

**EVALUACIÓN DE LA VARIABILIDAD CLIMÁTICA A PARTIR DE DATOS DE  
PRECIPITACIÓN Y TEMPERATURA MEDIANTE EL MÉTODO DE SIMULACIÓN  
MONTECARLO PARA EL COMPLEJO CENAGOSO DE LA ZAPATOSA**



**AUTOR:**

MILLER ANDRES BARRAZA RICO

**UNIVERSIDAD POPULAR DEL CESAR**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA Y TECNOLÓGICAS**  
**PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y SANITARIA**  
**VALLEDUPAR – CESAR**

**2024**

**EVALUACIÓN DE LA VARIABILIDAD CLIMÁTICA A PARTIR DE DATOS DE  
PRECIPITACIÓN Y TEMPERATURA MEDIANTE EL MÉTODO DE SIMULACIÓN  
MONTECARLO PARA EL COMPLEJO CENAGOSO DE LA ZAPATOSA**

**AUTOR:**

MILLER ANDRES BARRAZA RICO

**DIRECTOR**

KARINA PAOLA TORRES CERVERA  
PhD EN CIENCIAS DE LA EDUCACIÓN

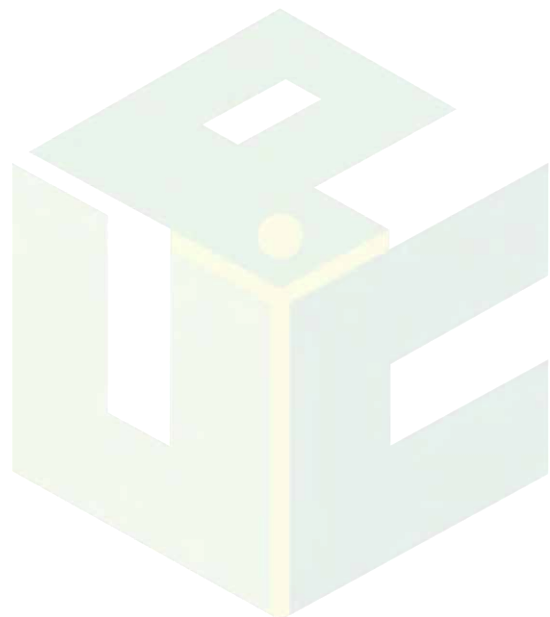
**UNIVERSIDAD POPULAR DEL CESAR**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA Y TECNOLÓGICAS**  
**PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y SANITARIA**  
**VALLEDUPAR – CESAR**

**2024**

## **DEDICATORIA**

A ti, mamá, por tu esfuerzo incansable y por enseñarme el valor de la perseverancia.  
Este triunfo es tan tuyo como mío.

*Miller Andres Barraza Rico*



## AGRADECIMIENTOS

A todos mis profesores, en especial a la Ingeniera Karina Torres quienes con su conocimiento y ejemplo han sentado las bases en mi formación, y a mi amigo Paul, por las experiencias compartidas y el aliento que hizo este reto más llevadero.

*Miller Andres Barraza Rico*



## RESUMEN

Este trabajo tuvo como objetivo generar información detallada y localizada sobre la variabilidad climática en el Complejo Cenagoso de la Zapatosa (CCZ), un ecosistema clave entre los departamentos del Cesar y Magdalena. Este análisis fue relevante debido a la escasez de investigaciones previas que emplearan metodologías avanzadas como la simulación de Monte Carlo en esta área específica. Además, se buscó evaluar cómo los cambios proyectados en las variables climáticas de precipitación y temperatura podrían impactar aspectos clave como la seguridad alimentaria, los recursos hídricos y la biodiversidad, en línea con los lineamientos de la Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático (TCNCC) y los Indicadores del NDC de Colombia. La investigación utilizó datos históricos de estaciones meteorológicas y datos complementarios de Google Earth Engine para estaciones sin registros. Se implementaron modelos SARIMA y simulaciones Monte Carlo, proyectando una disminución promedio del 1.40% en las precipitaciones y un aumento de 0.96°C en la temperatura para 2040, con un impacto significativo en la dinámica hídrica y la biodiversidad. Los resultados, representados en mapas geoespaciales generados en ArcGIS Pro, identificaron las zonas más vulnerables del CCZ y destacaron la necesidad de estrategias de adaptación para mitigar los impactos proyectados y asegurar la sostenibilidad del ecosistema y las comunidades locales.

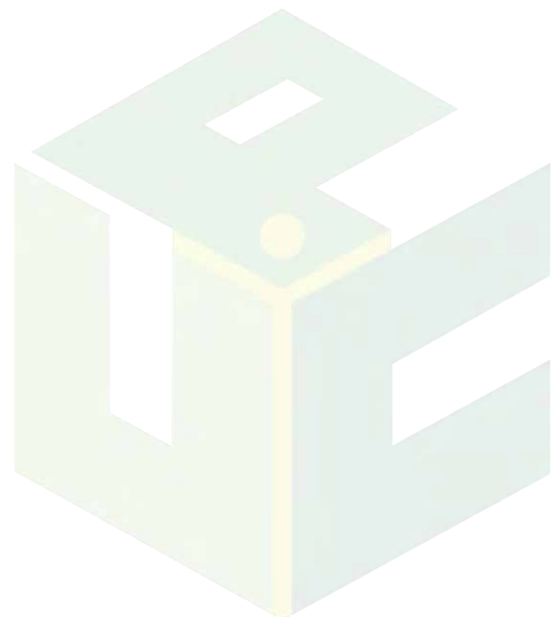
**Palabras Claves:** Variabilidad Climática, Simulación Monte Carlo, Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático (TCNCC), Escenarios climáticos.



## ABSTRACT

*This study aimed to generate detailed and localized information on climate variability in the Zapatosa Swamp Complex (ZSC), a key ecosystem located between the Cesar and Magdalena departments. This analysis was significant due to the scarcity of previous research employing advanced methodologies such as Monte Carlo simulations in this specific area. Additionally, it sought to assess how projected changes in climate variables, such as precipitation and temperature, could impact critical aspects like food security, water resources, and biodiversity, aligning with the guidelines of Colombia's Third National Communication on Climate Change (TCNCC) and NDC Indicators. The research utilized historical data from meteorological stations and complementary data from Google Earth Engine for stations lacking records. SARIMA models and Monte Carlo simulations were implemented, projecting an average 1.40% decrease in precipitation and a 0.96°C temperature increase by 2040, significantly affecting hydrological dynamics and biodiversity. Results, visualized in geospatial maps generated in ArcGIS Pro, identified the most vulnerable areas of the ZSC and highlighted the need for adaptation strategies to mitigate projected impacts and ensure the ecosystem's and local communities' sustainability.*

**Keywords:** *Climate variability, Monte Carlo simulation, Third National Communication on Climate Change (TCNCC), Climate scenarios*



## TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN .....	21
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	23
2. JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO .....	26
3. OBJETIVOS .....	28
3.1. OBJETIVO GENERAL .....	28
3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	28
4. MARCO REFERENCIAL.....	29
4.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN.....	29
4.2. MARCO CONTEXTUAL .....	42
4.2.1. Localización Geográfica .....	42
4.2.2. Caracterización Climática.....	44
4.2.3. Caracterización Hidrológica .....	45
4.3. MARCO TEÓRICO.....	33
4.4. MARCO CONCEPTUAL .....	41
4.5. MARCO LEGAL.....	46
5. MARCO METODOLÓGICO.....	51
5.1. LÍNEA, SUBLÍNEA Y ÁREA TEMÁTICA DE INVESTIGACIÓN.....	51
5.2. ENFOQUE DE LA INVESTIGACIÓN .....	51
5.3. ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN .....	51
5.4. POBLACIÓN DE ESTUDIO .....	52
5.6. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN .....	54
5.7. ESTRATEGIA Y DESARROLLO METODOLÓGICO .....	55

Fase I - Realizar Análisis Exploratorio De Los Datos De Variables Meteorológicas Históricas A Partir De Las Estaciones Del IDEAM presentes en los Municipios con área de influencia del Complejo Cenagoso de la Zapatosa .....	55
Actividad 1.1. Obtención De los Datos Meteorológicos. ....	55
Actividad 1.2. Resumen Estadístico Previo. ....	55
Actividad 1.3. Tratamiento de los Datos. ....	55
Fase II – Evaluar El Impacto Del Cambio Climático Con Proyecciones A (2030, 2040) En La Alteración De Las Variables Climatológicas De Precipitación Y Temperatura En El Sistema Cenagoso De La Zapatosa .....	56
Actividad 2.1. Implementación del Modelo Estocástico. ....	56
Actividad 2.2. Generación de la Serie de Tiempo Sintética .....	56
Actividad 2.3. Representación Geoespacial de.....	56
Fase III - Establecer El Marco De Análisis De Los Resultados Conforme A La Tercera Comunicación Nacional Del Cambio Climático (TCNCC) De Los Indicadores Del NDC Colombia Para El Complejo Cenagoso de la Zapatosa .....	57
Actividad 3.1. Revisión de los indicadores del TCNCC .....	57
Actividad 3.2. Incidencia sobre los Indicadores Biofísicos.....	57
Actividad 3.3. Análisis de la Política Nacional de Humedales Interiores de Colombia.....	57
6. ANALISIS Y RESULTADOS .....	58
6.1. ANÁLISIS EXPLORATORIO DE LOS DATOS HISTORICOS DE PRECIPITACIÓN Y TEMPERATURA CADA UNA DE LAS ESTACIONES DEL IDEAM SELECCIONADAS EN LOS MUNICIPIOS DEL AREA DE INFLUENCIA DEL COMPLEJO CENAGOZO DE LA ZPATOSA. ....	58
6.1.1. Obtención de los datos meteorológicos de precipitación y temperatura.....	58
6.1.1.1. Variable de Precipitación.....	63
6.1.1.2. Variable de Temperatura.....	76
6.1.2. Tratamiento de las Variables Meteorológicas.....	93

6.1.2.1.	Reconocimiento de Datos Atípicos .....	93
6.1.2.2.	Estaciones Meteorológicas sin Datos Atípicos .....	106
6.1.2.3	Reconocimiento de Datos Faltantes .....	109
6.1.3.	Análisis de consistencias de las variables meteorológicas .....	121
6.1.4.	Descomposición de las series de tiempo de las variables meteorológicas.....	128
6.2. DETERMINACIÓN DEL IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO CON PROYECCIONES A 2040 EN LA ALTERACIÓN DE LAS VARIABLES CLIMATOLÓGICAS DE PRECIPITACIÓN Y TEMPERATURA EN EL COMPLEJO CENAGOSO DE LA ZAPATOSA. ....		
6.2.1.	Implementación del Modelo SARIMA.....	129
6.2.2.	Ejecución de la Simulación de Montecarlo. ....	131
6.2.3.	Resultados de la Simulación de Montecarlo .....	132
6.2.4.	Análisis de Tendencia de las Variables para el Municipio de Chimichagua Cesar con la Simulación Monte Carlo. ....	136
6.2.4.1.	Análisis de Variable de Precipitación. ....	136
6.2.6.2.	Análisis de la Variable de Temperatura.....	141
6.2.5.	Análisis de Tendencia de las Variables para el Municipio de Chiriguaná Cesar con la Simulación Monte Carlo. ....	146
6.2.5.1.	Análisis de la Variable de Precipitación. ....	146
6.2.5.2.	Análisis de la Variable de Temperatura.....	149
6.2.6.	Análisis de Tendencia de las Variables para el Municipio de Curumaní Cesar con la Simulación Monte Carlo. ....	152
6.2.6.1.	Análisis de la Variable de Precipitación. ....	152
6.2.6.2.	Análisis para la Variable de Temperatura.....	157
6.2.7.	Análisis de Tendencia de las Variables para el Municipio de El Banco Magdalena con la Simulación Monte Carlo.....	162
6.2.7.1.	Análisis de la Variable de Precipitación .....	162

6.2.7.2.	Análisis de la Variable de Temperatura.....	165
6.2.8.	Análisis de Tendencia de las Variables para el Municipio de Tamalameque Cesar con la Simulación Monte Carlo. ....	168
6.2.8.1.	Análisis para la Variable de Precipitación. ....	168
6.2.8.2.	Análisis para para la Variable de Temperatura.....	170
6.2.9.	Análisis de los Resultado de la Simulación Monte Carlo para el Complejo Cenagoso de la Zapatosa para las Variables de Precipitación y Temperatura.....	172
6.2.9.1.	Impacto en las Precipitaciones y Temperatura para el periodo 2022-2040 en el Complejo Cenagoso de la Zapatosa. ....	174
6.2.9.2.	Impacto en las Poblaciones de los Municipios en el Área de Influencia del Complejo Cenagoso de la Zapatosa. ....	175
6.2.9.3.	Escenarios de Variación Climática para el Periodo 2022 – 2040 en el Complejo Cenagoso de la Zapatosa. ....	179
6.3.	ESTABLECIMIENTO DEL MARCO DE EVALUACIÓN DE LOS RESULTADOS BASADO EN LA TERCERA COMUNICACIÓN NACIONAL DEL CAMBIO CLIMÁTICO (TCNCC) Y LOS INDICADORES DEL NDC COLOMBIA, ESPECÍFICAMENTE PARA EL COMPLEJO CENAGOSO DE LA ZAPATOSA.....	187
6.3.1.	Análisis para los Indicadores Biofísico del TCNCC para el Complejo Cenagoso de la Zapatosa.....	187
6.3.1.1.	Seguridad Alimentaria .....	187
6.3.1.2.	Recurso Hídrico .....	191
6.3.1.3.	Biodiversidad y Servicios Ecosistémicos. ....	197
6.3.2.	Análisis Política Nacional para Humedales Interiores de Colombia. ....	204
7.	CONCLUSIONES .....	207
8.	RECOMENDACIONES.....	210
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	212
	ANEXOS .....	217

Anexos Simulaciones para la Variable de Precipitación .....	217
Estaciones del municipio de Chimichagua .....	217
Estaciones para el Municipio de Chiriguaná .....	221
Estaciones para el Municipio de Curumaní .....	223
Estaciones para el Municipio de El Banco Magdalena.....	227
Estación Para el Municipio de Tamalameque Cesar.....	229
Anexos Simulaciones para la Variable de Temperatura .....	230
Estaciones Para el Municipio de Chimichagua Cesar .....	230
Estaciones para el Municipio de Chiriguana. ....	234
Estaciones para el Municipio de Curumaní .....	236
Estaciones para el Municipio del El Banco Magdalena .....	240
Estación para el Municipio de Tamalameque Cesar.....	242
Anexos Capturas de Pantalla de Obtención de Datos, Interpolación IDW e Implementación del Modelo .....	243

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Localización Geográfica del Complejo Cenagoso de Zapatosa .....	43
Figura 2. Localización de los Municipios dentro del área de influencia del CCZ.....	44
Figura 3. Mapa Ubicación Estaciones Meteorológicas CCZ.....	62
Figura 4. Evolución Temporal de la Precipitación en la Estación CHIMICHAGUA [25021240] .....	63
Figura 5. Evolución Temporal de la Precipitación en la Estación SALOA [25020270].....	64
Figura 6. Evolución Temporal de la Precipitación en la Estación EL CANAL [25020240]...	65
Figura 7. Evolución Temporal de la Precipitación en la Estación HACIENDA EL TERROR [25020650].....	66

Figura 8. Evolución Temporal de la Precipitación en la Estación CHIRIGUANA [25025250]	67
Figura 9. Evolución Temporal de la Precipitación en la Estación RICONHONDO [25020260]	68
Figura 10. Evolución Temporal de la Precipitación en la Estación CURUMANI [25020250]	69
Figura 11. Evolución Temporal de la Precipitación en la Estación POPONTE [25020690]	70
Figura 12. Evolución Temporal de la Precipitación en la Estación PRIMAVERA [25020920]	71
Figura 13. Evolución Temporal de la Precipitación en la Estación PRIMAVERA [25020660]	72
Figura 14. Evolución Temporal de la Precipitación en la Estación TAMALAMEQUE [25020090]	73
Figura 15. Evolución Temporal de la Precipitación en la Estación AEROPUERTO LAS FLORES [25025090]	74
Figura 16. Evolución Temporal de la Precipitación en la Estación NEGRITOS [25021200]	75
Figura 17. Evolución Temporal de la Temperatura para las estaciones de los municipios de El Banco Magdalena y Chiriguana Cesar	76
Figura 18. Gráficos de Correlaciones de los Datos de Google Earth Engine vs Estaciones para los municipios del El Banco Magdalena y Chiriguana Cesar	78
Figura 19. Evolución Temporal de la Temperatura en la Estación CHIRIGUANA [25025250]	80
Figura 20. Evolución Temporal de la Temperatura en la Estación RINCONHONDO [25020260]	81
Figura 21. Evolución Temporal de la Temperatura en la Estación AEROPUERTO LAS FLORES [25025090]	82
Figura 22. Evolución Temporal de la Temperatura en la Estación NEGRITOS [25021200]	83
Figura 23. Evolución Temporal de la Temperatura en la Estación Chimichagua [25021240]	84
Figura 24. Evolución Temporal de la Temperatura en la Estación SALOA [25020270]	85
Figura 25. Evolución Temporal de la Temperatura en la Estación EL CANAL [25020240]	86
Figura 26. Evolución Temporal de la Temperatura en la Estación HACIENDA EL TERROR [25020650]	87

Figura 27. Evolución Temporal de la Temperatura en la Estación ZAPATOSA [25020660]	88
Figura 28. Evolución Temporal de la Temperatura en la Estación PRIMAVERA [25020920]	89
Figura 29. Evolución Temporal de la Temperatura en la Estación POPONTE [25020690]	90
Figura 30. Evolución Temporal de la Temperatura en la Estación CURUMANI [25020250]	91
Figura 31. Evolución Temporal de la Temperatura en la Estación TAMALAMEQUE [25020090]	92
Figura 32. Gráfico caja y bigotes para las estaciones del municipio de Chimichagua Cesar.	94
Figura 33. Evoluciones Temporales de la Precipitación con Datos atípicos para las Estaciones del Municipio de Chimichagua.	96
Figura 34. Gráfico caja y bigotes para las estaciones de Precipitación del Municipio de Chiriguaná Cesar.	97
Figura 35. Evoluciones Temporales de la Precipitación con Datos Atípicos para las Estaciones de Precipitación del Municipio de Chiriguaná Cesar	98
Figura 36. Gráfico caja y bigotes para las Estaciones de precipitación del Municipio de Curumaní Cesar	99
Figura 37. Evoluciones Temporales de la Precipitación con Datos Atípicos para las Estaciones del Municipio de Chiriguaná Cesar	101
Figura 38. Gráfico de caja y bigotes para las estaciones del Municipio El Banco Magdalena.	102
Figura 39. Evoluciones Temporales de la Precipitación con Datos Atípicos para las Estaciones del Municipio de El Banco Magdalena.	103
Figura 40. Gráfico de caja y bigotes para la Estación del Municipio Tamalameque Cesar	104
Figura 41. Evolución Temporal de la Precipitación con Datos Atípicos para la estación del Municipio de Tamalameque Cesar	105
Figura 42. Evoluciones Temporales de la Precipitación sin Datos Atípicos para las Estaciones de Precipitación del Municipio de Chimichagua Cesar	106
Figura 43. Evoluciones Temporales de la Precipitación sin Datos Atípicos para las Estaciones del Municipio de Chiriguaná Cesar	107
Figura 44. Evoluciones Temporales de la Precipitación sin Datos Atípicos para las Estaciones del Municipio de Curumaní Cesar	107

Figura 45. Histogramas sin Datos Atípicos para las Estaciones del Municipio de El Banco Magdalena.....	108
Figura 46. Evolución Temporal de la Precipitación sin Datos Atípicos para la Estación del Municipio del Tamalameque .....	108
Figura 47. Evoluciones Temporales de la Precipitación de Precipitaciones para las Estaciones CHIRIGUANA [25025250] y HACIENDA EL TERROR [25020650] antes y después de realizar la Imputación de los Datos Faltantes. ....	114
Figura 48. Mapa de Precipitaciones Multianual para Complejo Cenagoso de la Zapatosa en el periodo 1990-2021. ....	117
Figura 49. Mapa de Temperaturas Multianual para el Complejo Cenagoso de la Zapatosa en el periodo 1990-2021 .....	118
Figura 50. Mapa de Humedad Relativa Multianual para el Complejo Cenagoso de la Zapatosa en el periodo 1990-2021 .....	119
Figura 51. Mapa de Velocidad del Viento para el Complejo Cenagoso de la Zapatosa en el periodo 1990-2021. ....	120
Figura 52. Gráficos de Correlación Datos de Estaciones vs Datos de Chirps .....	123
Figura 53. Gráficos de análisis de consistencia de datos de las estaciones de los municipios del CCZ vs Datos de Chirps .....	124
Figura 54. Curva de Doble Masa con Datos incompletos de la Variable de Precipitación ...	125
Figura 55. Curva de Doble Masa sin datos atípicos y completos de la Variable de Precipitación .....	126
Figura 56. Curva de Doble Masa para las Temperaturas obtenidas mediante la herramienta Google Earth Engine. ....	127
Figura 57. Representación del Error Absoluto Medio (MAE) en Predicciones .....	130
Figura 58. Representación Simulación Monte Carlo hecha por el Autor. ....	131
Figura 59. Representación de Agrupamiento por K-Means con Centroides .....	133
Figura 60. Representación del Método del Codo para Determinar el Número Óptimo de Clústeres.....	134
Figura 61. Trayectorias más representativas en probabilidad y porcentaje de variación para la estación CHIMICHAGUA [25021240]. ....	137
Figura 62. Trayectorias más representativas en probabilidad y porcentaje de variación para la estación EL CANAL [25020240]. ....	138

Figura 63. Trayectorias más representativas en probabilidad y porcentaje de variación para la estación SALOA [25020270].	139
Figura 64. Trayectorias más representativas en probabilidad y porcentaje de variación para la estación HACIENDA EL TERROR [25020650].	140
Figura 65. Trayectorias más representativas en probabilidad y de variación para la estación CHIMICHAGUA [25021240].	142
Figura 66. Trayectorias más representativas en probabilidad y de variación para la estación EL CANAL [25020240].	143
Figura 67. Trayectorias más representativas en probabilidad y de variación para la estación SALOA [25020270].	144
Figura 68. Trayectorias más representativas en probabilidad y de variación para la estación HACIENDA EL TERROR [25020650].	145
Figura 69. Trayectorias más representativas en probabilidad y porcentaje de variación para la estación CHIRIGUANA [25025260].	147
Figura 70. Trayectorias más representativas en probabilidad y porcentaje de variación para la estación RINCON HONDO [25020260].	148
Figura 71. Trayectorias más representativas en probabilidad y su variación para la estación CHIRIGUANA [25025260].	150
Figura 72. Trayectorias más representativas y su variación para la estación RINCON HONDO [25020260].	151
Figura 73. Trayectorias más representativas en probabilidad y porcentaje de variación para la estación CURUMANI [25020250].	153
Figura 74. Trayectorias más representativas en probabilidad y porcentaje de variación para la estación PRIMAVERA [25020920].	154
Figura 75. Trayectorias más representativas en probabilidad y porcentaje de variación para la estación ZAPATOSA [25020690].	155
Figura 76. Trayectorias más representativas en probabilidad y su variación para la estación POPONTE [25020660].	156
Figura 77. Trayectorias más representativas en probabilidad y su variación para la estación CURUMANI [25020250].	158
Figura 78. Trayectorias más representativas en probabilidad y su variación para la estación PRIMAVERA [25020920].	159

