiológicos de Venezuela.  
[https://www.researchgate.net/publication/325158357\\_Influencia\\_de\\_las\\_sequias\\_sobre\\_el\\_regimen\\_hidrico\\_de\\_los\\_rios\\_en\\_Venezuela](https://www.researchgate.net/publication/325158357_Influencia_de_las_sequias_sobre_el_regimen_hidrico_de_los_rios_en_Venezuela).
- Paredes Trejo, Franklin. 2012. "Sistema para la alerta temprana de sequías meteorológicas en Venezuela". Tesis doctoral. Universidad de Carabobo.  
<https://vpiagendauniversitaria.blogspot.com/2012/08/sistema-para-la-alerta-temprana-de.html>.
- Pizarro, Roberto, Claudio Ramírez y Juan Pablo Flores. 2003. "Análisis comparativo de cinco métodos para la estimación de precipitaciones areales anuales en períodos extremos". *BOSQUE* 24 (3): 31-8.  
[https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0717-92002003000300003](https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0717-92002003000300003).
- Poquet, Daniel, Fernando Belda y Francisco Javier García-Haro. 2008. "Regionalización de la sequía en la Península Ibérica desde 1950 hasta 2007 a partir del SPI y una modelización digital del terreno." En *Actas del Congreso de la Asociación Española de Climatología*, Valencia. Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) y Universitat de València.  
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8598788>.
- Poveda, Germán, Peter R. Waylen y Roger S. Pulwarty. 2006. "Annual and inter-annual variability of the present climate in northern South America and southern Mesoamerica". *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* (234): 3-27. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0031018205006061>.
- Puertas Orozco, Olga Lucía, Yesid Carvajal Escobar y Mauricio Quintero Ángel. 2011. "Estudio de tendencias de la precipitación mensual en la cuenca alta-media del río Cauca, Colombia". *DYNA* 78 (169): 112-20.  
[http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0012-73532011000500013](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0012-73532011000500013).
- Quispe Quispe, Rubén Fredy. 2012. "Evaluación de las sequías hidro-meteorológicas en la microcuenca Ayaviri". Tesis de grado, Universidad Nacional del Altiplano.  
<https://agris.fao.org/search/en/providers/125062/records/6749797d7625988a37222727>.
- Ramírez-Builes, Víctor Hugo, y Álvaro Jaramillo-Robledo. 2009. "Relación entre el Índice Oceánico de El Niño y la lluvia en la región andina central de Colombia".

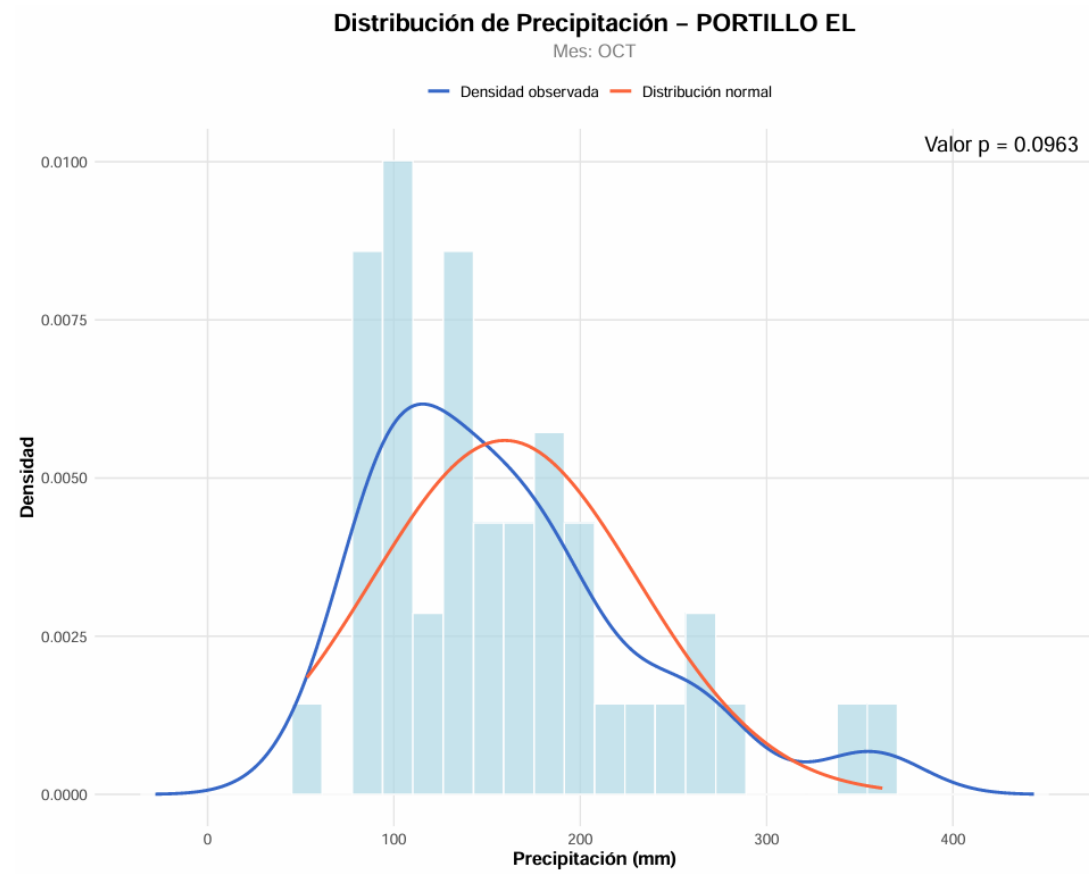
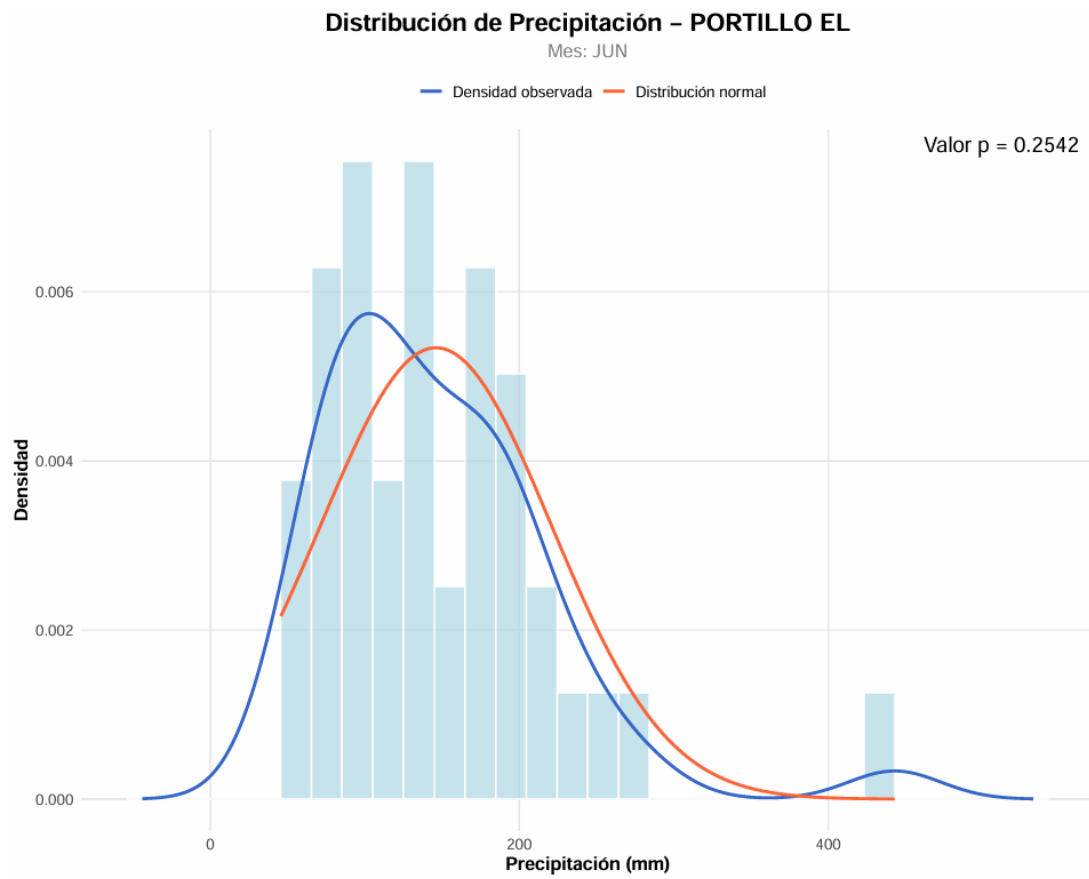
- Cenicafé* 60 (2): 161-72.  
[https://www.cenicafe.org/es/publications/arc060\(02\)161-172.pdf](https://www.cenicafe.org/es/publications/arc060(02)161-172.pdf).
- Razali, Nornadiah M., y Yap Bee Wah. 2011. "Power comparisons of Shapiro–Wilk, Kolmogorov–Smirnov, Lilliefors and Anderson–Darling tests". *Journal of Statistical Modeling and Analytics* 2 (1): 21–33.  
[https://www.researchgate.net/publication/267205556\\_Power\\_Comparisons\\_of\\_Shapiro-Wilk\\_Kolmogorov-Smirnov\\_Lilliefors\\_and\\_Anderson-Darling\\_Tests](https://www.researchgate.net/publication/267205556_Power_Comparisons_of_Shapiro-Wilk_Kolmogorov-Smirnov_Lilliefors_and_Anderson-Darling_Tests).
- Redacción El Tiempo. 2016. "Efectos del fenómeno de El Niño en Colombia 2015-2016". *El Tiempo*, 2 de junio.  
<https://www.eltiempo.com/archivo/documento/CMS-16610226>.
- Redacción Semana. 2014. "Consecuencias e impacto de las sequías en Colombia en 2014". *Semana*, 22 de julio.  
<https://www.semana.com/pais/articulo/consecuencias-impacto-Sequias-colombia-2014/198838/>.
- Rivera, Juan Antonio. 2014. "Aspectos climatológicos de las sequías meteorológicas en el Sur de Sudamérica: análisis regional y proyecciones futuras". Tesis doctoral, Universidad de Buenos Aires.  
[https://bibliotecadigital.exactas.uba.ar/download/tesis/tesis\\_n5504\\_Rivera.pdf](https://bibliotecadigital.exactas.uba.ar/download/tesis/tesis_n5504_Rivera.pdf).
- Salinas Alvarado, Juan Cristóbal. 2017. "Evaluación de modelos de regresión para predicción de sequías en la microcuenca del río Chulco utilizando el Índice Estandarizado de Precipitación-Evapotranspiración (SPEI) y predictores climáticos". Tesis de grado, Universidad de Cuenca.  
<https://dspace.ucuenca.edu.ec/items/992c0681-1190-4af6-b04b-bbb73e203ac2>.
- Torres Rodríguez, Laura Patricia, y Mario Alberto Díaz-Granados Ortiz. 2018. "Análisis detallado de metodologías para definición de índices de sequía: caso cuenca río Sumapaz, Colombia". En *XXVIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica*, Buenos Aires, Argentina, septiembre de 2018. Asociación Internacional de Ingeniería e Investigación Hidráulica (IAHR) y Asociación Internacional de Ingeniería Hidráulica (AIH).
- Trujillo Osorio, David Enrique. 2018. "Aportes a la caracterización estadística de sequías meteorológicas en el territorio colombiano". Tesis de maestría, Pontificia Universidad Javeriana.  
<https://agris.fao.org/search/en/providers/124902/records/67122de87f591113e2a4e45c>.