Figura 79. Trayectorias más representativas en probabilidad y su variación para la estación ZAPATOSA [25020690] .....	160
Figura 80. Trayectorias más representativas en probabilidad y su variación para la estación POPONTE [25020660].....	161
Figura 81. Trayectorias más representativas en probabilidad y su porcentaje de variación para la estación AEROPUERTO LAS FLORES [25025090] .....	163
Figura 82. Trayectorias más representativas en probabilidad y su porcentaje de variación para la estación LOS NEGRITOS [25021200].....	164
Figura 83. Trayectorias más representativas en probabilidad y su variación para la estación AEROPUERTO LAS FLORES [25025090] .....	166
Figura 84. Trayectorias más representativas en probabilidad y su variación para la estación LOS NEGRITOS [25021200].....	167
Figura 85. Trayectorias más representativas en probabilidad y su variación para la estación TAMALAMEQUE [25020090].....	169
Figura 86. Trayectorias más representativas en probabilidad y su variación para la estación TAMALAMEQUE [25020090].....	171
Figura 87. Trayectorias de Mayor probabilidad de todas las Estaciones del Complejo cenagoso de la Zapatosa   Precipitación Media para todo el Complejo.....	172
Figura 88. Trayectorias de Mayor probabilidad de todas las Estaciones del Complejo cenagoso de la Zapatosa   Temperatura Media para todo el Complejo. ....	173
Figura 89. Gráfico de ajuste de mejor método de proyección Poblacional para el CCZ.....	176
Figura 90. Proyección para Complejo Cenagoso de la Zapatosa.....	177
Figura 91. Escenarios de Precipitaciones para el periodo 1990-2022 .....	179
Figura 92. Escenarios de Precipitaciones para el Periodo 2022-2040 .....	180
Figura 93. Escenarios de Temperaturas para el Periodo 1990-2022 .....	181
Figura 94. Escenarios de Temperaturas en el Periodo 2022-2040.....	182
Figura 95. Escenarios del IDEAM para Precipitación y Temperatura para el Departamento del Cesar para los años 240, 2070 y 2100.....	185
Figura 96. Escenarios del IDEAM para Precipitación y Temperatura para el Departamento del Magdalena para los años 240, 2070 y 2100.....	186
Figura 97. Indicadores de Amenaza TCNCC .....	188
Figura 98. Índice de amenaza TCNCC .....	189

Figura 99. Índice de capacidad Adaptativa TCNCC .....	190
Figura 100. Índice de Amenaza TCNCC .....	192
Figura 101. Índice de Sensibilidad TCNCC .....	194
Figura 102. Índice de Capacidad Adaptativa TCNCC.....	196
Figura 103. Índice de Amenaza TCNCC .....	198
Figura 104. Indicadores de Sensibilidad TCNCC.....	201
Figura 105. Índice de capacidad Adaptativa.....	203
Figura 106. Simulaciones Vs Datos Históricos para la estación CHIMICHAGUA [25021240] .....	217
Figura 107. Simulaciones Vs Datos Históricos para la estación EL CANAL [25020240] ...	218
Figura 108. Simulaciones Vs Datos Históricos para la estación HACIENDA EL TERROR [25020650].....	219
Figura 109. Simulaciones Vs Datos Históricos para la estación SALOA [25020270] .....	220
Figura 110. Simulaciones Vs Datos Históricos para la estación CHIRIGUANA [25025250] .....	221
Figura 111. Simulaciones Vs Datos Históricos para la estación RINCONHONDO [25020260] .....	222
Figura 112. Simulaciones Vs Datos Históricos para la estación CURUMANI [25020250].	223
Figura 113. Simulaciones Vs Datos Históricos para la estación POPONTE [25020690].....	224
Figura 114. Simulaciones Vs Datos Históricos para la estación PRIMAVERA LA [25020920] .....	225
Figura 115. Simulaciones Vs Datos Históricos para la estación ZAPATOZA [25020660]..	226
Figura 116. Simulaciones Vs Datos Históricos para la estación AEROPUERTO LAS FLORES [25025090].....	227
Figura 117. Simulaciones Vs Datos Históricos para la estación LOS NEGRITOS [25021200] .....	228
Figura 118. Simulaciones Vs Datos Históricos para la estación TAMALAMEQUE [25020090] .....	229
Figura 119. Simulaciones Vs Datos Históricos para la estación CHIMICHAGUA [25021240] .....	230
Figura 120. Simulaciones Vs Datos Históricos para la estación EL CANAL [25020240] ...	231

Figura 121. Simulaciones Vs Datos Históricos para la estación HACIENDA EL TERROR [25020650].....	232
Figura 122. Simulaciones Vs Datos Históricos para la estación SALOA [25020270] .....	233
Figura 123. Simulaciones Vs Datos Históricos para la estación CHIRIGUANA [25025250] .....	234
Figura 124. Simulaciones Vs Datos Históricos para la estación RINCONHONDO [25020260] .....	235
Figura 125. Simulaciones Vs Datos Históricos para la estación CURUMANI [25020250] ..	236
Figura 126. Simulaciones Vs Datos Históricos para la estación POPONTE [25020690].....	237
Figura 127. Simulaciones Vs Datos Históricos para la estación PRIMAVERA LA [25020920] .....	238
Figura 128. Simulaciones Vs Datos Históricos para la estación ZAPATOZA [25020660]..	239
Figura 129. Simulaciones Vs Datos Históricos para la estación AEROPUERTO LAS FLORES [25025090].....	240
Figura 130. Simulaciones Vs Datos Históricos para la estación LOS NEGRITOS [25021200] .....	241
Figura 131. Simulaciones Vs Datos Históricos para la estación TAMALAMEQUE [25020090] .....	242
Figura 132. Obtención de Datos de Precipitación .....	243
Figura 133. Obtención de datos de Temperatura .....	243
Figura 134. Código Python de Implementación del Modelo.....	244
Figura 135. Código Implementación IDW .....	248
Figura 136. Código para Proyección Poblacional en el CCZ.....	249
Figura 137. Creación de Mapas de Precipitaciones Y Temperaturas .....	250
Figura 138. Certificado de Competencia Cursada de Python.....	250
Figura 139. Certificado de competencia cursada de la librería de Python Scikitlearn esencial en este trabajo .....	251

## LISTA DE TABLAS

**Pág.**

Tabla 1, Municipios con área de influencia en el Complejo Cenagoso de la Zapatosa.....	43
Tabla 2. Normativa Aplicable.....	46
Tabla 3. Estaciones datos meteorológicos de precipitación plataforma DHIME. ....	59
Tabla 4. Estaciones datos meteorológicos Temperatura plataforma DHIME. ....	59
Tabla 5. Estaciones datos meteorológicos Plataforma GEE.....	61
Tabla 6. Resumen estadístico Chimichagua [25021240].....	63
Tabla 7. Resumen Estadístico para la estación SALOA [25020270] .....	64
Tabla 8. Resumen estadístico para la estación EL CANAL [25020240] .....	65
Tabla 9. Resumen estadístico para la estación HACIENDA EL TERROR [25020650].....	66
Tabla 10. Resumen estadístico para la estación CHIRIGUANA [25025250].....	67
Tabla 11. Resumen estadístico para la estación RINCONHONDO [25020260] .....	68
Tabla 12. Resumen estadístico para la estación CURUMANI [25020250.] .....	69
Tabla 13. Resumen estadístico para la Estación POPONTE [250] .....	70
Tabla 14. Resumen estadístico para la estación PRIMAVERA [25020920].....	71
Tabla 15. Resumen estadístico para la estación ZAPATOSA [25020660] .....	72
Tabla 16. Resumen estadístico para la estación TAMALAMEQUE [25020090].....	73
Tabla 17. Resumen estadístico para la estación ARTO LAS FLORES [25025090].....	74
Tabla 18. Resumen estadístico para la estación NEGRITOS [25021200] .....	75
Tabla 19. Resumen estadístico para la estación RINCONHONDO [25020260] .....	81
Tabla 20. Resumen estadístico para estación AEROPUERTO LAS FLORES [25025090] ...	82
Tabla 21. Resumen Estadístico para la estación NEGRITOS [25021200].....	83
Tabla 22. Resúmenes estadísticos para la estación CHIMICHAGUA [25021240] .....	84
Tabla 23. Resumen estadístico para la estación SALOA [25020270].....	85
Tabla 24. Resumen estadístico para la estación EL CANAL [25020240] .....	86
Tabla 25. Resumen estadístico para la estación HACIENDA EL TERROR [25020650.....	87
Tabla 26. Resumen estadístico para la Estación ZAPATOSA [25020660].....	88
Tabla 27. Resumen Estadístico para la estación PRIMAVERA [25020920].....	89
Tabla 28. Resumen estadístico para la estación POPONTE [250960] .....	90
Tabla 29. Resumen estadístico para la estación CURUMANI [25020250] .....	91
Tabla 30. Resumen estadístico para la estación TAMALAMEQUE [25020090].....	92
Tabla 31. Valores atípicos para las estaciones del Municipio de Chimichagua cesar.....	95
Tabla 32. Datos Atípicos Estaciones de Precipitación Municipio Chimichagua Cesar .....	97

Tabla 33. Datos Atípicos para las Estaciones del Municipio Chiriguana.....	99
Tabla 34. Datos Atípicos para las Estaciones del Municipio de El Banco Magdalena .....	102
Tabla 35. Datos Atípicos para la Estación del Municipio de Tamalameque Cesar.....	104
Tabla 36. Estaciones en el municipio de Chimichagua Cesar .....	136
Tabla 37. Estaciones para el Municipio de Chiriguaná Cesar .....	146
Tabla 38. Estaciones para el Municipio de Curumaní Cesar .....	152
Tabla 39. Estaciones para El Banco Magdalena.....	162
Tabla 40. Población censada para los municipios de la Zapatosa 1985-2018.....	176
Tabla 41. Población Proyecta al periodo 2040. ....	176



## INTRODUCCIÓN

El cambio climático, como lo respaldan diversos estudios científicos, es el resultado de un sin número de actividades humanas, conocidas como actividades antrópicas. Según Smith et al. (2019), el uso insostenible y el aprovechamiento masivo de los recursos naturales han tenido un impacto significativo en la alteración de las temperaturas y las precipitaciones en múltiples regiones del mundo. Este desequilibrio en los flujos de energía y materia ha llevado a un incremento del calentamiento global, ocasionando alteraciones en los patrones climáticos en diferentes partes del planeta.

Esto queda reafirmado en el informe del IPCC (Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático) en 2021, destacando que las concentraciones en aumento de gases de efecto invernadero, tales como los compuestos de carbono, nitrógeno y metano, están provocando un incremento en las temperaturas globales. Esta situación, a su vez, está generando cambios en los patrones de precipitación, resultando en eventos climáticos más extremos como sequías prolongadas, inundaciones intensas y tormentas más frecuentes. Estos fenómenos climáticos adversos representan un desafío significativo para la resiliencia de los ecosistemas y las comunidades humanas en todo el mundo.

Considerando lo anterior, la presente investigación resulta de interés puesto que se quiere recopilar información importante sobre los cambios adversos como favorables que podría tener el Complejo Cenagoso de Zapatosa como ecosistema estratégico de gran importancia y humedal categoría RAMSAR y una forma de entender cómo pueden suceder estas afectaciones es mediante el análisis y modelado de datos temporales y distribución geoespacial de las temperaturas y precipitaciones, que son las variables más representativas para comprender el efecto del cambio climático sobre los componentes biofísicos y socioeconómicos, por lo cual, esta investigación toma como información clave la Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático (TCNCC) y los valores de las variables desde los años 1990 hasta 2022, obtenidos de la plataforma DHIME del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM.

Esta investigación tiene un enfoque cuantitativo y alcance explicativo busca, mediante tres objetivos específicos, la obtención de las variables mencionadas en la serie de tiempo indicada, aplicar un tratamiento a estos y realizar un análisis estadístico, en el marco de realizar el análisis exploratorio para la limpieza de los datos y mejorar la consistencia, calidad y homogeneidad de estos, conforme a lo establecido en los lineamientos técnicos definidos por el IDEAM. Seguidamente, se implementan modelos estadísticos estocástico de la familia SARIMA (Modelo autorregresivo integrado de media móvil estacional, siglas traducidas al español) para simular el comportamiento futuro de la precipitación y temperatura en cada estación, mediante la creación de números aleatorios probabilísticos empleando el método Montecarlo, y así conseguir evaluar el impacto del cambio climático proyectado para el año 2040, coincidiendo con uno de los escenarios proyectados por el TCNCC para el departamento del Cesar, principalmente y considerando que este tiene mayor área de influencia en el Complejo Cenagoso de Zapatosa.

Por último, se evalúa la incidencia que tienen estas variables para con los indicadores biofísicos y socioeconómicos, desde el grado de amenaza, sensibilidad y capacidad adaptativa considerando información del TCNCC, para realizar la representación geoespacial en Sistema de Información Geográfico ArcGIS, consiguiendo así establecer el Marco de Análisis de los Resultados con base a la mencionada metodología del TCNCC.

Con el cual este trabajo analizó la variabilidad climática en el Complejo Cenagoso de la Zapatosa, obteniendo resultados significativos que evidencian una disminución proyectada del 1.40% en las precipitaciones y un aumento de 0.96°C en las temperaturas para 2040. Estos hallazgos, fundamentados en análisis estadísticos y modelamientos climáticos, resaltan los riesgos para la estabilidad hídrica y la biodiversidad del ecosistema, así como los desafíos para las comunidades locales. Además, se detallaron las actividades realizadas y los recursos utilizados, evidenciando un enfoque metodológico riguroso que permitió cumplir los objetivos planteados y generar información relevante para la toma de decisiones adaptativas en la región.

## 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El panorama global del cambio climático implica un aumento continuo de las temperaturas medias, alteraciones en los patrones de precipitación, acidificación de los océanos y aumento del nivel del mar. Se prevé que estos cambios tengan impactos adversos significativos sobre los ecosistemas naturales y humanos en las próximas décadas y que sus efectos sean especialmente severos en países en desarrollo con baja capacidad de adaptación. Es urgente la implementación de medidas de mitigación y adaptación para construir resiliencia y reducir riesgos climáticos. (IPCC, 2014).

Por lo cual, el cambio climático representa una de las mayores amenazas ambientales y especialmente para Latinoamérica. El último reporte del IPCC (2014) prevé un aumento de temperatura entre 1.6°C y 4°C para la región hacia finales de siglo, junto con alteraciones en los regímenes de precipitación.

De manera más centralizada, el cambio climático ha agravado los desafíos que enfrenta el Complejo Cenagoso de la Zapatosa. De acuerdo con proyecciones basadas en el IPCC, se esperan aumentos preocupantes en la temperatura media en la zona, así como cambios en las precipitaciones que podrían afectar el ciclo hidrológico del CCZ y reducir el suministro de agua para las poblaciones locales. Esto podría llevar a períodos de sequía más críticos y a riesgos de inundación para las comunidades cercanas al complejo cenagoso. (CORPAMAG, UNIMAGDALENA 2017).

La ciénaga de Zapatosa tiene un clima cálido, con temperaturas promedio entre 28°C y 32°C (Viloria, 2008). Las precipitaciones anuales en la región oscilan entre 1600 mm y 2000 mm. Los meses de mayor pluviosidad son de agosto a noviembre, siendo octubre el mes más lluvioso. Los meses más secos son de diciembre a marzo, con enero como el mes más seco. También se presenta un segundo periodo seco durante julio. Hay dos estaciones climáticas principales: la temporada lluviosa de abril a junio y octubre-noviembre, y la temporada seca de diciembre a marzo y julio-agosto (Viloria, 2008). La ciénaga recibe aguas principalmente de los ríos Magdalena y Cesar. Su profundidad varía entre 1 y 8 metros, con mínimos en febrero (temporada seca) y máximos en mayo (temporada lluviosa). La amplitud media de inundación es de aproximadamente 3,5 metros según Viloria. (Instituto Humboldt, 2016)

El cambio climático puede afectar las condiciones de precipitación y clima en la ciénaga de Zapatosa de las siguientes maneras:

- Alteración del régimen de precipitaciones: Los cambios en los patrones de lluvia pueden modificar los ciclos de inundación y sequía de la ciénaga, de acuerdo con proyecciones del IDEAM indican posibles reducciones de lluvia de más del 40% en el Magdalena y Cesar (Instituto Humboldt., 2016).
- Mayor duración de la temporada seca: De acuerdo con proyecciones del IDEAM para la región Caribe indican una posible mayor duración de la época seca como efecto del cambio climático (IDEAM et al., 2015). Esto reduciría la lámina de inundación de la ciénaga (Instituto Humboldt., 2016).
- Aumento de inundaciones: Aunque pueda disminuir la precipitación promedio anual, el cambio climático podría incrementar la intensidad de eventos lluviosos extremos, resultando en inundaciones más frecuentes en la ciénaga (IDEAM., 2015).

Se prevé que las temperaturas en el CCZ aumenten entre 1°C y 2.7°C hacia finales del presente siglo, junto con posibles cambios en las precipitaciones entre -10% y +10% (CORPAMAG, UNIMAGDALENA 2017, sección 4.3). Tales variaciones tendrán efectos significativos sobre los frágiles ecosistemas de humedales y las especies de flora y fauna que los habitan, así como sobre la disponibilidad del recurso hídrico para las poblaciones humanas.

la ciénaga de Zapatosa ha sufrido una degradación ambiental sustancial, producto de actividades como la pesca, la ganadería extensiva y la agricultura de subsistencia, que impactan al ecosistema acuático<sup>1</sup>. Estas actividades eliminan la cobertura vegetal natural y afectan la salud del ecosistema acuático, (Fundación Natura, 2020).

El cambio climático puede exacerbar estos impactos. Por ejemplo, el aumento de la temperatura puede alterar las condiciones del agua, afectando a las especies acuáticas. Las sequías pueden reducir el nivel del agua, lo que puede tener un impacto en la fauna y la flora que dependen del ecosistema acuático.

Los ecosistemas terrestres circundantes, como los bosques de galería y manglares, también pueden verse afectados por el cambio climático. Las especies endémicas de estos bosques pueden ser susceptibles a las sequías o al aumento de las temperaturas.

El aspecto más crítico y susceptible a sufrir consecuencias es la seguridad alimentaria, la cual podría enfrentarse a múltiples amenazas. Las sequías más prolongadas e intensas podrían mermar la productividad agrícola, disminuyendo los rendimientos de los cultivos y la disponibilidad de alimentos. Esta situación podría derivar en un aumento de los precios de los alimentos, reduciendo el acceso a la nutrición para las poblaciones más vulnerables. Además, muchas comunidades en y alrededor del CCZ podrían depender aún más de la pesca para su sustento y alimentación, y las especies de peces podrían verse adversamente afectadas por el uso indebido de productos químicos y técnicas de pesca de alto impacto, así como por las alteraciones en el ciclo hidrológico y las temperaturas más elevadas.

Por otra parte, la alteración del régimen hídrico reducirá la capacidad del complejo cenagoso para amortiguar crecientes, aumentando así la vulnerabilidad de poblaciones ribereñas a inundaciones. Asimismo, incrementará la probabilidad de incendios forestales en los bosques inundables y secos del área (CORPAMAG, UNIMAGDALENA 2017).

Ante esta problemática, es prioritario generar información detallada sobre los posibles escenarios climáticos futuros en el área del CCZ, que permita una adecuada planificación de medidas de adaptación y mitigación. Es necesario entender, con un nivel apropiado de detalle, cómo la variabilidad de las lluvias y temperaturas, con mayor especificidad, impactará la biodiversidad, los ciclos hídricos y las comunidades en las próximas décadas.

Conforme a lo descrito en los párrafos anteriores, el autor se formula la siguiente pregunta de investigación: ¿cómo se evaluará la Variabilidad Climática a partir de datos de Precipitación y Temperatura mediante el Método de Simulación Montecarlo para el Complejo Cenagoso de Zapatosa?

## 2. JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO

Este proyecto de investigación se cimienta de manera jurídica en las políticas del cambio climático establecida en la Ley 1931 del 2018, en donde se presentan las directrices para la Gestión del Cambio Climático y la Política nacional para la gestión del recurso hídrico 2010, además, se enmarca en los escenarios proyectados del TCNCC para el 2040 en el departamento del Cesar, implicando la necesidad de analizar y modelar series temporales de variables meteorológicas y climáticas para entender y predecir los cambios del clima, y de manera estratégica, informar y guiar las políticas hacia una transformación que permita el cumplimiento que abarca los objetivos del desarrollo sostenible.

En el marco de la evaluación de la variabilidad climática, inicialmente se contempló realizar proyecciones tanto para el año 2030 como para el año 2040. Sin embargo, se ha decidido enfocar el análisis únicamente en la proyección hacia el año 2040 con el fin de obtener un horizonte temporal más amplio y representativo de las posibles tendencias y cambios en las variables de estudio.

Una simulación de Montecarlo es ideal para proyectar la variabilidad de temperatura y precipitación en el Complejo Cenagoso de Zapatosa (CCZ) por varias razones:

- Permite generar un gran número de escenarios futuros posibles a partir del análisis de datos históricos y la incorporación de modelos de probabilidad (Tucci, 2005). Esto captura la incertidumbre inherente a las proyecciones climáticas.
- Puede explorar rangos de variabilidad climática en diferentes horizontes temporales (Steinschneider & Brown, 2013). Esto es útil para entender impactos potenciales en el ecosistema del CCZ.
- Incorpora elementos estocásticos en la simulación, lo cual es apropiado dada la naturaleza caótica del clima (Fatichi, 2016).
- Los resultados pueden usarse directamente para orientar estrategias de manejo adaptativo y conservación de los humedales (Prudhomme, 2010).

Considerando esto, la simulación de la temperatura y la precipitación en escenarios futuros del cambio climático para el Complejo Cenagoso de Zapatosa es fundamental para anticipar y comprender los cambios climáticos específicos de la región. Estas simulaciones permiten a científicos y políticos prever cómo factores críticos como la temperatura y la precipitación pueden cambiar en el futuro, afectando los ecosistemas, la vida silvestre y las comunidades humanas que dependen de ellos. Además, dichas simulaciones proporcionan una base sólida para la planificación y la acción, permitiendo a las partes interesadas tomar medidas proactivas para mitigar los impactos negativos del cambio climático.

Los resultados de la simulación permitieron entender el rango de variabilidad climática esperada y sus impactos. Así, se podrán tomar mejores decisiones para la conservación y manejo sostenible del área protegida, aumentando su resiliencia climática. También será útil para planificar medidas de adaptación para las comunidades locales dependientes del complejo cenagoso.

Las simulaciones de Monte Carlo para el Complejo Cenagoso de Zapatosa (CCZ) ofrecen una visión detallada de las variaciones climáticas a nivel local, superando las limitaciones de los modelos globales, que no suelen captar los detalles a pequeña escala. Esto permite una proyección más precisa de los posibles cambios climáticos en la zona y ayuda a identificar escenarios más críticos, además de señalar áreas donde de mayores afectaciones por las variaciones climáticas.

Para llevar a cabo este trabajo se requirió información de las variables de precipitación y temperatura a partir de la red de estaciones meteorológicas del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM, para series de tiempo no inferior a 10 años. La disponibilidad de datos es altamente accesible y existen alternativas para poder sustentar la información. Por ejemplo, existen modelos climáticos globales, lo que sería fundamental en caso dado no se tenga disponibilidad suficiente de datos climáticos. Por otra parte, debido a la insuficiencia de datos locales de la variable de temperatura, se optó por obtener la información del modelo ERA5-Land del Centro Europeo de Pronósticos Meteorológicos a Plazo Medio (ECMWF), mediante la plataforma Google Earth Engine, que permitió calcular la temperatura del aire a 2 metros de manera precisa a partir de complejos modelos satelitales.

### **3. OBJETIVOS**

#### **3.1. OBJETIVO GENERAL**

Evaluar la Variabilidad climática a partir de datos de Precipitación y Temperatura mediante el Método de Simulación Montecarlo para Complejo Cenagoso de la Zapatosa.

#### **3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Realizar Análisis Exploratorio de los Datos de Variables Climatológicas Históricas a partir de las estaciones del IDEAM con influencia en el área del Complejo Cenagoso de la Zapatosa.

Determinar el Impacto del cambio Climático con Proyecciones a 2040 en la Alteración de las Variables Climatológicas de Precipitación y Temperatura en el Complejo Cenagoso de la Zapatosa.

Establecer el marco de evaluación de los resultados basado en la Tercera Comunicación Nacional del Cambio Climático (TCNCC) y los Indicadores del NDC Colombia, específicamente para el Complejo Cenagoso de la Zapatosa.



## 4. MARCO REFERENCIAL

A través de una revisión exhaustiva de la literatura existente y de investigaciones previas, se puede identificar la evolución de los conceptos clave y las teorías que fundamentan el marco referencial. Este análisis permite destacar las brechas de conocimiento y justificar la necesidad de la investigación actual, ofreciendo una base sólida sobre la cual se construirá el estudio. En este sentido, los antecedentes son esenciales para situar la investigación en el panorama académico y científico, demostrando cómo se enlaza con trabajos previos y qué nuevas perspectivas aporta.

### 4.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

Buitrago V (2023). Desarrolló la investigación titulada "Simulación Hidrológica de los Impactos Potenciales del Cambio Climático en la Parte Alta del Río Iquira, Huila, Colombia", con el propósito de obtener su título de Ingeniero Civil en la Universidad Cooperativa de Colombia. El objetivo principal de este estudio fue evaluar el desempeño de un modelo hidrológico mensual para estimar la oferta hídrica futura en la subcuenca alta del Río Iquira, ante diversos escenarios de cambio climático proyectados para las próximas décadas en la región. La investigación se realizó en tres fases principales: ETAPA 1: el autor caracterizó en detalle la zona de estudio, la cuenca hidrográfica del Río Iquira ubicada en el Huila, Colombia. Recopiló información hidrometeorológica histórica de 20 años sobre precipitación, temperatura y caudales, proveniente de estaciones locales. Adicionalmente, seleccionó el modelo hidrológico mensual abcd de Thomas por su simplicidad y pocos parámetros a calibrar. ETAPA 2: calibró y validó el modelo hidrológico con los datos observados de caudal mensual. También llevó a cabo un riguroso análisis de sensibilidad de los parámetros, utilizando técnicas avanzadas como Monte Carlo. Asimismo, generó 3 escenarios de cambio climático para la zona hasta el 2040, con base en proyecciones del IPCC. ETAPA 3: el autor simuló la oferta hídrica futura de la cuenca para cada escenario de cambio climático y comparó los resultados con el periodo base observado de 1992-2012. Los principales hallazgos fueron una posible disminución del caudal medio anual entre el 37% y 54%, dependiendo del escenario climático futuro que se materialice. En conclusión, este estudio aporta una metodología detallada para evaluar impactos locales del cambio climático sobre la hidrología, utilizando un modelo lluvia-escorrentía calibrado para la cuenca. Sus resultados resaltan la necesidad de considerar

proyecciones climáticas en la planificación de los recursos hídricos, para formular estrategias de adaptación frente a un futuro incierto.

Rodríguez & Salazar (2023), desarrollaron la investigación titulada "Análisis de la influencia del fenómeno de La Niña 2020-2022 en la precipitación y temperatura del aire en Chile continental"; para optar el título de Ingeniera Oceanográfica, en la Escuela Superior Politécnica del Litoral, con la finalidad de analizar la influencia de La Niña en el clima de Chile. Esta investigación se llevó a cabo en 5 etapas principales: ETAPA 1: En esta fase se realizó la selección y recopilación de los datos de 34 estaciones meteorológicas de la Dirección Meteorológica de Chile (DMC) en el período 1991-2022 para las variables de precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima. También se aplicó control de calidad a los datos con el software Climdex. ETAPA 2: Se procedió al procesamiento de los datos calculando las anomalías mensuales y estacionales de las variables con respecto a la normal climatológica de 30 años 1991-2020. Las estaciones fueron agrupadas en 5 Zonas Naturales de Chile: Norte Grande, Norte Chico, Central, Sur y Austral. ETAPA 3: Se validó la agrupación de las estaciones en Zonas Naturales mediante análisis de Funciones Empíricas Ortogonales (EOF) para observar la variabilidad explicada en cada zona. ETAPA 4: Se realizó análisis de correlación entre las anomalías y los índices oceánicos de las regiones Niño 3.4, Niño 1+2, ONI e IOS para estudiar posibles influencias remotas del Pacífico. También se generaron mapas de anomalías para visualizar patrones espaciales durante La Niña 2020-2022. ETAPA 5: Se comparó el evento La Niña 2020-2022 con eventos históricos similares para identificar comportamientos y diferencias entre los diferentes ciclos de La Niña. Los resultados indican la presencia de patrones espaciales y temporales en los impactos de La Niña sobre la precipitación y temperatura del aire en Chile. Las principales conclusiones obtenidas fueron que las anomalías de temperatura se vuelven positivas en la zona Austral, las anomalías negativas de precipitación disminuyen en magnitud hacia el sur y existe mayor variabilidad en las Zonas Central y Sur. Los aportes de este estudio fueron un mayor conocimiento de los efectos climáticos de La Niña en el territorio chileno, información útil para mejorar los servicios de predicción meteorológica en el país.

Leal & Portes (2020), desarrollaron la investigación titulada "Análisis de las variables climatológicas de precipitación y temperatura de los municipios de Tocaima y Jerusalén"; para optar al título de Administrador Ambiental, en la Universidad Piloto de Colombia. La finalidad

fue analizar estas variables climáticas como aporte para la gestión ambiental de dichos municipios. Esta investigación se llevó a cabo en 6 etapas. ETAPA 1: En esta fase se recopiló información climática de estaciones meteorológicas cercanas a los municipios para los años 1987-2008 (Tocaima) y 1975-2017 (Jerusalén). ETAPA 2: Se tabularon y graficaron los datos de precipitación y temperatura para analizar su variabilidad. ETAPA 3: Se realizó el análisis climatológico identificando valores medios, máximos y mínimos de las variables. ETAPA 4: Se elaboró un análisis de posibles efectos ambientales y sociales derivados de la variabilidad climática. ETAPA 5: Se plantearon recomendaciones para mejorar el monitoreo climático y la gestión ambiental local. ETAPA 6: Se redactaron las conclusiones y aportes del estudio. Los productos fueron tablas, gráficos y análisis climatológicos. Donde el estudio reveló variabilidad climática en la zona analizada, evidenciaron variabilidad y cambios en las variables climáticas. Los aportes fueron información y recomendaciones para la gestión ambiental ante el cambio.

El Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2020), desarrolló la actualización de la Contribución Determinada a Nivel Nacional (NDC) de Colombia; para dar cumplimiento a los compromisos adquiridos ante la Convención Marco de Naciones Unidas sobre Cambio Climático (CMNUCC), con la finalidad de aumentar la ambición climática del país. Esta actualización se llevó a cabo en 3 etapas: ETAPA 1: En esta fase de la actualización, el Ministerio consolidó la información sobre el escenario de referencia y el potencial de mitigación de gases efecto invernadero a nivel nacional. ETAPA 2: En segunda instancia, se estructuraron las metas y medidas de mitigación y adaptación al cambio climático, cubriendo todos los sectores relevantes. ETAPA 3: Por último, se identificaron las necesidades de medios de implementación y los arreglos institucionales requeridos. Los productos de esta actualización fueron la meta absoluta de reducción de emisiones al 2030, el portafolio de medidas sectoriales, territoriales y empresariales, y las prioridades en adaptación. Los resultados de la actualización fueron una NDC más ambiciosa y robusta, que demuestra el liderazgo climático de Colombia. Los aportes directos al presente estudio son la línea base de información sobre mitigación y adaptación, y la hoja de ruta climática del país al 2030.

Alvarino & Ocampo (2015), desarrollaron la investigación titulada "Análisis de las variables climatológicas temperatura, humedad relativa, precipitación, evaporación, brillo solar, radiación, velocidad y dirección del viento, medidas por la estación meteorológica "Argelia" entre los años 1993 – 2013 para verificar la variabilidad climática del municipio de

Girardot"; para optar al título de Ingenieras Ambientales, en la Universidad de Cundinamarca, con la finalidad de determinar la variabilidad climática en el municipio de Girardot entre los años 1993-2013. Esta investigación se llevó a cabo en 3 etapas: ETAPA 1: En esta fase de la investigación, las autoras realizaron la recolección de información bibliográfica sobre climatología, cambio climático y tipos de estaciones meteorológicas. También definieron las variables climatológicas a analizar y seleccionaron la estación climatológica Argelia. ETAPA 2: En segunda instancia obtuvieron las bases de datos de la CAR de 1993 a 2013 y realizaron los análisis estadísticos interanual e interanual de las variables. ETAPA 3: Por último, interpretaron los resultados en relación con fenómenos climáticos y actividades antropogénicas. También identificaron impactos asociados a la variabilidad climática. Los resultados de la investigación indicaron que las variables climatológicas en Girardot presentaron variabilidad entre 1993 y 2013, con cambios como el aumento de  $3.37^{\circ}\text{C}$  en la temperatura promedio. Los aportes directos al presente estudio son el análisis detallado del comportamiento climatológico de Girardot en ese período, que sirve como precedente para futuras investigaciones y estrategias de adaptación al cambio climático en el municipio.

Ramos J. (2014). Desarrolló la investigación titulada “Estimación del efecto del cambio climático en la precipitación de la Costa Norte del Perú usando simulaciones de modelos climáticos globales”; para optar el título de Ingeniero Meteorólogo, en la Universidad Nacional Agraria La Molina, con el objetivo de estimar los cambios en la precipitación en la Costa Norte del Perú bajo un escenario futuro de cambio climático. Esta investigación se realizó en 4 etapas: ETAPA 1: En esta primera fase, la autora analizó la relación empírica entre la precipitación mensual y la temperatura superficial del mar (TSM) en la zona de estudio utilizando datos observados de estaciones meteorológicas y TSM de fuentes satelitales para el periodo 1968-2005. Estimó los parámetros de un modelo físico empírico (MFE) que relaciona estas dos variables de forma no lineal a través de una temperatura umbral crítica ( $T_{crit}$ ) y una pendiente. ETAPA 2: En la segunda etapa, la autora utilizó simulaciones mensuales de 39 modelos climáticos globales (GCMs) del proyecto CMIP5 para un periodo histórico (1968-2005) y uno futuro (2050-2100) bajo el escenario RCP4.5. Estimó los parámetros del MFE para cada modelo y evaluó la relación TSM-precipitación, categorizando su ajuste. ETAPA 3: Posteriormente, comparó el MFE con las salidas directas de precipitación de los GCMs, analizando las correlaciones y realizando un análisis de sensibilidad de los parámetros. Así

determinó que el cambio en la pendiente y en la diferencia TSM-Tcrit son claves. ETAPA 4: Finalmente, corrigió los sesgos sistemáticos de los GCMs e incorporó los cambios proyectados de TSM, Tcrit y pendiente al MFE observacional para estimar la precipitación futura. Así proyectó un incremento entre 0 y 60% en los próximos 50 años. Los productos fueron parámetros empíricos de TSM y precipitación para la zona de estudio. Los resultados indican un posible aumento moderado de la precipitación. Este trabajo aporta una metodología para mejorar proyecciones climáticas regionales mediante un modelo empírico.

## **4.2. MARCO TEÓRICO**

### **4.2.1 Cambio Climático.**

El cambio climático es un fenómeno complejo y de larga duración que altera los patrones y condiciones climáticas de la Tierra. Se refiere a las variaciones climáticas que ocurren a lo largo de décadas o más, tanto debido a procesos naturales como a la influencia humana. La actividad humana, especialmente la quema de combustibles fósiles y la deforestación, ha liberado grandes cantidades de gases de efecto invernadero a la atmósfera, intensificando el efecto invernadero y causando un aumento en la temperatura global. (IPCC, 2014).

El cambio climático afecta los patrones meteorológicos normales en un ecosistema, manifestándose a través de cambios continuos en el tiempo en las variables climáticas promedio, como la precipitación y la temperatura. Sin embargo, para ser considerado cambio climático, generalmente estos cambios deben ocurrir durante un período de 30 años o más. En escalas de tiempo más cortas, estos cambios se denominan fluctuaciones climáticas normales dentro de los límites establecidos del sistema climático y se dividen en variaciones estacionales. (IDEAM, UNAL, 2018).

#### **4.2.1.1. Escenario Climático.**

Un escenario climático se refiere a una representación plausible del futuro estado del clima de la Tierra, basada en supuestos sobre las condiciones socioeconómicas, tecnológicas y políticas futuras. Estos escenarios son herramientas utilizadas por los científicos del clima y los investigadores para evaluar posibles resultados y tendencias climáticas a largo plazo (IPCC 2014).

El Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC) ha desarrollado diferentes escenarios climáticos en sus informes. Por ejemplo, en el Informe de Evaluación del IPCC de 2014, se presentan diferentes escenarios de emisiones conocidos como "RCP" (Representative Concentration Pathways). Estos escenarios se basan en diferentes niveles de emisiones de gases de efecto invernadero y se utilizan para examinar las posibles respuestas del clima en función de esas emisiones. (IPCC 2014).

Los escenarios de cambio climático son herramientas fundamentales que cumplen dos propósitos principales:

- Representar cómo podrían cambiar los climas regionales a medida que aumentan las concentraciones de gases de efecto invernadero (GEI). Estos escenarios permiten modelar y proyectar posibles futuros climáticos en diferentes regiones del planeta, considerando diferentes trayectorias de emisiones de GEI y escenarios socioeconómicos.
- Comprender y evaluar cómo los sistemas sensibles, como ecosistemas, recursos hídricos, agricultura y comunidades humanas, pueden verse afectados por el cambio climático antropogénico. Al utilizar escenarios de cambio climático, los científicos y planificadores pueden analizar los posibles impactos en diversos sectores y tomar decisiones informadas sobre cómo minimizar y adaptarse a estos cambios previstos.

#### **4.2.1.2. Distribución Espacial y Temporal.**

La distribución espacial se refiere a la localización de entidades geográficas y sus atributos a través del espacio. Esto puede representarse como puntos, líneas o polígonos en un sistema de información geográfica vectorial, o como celdas en una matriz raster. Describe la variabilidad espacial de fenómenos como el clima, la vegetación o la densidad de población.

La distribución temporal considera cómo estas entidades geográficas varían a lo largo del tiempo, desde escalas temporales cortas como días o años, hasta periodos geológicos de millones de años. Por ejemplo, la precipitación tiene un ciclo anual, mientras que la forma de un valle cambia lentamente con la erosión a lo largo de milenios.

Juntas, la distribución espacial y temporal son fundamentales para analizar y modelar procesos ambientales, patrones ecológicos y dinámicas geográficas. (O'Sullivan, D. y Unwin, D. 2010).

#### **4.2.2. Tercera Comunicación Nacional del Cambio Climático (TCNCC).**

Las comunicaciones nacionales desempeñan un papel crucial para que los 196 estados miembros de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) informen sobre el progreso en la implementación de la Convención y recopilen datos actualizados sobre el cambio climático en sus respectivos países. Estas comunicaciones son fundamentales para orientar la planificación sectorial y territorial, así como para desarrollar políticas públicas basadas en información precisa. El objetivo es avanzar hacia territorios resilientes al clima, con una economía eficiente y bajas emisiones de carbono (IDEAM, PNUD, 2017).

En este contexto, Colombia ha desarrollado la Tercera Comunicación Nacional en colaboración con el IDEAM, el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, el DNP, la Cancillería y con el apoyo del Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD). Esta comunicación proporciona una información detallada sobre el estado y los avances del país en diversos aspectos relacionados con el cambio climático.

La Tercera Comunicación Nacional de Colombia abarca los siguientes aspectos:

1. **Circunstancias Nacionales:** Presenta información crítica para comprender la vulnerabilidad de Colombia frente al cambio climático, así como su capacidad de adaptación y las opciones para gestionar las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI).
2. **Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero (GEI):** Describe las emisiones de GEI producidas en el país, lo que permite evaluar su contribución al calentamiento global.
3. **Acciones de Mitigación:** Detalla las medidas adoptadas para reducir el aumento de las emisiones de GEI y promover el almacenamiento de carbono en el territorio.
4. **Vulnerabilidad:** Analiza los riesgos asociados al cambio climático, como eventos climáticos extremos, cambios en la temperatura y la precipitación, y la pérdida de servicios ecosistémicos, evaluando su impacto en la población y los territorios.

5. Acciones de Adaptación: Presenta las estrategias implementadas para reducir la vulnerabilidad de la población y los territorios frente a los efectos del cambio climático, fortaleciendo la resiliencia.

6. Educación y Sensibilización Pública: Destaca las acciones dirigidas a mejorar la educación, capacitación y conciencia pública sobre el cambio climático, con el objetivo de involucrar a la sociedad en la toma de decisiones informadas.

7. Obstáculos e Información Financiera: Identifica las necesidades de financiamiento, acceso a tecnología y fortalecimiento de capacidades de adaptación, a fin de superar los desafíos que enfrenta Colombia en la implementación de acciones climáticas.

La Tercera Comunicación Nacional de Colombia adopta un enfoque integral que proporciona una visión completa de los esfuerzos del país en la lucha contra el cambio climático. Además, contribuye a la toma de decisiones informadas para promover un desarrollo sostenible y resiliente al clima en Colombia.

#### **4.2.3. Contribución Determinada a Nivel Nacional de Colombia (NDC)**

Este documento analiza las Contribuciones Determinadas a Nivel Nacional (NDC) de los países de América Latina y el Caribe, centrándose en su contribución compartida para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. Se compara esta contribución con las metas climáticas establecidas y se calculan las tasas históricas anuales de descarbonización de la economía a escala regional. Además, se evalúan las tasas de descarbonización necesarias bajo diferentes escenarios de cumplimiento de las NDC, teniendo en cuenta las desviaciones en comparación con el desempeño histórico.

El informe también destaca los avances institucionales en políticas climáticas y el cumplimiento de los compromisos. Se mencionan algunas medidas tomadas por los países de la región.

En el caso específico de Colombia, la Contribución Determinada a Nivel Nacional (NDC) integra diferentes consideraciones, como los derechos humanos, la equidad intergeneracional, la transición laboral, la igualdad de género y el empoderamiento de las mujeres, así como enfoques diferenciados para comunidades étnicas y poblaciones vulnerables.

También se abordan temas como la integridad del ecosistema, la protección de la biodiversidad, la seguridad alimentaria y el alivio de la pobreza, así como la producción y el consumo sostenibles. Estos esfuerzos buscan fortalecer los sectores y regiones para alcanzar las metas de desarrollo, paz, equidad y educación de Colombia tanto a mediano como a largo plazo.

La NDC de Colombia incorpora tres componentes principales: mitigación de gases de efecto invernadero, adaptación al cambio climático y medios de implementación como instrumentos para promover el desarrollo sostenible y resiliente al clima.

Según el Análisis de Vulnerabilidad y Riesgo por Cambio Climático realizado por la TCNCC, Colombia presentó un conjunto de 113 indicadores relacionados con amenazas, sensibilidad y capacidad adaptativa en seis dimensiones: seguridad alimentaria, recurso hídrico, biodiversidad y servicios ecosistémicos, hábitat humano, salud e infraestructura.

#### **4.2.4. Variables Meteorológicas.**

En Colombia, el IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Medio Ambiente) es un organismo público dependiente del Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible. Su función principal es gestionar toda la información hidrometeorológica oficial del país. Desde el 5 de enero de 1962, el IDEAM es miembro de la Organización Meteorológica Mundial (OMM), cumpliendo con las responsabilidades establecidas por esta organización. Cabe mencionar que existen otras entidades tanto a nivel regional como central que también forman parte de la OMM.

Las variables hidrometeorológicas se enfocan en el estudio de las fases atmosféricas (evaporación, condensación y precipitación) y terrestres (interceptación de precipitaciones, infiltración y descarga superficial) del ciclo hidrológico, así como en las interrelaciones dentro de dicho ciclo. Esto incluye la observación, procesamiento y análisis del comportamiento de los elementos del agua, como los caudales fluviales y los volúmenes almacenados en embalses naturales y artificiales, además de los factores meteorológicos.

Algunas de las variables hidrometeorológicas clave son:

- Temperatura del aire: mide el grado de calor o frío en un lugar determinado y se describe a través de parámetros como la temperatura máxima, mínima y promedio.
- Humedad del aire: indica el porcentaje de humedad presente en el aire en relación con su capacidad máxima de retener agua, según su temperatura y presión.
- Viento de superficie: representa la distancia recorrida por una partícula de aire en un tiempo determinado y se expresa en unidades como metros por segundo (m/s), kilómetros por hora (km/h) o nudos.
- Precipitación: se refiere a la cantidad de agua lluvia que cae sobre una superficie en un período de tiempo determinado.
- Brillo solar (tiempo de insolación): está asociado con la cantidad de tiempo en el que la superficie del suelo recibe radiación solar directa.

Estas variables hidrometeorológicas son fundamentales para comprender y monitorear el clima y los recursos hídricos en Colombia.

#### **4.2.5. Modelos estocásticos.**

Los modelos estocásticos, tal como explicó de forma concisa el eminente estadístico George Box en su obra Modelos Estadísticos y Diseño de Experimentos (1978), son modelos matemáticos que incorporan variables aleatorias para representar sistemas donde existe incertidumbre. A diferencia de los modelos deterministas, los resultados de un modelo estocástico no están completamente predeterminados, sino que siguen una distribución de probabilidad.

Según aportó de forma visionaria la destacada matemática Fanny Rosenblatt en su clásico libro Procesos Estocásticos (1962), la aleatoriedad en estos modelos se introduce mediante el uso de variables aleatorias que representan la incertidumbre inherente en el sistema modelado. De esta manera, en lugar de producir un único resultado, un modelo estocástico genera una gama de resultados posibles que siguen una función de probabilidad.

Como explicó con gran claridad el prominente estadístico italiano Bruno de Finetti en su obra Teoría de la Probabilidad (1970), los modelos estocásticos son ideales para describir

sistemas que evolucionan de forma impredecible en el tiempo, como por ejemplo en climatología, economía o biología. Su capacidad para incorporar el azar los hace más realistas y precisos que los modelos puramente deterministas.

Los modelos estocásticos se utilizan ampliamente en diversas áreas como finanzas, biología, física y ciencias sociales. Algunos ejemplos incluyen el modelo Black-Scholes para la valuación de opciones financieras (Black y Scholes, 1973), los modelos epidemiológicos para estudiar la propagación de enfermedades (Bailey, 1975), y los procesos de Markov para modelar sistemas que evolucionan aleatoriamente entre un conjunto finito de estados (Norris, 1997). La simulación estocástica mediante métodos como MonteCarlo es una herramienta importante para estudiar este tipo de modelos. (Rubinstein y Kroese, 2016).

#### **4.2.5.1. Modelo Montecarlo.**

Un modelo Montecarlo es un tipo de modelo estocástico que utiliza el muestreo aleatorio repetido para obtener la probabilidad de que se produzcan una serie de resultados en un problema complejo o incierto. El método Montecarlo fue inventado por John von Neumann y Stanislaw Ulam durante la Segunda Guerra Mundial para mejorar la toma de decisiones en condiciones de incertidumbre. (IBM, 2021).