- Valarezo Aguilar, Lisbeth Katherine. 2017. "Caracterización de las sequías meteorológicas en la cuenca del Paute mediante la aplicación del índice de precipitación estandarizado en diversas escalas temporales". Tesis de grado, Universidad de Cuenca. <https://dspace.ucuenca.edu.ec/items/5021a4ab-466d-4eec-b4b0-adc74b45fc08>.
- Valiente, Óscar Marcos. 2001. "Sequía: definiciones, tipologías y métodos de cuantificación". *Investigaciones Geográficas (Esp)* 26 (julio-diciembre): 59-80. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=17602604>.
- Vega Jácome, Fiorella. 2018. "Variabilidad espacio-temporal de las sequías en el Perú y el peligro asociado al fenómeno del Niño". Tesis de maestría. Universidad Nacional Agraria La Molina. <https://repositorioslatinoamericanos.uchile.cl/handle/2250/4741200>.
- Vega Viviescas, Carolina. 2019. "Análisis de sequías meteorológicas e hidrológicas en la Macrocuena Magdalena–Cauca (McMC) para el período 1980-2010". Tesis de maestría. Universidad Nacional de Colombia. <https://repositorio.unal.edu.co/items/7acfa94f-c836-4ef3-80df-b39881aac799>.
- Vega-Viviescas, Carolina, y Erasmo A. Rodríguez. 2018. *Incertidumbre en el cálculo del índice de sequías SPI en la Macrocuena Magdalena–Cauca, Colombia*. En *XXVIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica*, Buenos Aires, Argentina, septiembre de 2018. Asociación Internacional de Ingeniería e Investigación Hidráulica (IAHR). [https://www.ina.gov.ar/congreso\\_hidraulica/resumenes/LADHI\\_2018\\_RE\\_189.pdf](https://www.ina.gov.ar/congreso_hidraulica/resumenes/LADHI_2018_RE_189.pdf).
- Vélez Muñoz, Ricardo. 1995. "El peligro de incendios forestales derivado de la sequía". *Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales* (2): 99-109. <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/4247532.pdf>.
- Wilhite, Donald A., y Michael H. Glantz. 1985. "Understanding the Drought Phenomenon: The Role of Definitions". *Water International* 10 (3): 111-20. <https://digitalcommons.unl.edu/droughtfacpub/20/>.
- Zuluaga López, Julián. 2009. "Análisis de la variabilidad espacio-temporal de la sequía en Colombia". Tesis de maestría. Universidad Nacional de Colombia. <https://repositorio.unal.edu.co/items/3e61b24f-1301-4831-b05a-ebc28efe3e88>.

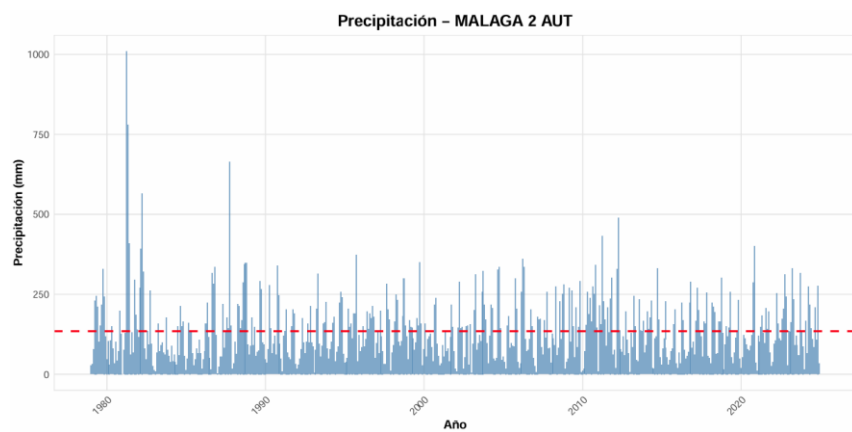
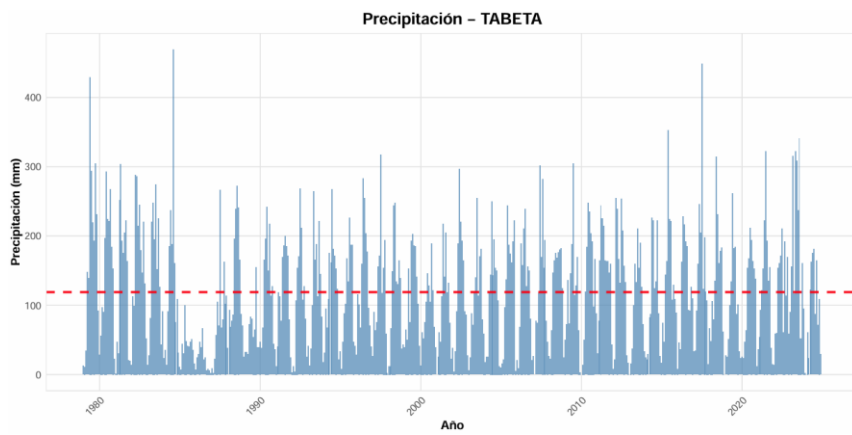
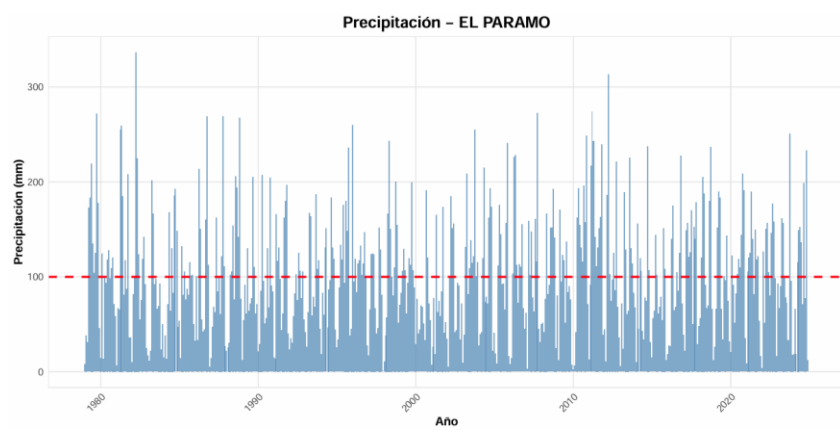
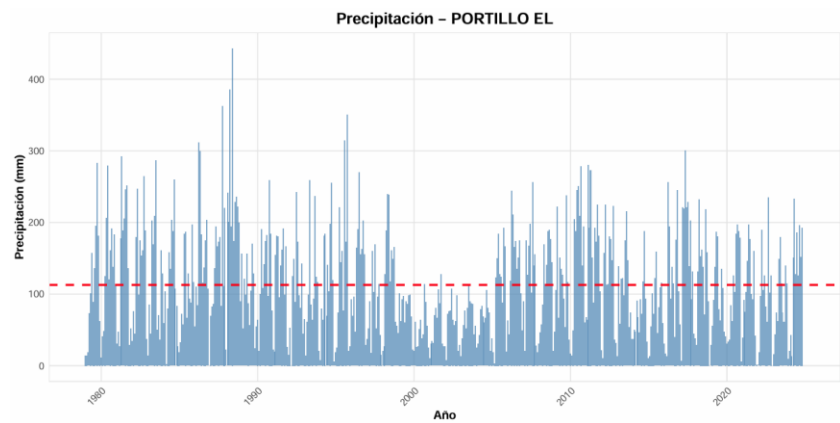
## Anexos

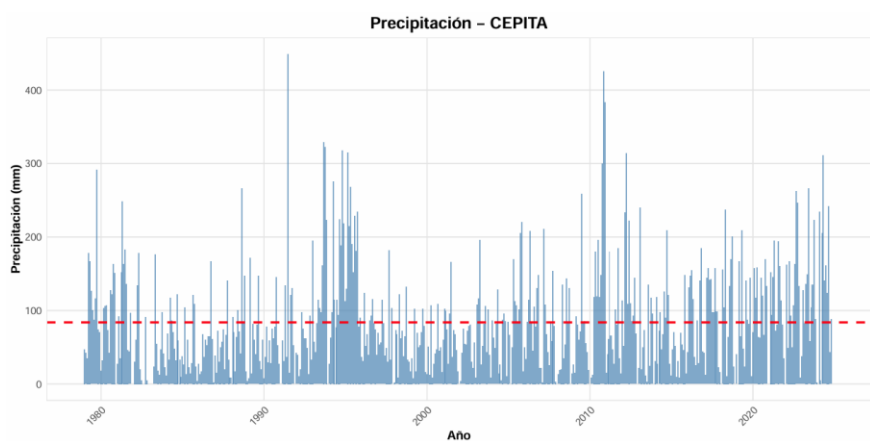
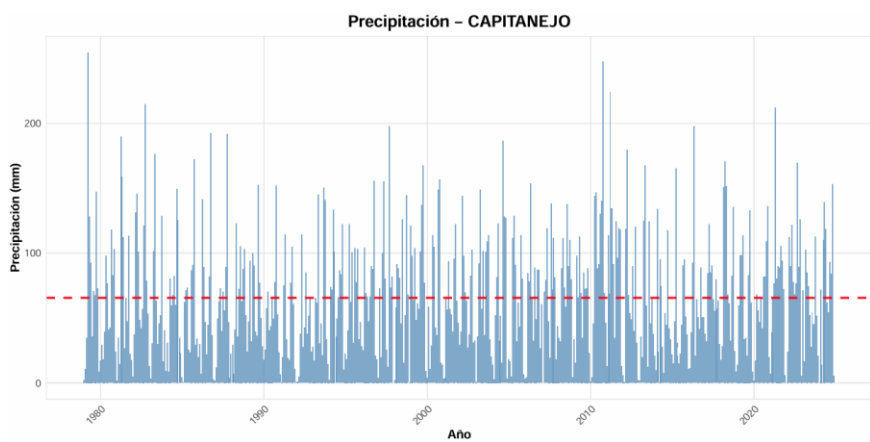
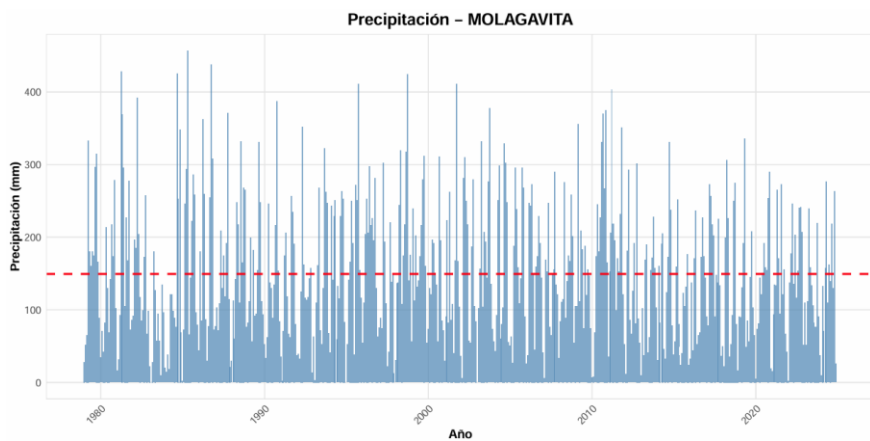
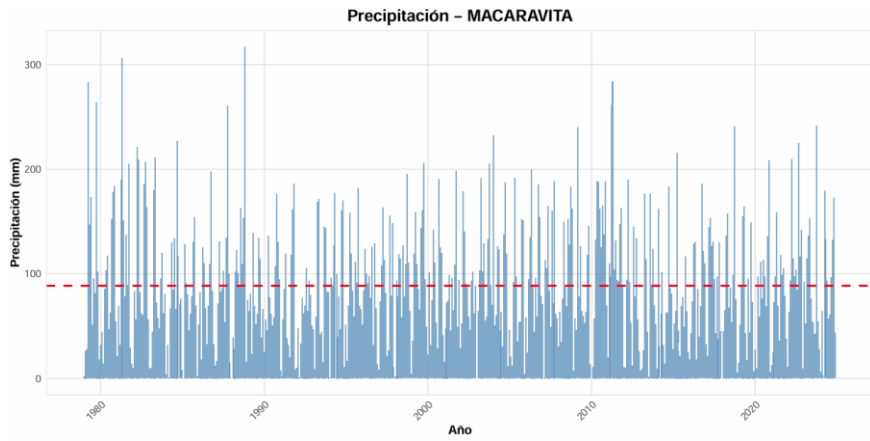
### Anexo 1: Distribución de probabilidad de la precipitación mensual





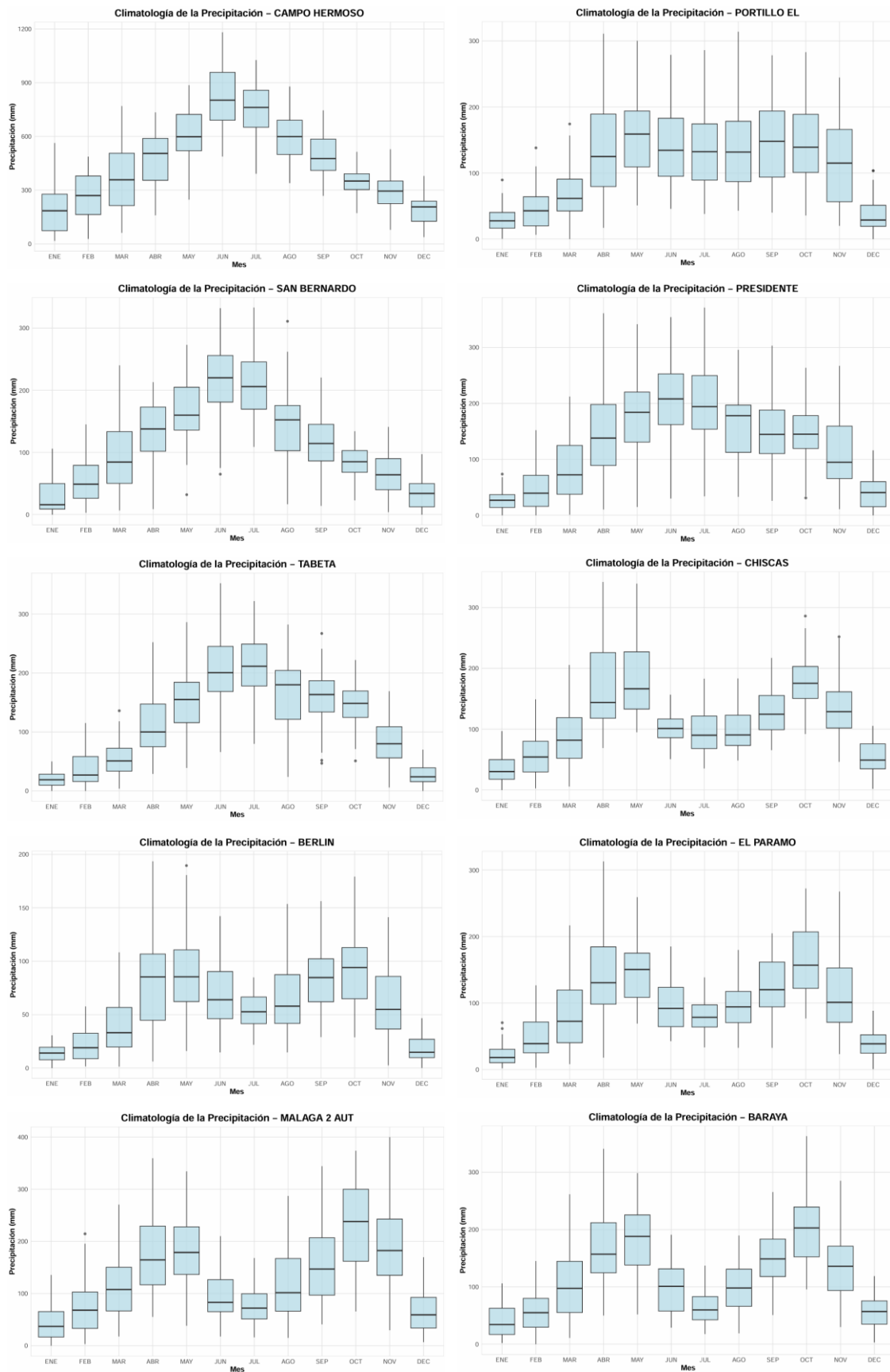
## Anexo 2: Histogramas de la precipitación



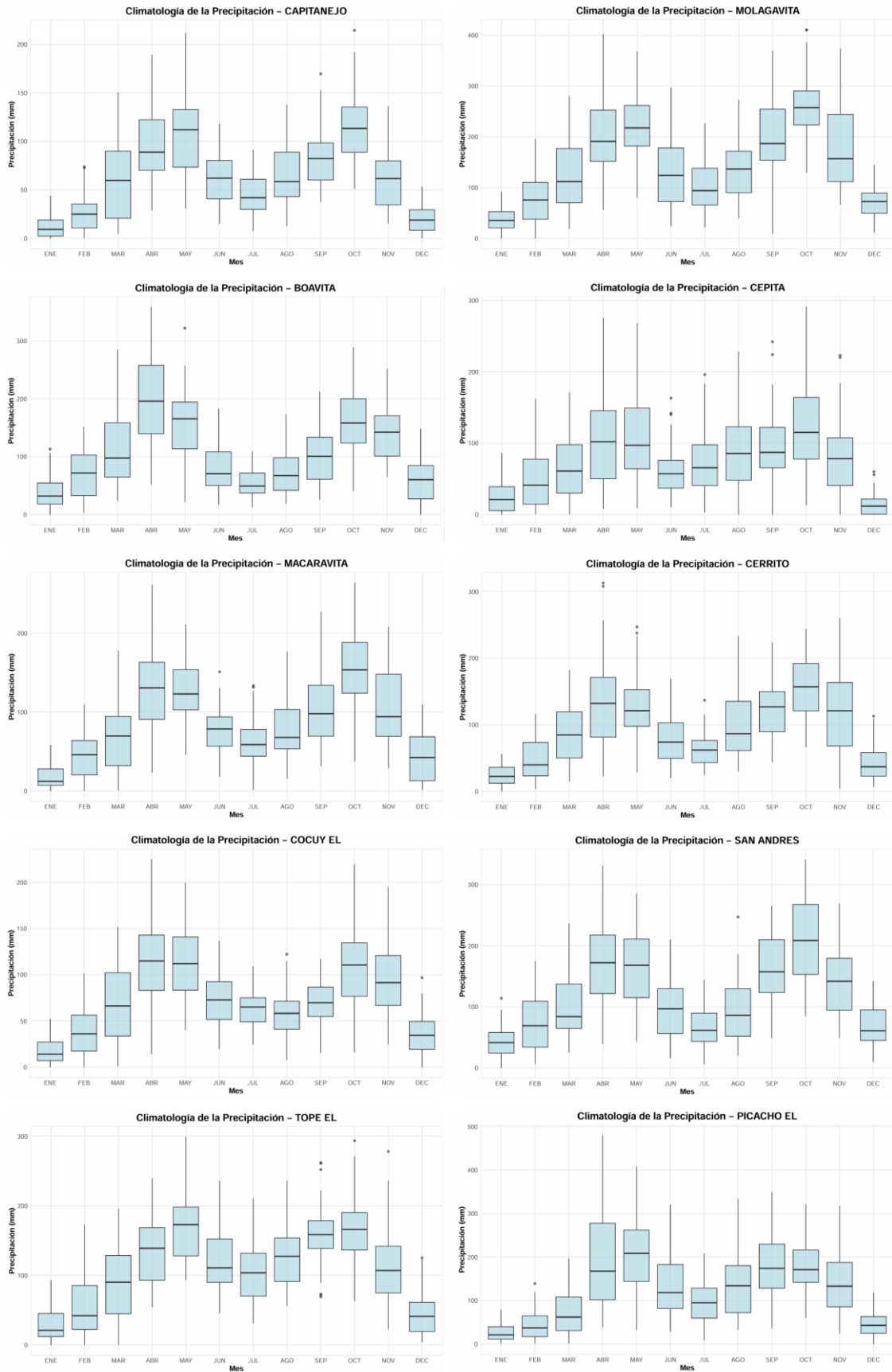


### Anexo 3: Climatología mensual de la precipitación

Estaciones meteorológicas donde gráficamente se logra observar un régimen unimodal.