Un modelo Montecarlo funciona de la siguiente manera: se define un rango estimado de valores para cada variable que tenga una incertidumbre inherente, se elige una distribución de probabilidad adecuada para cada variable, se generan números aleatorios entre los valores mínimo y máximo de cada variable, se calcula el resultado del problema con esos números aleatorios, se repite el proceso muchas veces para obtener una muestra grande de resultados posibles, y se analiza la distribución de probabilidad de los resultados y sus estadísticas descriptivas (media, desviación estándar, percentiles, etc.).

Los modelos Montecarlo se aplican a diversos campos como la física, la biología, la economía, la ingeniería, la informática y las ciencias sociales. Algunas ventajas de estos modelos son que permiten realizar análisis de sensibilidad y correlación entre las variables de entrada, que pueden incorporar diferentes escenarios y fuentes de incertidumbre, y que pueden generar predicciones a largo plazo con mayor precisión que los modelos deterministas. (Economipedia 2020).

#### 4.2.5.2. Modelos ARIMA

Los modelos ARIMA (Autoregressive Integrated Moving Average) son una clase de modelos estadísticos que se utilizan ampliamente para el análisis y pronóstico de series de tiempo. Fueron popularizados por los estadísticos George E. P. Box y Gwilym M. Jenkins en 1970 a través de su libro "Time Series Analysis: Forecasting and Control", considerado un clásico en la materia (Box & Jenkins, 1970).

La estructura de un modelo ARIMA se denota como ARIMA(p,d,q), donde:

p = es el orden de autorregresión, e indica que la variable dependiente se regresa sobre sus propios valores rezagados (Box et al., 2016). Captura la dependencia entre un valor y otros previos de la serie temporal.

d = es el orden de integración, e indica el grado de diferenciación de los datos raw para volverlos estacionarios (Cryer & Chan, 2008).

q = es el orden de la media móvil, e indica que la variable dependiente depende de los residuos (errores) pasados (Hanke & Wichern, 2009). Captura la dependencia entre un valor y las innovaciones aleatorias pasadas.

El proceso de construcción de un modelo ARIMA consiste en 3 etapas principales (Box & Jenkins, 1970; Hanke & Wichern, 2009):

Identificación y selección: examinar la función de autocorrelación (ACF) y autocorrelación parcial (PACF) para identificar tentativamente los órdenes p, d y q.

##### 4.2.5.2.1. Modelo ARIMA estacional (SARIMA)

Para incorporar la estacionalidad en el modelo, se añaden términos AR, I y MA específicos para cada período estacional. La expresión matemática del modelo SARIMA(p,d,q)(P,D,Q)<sub>s</sub> es:

$$\phi_p(B)\Phi_P(Bs)(1-B)^d(1-Bs)^D y_t = \theta_q(B)\Theta_Q(Bs)\epsilon_t$$

Donde:

- $y_t$  es el valor de la serie en el tiempo  $t$ .
- $\phi_p(B)$  y  $\Phi_P(B^s)$  son los polinomios de los términos autorregresivos (AR) regulares y estacionales, respectivamente.
- $\theta_q(B)$  y  $\Theta_Q(B^s)$  son los polinomios de los términos de promedio móvil (MA) regulares y estacionales, respectivamente.
- $(1 - B)^d$  y  $(1 - B^s)^D$  son las partes de diferenciación regular y estacional.
- $B$  es el operador de retraso (lag operator), tal que  $By_t = y_{t-1}$ .
- $\epsilon_t$  es el error (ruido blanco) en el tiempo  $t$ .

### 4.3. MARCO CONCEPTUAL

**Variables Aleatorias:** Una variable aleatoria desempeña la función de asignar valores numéricos a los resultados de un experimento aleatorio. (Ruiz, 2016).

**Python:** Es un lenguaje de programación de fácil sintaxis y de alto nivel, diseñado para ser de propósito general, lo que lo hace en una elección ideal tanto para principiantes como para experimentados (HubSpot, 2024).

**Librería:** Es un conjunto de funciones y rutinas predefinidas en un lenguaje de programación que simplifican el desarrollo de software al ofrecer herramientas preparadas listas para ser utilizadas (EducaOpen, 2024).

**Estación Meteorológica:** Una estación meteorológica se refiere a un sitio designado donde se llevan a cabo observaciones y mediciones precisas de varias variables meteorológicas utilizando instrumentos apropiados. El propósito de estas mediciones es comprender y registrar el comportamiento atmosférico en diferentes áreas geográficas. (IDEAM, 2005).

**Clima:** Es un conjunto cambiante de condiciones atmosféricas que se manifiestan en un área específica en un momento determinado se conoce como clima. Estas condiciones climáticas son el resultado de la interacción entre diversos factores forzantes, como el clima y sus determinantes, así como las interacciones entre los diferentes componentes del sistema climático. (IDEAM, 2005).

**Variaciones Climáticas:** Las variaciones climáticas se refieren a los cambios en las condiciones atmosféricas y climáticas, tanto a corto como a largo plazo, en una región o a nivel global. Estos cambios pueden abarcar desde fenómenos meteorológicos diarios hasta modificaciones que ocurren a lo largo de décadas o siglos. Incluyen ciclos naturales, eventos climáticos extremos, y fluctuaciones en la precipitación, temperaturas y otros factores climáticos. (IPCC 2021).

**Serie Temporal:** es un conjunto de observaciones obtenidas al medir una sola variable de manera constante a lo largo del tiempo (IBM, 2024).

**Google Earth Engine:** Es una herramienta en la nube para el análisis geoespacial que permite a los usuarios observar y estudiar imágenes satelitales (Google, 2024).

#### 4.4. MARCO CONTEXTUAL

##### 4.4.1. Localización Geográfica

El Complejo Cenagoso de Zapatosa (CCZ) se ubica en la región Caribe de Colombia, específicamente entre los departamentos de Cesar y Magdalena. Este complejo se encuentra en una zona geográfica que se halla entre la depresión Momposina y el delta del río Magdalena. Los municipios que forman parte de este complejo son Chimichagua, Tamalameque, Curumaní y Chiriguaná en el departamento de Cesar, y El Banco en el departamento de Magdalena. (Convenio Interadministrativo N<sup>o</sup> 205 Corporación Regional Autónoma del Magdalena y la Universidad del Magdalena 2017). De acuerdo con el sistema de coordenadas Magna Sirgas, la ubicación del área mencionada se encuentra entre los 9° 0' y 9° 18' de latitud Norte y los 73° 40' a 73° 56' de longitud Oeste. (IDEAM).

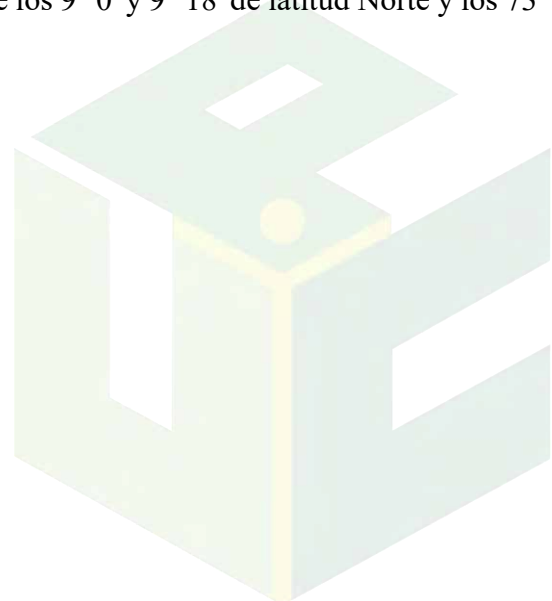
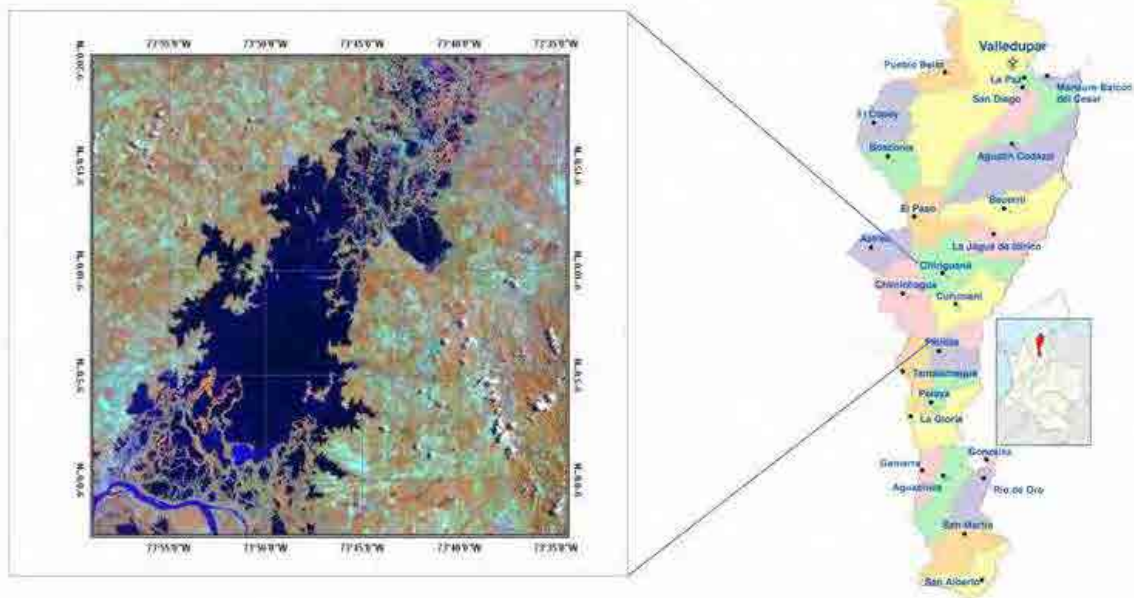


Figura 1. Localización Geográfica del Complejo Cenagoso de Zapatosa



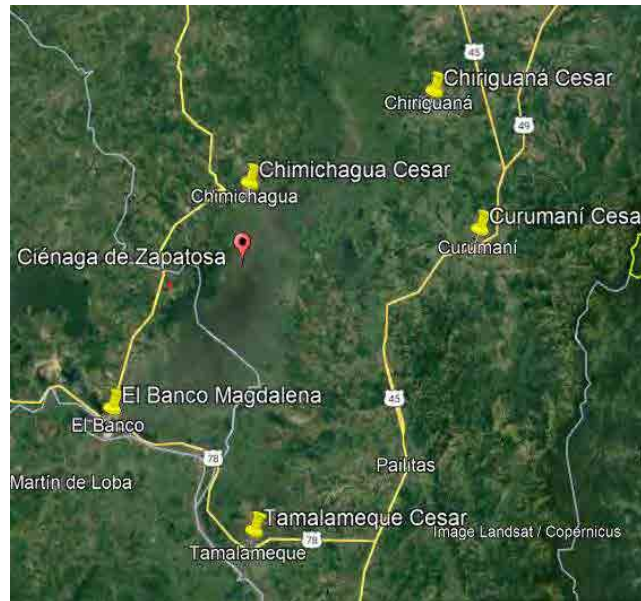
Nota: Tomado por el Autor del IDEAM y sitio web de la Gobernación del Cesar 2023

Tabla 1, Municipios con área de influencia en el Complejo Cenagoso de la Zapatosa

<b>Municipio</b>	<b>Departamento</b>	<b>Población (Hab)</b>	<b>Superficie</b>
Chimichagua	Cesar	30,289	2,147 km <sup>2</sup>
Chiriguana	Cesar	27,006	1,132 km <sup>2</sup>
Curumani	Cesar	34,838	890 km <sup>2</sup>
Tamalameque	Cesar	14,063	511.3 km <sup>2</sup>
El Banco	Magdalena	59,594	820 km <sup>2</sup>

Nota: Tomado por el Autor del DANE, Municipio.com.co (2023)

Figura 2. Localización de los Municipios dentro del área de influencia del CCZ



Nota: Tomado por el Autor del sistema de información geográfico Google Earth 2023

#### 4.4.2. Caracterización Climática

La ciénaga de Zapatosa desempeña un papel fundamental como reserva hídrica, ya que durante las épocas de lluvia acumula agua y posteriormente la libera hacia la depresión Momposina en las épocas de sequía. Su función como sistema de regulación de caudales es especialmente importante durante las crecidas, permitiendo mitigar y controlar los flujos de agua en estos periodos (Viloria, 2008).

En términos de épocas o temporadas climáticas, la ciénaga de Zapatosa muestra variaciones significativas en la profundidad promedio a lo largo del año. Durante la temporada seca, específicamente en febrero, se observa el promedio mínimo de profundidad. En contraste, durante la temporada de lluvias, que abarca el mes de mayo, se registra el promedio máximo de profundidad. En cuanto a las precipitaciones anuales, oscilan entre 1600 mm y 2000 mm en promedio. Durante el periodo comprendido entre agosto y noviembre, se presenta la mayor pluviosidad, siendo octubre el mes más lluvioso de todos. Por otro lado, el periodo más seco ocurre entre diciembre y marzo, siendo enero el mes con menor cantidad de precipitaciones. Además, se presenta un segundo periodo seco en el mes de julio. El clima general de la subregión se clasifica como cálido, y las temperaturas promedio varían entre los 28°C y 32°C. (Viloria en 2008).

#### 4.4.3. *Caracterización Hidrológica*

El análisis de la dinámica río-ciénaga-río, aunque complejo, debe enfocarse en la interrelación entre la ciénaga de Zapatosa y los ríos Cesar y Magdalena. Es crucial resaltar el papel regulador que desempeña la ciénaga, ya que actúa como un amortiguador durante las crecientes de los ríos Cesar y Magdalena. Esto es especialmente relevante en el caso del río Magdalena debido a su magnitud, ya que una creciente de gran intensidad podría tener un efecto devastador aguas abajo, afectando a la población de El Banco y la región de la depresión Momposina hasta su desembocadura en el mar Caribe, tanto a lo largo de su cauce principal como en el canal del Dique. (IDEAM)



#### 4.5. MARCO LEGAL

Tabla 2. Normativa Aplicable

<b>Normativa</b>	<b>Descripción</b>	<b>Aplicación</b>
Constitución política de Colombia de 1991	Artículo 79. Todas las personas tienen derecho a gozar de un ambiente sano. La ley garantizará la participación de la comunidad en las decisiones que puedan afectarlo. Es deber del Estado proteger la diversidad e integridad del ambiente, conservar las áreas de especial importancia ecológica y fomentar la educación para el logro de estos fines.	El Estado Colombiano tiene la responsabilidad de proteger la diversidad y la integridad del medio ambiente. Además, está encargado del sostenimiento, conservación, restauración y sustitución de los recursos naturales, tal como se establece en la Carta Magna.
Ley 99 de 1993	por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental, SINA, y se dictan otras disposiciones.	Las entidades tienen funciones claramente definidas en lo que concierne a la vigilancia y garantías para el cuidado de las actividades y procesos relacionados con el servicio de aseo.
Ley 1931 de 2018	La presente ley tiene por objeto establecer las directrices para la gestión del cambio climático en las decisiones de las personas públicas y privadas, la concurrencia de la Nación, Departamentos, Municipios, Distritos, áreas Metropolitanas y Autoridades	Es esencial tener en cuenta esta normativa al momento de establecer las medidas de adaptación al cambio climático y la mitigación de gases de efecto invernadero (GEI).

<b>Normativa</b>	<b>Descripción</b>	<b>Aplicación</b>
	Ambientales principalmente en las acciones de adaptación al cambio climático, así como en mitigación de gases efecto invernadero.	
Ley 1753 de 2015	Por la cual se adopta la política nacional de gestión del riesgo de desastres y se establece el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres y se dictan otras disposiciones.	Las medidas de adaptación al cambio climático y la mitigación de gases de efecto invernadero (GEI) se implementan como respuesta a los cambios observados o esperados del clima y su variabilidad.
Ley 1844 de 2017	Por medio de la cual se aprueba el “Acuerdo de París”, adoptado el 12 de diciembre de 2015, en París, Francia.	El objetivo principal es fortalecer la respuesta global ante la amenaza del cambio climático, en el marco del desarrollo sostenible.
Ley 1523 de 2012	Por el cual se adopta la política nacional de gestión del riesgo de desastres y se establece el sistema nacional de gestión del riesgo de desastres y se dictan otras disposiciones.	Se crea la política nacional de gestión del riesgo de desastres y el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres, orientados a prevenir y mitigar los efectos de los eventos desfavorables relacionados con el cambio climático.

<b>Normativa</b>	<b>Descripción</b>	<b>Aplicación</b>
Ley 164 de 1994	Por medio de la cual se aprueba la "Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático", hecha en Nueva York el 9 de mayo de 1992.	Su intención es lograr la estabilización de las concentraciones de GEI en la atmósfera a un nivel que prevenga intervenciones humanas peligrosas en el sistema climático.
Ley 164 de 1994	Por medio de la cual se aprueba la "Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático", hecha en Nueva York el 9 de mayo de 1992.	El propósito es alcanzar la estabilización de las concentraciones de GEI en la atmósfera, a un nivel que evite interferencias antropogénicas peligrosas en el sistema climático.
Ley 629 de 2000	Por medio de la cual se aprueba el "Protocolo de Kyoto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático", hecho en Kyoto el 11 de diciembre de 1997.	Que ratifica el Protocolo de Kyoto de la Convención Marco de la ONU sobre el Cambio Climático, el cual establece compromisos obligatorios para que los países desarrollados disminuyan sus emisiones de GEI
Decreto 298 de 2016	Por el cual se establece la organización y funcionamiento del Sistema Nacional de Cambio Climático y se dictan otras disposiciones	Se tiene en cuenta para hacer seguimiento y evaluar las políticas de adaptación al cambio climático.

<b>Normativa</b>	<b>Descripción</b>	<b>Aplicación</b>
Decreto 2811 de 1974	Por el cual se dicta el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente.	Busca garantizar la preservación y restauración del medio ambiente, con criterios de equidad que promuevan un desarrollo equilibrado tanto para el ser humano como para estos recursos.
Resolución 1447 de 2018	Por la cual se reglamenta el sistema de monitoreo, reporte y verificación de las acciones de mitigación a nivel nacional de que trata el Artículo 175 de la Ley 1753 de 2005, y se dictan otras disposiciones.	El objetivo principal es establecer la reglamentación del sistema de monitoreo, reporte y verificación de las acciones de mitigación a nivel nacional.
Política Nacional de Cambio Climático	La política organiza la gestión del cambio climático en Colombia para influir en las decisiones públicas y privadas más relevantes y que definen la senda del desarrollo del país, con el fin de integrar a estas decisiones consideraciones de adaptación y mitigación de Gases de Efecto Invernadero.	El objetivo es fomentar una gestión del cambio climático que favorezca un desarrollo con bajas emisiones de carbono y sea resistente al clima, con el propósito de disminuir los riesgos asociados al deterioro provocado por los impactos del cambio climático.
Política Nacional para la Gestión	Tiene como objetivo guiar la implementación de políticas gubernamentales relacionadas con los recursos hídricos mediante la	La política define planes y acciones para gestionar el recurso hídrico en el país durante 12 años, incluyendo la formulación de políticas y planes

<b>Normativa</b>	<b>Descripción</b>	<b>Aplicación</b>
de los Recursos Hídrico	integración del crecimiento económico, social y la protección de los ecosistemas.	hídricos nacionales, regulaciones y programas para asegurar la cantidad y calidad adecuada del agua.
Política Nacional para Humedales Interiores de Colombia	Busca la conservación y el uso sostenible de los humedales interiores del país, protegiendo estos ecosistemas vitales para el bienestar ambiental y socioeconómico de la nación	La política se aplica a través de estrategias y acciones que incluyen el manejo y uso racional de los recursos hídricos, la restauración de ecosistemas degradados, y la promoción de la investigación y educación ambiental.
CONPES 3700 de 2011	Estrategia Institucional para la articulación de políticas y acciones en materia de cambio climático en Colombia.	Tiene como objetivo establecer una estrategia institucional en la articulación de políticas y acciones relacionadas con el cambio climático en Colombia, con el fin de fortalecer la capacidad de respuesta tanto del Estado como de la sociedad frente a este fenómeno.

Nota: Tomado por el Autor (2023) de la página oficial del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible y del Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, sección Normativa.

## 5. MARCO METODOLÓGICO

### 5.1. LÍNEA, SUBLÍNEA Y ÁREA TEMÁTICA DE INVESTIGACIÓN

Este proyecto se enmarca en la línea de investigación "Sostenibilidad y Gestión Ambiental", específicamente en la sublínea de investigación "Seguridad y salud en el trabajo, sistemas de gestión y gestión del riesgo", y pertenece al área temática de investigación "mediciones ambientales". Estas categorías fueron establecidas en el acuerdo No. 003 del 08 de julio de 2021, emitido por la Universidad Popular del Cesar (UNICESAR), titulado "por medio del cual se adoptan las líneas de investigación de los programas de Pregrado de la Facultad de Ingeniería y Tecnológicas sede Valledupar, y se dictan otras disposiciones" (UNICESAR, 2021).

### 5.2. ENFOQUE DE LA INVESTIGACIÓN

De acuerdo con el libro "Metodología de la Investigación: Rutas Cuantitativa, Cualitativa y Mixta" de Hernández S. (2018), el enfoque de investigación utilizado en este trabajo es cuantitativo. Esto se debe a que se basa en el análisis de secuencias procesales de información numérica primaria, fundamentada a partir de una base de datos que permite llegar a conclusiones sobre relaciones temporales, como es el caso de la información de estaciones meteorológicas. El enfoque cuantitativo se centra en la recopilación y análisis de datos numéricos para obtener conclusiones objetivas y basadas en evidencia.

### 5.3. ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN

De acuerdo con el libro Metodología de la Investigación de Hernández S. (2014) el alcance de esta investigación es explicativo, ya que busca examinar la relación estadística entre variables cuantitativas en un contexto específico. El objetivo es conocer cómo se comportan y vinculan las variables, para lo cual se realiza un análisis inicial exploratorio de los datos que permite identificar posibles correlaciones, estableciendo relaciones causales, mediante la cuantificación el grado de asociación entre las variables analizadas.

#### 5.4. POBLACIÓN DE ESTUDIO

La población de estudio para este trabajo corresponde al Complejo Cenagoso de la Zapatosa y se usaron como muestra las estaciones meteorológicas que miden variables como la precipitación. A partir de esta información, se estimó los datos provenientes de la plataforma de Consulta y Descarga de Datos Hidrometeorológicos del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) para el año 2023, en cuanto a los datos de temperatura se obtuvieron a partir de la plataforma Google Earth Engine mediante dataset ERA5 LAND de la ECMWF para las mismas coordenadas de las estaciones de precipitación en el periodo de tiempo. Estas estaciones fueron objeto de análisis y estudio para comprender las relaciones y patrones relacionados con las variables meteorológicas mencionadas.

#### 5.5. MUESTRA POBLACIONAL

La selección de la muestra para este trabajo de investigación es no probabilística dirigida y a criterio del investigador. Esto se debe a que la elección de las estaciones meteorológicas depende de factores como la antigüedad de la información y la calidad de los datos. El investigador escogió las estaciones más representativas y confiables, que contaron con una calificación y nivel de aprobación adecuados con al menos veinte años de información disponible.

En la plataforma DHIME, que es utilizada para la exploración de datos hidrometeorológicos del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), se consideran potencialmente varias estaciones que cumplen con los criterios establecidos. Estas estaciones son relevantes para el estudio y análisis de la información relacionada con el trabajo de investigación:

Tabla 3. Muestra de estudio estaciones meteorológicas – Precipitación.