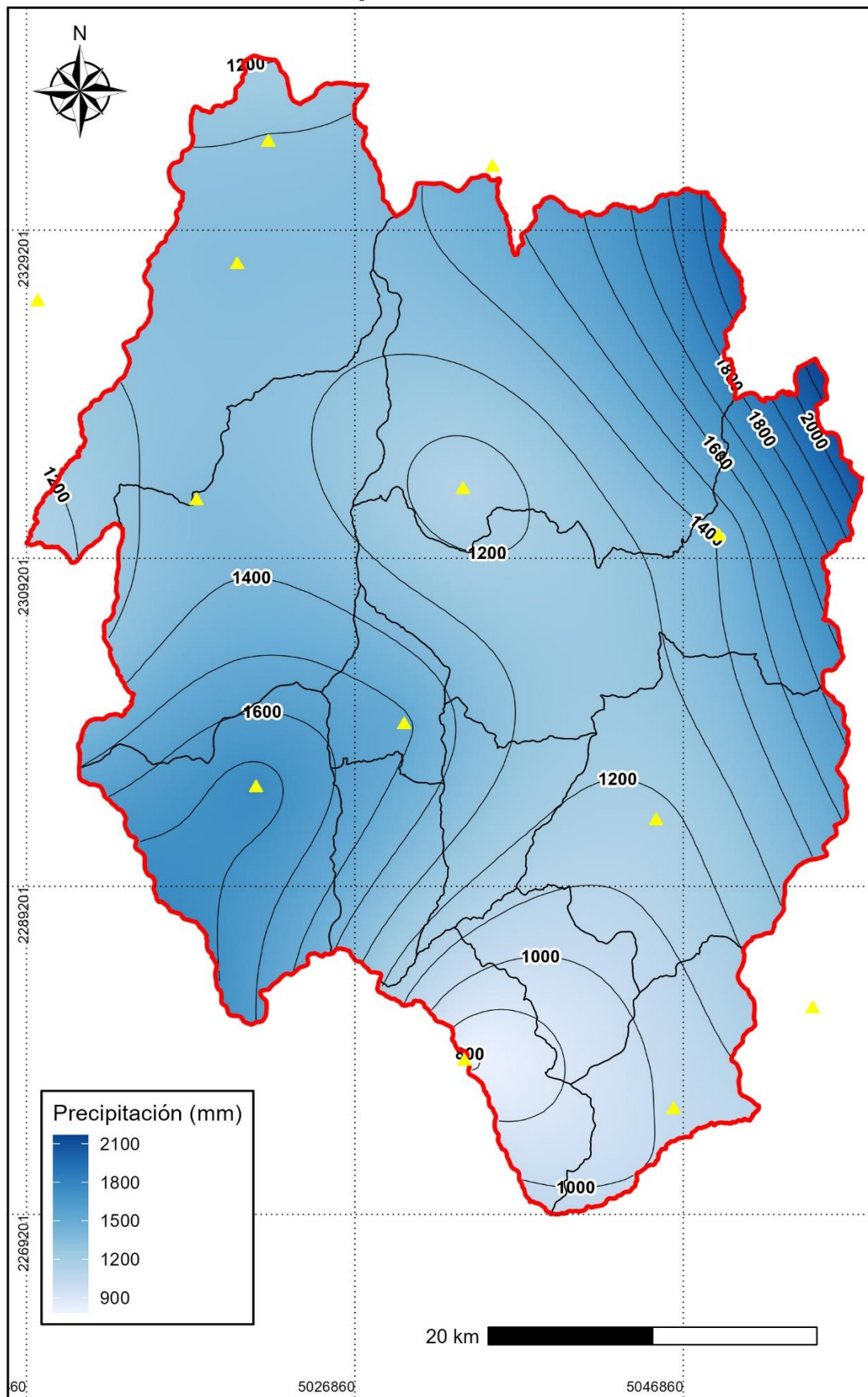


Estaciones meteorológicas donde gráficamente se logra observar un régimen bimodal.

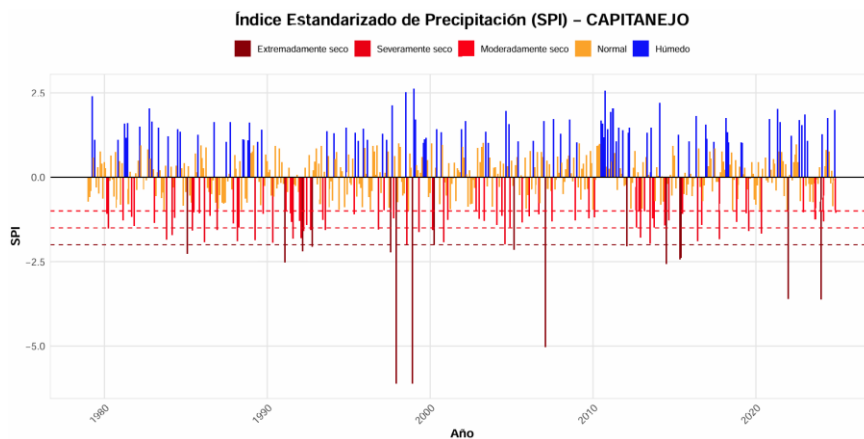
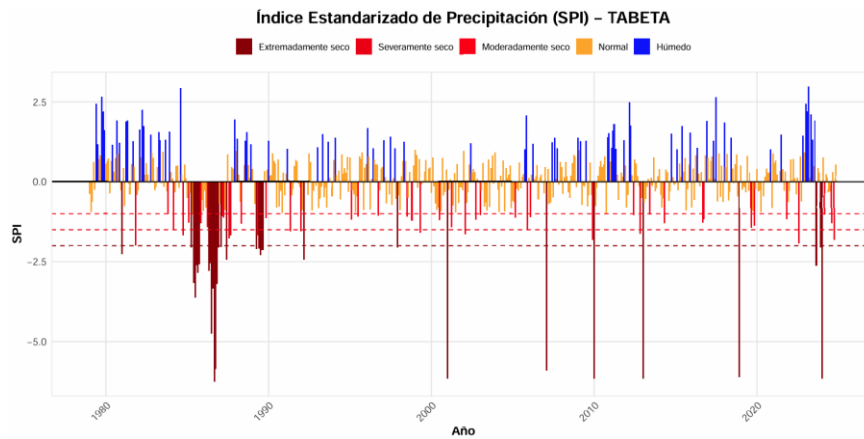
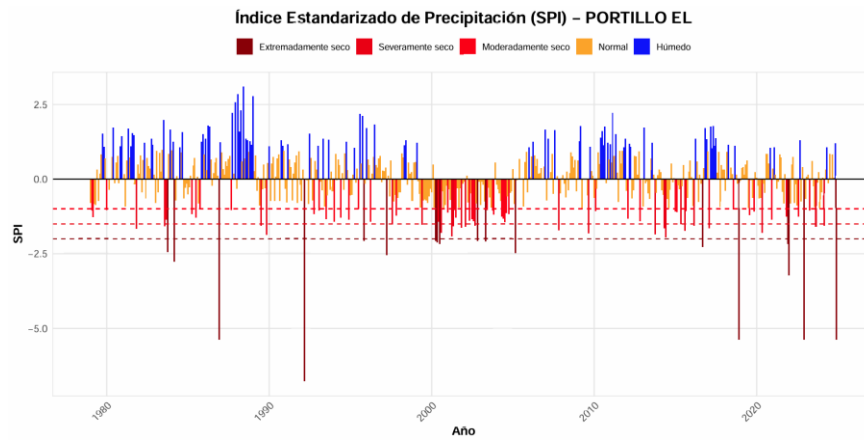
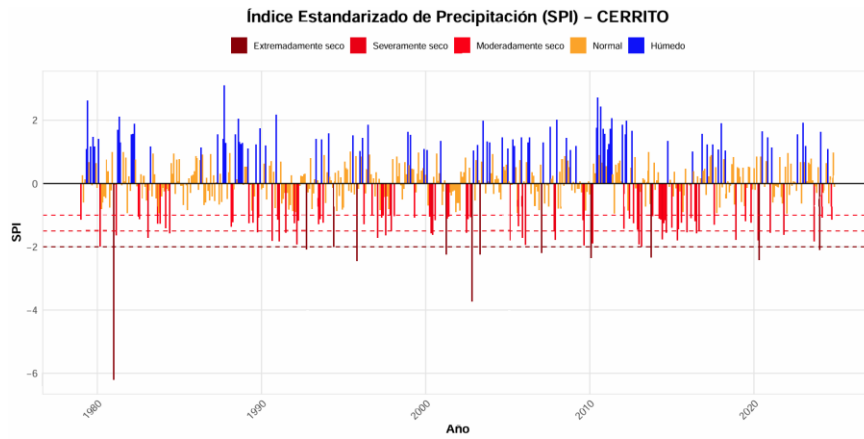


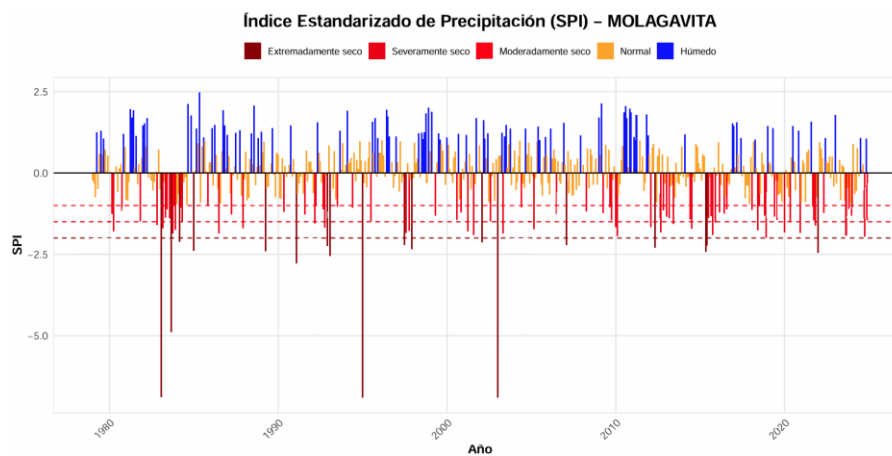
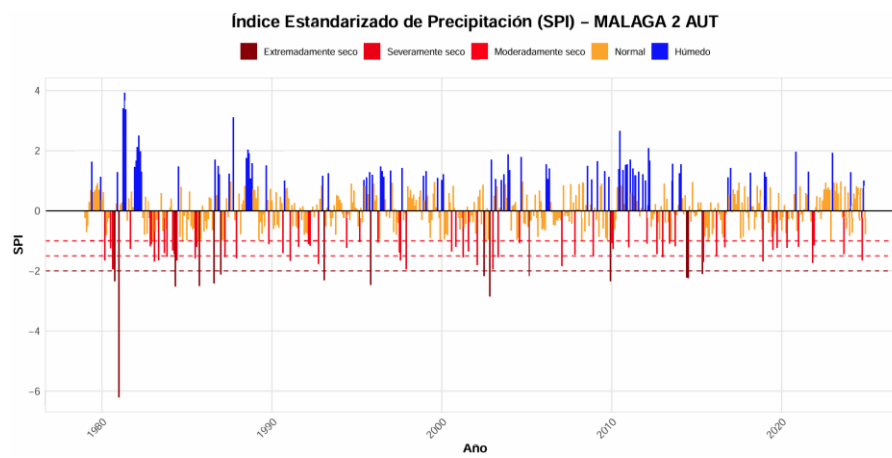
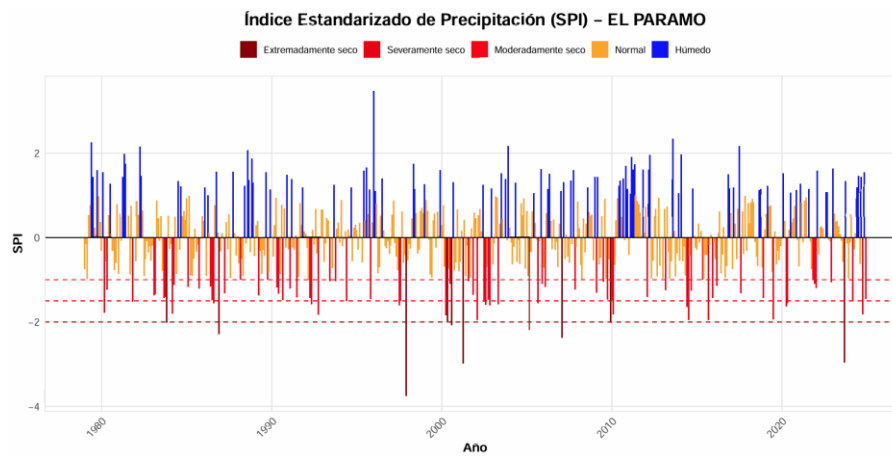
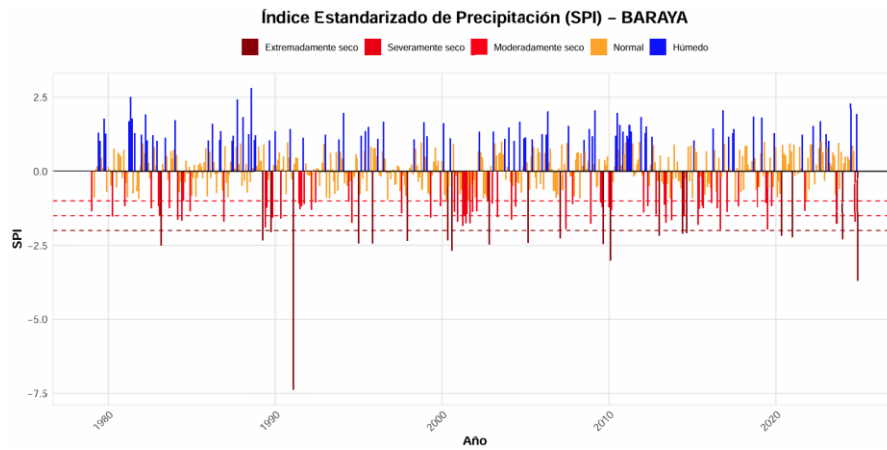
Anexo 4: Precipitación total anual