Municipio	Estación	Código
Chimichagua-Cesar	EL CANAL	25020240
Chimichagua-Cesar	CHIMICHAGUA	25021240
Chimichagua-Cesar	SALOA	25020270
Chimichagua-Cesar	HDA EL TERROR	25020650

Municipio	Estación	Código
Tamalameque-Cesar	TAMALAMEQUE	25020090
Curumaní-Cesar	CURUMANI	25020250
Curumaní-Cesar	POPONTE	25020690
Curumaní-Cesar	PRIMAVERA	25020920
Curumaní-Cesar	ZAPATOSA	25020660
Chiriguaná-Cesar	CHIRIGUANA	25025250
Chiriguaná-Cesar	RINCOHONDO	25020260
El Banco-Magdalena	ARPTO LAS FLORES	25025090
El Banco-Magdalena	LOS NEGRITOS	25021200

Nota: Elaborado por el Autor 2023

Tabla 4, Muestra de estudio estaciones meteorológicas-Temperatura

El Banco-Magdalena	ARPTO LAS FLORES	25025090
Chiriguaná-Cesar	CHIRIGUANA	25025250

Nota Elaborado por el Autor 2024

Tabla 5, Muestra de estudio estaciones meteorológicas-Temperatura Google Earth Engine

Municipio	Estación	Código
Chimichagua-Cesar	EL CANAL	25020240
Chimichagua-Cesar	CHIMICHAGUA	25021240
Chimichagua-Cesar	SALOA	25020270
Chimichagua-Cesar	HDA EL TERROR	25020650
Tamalameque-Cesar	TAMALAMEQUE D C	25021590
Tamalameque-Cesar	TAMALAMEQUE	25020090
Curumaní-Cesar	CURUMANI D C	25021580
Curumaní-Cesar	CURUMANI	25020250

Municipio	Estación	Código
Curumaní-Cesar	POPONTE	25020690
Curumaní-Cesar	PRIMAVERA	25020920
Curumaní-Cesar	ZAPATOSA	25020660
Chiriguana-Cesar	RINCOHONDO	25020260
El Banco-Magdalena	LOS NEGRITOS	25021200
El Banco-Magdalena	EL BANCO	25025010

Nota: Elaborado por el Autor 2024

## 5.6. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

El diseño de investigación utilizado en este trabajo fue analítico, el cual buscó determinar si existía una relación causa-efecto entre las dos variables de interés, controlando posibles factores confusores. Requiere grupos de comparación, secuencia temporal correcta, idealmente aleatorización, y análisis estadísticos. Se implementaron pruebas estadísticas para determinar la homogeneidad, consistencia y calidad de los datos, además de detectar datos atípicos y aplicar correcciones basadas en la media y desviación estándar de los datos. También se estimaron datos faltantes considerando variables como la latitud y longitud de las estaciones meteorológicas, la corriente hídrica a la cual pertenecía y las distancias entre estaciones.

Las variables de control fueron las ya mencionadas: precipitación y temperatura. Estas variables se mantuvieron constantes para garantizar que los resultados de la investigación fueran atribuibles a un análisis fiable.



## 5.7. ESTRATEGIA Y DESARROLLO METODOLÓGICO

*Fase I - Realizar Análisis Exploratorio De Los Datos De Variables Meteorológicas Históricas A Partir De Las Estaciones Del IDEAM presentes en los Municipios con área de influencia del Complejo Cenagoso de la Zapatosa*

### **Actividad 1.1. Obtención De los Datos Meteorológicos.**

**Descripción:** Se realizó la obtención de los datos mensuales de precipitación (mm) y temperatura media (°C) para las 13 estaciones meteorológicas del IDEAM con influencia directa e indirecta en el Complejo Cenagoso de La Zapatosa, abarcando el periodo del 1 de enero de 1990 al 1 de enero de 2022. Para la precipitación, se identificaron y revisaron las estaciones activas del IDEAM en la zona, verificando la consistencia de sus registros, y los datos se descargaron mes a mes desde la plataforma DHIME en formato CSV. Por otro lado, algunas estaciones listadas en la tabla 5 no contaban con datos de temperatura, lo que llevó a emplear ERA5-Land, un conjunto público de alta resolución del Centro Europeo de Previsiones Meteorológicas a Medio Plazo (ECMWF), accesible mediante Google Earth Engine. En este caso, se seleccionó un punto representativo en las coordenadas de cada estación sin datos para completar la información de temperatura faltante.

### **Actividad 1.2. Resumen Estadístico Previo.**

**Descripción:** Una vez descargados los datos, se utilizó la función `.describe()` de la librería Pandas en Python para generar un resumen estadístico de cada serie temporal de las variables meteorológicas. Este análisis permitió obtener una visión general de la integridad de los datos, incluyendo el número total de datos, media, desviación estándar, cuartiles (Q1 a Q3), y los valores mínimos y máximos.

### **Actividad 1.3. Tratamiento de los Datos.**

**Descripción:** Una vez obtenidos los datos se llevó a cabo su análisis estadístico utilizando librerías de Python como Pandas, Numpy, Sklearn y Matplotlib, con las que se realizó una exploración inicial de los datos, calculando medidas de resumen para detectar valores atípicos y graficando series de tiempo para identificar vacíos o inconsistencias. Los datos faltantes fueron completados mediante la técnica IDW (Inverse Distance Weighted), que se basa en la premisa de que los valores cercanos son más similares entre sí que los lejanos, en combinación con el método de Haversine para calcular la distancia entre estaciones con datos conocidos y aquellos con datos faltantes. Posteriormente, se aplicó la prueba de Levene, una

prueba estadística para evaluar diferencias significativas en las varianzas entre la serie de tiempo original y la serie imputada, comúnmente utilizada en el análisis de varianza (ANOVA) para evaluar la homogeneidad de las varianzas. Todo el proceso fue documentado en informes técnicos que incluyen gráficas y medidas de resumen antes y después del tratamiento.

***Fase II – Evaluar El Impacto Del Cambio Climático Con Proyecciones A (2030, 2040) En La Alteración De Las Variables Climatológicas De Precipitación Y Temperatura En El Sistema Cenagoso De La Zapatosa***

**Actividad 2.1. Implementación del Modelo Estocástico.**

**Descripción:** Se implementaron modelos estocásticos probabilísticos de la familia ARIMA (Modelo autorregresivo integrado de media móvil, siglas traducidas al español) para proyectar el comportamiento futuro de la precipitación y temperatura en cada estación, mediante la creación de números aleatorios probabilísticos empleando el método Montecarlo. Se calibrarán exhaustivamente los parámetros  $p$ ,  $d$  y  $q$  optimizando métricas de bondad de ajuste. Se validó rigurosamente el desempeño de los modelos utilizando métricas como el AIC (Criterio de Información de Akaike) como criterio de selección, con el objetivo de determinar el modelo que mejor se adecue a los datos, reduciendo el error de predicción y previniendo la sobreparametrización.

**Actividad 2.2. Generación de la Serie de Tiempo Sintética**

**Descripción:** Se utilizaron modelos SARIMA modelos estacionales de la familia ARIMA calibrados en parámetros  $(p,d,q)$  para la parte no estacional y  $(P,D,Q)$  para la parte estacional de cada una, se generaron al menos 1000 escenarios futuros posibles (caminatas aleatorias o iteraciones) de las variables hasta el 2040 para cada estación. Se agruparon mediante la técnica de clusterización aquellos escenarios más comunes y de mayor probabilidad de ocurrencia y variación con respecto al periodo histórico.

**Actividad 2.3. Representación Geoespacial de**

**Descripción:** Se utilizó el software ArcGIS Pro para la representación geoespacial de los resultados, generando mapas detallados de precipitación y temperatura tanto para el periodo histórico como para el periodo proyectado de 2022 a 2040, basados en las series simuladas con mayor probabilidad. Estos mapas permitieron comparar las condiciones históricas y futuras,

analizando los cambios esperados en el periodo proyectado respecto al histórico y determinando las áreas con mayor afectación a futuro.

***Fase III - Establecer El Marco De Análisis De Los Resultados Conforme A La Tercera Comunicación Nacional Del Cambio Climático (TCNCC) De Los Indicadores Del NDC Colombia Para El Complejo Cenagoso de la Zapatosa***

**Actividad 3.1. Revisión de los indicadores del TCNCC**

**Descripción:** Se llevó a cabo una revisión de las tablas recapitulativas de cada uno de los municipios del área del complejo cenagoso de la Zapatosa, identificando los indicadores biofísicos correspondientes. Posteriormente, se consultó la tabla final de los indicadores, en la cual se cotejaron los códigos con sus respectivos nombres, permitiendo así una descripción detallada de cada uno en cada ítem como Amenaza, Sensibilidad y Capacidad Adaptativa.

**Actividad 3.2. Incidencia sobre los Indicadores Biofísicos**

**Descripción:** Se evaluó rigurosamente la incidencia de los cambios simulados en indicadores biofísicos, identificando impactos potenciales en ecosistemas y comunidades. El análisis detallado de los resultados, basado en la Tercera Comunicación Nacional del Cambio Climático (TCNCC) de Colombia, se centró en indicadores de seguridad alimentaria, recursos hídricos, biodiversidad y servicios ecosistémicos, con enfoque específico en el Complejo Cenagoso de la Zapatosa.

**Actividad 3.3. Análisis de la Política Nacional de Humedales Interiores de Colombia**

**Descripción:** Se revisó la Política Nacional de Humedales Interiores de Colombia y se analizó la relación de sus estrategias con el manejo y conservación con el Complejo Cenagoso de la Zapatosa, considerando la importancia de integrar este ecosistema de humedales en los procesos de planificación territorial de los municipios de su área de influencia. Se destacó la necesidad de promover la conservación, fomentar la participación comunitaria y sensibilizar a la población sobre la importancia del ecosistema. Este análisis evaluó cómo las estrategias de la política pueden fortalecer la resiliencia del complejo frente a la variabilidad climática, subrayando la relevancia de la investigación y el monitoreo para adaptar las acciones de manejo a las dinámicas ambientales locales.

## 6. ANALISIS Y RESULTADOS

### 6.1. ANÁLISIS EXPLORATORIO DE LOS DATOS HISTORICOS DE PRECIPITACIÓN Y TEMPERATURA CADA UNA DE LAS ESTACIONES DEL IDEAM SELECCIONADAS EN LOS MUNICIPIOS DEL AREA DE INFLUENCIA DEL COMPLEJO CENAGOZO DE LA ZPATOSA.

#### 6.1.1. *Obtención de los datos meteorológicos de precipitación y temperatura*

Para la obtención de los datos meteorológicos de precipitación y temperatura se realizó mediante el uso de dos plataformas que proveen estos datos como la plataforma web DHIME del IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales) para la obtención los datos de precipitación y temperatura, debido que la mayoría de las estaciones no había disponibilidad de los datos de temperatura se optó por hacer uso de la plataforma GEE (Google Earth Engine) la cual es una plataforma de análisis geoespacial basada en la nube, el procedimiento se llevó a cabo de la siguiente manera.

Nota: El procedimiento que se describe a continuación es genérico es válido para las fechas en la cuales se hicieron las consultas de los datos, por lo cual este mismo podría ser sujeto a cambios en el futuro.

Para la plataforma DHIME se procedió a consultar los datos meteorológicos de la siguiente manera:

- **Acceder al sitio web:** Se procedió a acceder al sitio web de la plataforma DHIME (<http://dhime.ideam.gov.co>).
- **Navegación por el sitio web:** Se navegó por el sitio web de la plataforma hasta localizar la barra de navegación ubicado en la zona lateral izquierda.
- **Barra de navegación:** Dentro de las opciones disponible en la barra de navegación se accede a la opción de consulta.
- **Selección de opciones:** Una vez que se ha accedido dentro de la opción de consulta se despliega un menú con las siguientes opciones: Periodo, parámetro y dato estación.
- **Selección de datos:** Luego se seleccionó el periodo de la serie de tiempo correspondiente a las fechas 01/01/1990 a 01/01/2022, el parámetro de los

datos ya sea para precipitación o temperatura para este caso y por último se selecciona el departamento y municipio para las estaciones de interés.

- **Selección de descargas:** Una vez seleccionado el periodo, parámetro y departamento y municipio de interés se le da click en el botón DESCARGAR el cual permite que se descargue la serie histórica de los datos de precipitación y temperatura en formato CSV para su respectivo análisis.

Las variables que se obtuvieron mediante el procedimiento anteriormente descrito corresponden para precipitación total mensual y temperatura media del aire mensual total para las siguientes estaciones en las tablas a continuación.

Tabla 3. Estaciones datos meteorológicos de precipitación plataforma DHIME.

Municipio	Estación	Código
Chimichagua-Cesar	EL CANAL	25020240
Chimichagua-Cesar	CHIMICHAGUA	25021240
Chimichagua-Cesar	SALOA	25020270
Chimichagua-Cesar	HDA EL TERROR	25020650
Tamalameque-Cesar	TAMALAMEQUE D C	25021590
Tamalameque-Cesar	TAMALAMEQUE	25020090
Curumaní-Cesar	CURUMANI D C	25021580
Curumaní-Cesar	CURUMANI	25020250
Curumaní-Cesar	POPONTE	25020690
Curumaní-Cesar	PRIMAVERA	25020920
Curumaní-Cesar	ZAPATOSA	25020660
Chiriguaná-Cesar	CHIRIGUANA	25025250
Chiriguaná-Cesar	RINCOHONDO	25020260
El Banco-Magdalena	ARPTO LAS FLORES	25025090
El Banco-Magdalena	LOS NEGRITOS	25021200
El Banco-Magdalena	EL BANCO	25025010

Nota: Elaborada por el autor 2024

Tabla 4. Estaciones únicas con datos meteorológicos Temperatura plataforma DHIME.

Municipio	Estación	Código
El Banco-Magdalena	ARPTO LAS FLORES	25025090
Chiriguaná-Cesar	CHIRIGUANA	25025250

Nota: Elaborado por el autor 2024

Para solucionar el problema de falta de datos de temperatura para la mayoría de las estaciones para estaciones del IDEAM, se optó por hacer uso de la plataforma Google Earth Engine seleccionando una geometría de punto para cada una de las coordenadas de las estaciones del IDEAM en las cuales se presentó la inexistencia de los datos de temperatura se el procedimiento se realizó de la siguiente manera:

- **Se hace la definición de un Punto Geográfico:** Se definió una geometría de punto utilizando `ee.Geometry.Point`, proporcionando las coordenadas longitudinales y latitudinales de cada una de las estaciones. Este punto sirve como el centro de todas las operaciones de análisis espacial que siguen.
- **Selección del Conjunto de Datos de Temperatura:** Se accedió a un conjunto de imágenes de temperatura mensual agrupadas ('ECMWF/ERA5\_LAND/MONTHLY\_AGGR') a través de la colección de imágenes de GEE. Este conjunto de datos se filtró para el rango de fechas entre el 1 de enero de 1990 y el 1 de enero de 2022. Se seleccionó específicamente la banda 'temperature\_2m', que representa la temperatura a 2 metros sobre la superficie de la Tierra.
- **Extracción de la Temperatura:** Se definió una función `extractTemperature` que procesa cada imagen (mes) en la colección para extraer la temperatura media en el punto definido. Esto se logra mediante `reduceRegion`, que reduce la información de la imagen en la región del punto a un solo valor, utilizando un promedio como reductor. El tamaño del píxel para esta operación se establece en 1000 metros. La temperatura extraída está inicialmente en Kelvin, por lo que se convierte a Celsius restando 273.15.
- **Creación de una Serie Temporal de Temperatura:** La función `extractTemperature` se aplicó a cada imagen en el conjunto de datos de temperatura utilizando `map()`. Esto produce una colección de `ee.Feature` donde cada elemento representa la temperatura media mensual en Celsius en el punto de interés, asociado con su fecha correspondiente.
- **Exportación de los Datos:** Finalmente, la colección de series temporales de temperatura se exportó a Google Drive en formato CSV. La exportación incluye una descripción, el formato de archivo ('CSV'), y el nombre de la carpeta de destino.

Este procedimiento ilustra cómo se puede utilizar GEE para procesar y analizar datos de temperatura a lo largo del tiempo en una ubicación específica, el procedimiento se realizó para siguientes estaciones en la tabla a continuación.

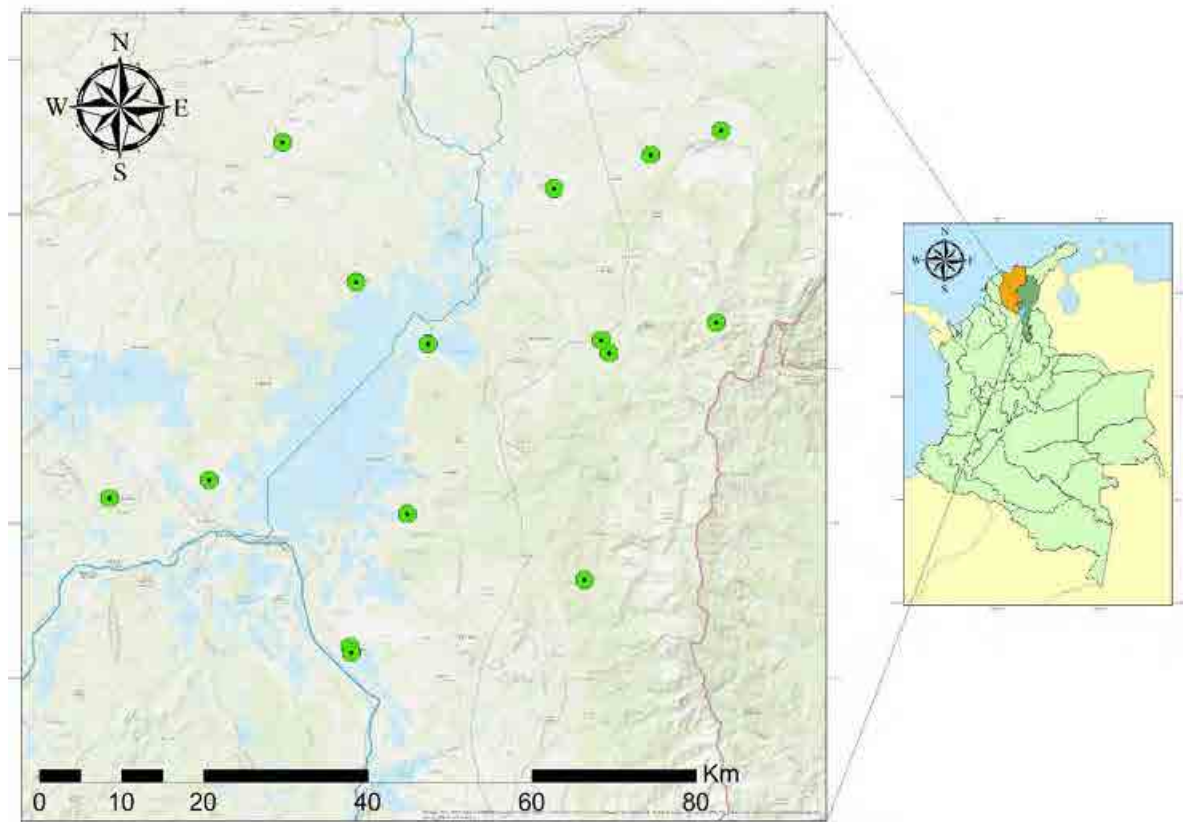
Tabla 5. Estaciones datos meteorológicos Plataforma GEE

Código	Nombre	Latitud	Longitud	Altitud m
25020240	EL CANAL	9.41047222	-73.890417	70
25021240	CHIMICHAGUA	9.26008333	-73.809861	138
25020270	SALOA [25020270]	9.19316667	-73.731306	90
25020650	HACIENDA EL YERROR	8.93877778	-73.560222	250
25020250	CURUMANI	9.19719444	-73.541944	100
25020690	POPONTE	9.42327778	-73.410944	500
25020920	PRIMAVERA LA	9.21666667	-73.416667	500
25020660	ZAPATOZA	9.00975	-73.754028	90
25025250	CHIRIGUANA	9.36102778	-73.593389	40
25020260	RINCONHONDO	9.39702778	-73.488028	100
25025090	AEROPUERTO LAS FLORES	9.04633333	-73.970833	34
25021200	NEGRITOS LOS	9.02666667	-74.079444	26
25020090	TAMALAMEQUE	8.86038889	-73.815444	20

Nota: Elaborado por el autor (2024)



Figura 3. Mapa Ubicación Estaciones Meteorológicas CCZ



**Nota:** Elaborado por el Autor (2024) mediante el software ArcMap

En el siguiente capítulo se presentará un resumen estadístico preliminar de cada una de las estaciones acompañado de su gráfico de Líneas tanto para las variables de precipitación y como de temperatura.



### 6.1.1.1. Variable de Precipitación

A continuación, se presenta el resumen estadístico para las estaciones meteorológicas para el municipio de Chimichagua Cesar.

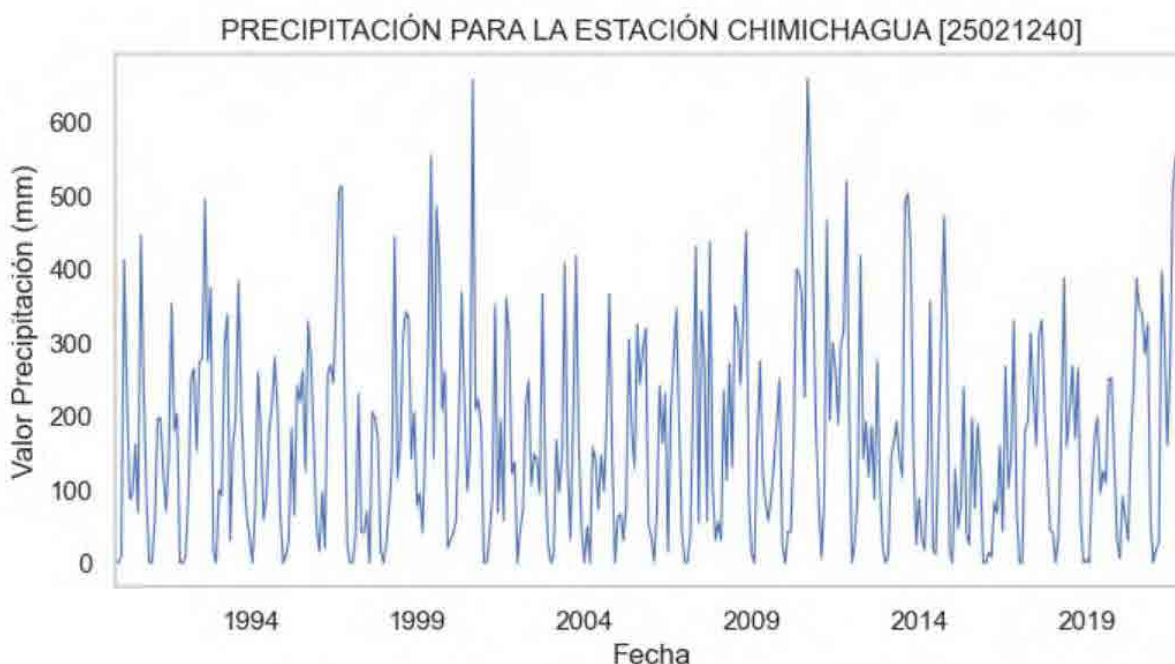
El resumen estadístico para la estación CHIMICHAGUA [25021240] se presenta en la siguiente tabla.

Tabla 6. Resumen estadístico Chimichagua [25021240]

CHIMICHAGUA [25021240]	
Count	385
mean	167.76046
std	141.940995
min	0
25%	46.5
50%	142.9
75%	257
max	659.4

Nota: Elaborado por el autor 2024 a partir de los datos obtenido en el archivo CSV descargado de la plataforma del IDEAM DHIME

Figura 4. Evolución Temporal de la Precipitación en la Estación CHIMICHAGUA [25021240]



Nota: Elaborado por el Autor 2024 mediante la herramienta de Jupyter Notebook con Python

[www.unicesar.edu.co](http://www.unicesar.edu.co)

Teléfono conmutador PBX: (+57 605 588 5592)

Balneario Hurtado, Vía a Patillal

Valledupar – Cesar, Colombia

El resumen estadístico para la estación SALOA [25020270] se presenta en la siguiente tabla.

Tabla 7. Resumen Estadístico para la estación SALOA [25020270]

SALOA[25020270]	
Count	381
mean	171.046
std	146.0476
min	0
25%	48
50%	138
75%	263
max	627

Nota: Elaborado por el Autor 2024 mediante los datos obtenidos en el archivo CSV descargado de la plataforma del IDEAM DHIME.

Figura 5. Evolución Temporal de la Precipitación en la Estación SALOA [25020270]



Nota: Elaborado por el Autor 2024 mediante la herramienta Jupyter Notebook con Python.

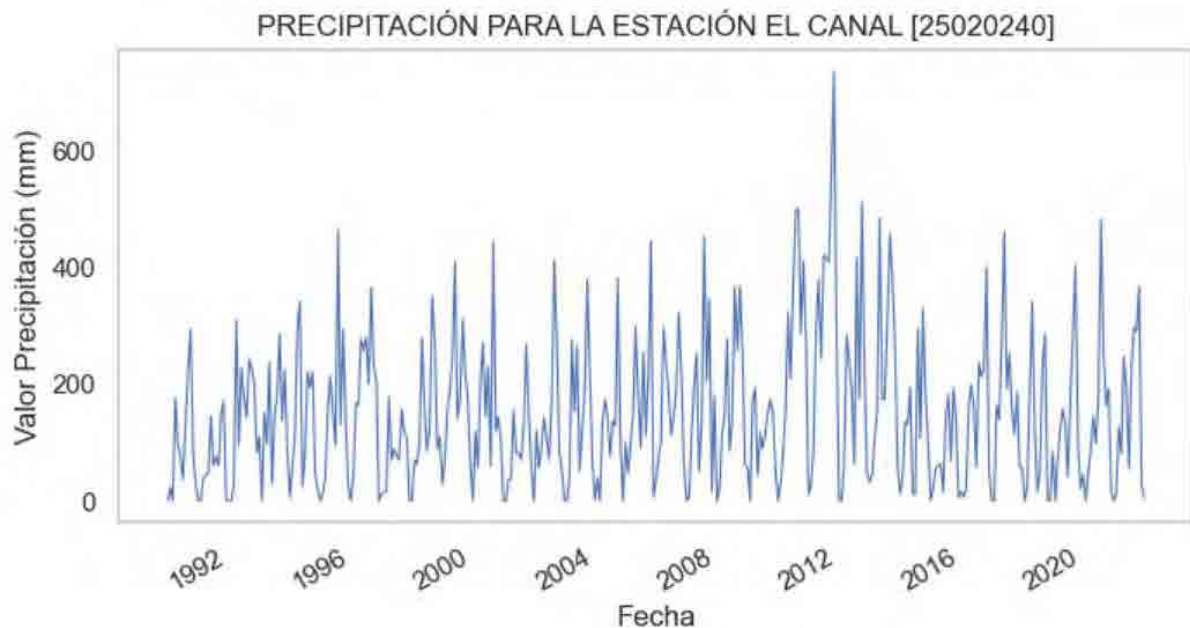
El resumen estadístico para la estación EL CANAL [25020240] se presenta en la siguiente tabla.

Tabla 8. Resumen estadístico para la estación EL CANAL [25020240]

CANAL[25020240]	
Count	383
mean	148.185379
std	125.44193
min	0
25%	49.5
50%	128
75%	219
max	735

Nota: Elaborado por el 2024 mediante los datos obtenidos en el archivo CSV descargado de la plataforma del IDEAM DHIME.

Figura 6. Evolución Temporal de la Precipitación en la Estación EL CANAL [25020240]



Nota: Elaborado por el Autor 2024 mediante la herramienta Jupyter Notebook con Python.

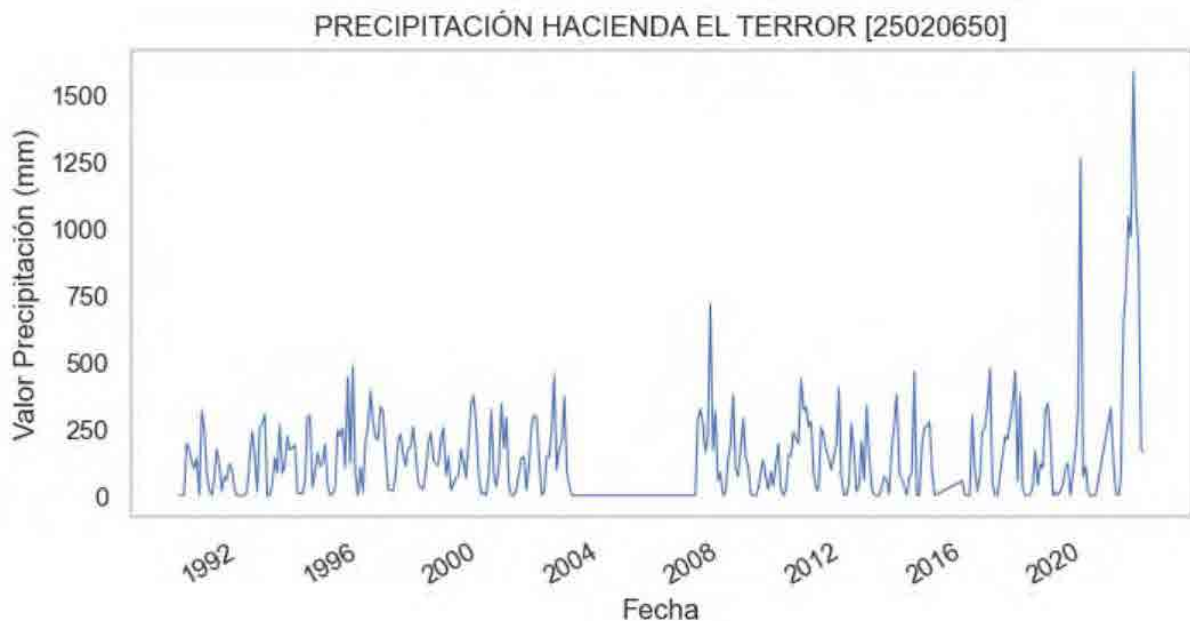
El resumen estadístico para la estación HACIENDA EL TERRO [25020650] se presenta en la siguiente tabla.

Tabla 9. Resumen estadístico para la estación HACIENDA EL TERROR [25020650]

HACIENDA EL TERROR[25020240]	
Count	322
mean	154.552174
std	190.96664
min	0
25%	23.775
50%	110
75%	220.75
max	1585

Nota: Elaborado por el Autor 2024 mediante la herramienta Jupyter Notebook con Python.

Figura 7. Evolución Temporal de la Precipitación en la Estación HACIENDA EL TERROR [25020650]



Nota: Elaborado por el Autor 2024 mediante los datos obtenidos en el archivo CSV descargado de la plataforma del IDEAM DHIME.

A continuación, se presenta el resumen estadístico para las estaciones meteorológicas para el municipio de Chiriguana Cesar.

El resumen estadístico para la estación Chimichichagua [25021240] se presenta en la siguiente tabla.

Tabla 10. Resumen estadístico para la estación CHIRIGUANA [25025250]

CHIRIGUANA [25025250]	
Count	335
mean	137,212,836
std	119.067942
min	0
25%	32.15
50%	115.4
75%	196.6
max	549.9

Nota: Elaborado por el Autor 2024 mediante los datos obtenidos en el archivo CSV descargado de la plataforma del IDEAM DHIME.

Figura 8. Evolución Temporal de la Precipitación en la Estación CHIRIGUANA [25025250]



Nota: Elaborado por el Autor 2024 mediante la herramienta Jupyter Notebook con Python.

El resumen estadístico para la estación RINCOHONDO [25020260] se presenta en la siguiente tabla.

Tabla 11. Resumen estadístico para la estación RINCONHONDO [25020260]

RINCONHONDO [25020260]	
Count	376
mean	231
std	176.831909
min	0
25%	99.75
50%	211
75%	339
max	1163

Elaborado por el Autor 2024 mediante los datos obtenidos en el archivo CSV descargado de la plataforma del IDEAM DHIME

Figura 9. Evolución Temporal de la Precipitación en la Estación RICONHONDO [25020260]



Nota: Elaborado por el Autor mediante la herramienta Jupyter Notebook con Python (2024).

A continuación, se presenta el resumen estadístico para las estaciones del Municipio de Curumani Cesar.

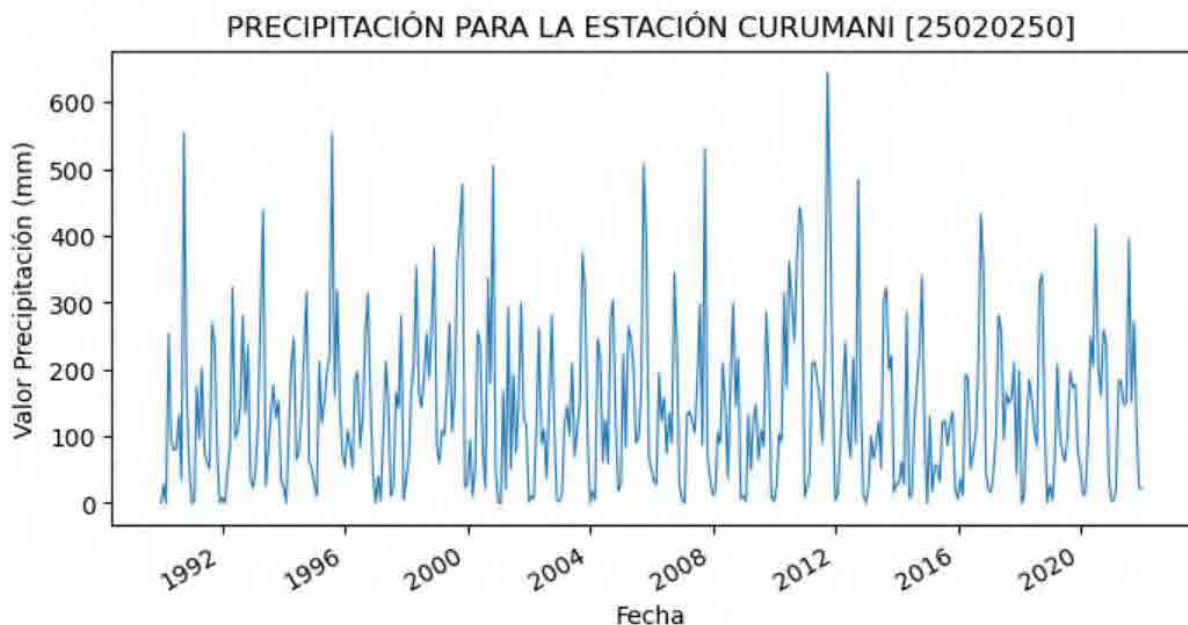
El resumen estadístico para la estación CURUMANI [25025250] se presenta en la siguiente tabla.

Tabla 12. Resumen estadístico para la estación CURUMANI [25020250.]

CURUMANI [25025250]	
Count	382
mean	139
std	119.524093
min	0
25%	45.475
50%	111.2
75%	203
max	644.3

Nota: Elaborado por el Autor 2024 mediante los datos obtenidos en el archivo CSV descargado de la plataforma del IDEAM DHIME.

Figura 10. Evolución Temporal de la Precipitación en la Estación CURUMANI [25020250]



Nota: Elaborado por el Autor mediante la herramienta Jupyter Notebook con Python (2024).

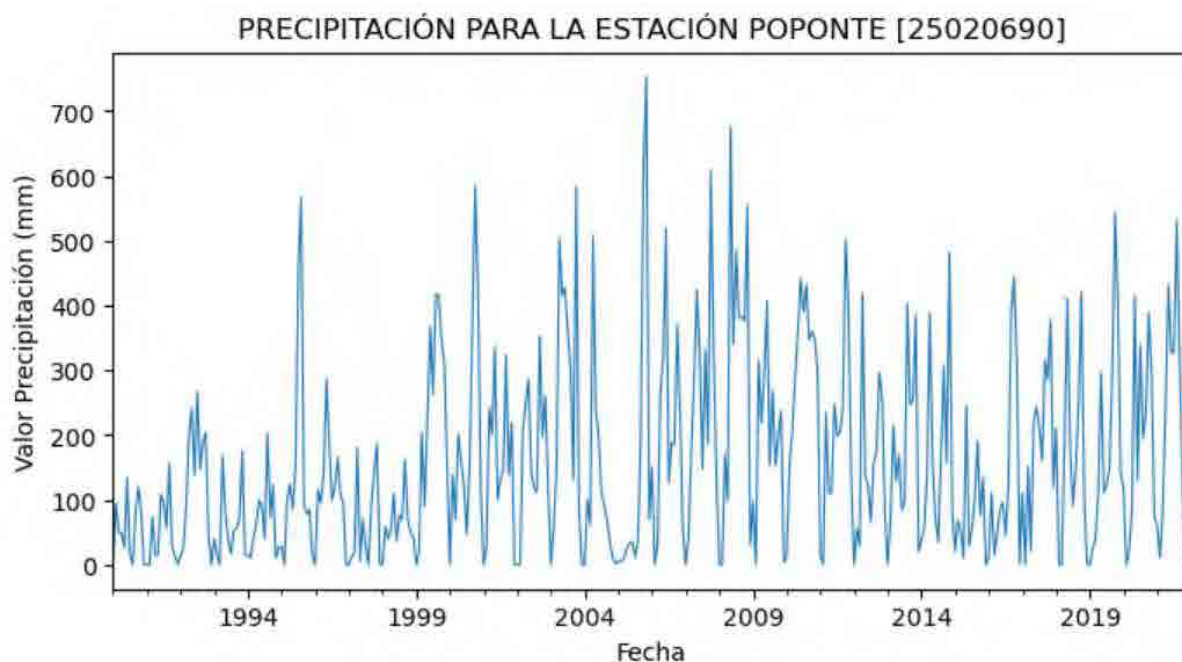
El resumen estadístico para la estación POPONTE [25020690] se presenta en la siguiente tabla.

Tabla 13. Resumen estadístico para la Estación POPONTE [250]

POPONTE [25020690]	
Count	385
mean	160
std	149.535241
min	0
25%	37
50%	120
75%	241.1
max	753

Nota: Elaborado por el Autor 2024 mediante los datos obtenidos en el archivo CSV descargado de la plataforma del IDEAM DHIME.

Figura 11. Evolución Temporal de la Precipitación en la Estación POPONTE [25020690]



Nota: Elaborado por el Autor mediante la herramienta Jupyter Notebook con Python (2024).

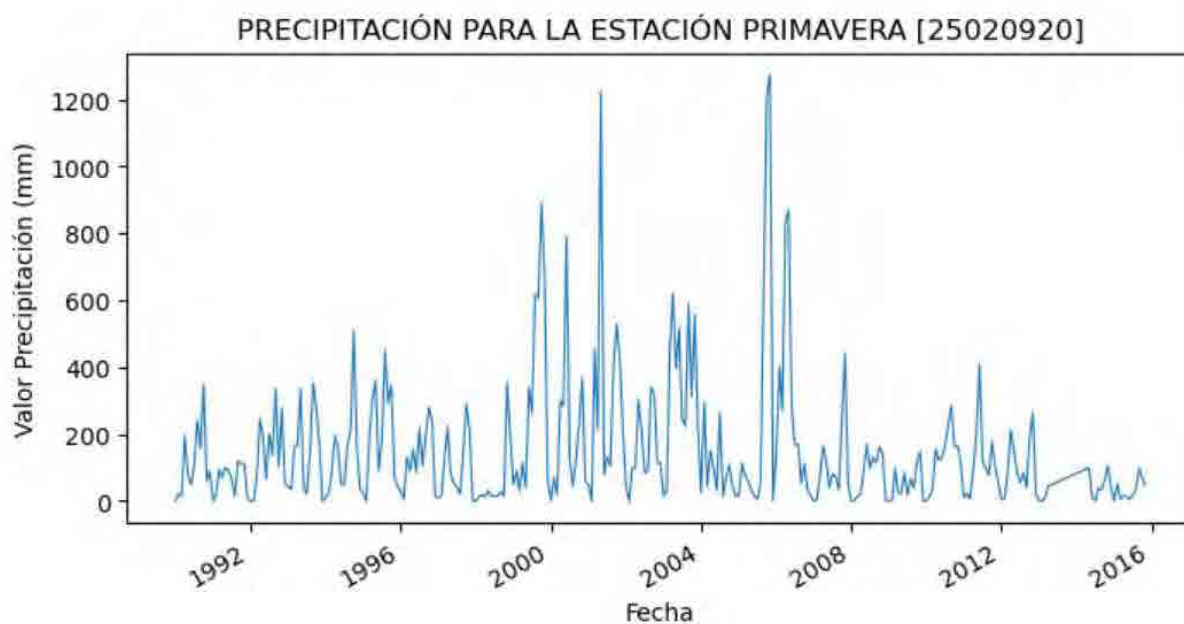
El resumen estadístico para la estación PRIMAVERA [25020920] se presenta en la siguiente tabla.

Tabla 14. Resumen estadístico para la estación PRIMAVERA [25020920]

PRIMAVERA [25020920]	
Count	298
mean	149
std	191.848948
min	0
25%	28.25
50%	90
75%	195
max	1274

Nota: Elaborado por el Autor 2024 mediante los datos obtenidos en el archivo CSV descargado de la plataforma del IDEAM DHIME.

Figura 12. Evolución Temporal de la Precipitación en la Estación PRIMAVERA [25020920]



Nota: Elaborado por el Autor mediante la herramienta Jupyter Notebook con Python (2024).

El resumen estadístico para la estación ZAPATOSA [25020660] se presenta en la siguiente tabla.

Tabla 15. Resumen estadístico para la estación ZAPATOSA [25020660]

ZAPATOSA [25020920]	
Count	375
mean	160
std	134.317556
min	0
25%	52
50%	129
75%	237.5
max	679

Nota: Elaborado por el Autor 2024 mediante los datos obtenidos en el archivo CSV descargado de la plataforma del IDEAM DHIME.

Figura 13. Evolución Temporal de la Precipitación en la Estación PRIMAVERA [25020660]



Nota: Elaborado por el Autor mediante la herramienta Jupyter Notebook con Python (2024).

A continuación, se presenta un resumen estadístico para las estaciones del Municipio de Tamalameque Cesar.

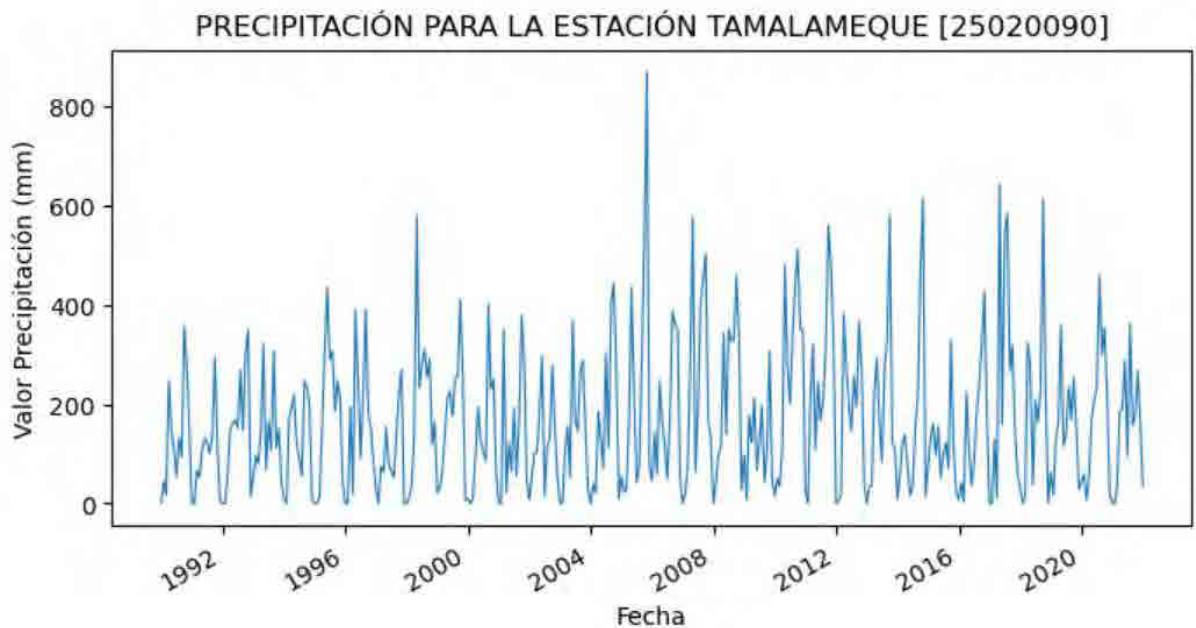
El resumen estadístico para la estación TAMALAMEQUE [25020090] se presenta en la siguiente tabla.

Tabla 16. Resumen estadístico para la estación TAMALAMEQUE [25020090]

TAMALAMEQUE [25020090]	
Count	382
mean	167
std	145.167323
min	0
25%	50.5
50%	141
75%	253.5
max	870.6

Nota: Elaborado por el Autor 2024 mediante los datos obtenidos en el archivo CSV descargado de la plataforma del IDEAM DHIME.

Figura 14. Evolución Temporal de la Precipitación en la Estación TAMALAMEQUE [25020090]



Nota: Elaborado por el Autor 2024 mediante la herramienta Jupyter Notebook con Python.

A continuación, se presenta un resumen estadístico para las estaciones del Municipio de El Banco Magdalena.

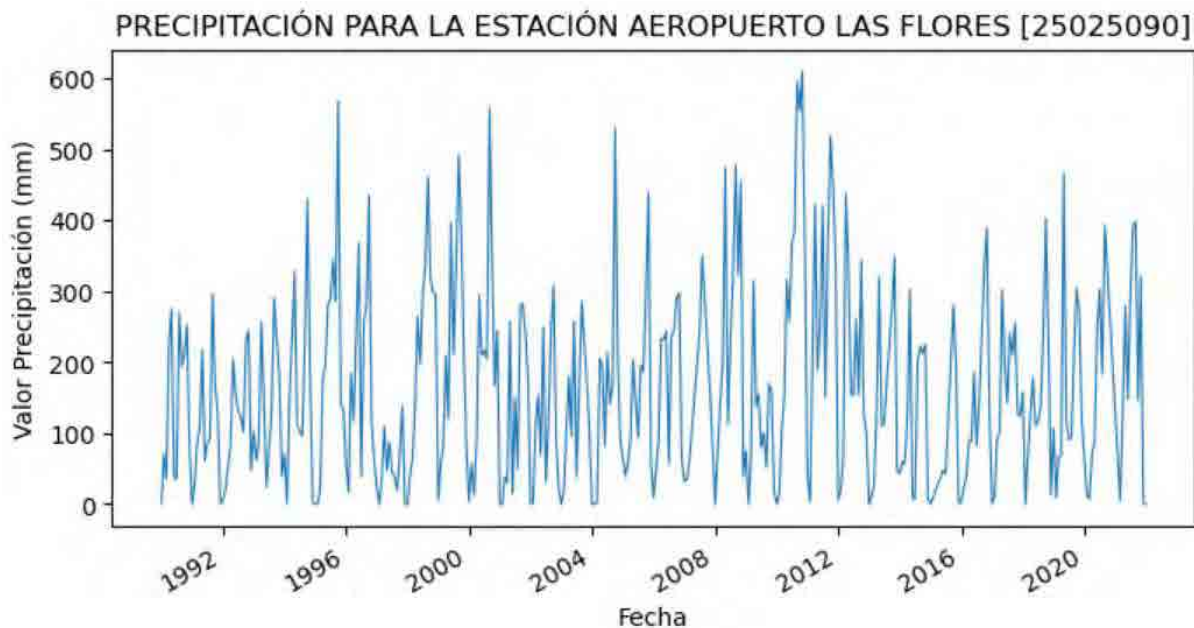
El resumen estadístico para la estación Aeropuerto las Flores [25025090] se presenta en la siguiente tabla.