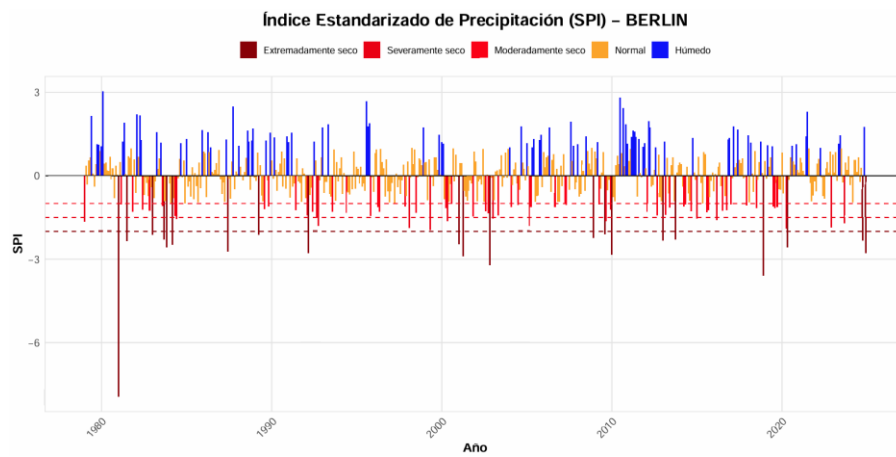
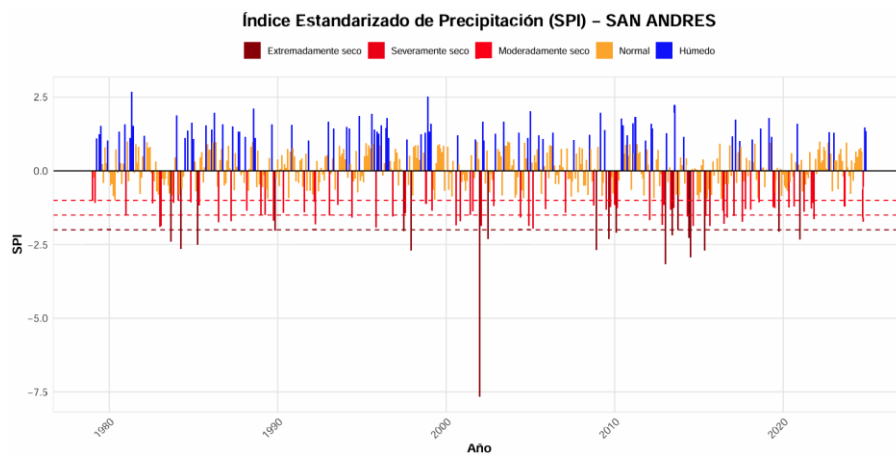
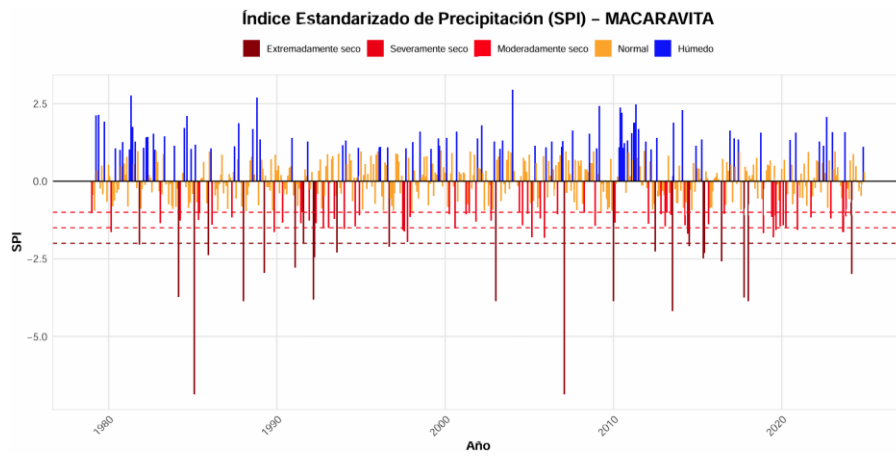
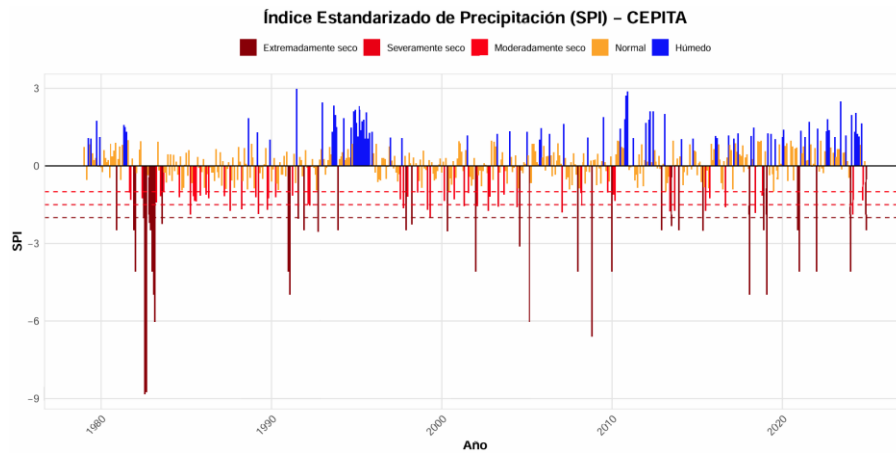
### Precipitación - Anual

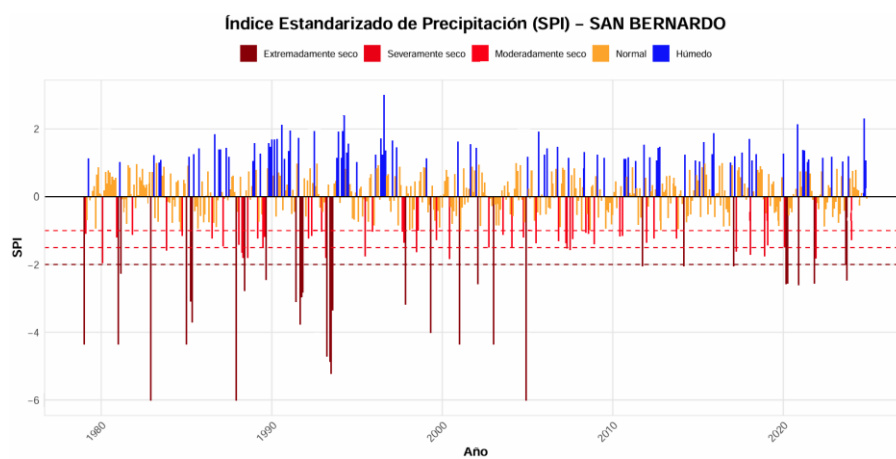
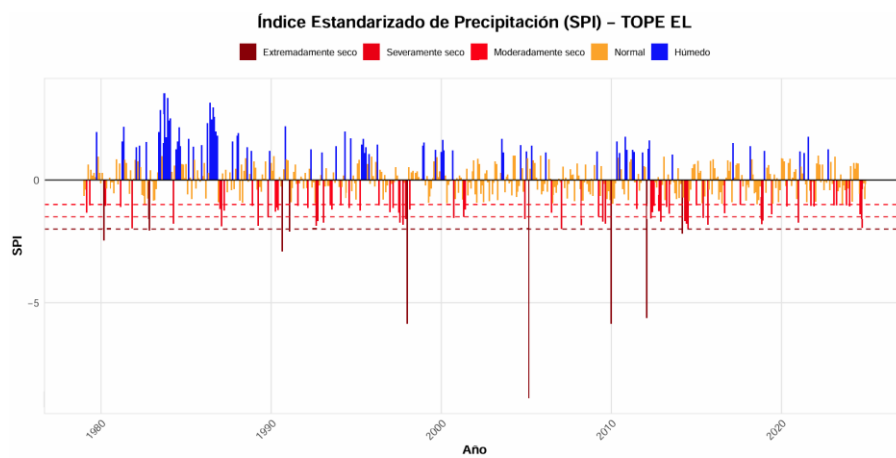
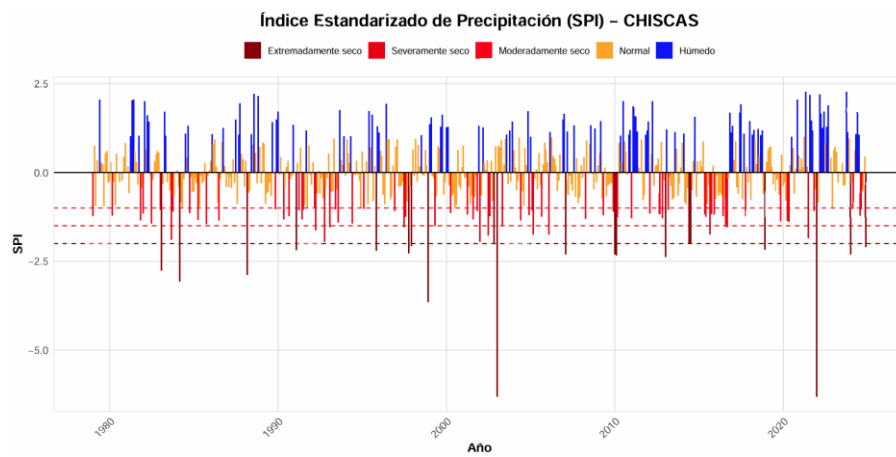
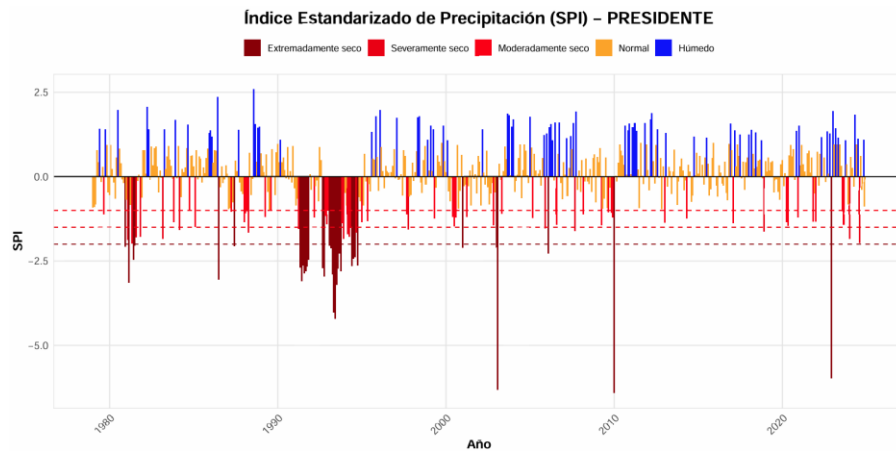