Tabla 17. Resumen estadístico para la estación ARTO LAS FLORES [25025090]

ARTO FLORES [25020090]	
Count	369
mean	163
std	132.767138
min	0
25%	57.5
50%	137.2
75%	245
max	609.3

Nota: Elaborado por el Autor 2024 mediante los datos obtenidos en el archivo CSV descargado de la plataforma del IDEAM DHIME.

Figura 15. Evolución Temporal de la Precipitación en la Estación AEROPUERTO LAS FLORES [25025090]



Nota: Elaborado por el Autor mediante la herramienta Jupyter Notebook con Python (2024).

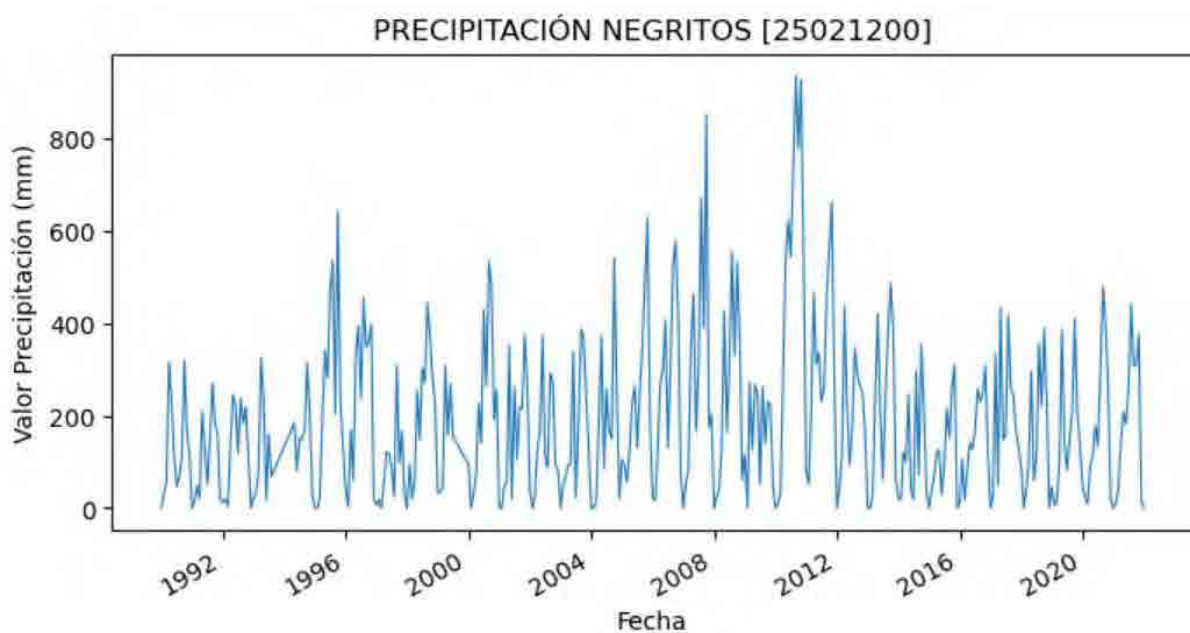
El resumen estadístico para la estación NEGRITOS [25021200] se presenta en la siguiente tabla.

Tabla 18. Resumen estadístico para la estación NEGRITOS [25021200]

NEGRITOS [25021200]	
Count	372
mean	193
std	171.344297
min	0
25%	51
50%	155.5
75%	283.25
max	934

Nota: Elaborado por el Autor 2024 mediante los datos obtenidos en el archivo CSV descargado de la plataforma del IDEAM DHIME.

Figura 16. Evolución Temporal de la Precipitación en la Estación NEGRITOS [25021200]



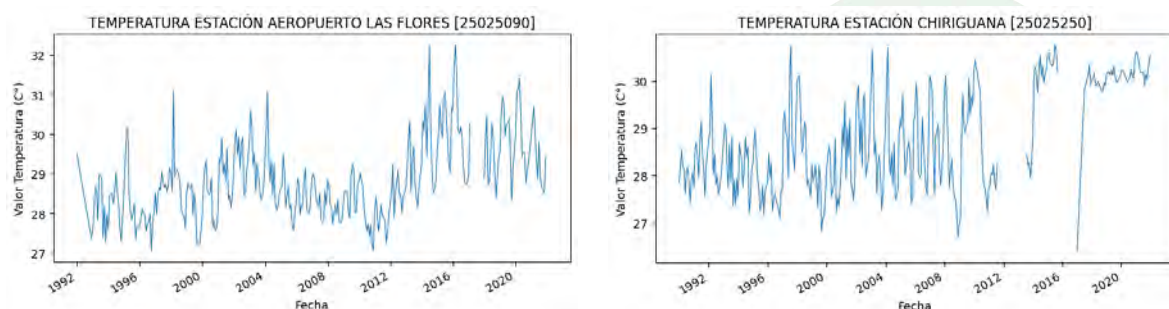
Nota: Elaborado por el Autor mediante la herramienta Jupyter Notebook con Python (2024).

### 6.1.1.2. Variable de Temperatura

En cuanto a la variable de temperatura, los datos se obtuvieron mediante la herramienta de Google Earth Engine que es una plataforma para el análisis geoespacial basada en la nube enlazado a la colección de datos “ECMWF/ERA5\_LAND/MONTHLY\_AGGR” Centro Europeo de Previsiones Meteorológicas a Plazo Medio (ECMWF) por sus siglas en inglés, debido que al momento de realizar la consulta de los datos para la variable de temperatura en la plataforma DHIME del IDEAM se encontró que estos no estaban disponibles para la mayoría de los municipios del Complejo Cenagoso de la Zapatosá, solamente se encontró disponibilidad de estos datos para los municipios de Chiriguana Cesar y El Banco Magdalena para las estaciones AEROPUERTO LAS FLORES [25025090] y CHIRIGUANA [25025250].

Realizando un análisis exploratorio para las estaciones de los municipios donde había disponibilidad de estos como es el caso de los municipios de Chiriguana Cesar y El Banco Magdalena, se encontró que estas series de tiempo presentaba datos faltantes en forma de saltos en fechas donde estas estaciones no recopilaban datos, como es el caso de la estación AEROPUERTO LAS FLORES [25025090] que presentó datos faltante para los periodo de (1990-01-01 hasta 1991-12-01) y (2017-03-01 hasta 2017-12-01) y para la estación CHIRIGUANA [25025250] se encontró que también presentaba periodos donde esta no recopiló datos para las fechas (2011-10-01 hasta 2013-07-01) y (2015-10-01 hasta 2016-12-01) como se observa en los siguientes histogramas.

Figura 17. Evolución Temporal de la Temperatura para las estaciones de los municipios de El Banco Magdalena y Chiriguana Cesar



Nota: Elaborado por el Autor (2024) mediante la herramienta Jupyter Notebook con Python mediante los datos obtenidos de la plataforma DHIME del IDEAM.

Por los inconvenientes presentados en las series de tiempo de estas estaciones se ha optado por descartarlas y trabajar únicamente con los datos de que obtenga mediante la herramienta de Google Earth Engine para todos los municipios del área de influencia del Complejo Cenagoso de la Zapatosa.

Para garantizar la confiabilidad de los datos obtenido mediante Google Earth Engine se ha realizado una comprobación realizando una correlación de Pearson con los datos en periodos completos contra los datos obtenido con Google Earth Engine donde el fundamento de la correlación de Pearson se emplea para medir la similitud entre dos variables que representan diferentes características o medidas de unidades taxonómicas (Salazar, 2000). El coeficiente de correlación de Pearson puede oscilar entre -1 y +1, donde:

+1 indica una correlación positiva perfecta,

-1 indica una correlación negativa perfecta,

0 no existe correlación entre las variables.

El coeficiente de correlación de Spearman se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$r = 1 - \frac{6 \sum_{j=1}^n d_j^2}{n(n^2 - 1)}$$

Donde:

n = Número de observaciones,

$d_i$  = es la diferencia entre los rangos de cada par de observaciones.

Una vez que se realizó el proceso de correlación de Spearman entre las series de tiempo de las estaciones de AEROPUERTO LAS FLORES [25025090] y CHIRIGUANA [25025250] se obtuvieron resultados mediante la herramienta de pandas de Python.

Para la estación AEROPUERTO LAS FLORES [25025090] del municipio del El Banco Magdalena se obtuvo una correlación de:

$$r = 0.76$$

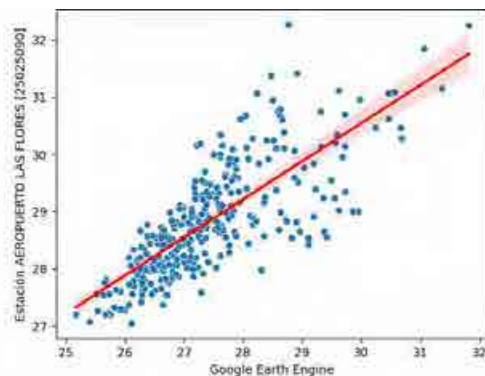
Para la estación CHIRIGUANA [25025250] del municipio de Chiriguana Cesar se obtuvo una correlación de:

$$r = 0.77$$

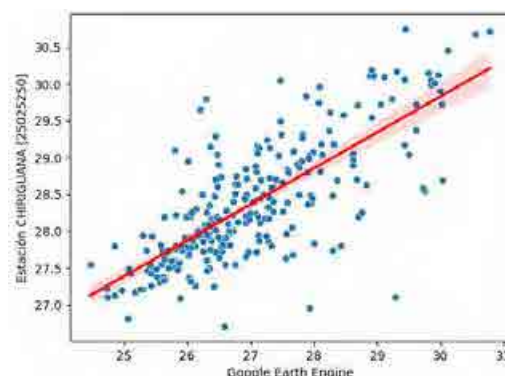
De acuerdo con (Saravia, 2015) el resultado obtenido en este trabajo se establecería como una correlación alta, donde una correlación en un rango de 0.6 y 0.8 es una correlación alta.

Figura 18. Gráficos de Correlaciones de los Datos de Google Earth Engine vs Estaciones para los municipios del El Banco Magdalena y Chiriguana Cesar.

Correlación de Spearman para el Municipio El Banco Magdalena



Correlación de Spearman para el Municipio de Chiriguana Cesar



Nota: Elaborado por el Autor mediante la herramienta Jupyter Notebook con Python (2024).

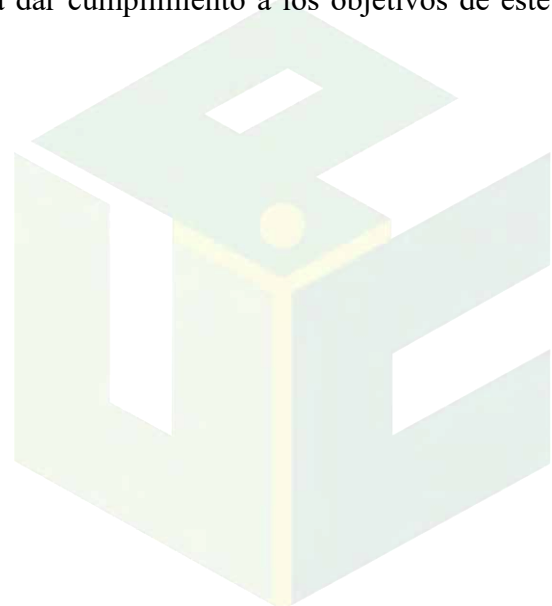
La visualización mediante los gráficos de dispersión respalda los resultados obtenidos de la correlación de Spearman, que es de 0.76 y 0.77. Estos valores indican una fuerte correlación positiva monótona entre las temperaturas estimadas por Google Earth Engine y las medidas por las estaciones AEROPUERTO LAS FLORES [25025090] y CHIRIGUANA [25025250], ubicadas en los municipios de El Banco, Magdalena, y Chiriguana, Cesar. Esto sugiere que, a medida que los valores de temperatura de una fuente (ya sea Google Earth Engine o la estación terrestre) aumentan, los de la otra también tienden a aumentar. Por lo tanto, las tendencias y variaciones en los datos de Google Earth Engine reflejan con precisión las variaciones en las condiciones de temperatura locales en el área de estudio del Complejo Cenagoso de la Zapatosa.

Los valores  $p$  obtenidos en ambas correlaciones fueron por debajo de 0.05, lo que indica que la probabilidad de que esta correlación se haya producido por azar es prácticamente nula.

Esto significa que la correlación observada es estadísticamente significativa, lo que refuerza la confianza en que existe una relación genuina entre los datos de GEE y los de las estaciones terrestres.

Los datos obtenidos de la colección “ECMWF/ERA5\_LAND/MONTHLY\_AGGR” de la (ECMWF) con Google Earth Engine tiene la ventaja de ofrecer una cobertura geográfica amplia y continua, lo cual es especialmente valioso para las áreas donde las estaciones terrestres son escasas o no existen como es el caso de los municipios que comprenden el área de influencia del Complejo Cenagoso de la Zapatosa. Esta cobertura puede permitir análisis climáticos en zonas donde no se tenga disponibilidad o de difícil acceso que de otro modo serían inaccesibles por lo que Google Earth Engine pueden ser una buena opción en cuanto a datos para el estudio impactos climáticos.

Para este trabajo se realizará la recreación de las series de tiempo de la variable de temperatura, estableciendo un punto con las coordenadas exactas de cada una de las estaciones de precipitación seleccionadas que ya comprobada la fiabilidad de los que nos pueda proporcionar la colección de datos meteorológicos “ECMWF/ERA5\_LAND/MONTHLY\_AGGR” de la (ECMWF) con Google Earth Engine serán los datos con los que se trabajará para cumplir con los objetivo de este trabajo como en la implementación de los modelos predictivo para dar cumplimiento a los objetivos de este trabajo.



A continuación, se presenta los rúmenes estadísticos para las estaciones meteorológicas del Municipio de Chiriguaná Cesar.

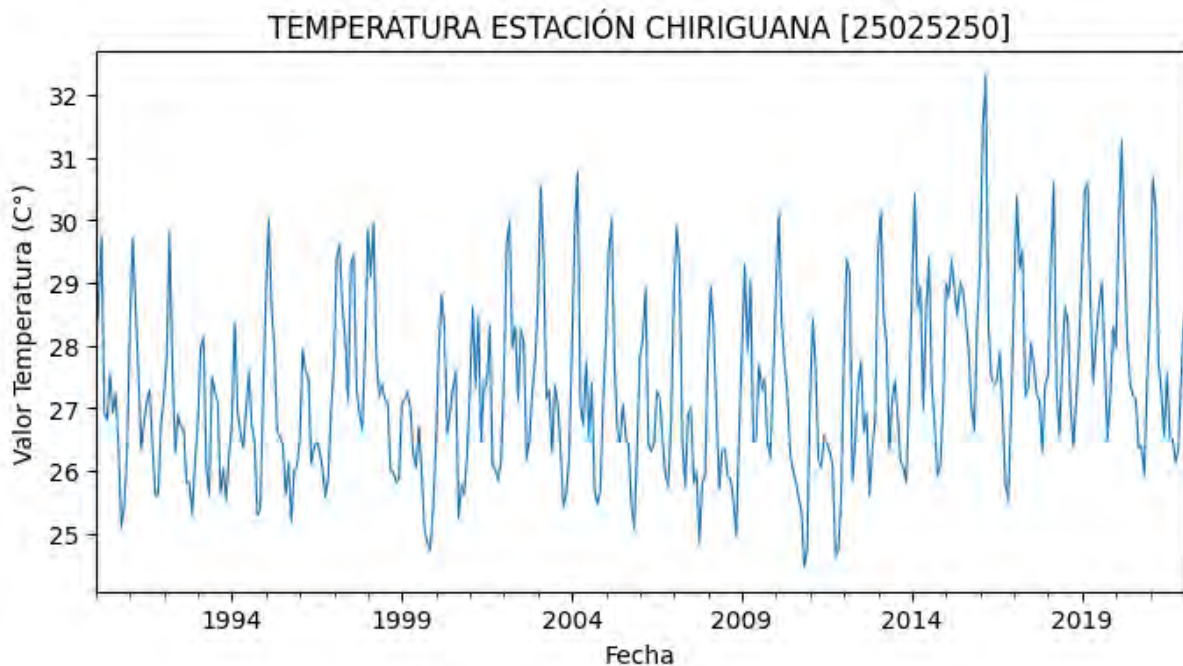
El resumen estadístico para la estación CHIRIGUANÁ [25025250] se presenta en la siguiente tabla.

Tabla19. Resumen estadístico para la estación CHIRIGUANA [25025250]

CHIRIGUANÁ [25025250]	
Count	385
mean	27.400299
std	1.091919
min	25.169528
25%	26.651782
50%	27.191237
75%	27.835018
max	31.81297

Nota: Elaborado por el Autor 2024 mediante los datos obtenidos en el archivo CSV descargado de la plataforma Google Earth Engine.

Figura 19. Evolución Temporal de la Temperatura en la Estación CHIRIGUANA [25025250]



Nota: Elaborado por el Autor mediante la herramienta Jupyter Notebook con Python (2024).

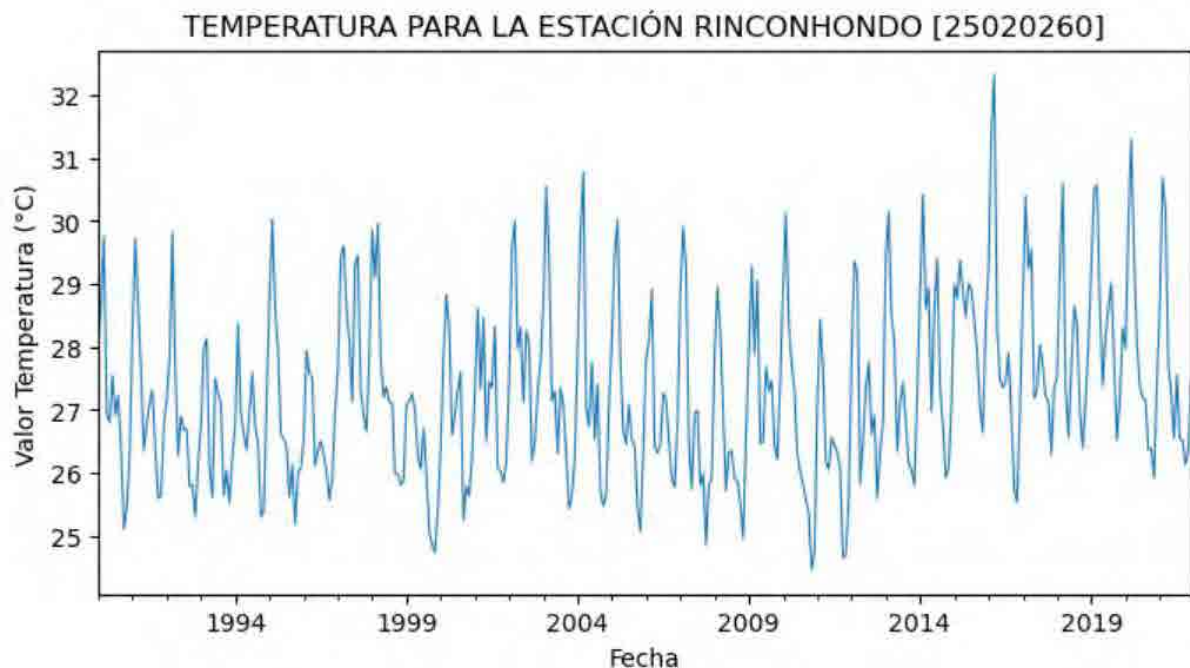
El resumen estadístico para la estación RINCONHONDO [25020260] se presenta en la siguiente tabla.

Tabla 19. Resumen estadístico para la estación RINCONHONDO [25020260]

RINCONHONDO [25020260]	
Count	384
mean	28
std	1.388977
min	24.785878
25%	26.532616
50%	27.309615
75%	28.333016
max	32.792264

Nota: Elaborado por el Autor 2024 mediante los datos obtenidos en el archivo CSV descargado de la plataforma Google Earth Engine.

Figura 20. Evolución Temporal de la Temperatura en la Estación RINCONHONDO [25020260]



Nota: Elaborado por el Autor mediante la herramienta Jupyter Notebook con Python (2024).

A continuación, se presenta los resúmenes estadísticos para el Municipio del El Banco Magdalena.

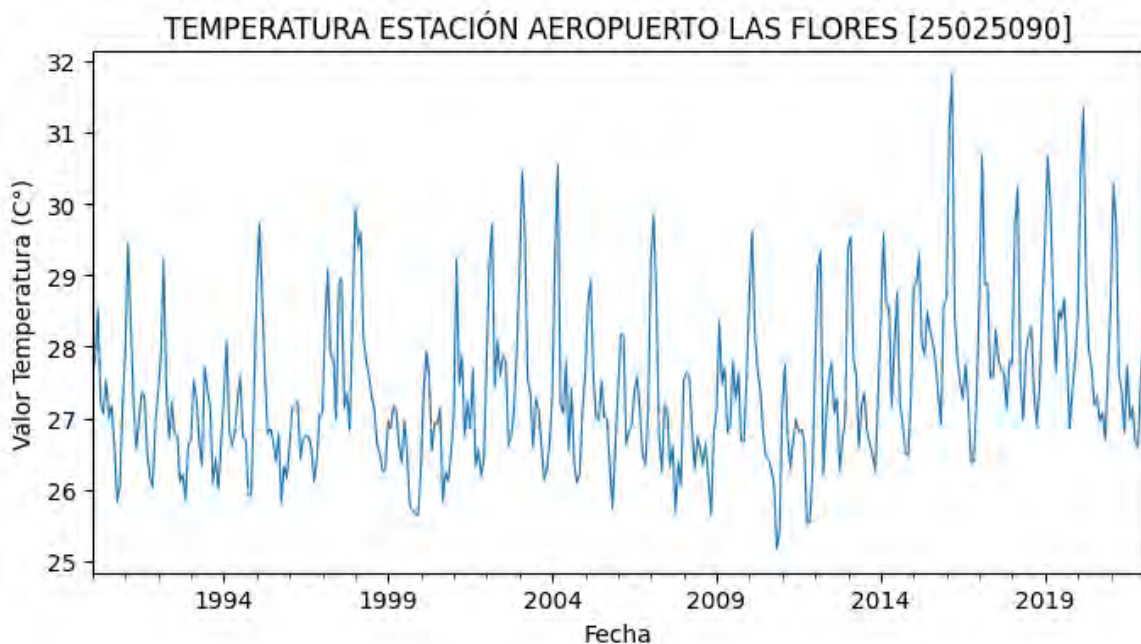
El resumen estadístico para la estación AEROPUERTO LAS FLORES [25025090] se presenta en la siguiente tabla.

Tabla 20. Resumen estadístico para estación AEROPUERTO LAS FLORES [25025090]

ARTO FLORES [25025090]	
Count	385
mean	27.289317
std	1.377532
min	24.464871
25%	26.307311
50%	27.118265
75%	28.087927
max	32.311826

Nota: Elaborado por el Autor (2024) mediante los datos obtenidos en el archivo CSV descargado de la plataforma Google Earth Engine.

Figura 21. Evolución Temporal de la Temperatura en la Estación AESROPUERTO LAS FLORES [25025090]



Nota: Elaborado por el Autor mediante la herramienta Jupyter Notebook con Python (2024).