Anexo 5: Caracterización temporal de las sequías meteorológicas

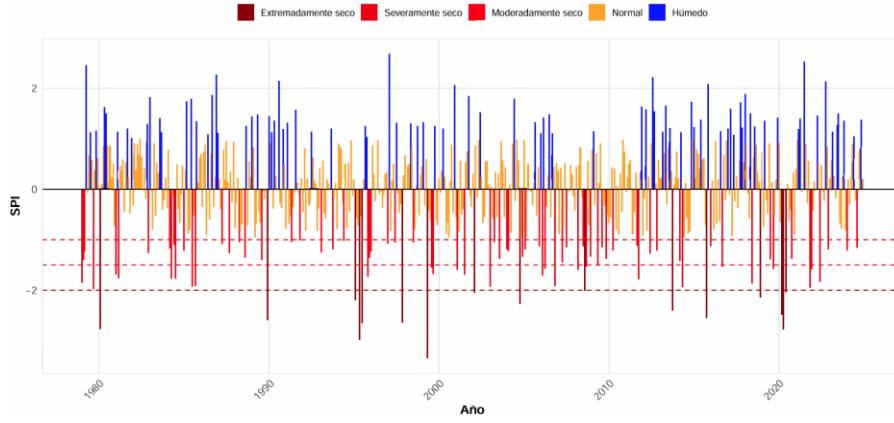




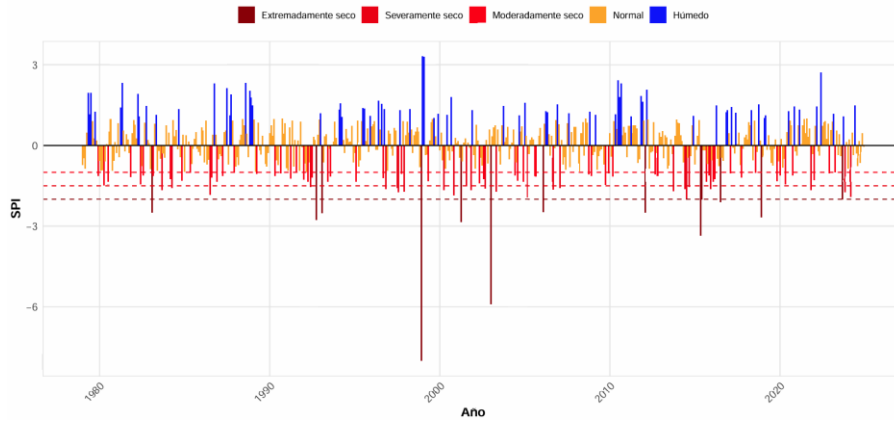




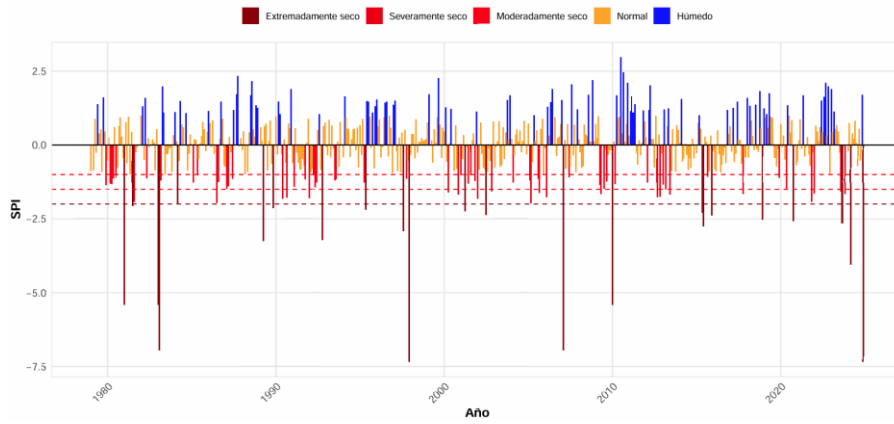
### Índice Estandarizado de Precipitación (SPI) – CAMPO HERMOSO



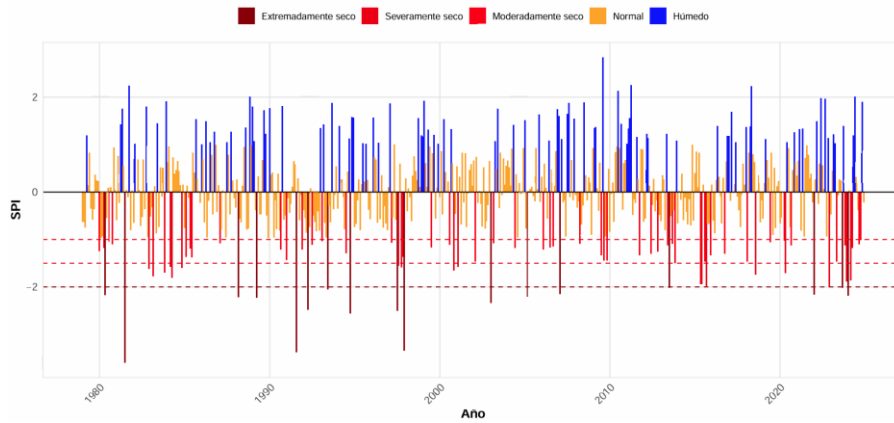
### Índice Estandarizado de Precipitación (SPI) – BOAVITA

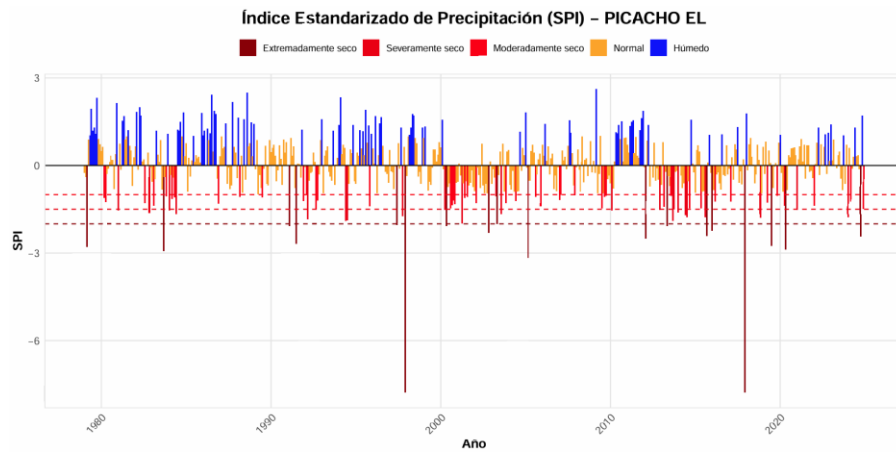


### Índice Estandarizado de Precipitación (SPI) – COCUI EL

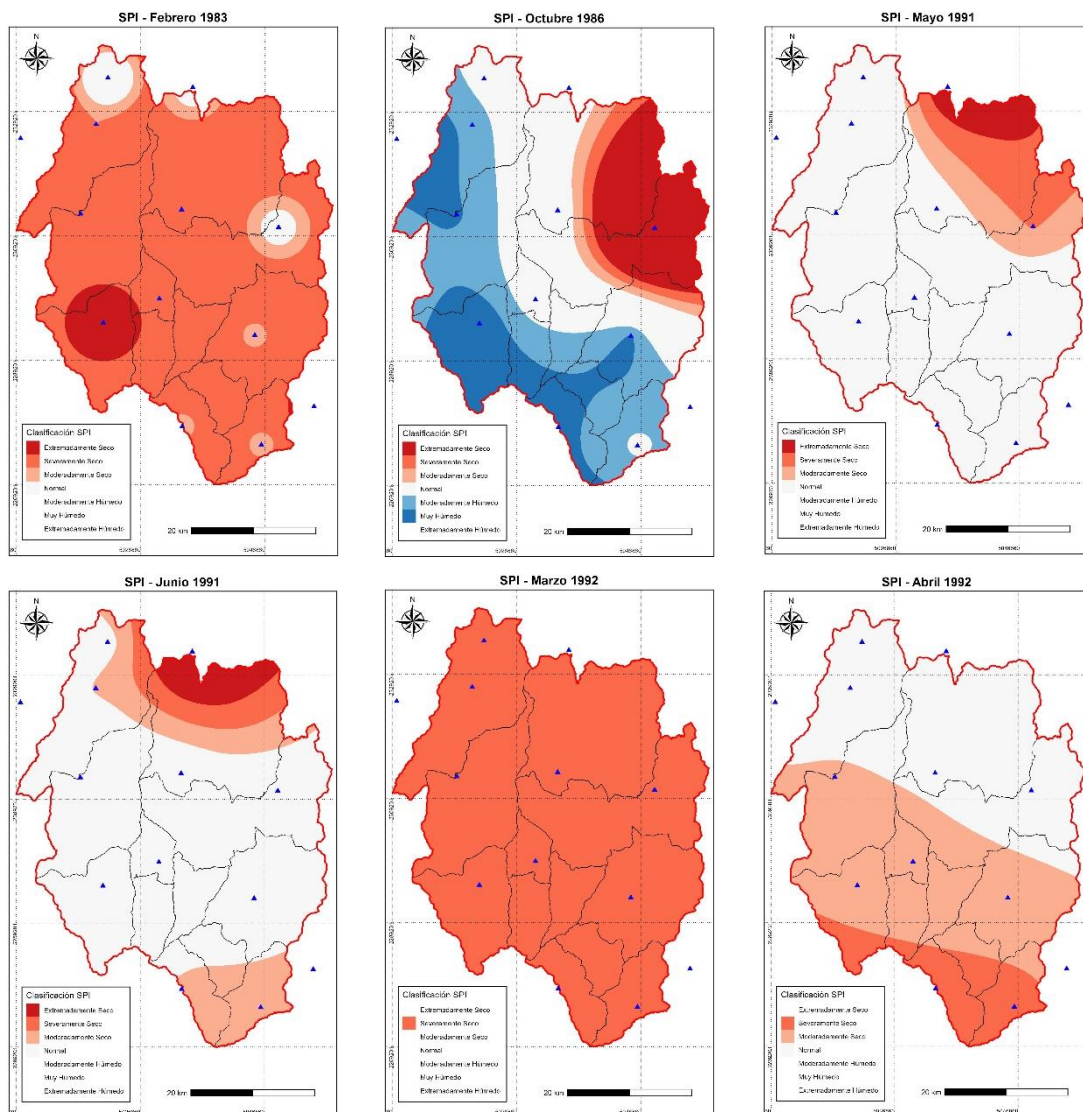


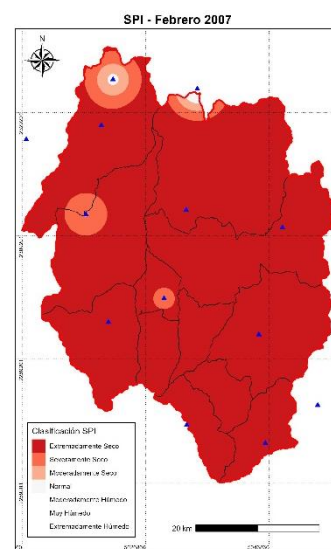
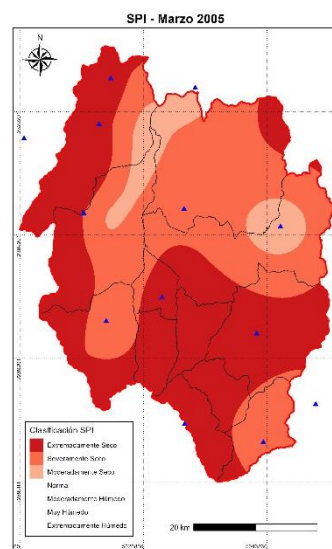
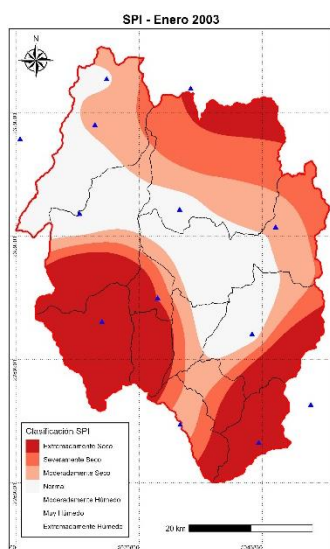
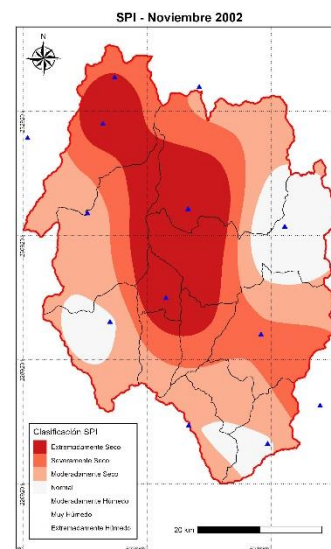
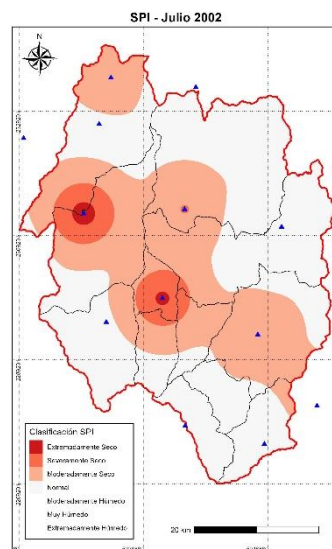
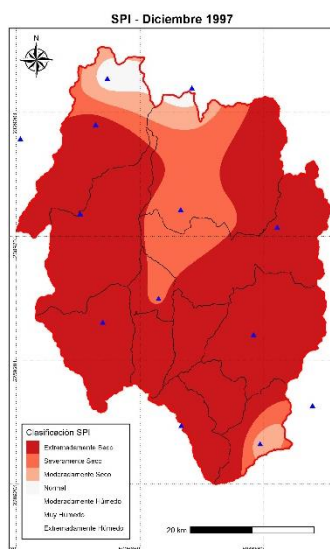
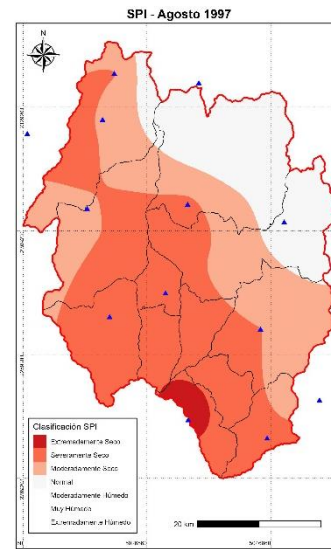
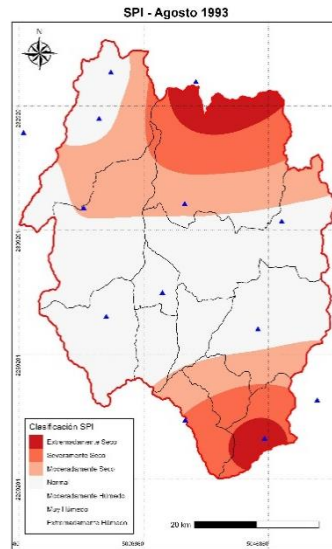
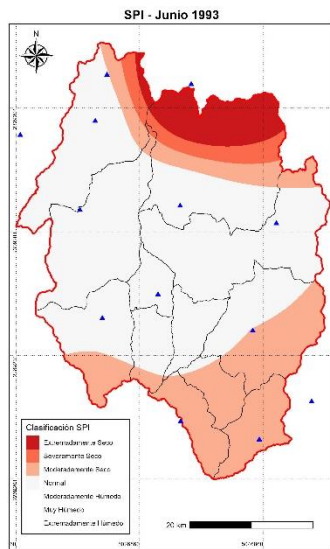
### Índice Estandarizado de Precipitación (SPI) – ESC MOGOTES

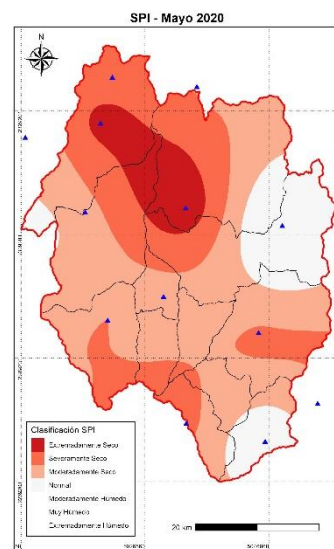
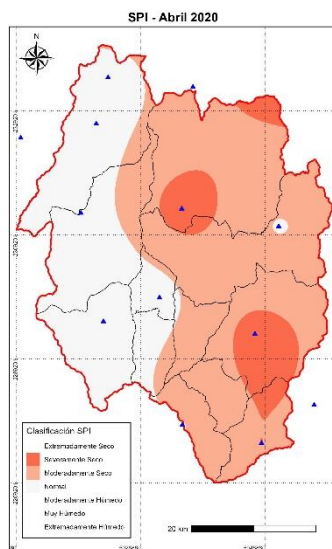
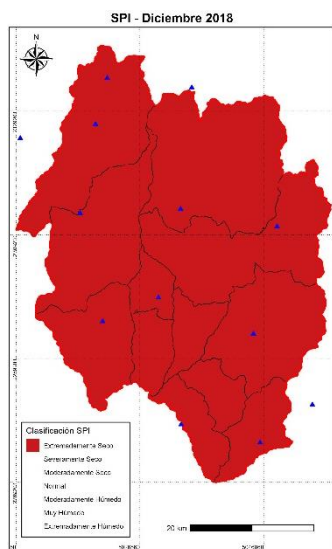
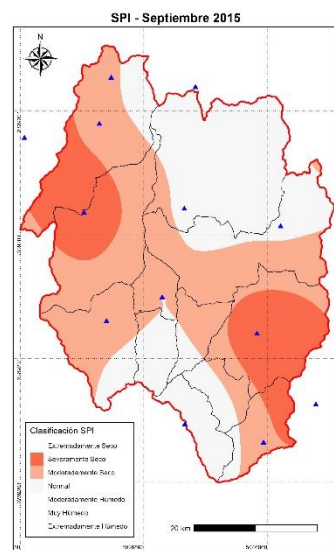
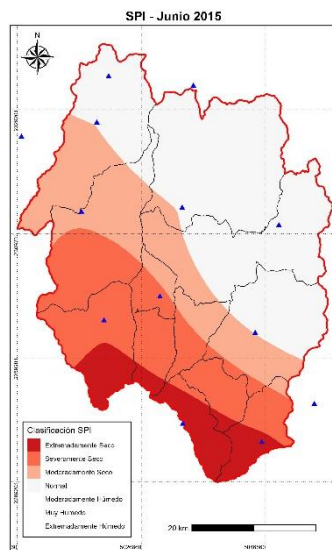
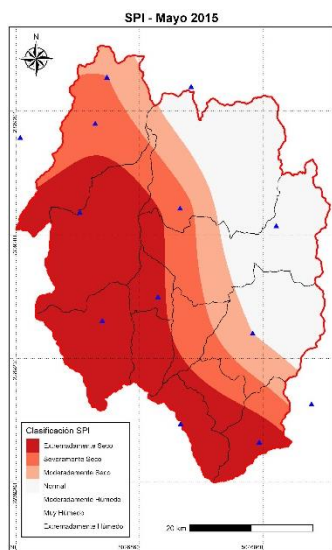
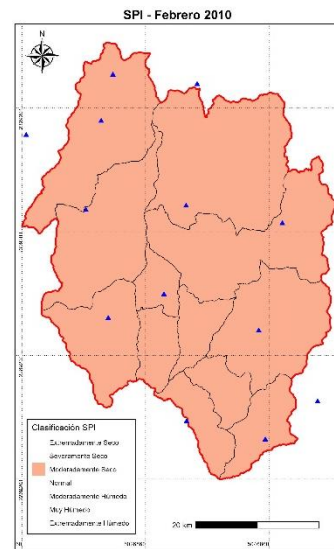
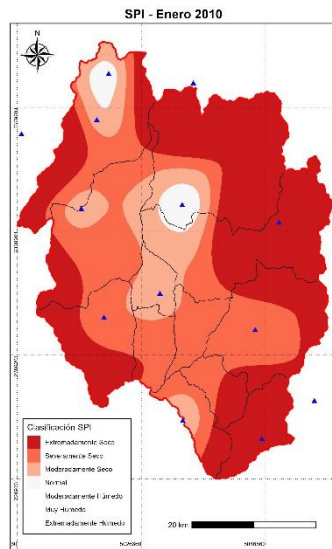
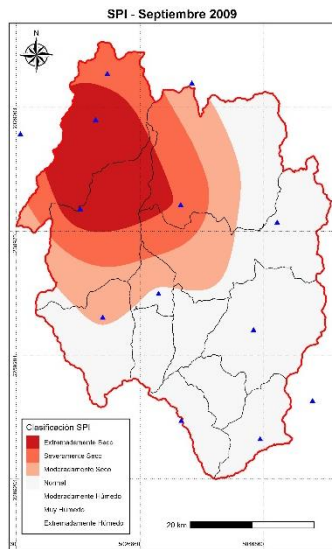


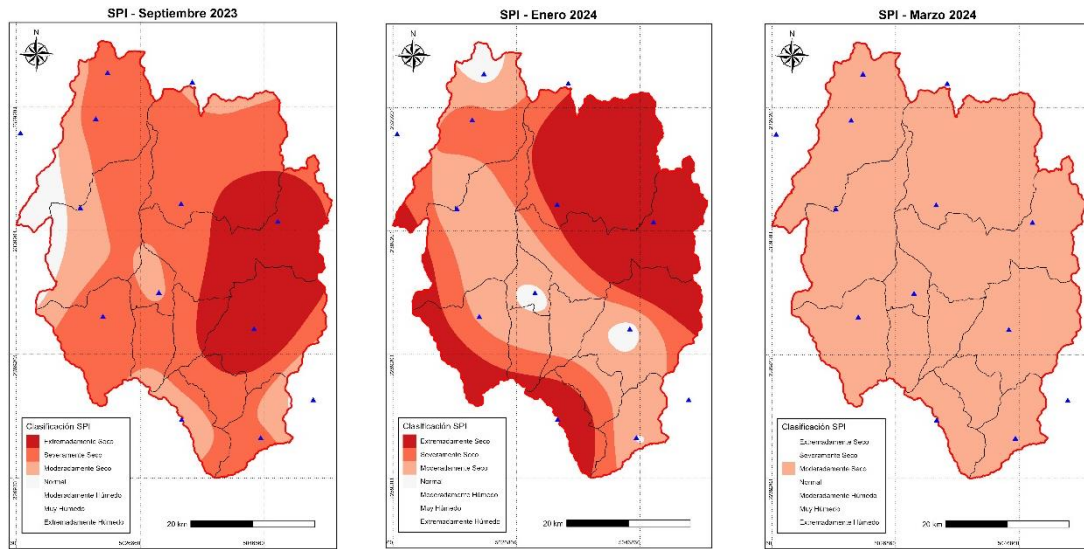


Anexo 6: Meses en los que se presentaron los eventos de sequía representativos







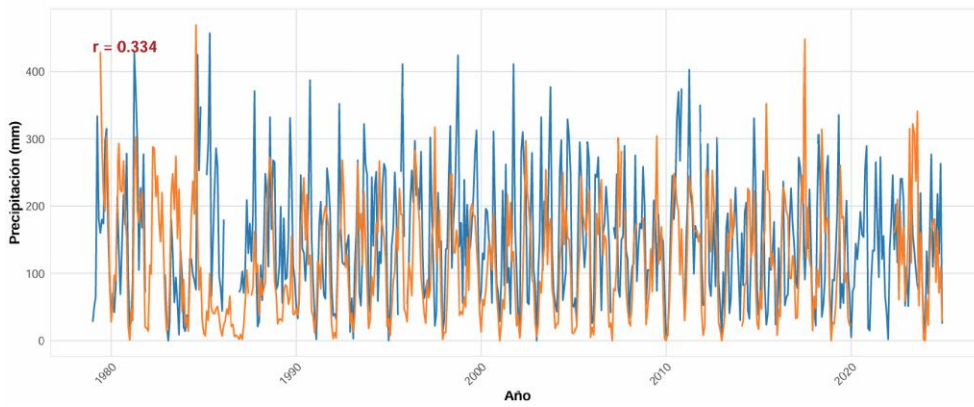


Anexo 7: Comparación entre estaciones meteorológicas

Comparación de Precipitación: MOLAGAVITA vs TABETA

Estaciones No Correlacionadas ( $r = 0.6$ )

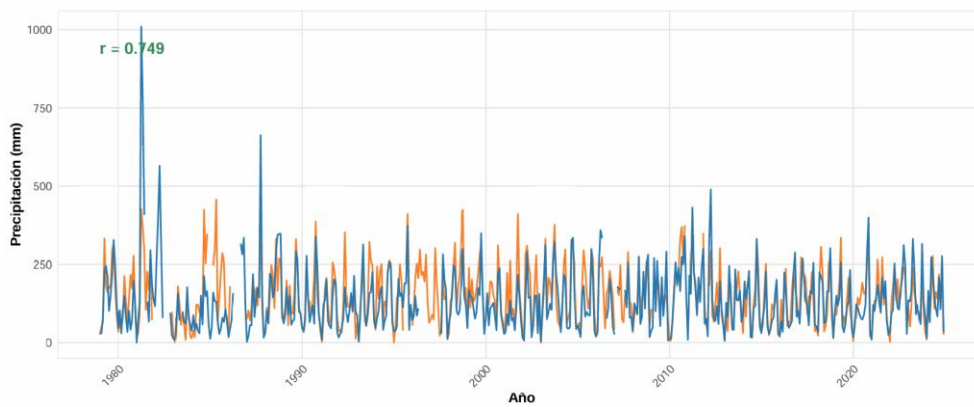
— MOLAGAVITA — TABETA



Comparación de Precipitación: MOLAGAVITA vs MALAGA 2 AUT

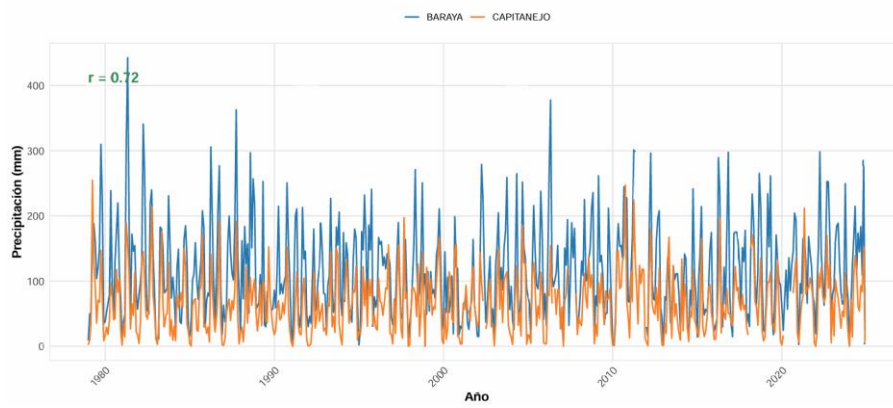
Estaciones Correlacionadas ( $r > 0.6$ )

— MOLAGAVITA — MALAGA 2 AUT



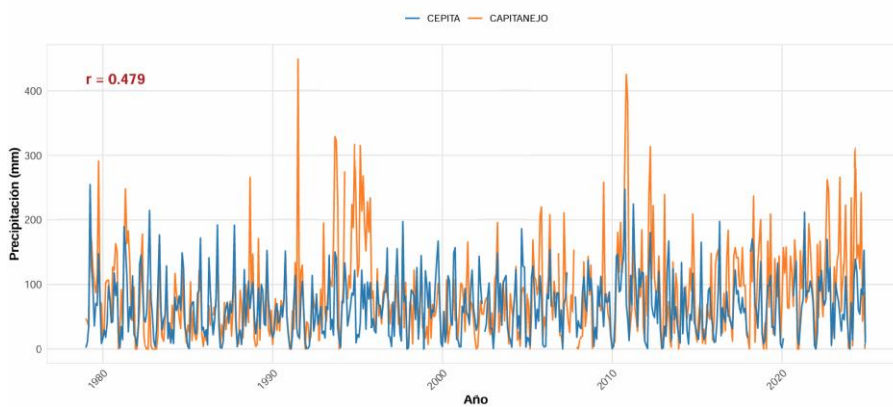
### Comparación de Precipitación: BARAYA vs CAPITANEJO

Estaciones Correlacionadas ( $r > 0.6$ )



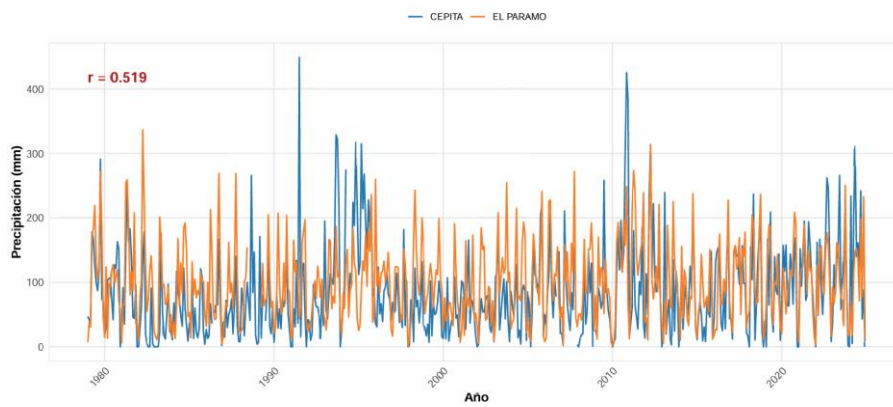
### Comparación de Precipitación: CEPITA vs CAPITANEJO

Estaciones No Correlacionadas ( $r = 0.6$ )



### Comparación de Precipitación: CEPITA vs EL PARAMO

Estaciones No Correlacionadas ( $r = 0.6$ )



### Comparación de Precipitación: CEPITA vs MOLAGAVITA

Estaciones No Correlacionadas ( $r = 0.6$ )