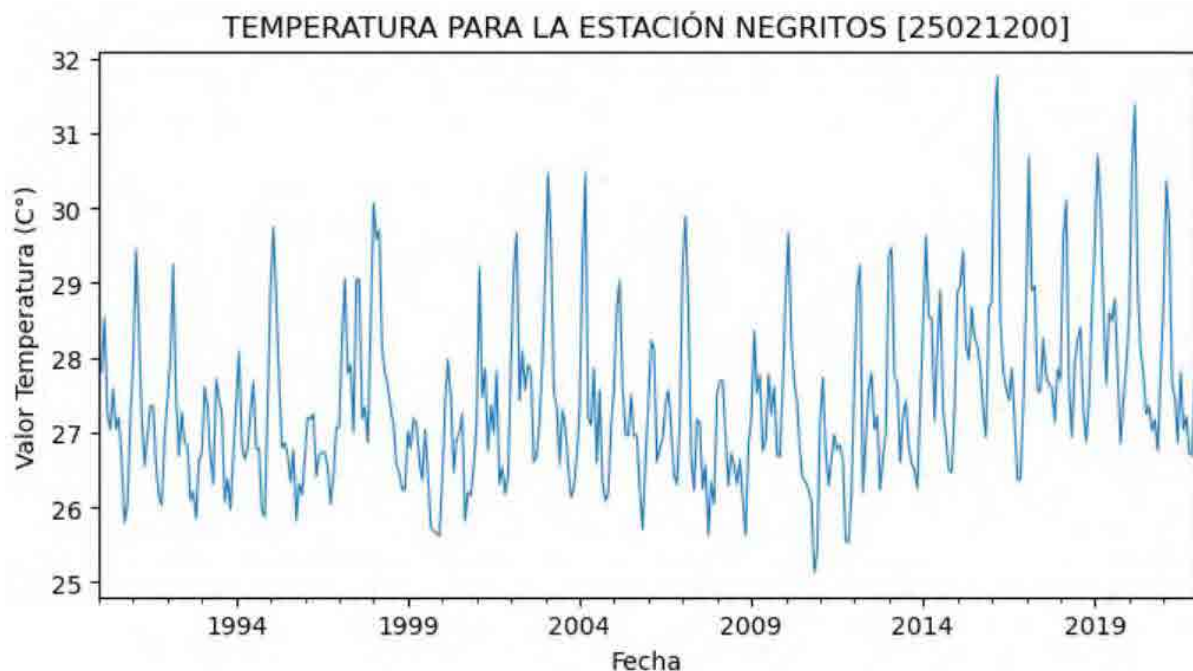
El resumen estadístico para la estación NEGRITOS [25021200] se presenta en la siguiente tabla.

Tabla 21. Resumen Estadístico para la estación NEGRITOS [25021200]

NEGRITOS [25021200]	
Count	384
mean	27
std	1.109768
min	25.136268
25%	26.660661
50%	27.217014
75%	27.860524
max	31.762573

Nota: Elaborado por el Autor (2024) mediante los datos obtenidos en el archivo CSV descargado de la plataforma Google Earth Engine.

Figura 22. Evolución Temporal de la Temperatura en la Estación NEGRITOS [25021200]



Nota: Elaborado por el Autor mediante la herramienta Jupyter Notebook con Python (2024).

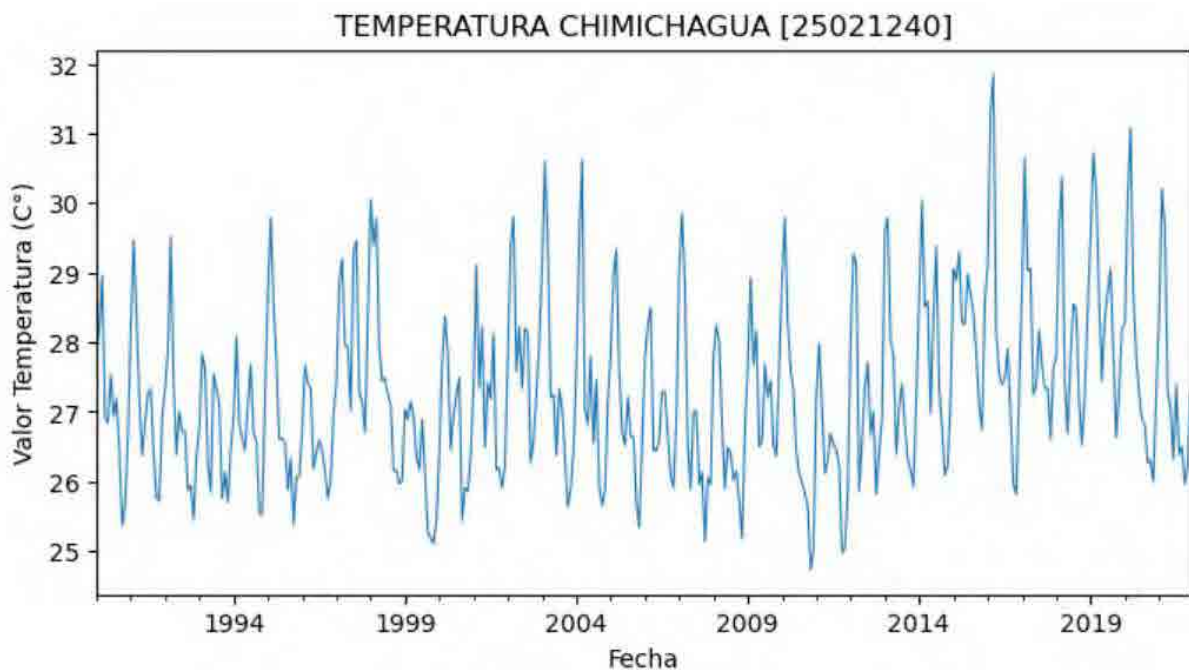
A continuación, se presenta los resúmenes estadísticos para las estaciones meteorológicas del Municipio de Chimichagua Cesar.

Tabla 22. Resúmenes estadísticos para la estación CHIMICHAGUA [25021240]

CHIMICHAGUA [25021240]	
Count	384
mean	27
std	1.259283
min	24.730718
25%	26.385422
50%	27.148313
75%	27.993781
max	31.843659

Nota: Elaborado por el Autor 2024 mediante los datos obtenidos en el archivo CSV descargado de la plataforma Google Earth Engine.

Figura 23. Evolución Temporal de la Temperatura en la Estación Chimichagua [25021240]



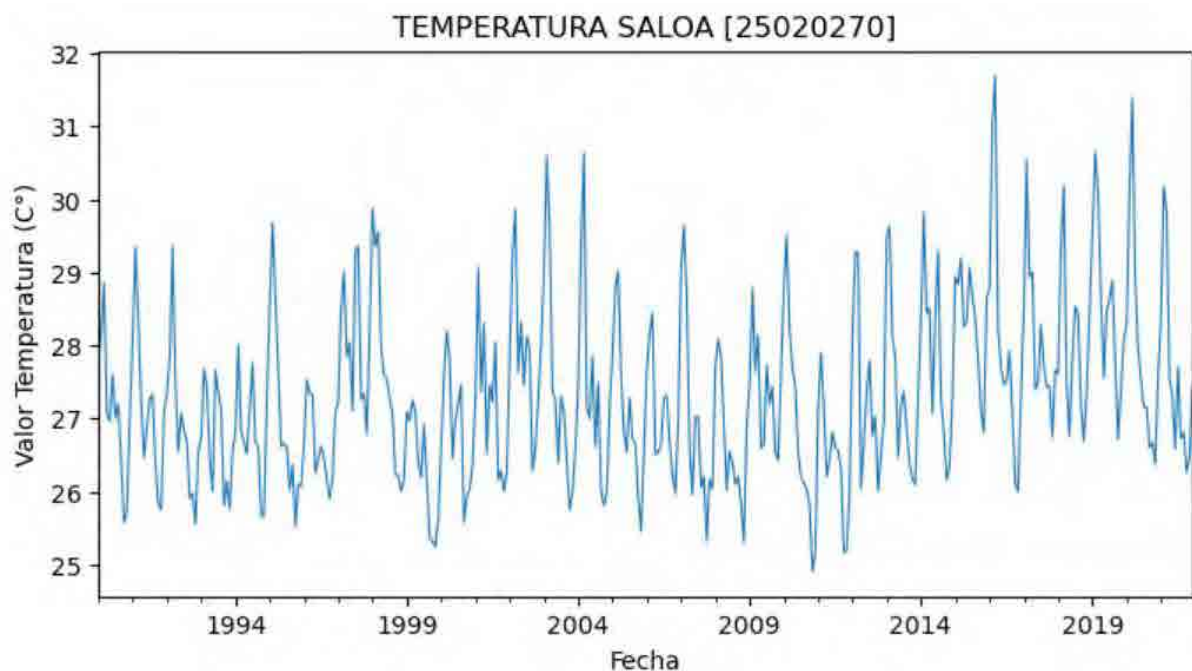
Nota: Elaborado por el Autor mediante la herramienta Jupyter Notebook con Python (2024).

Tabla 23. Resumen estadístico para la estación SALOA [25020270]

SALOA [25020270]	
Count	384
mean	27
std	1.193508
min	24.907869
25%	26.462642
50%	27.207674
75%	27.993732
max	31.691412

Nota: Elaborado por el Autor 2024 mediante los datos obtenidos en el archivo CSV descargado de la plataforma Google Earth Engine.

Figura 24. Evolución Temporal de la Temperatura en la Estación SALOA [25020270]



Nota: Elaborado por el Autor mediante la herramienta Jupyter Notebook con Python (2024).

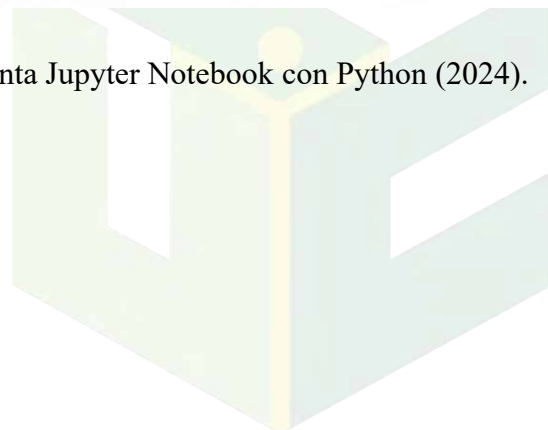
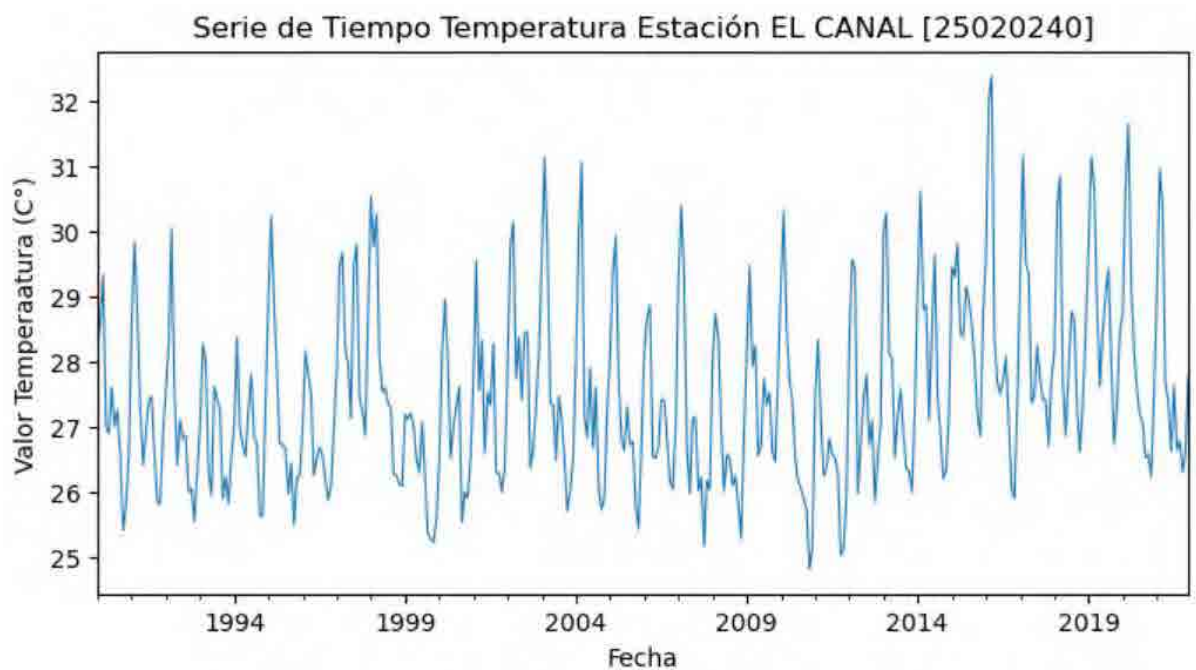


Tabla 24. Resumen estadístico para la estación EL CANAL [25020240]

EL CANAL [25020240]	
Count	384
mean	27
std	1.378503
min	24.813834
25%	26.519416
50%	27.271091
75%	28.256452
max	32.391621

Nota: Elaborado por el Autor 2024 mediante los datos obtenidos en el archivo CSV descargado de la plataforma Google Earth Engine.

Figura 25. Evolución Temporal de la Temperatura en la Estación EL CANAL [25020240]



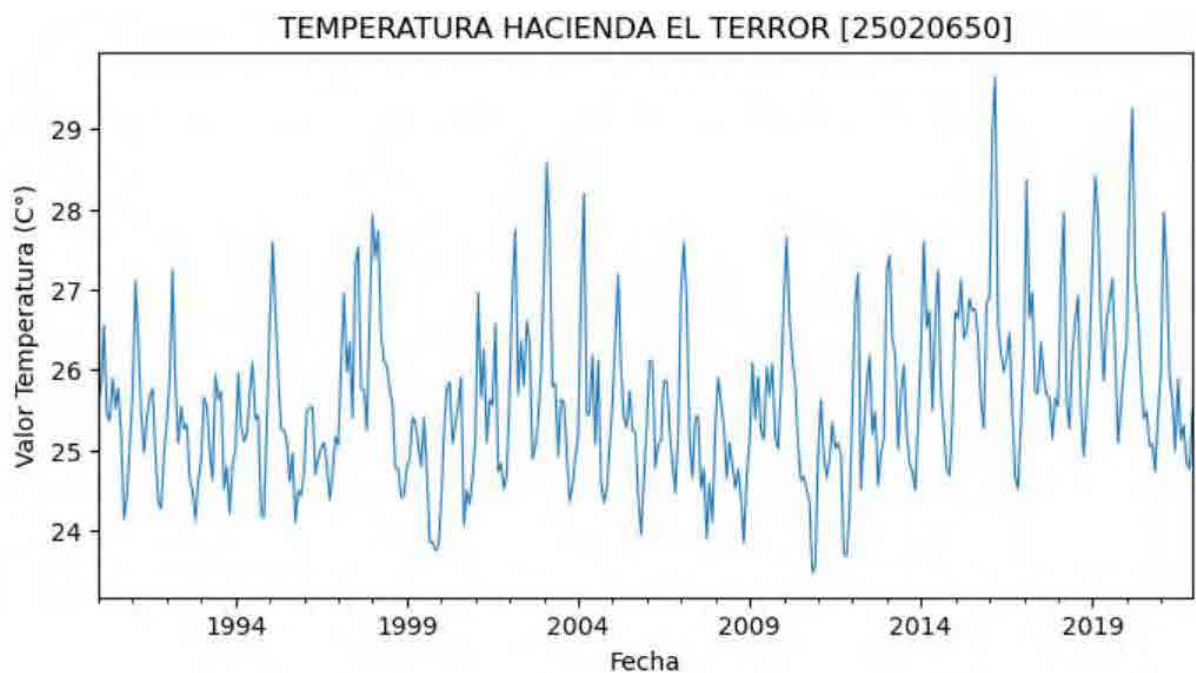
Nota: Elaborado por el Autor 2024 mediante la herramienta Jupyter Notebook con Python.

Tabla 25. Resumen estadístico para la estación HACIENDA EL TERROR [25020650]

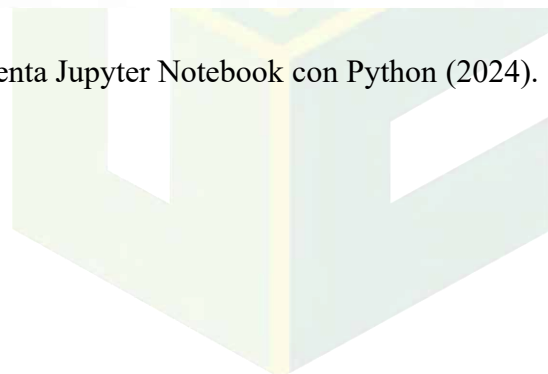
HACIENDA EL TERROR [25020240]	
Count	384
mean	26
std	1.010107
min	23.477463
25%	24.910638
50%	25.445294
75%	26.114645
max	29.649515

Nota: Elaborado por el Autor 2024 mediante los datos obtenidos en el archivo CSV descargado de la plataforma Google Earth Engine.

Figura 26. Evolución Temporal de la Temperatura en la Estación HACIENDA EL TERROR [25020650]



Nota: Elaborado por el Autor mediante la herramienta Jupyter Notebook con Python (2024).



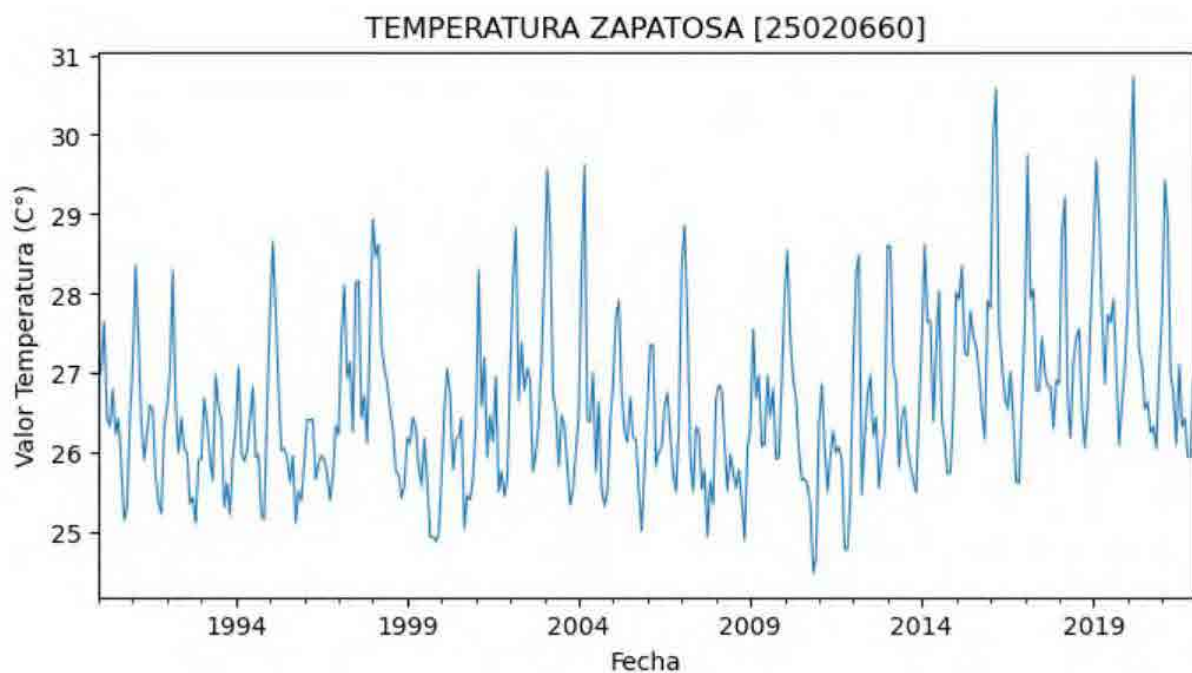
A continuación, se presenta los resúmenes estadísticos para las estaciones meteorológicas del Municipio de Curumaní Cesar.

Tabla 26. Resumen estadístico para la Estación ZAPATOSA [25020660]

ZAPATOSA [25020660]	
Count	384
mean	27
std	1.045104
min	24.501576
25%	25.917506
50%	26.425202
75%	27.068466
max	30.728797

Nota: Elaborado por el Autor 2024 mediante los datos obtenidos en el archivo CSV descargado de la plataforma Google Earth Engine.

Figura 27. Evolución Temporal de la Temperatura en la Estación ZAPATOSA [25020660]



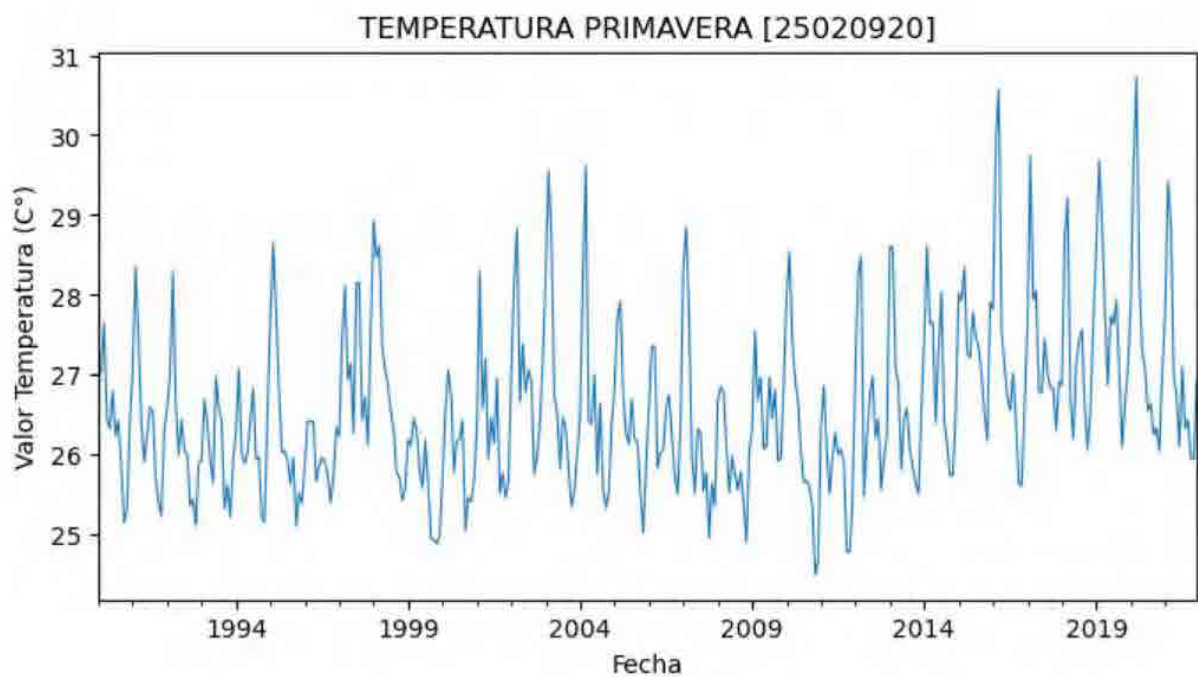
Nota: Elaborado por el Autor mediante la herramienta Jupyter Notebook con Python (2024).

Tabla 27. Resumen Estadístico para la estación PRIMAVERA [25020920]

PRIMAVERA [25020920]	
Count	384
mean	22
std	1.008368
min	20.147824
25%	21.548559
50%	22.188493
75%	22.927537
max	26.144201

Nota: Elaborado por el Autor 2024 mediante los datos obtenidos en el archivo CSV descargado de la plataforma Google Earth Engine.

Figura 28. Evolución Temporal de la Temperatura en la Estación PRIMAVERA [25020920]



Nota: Elaborado por el Autor mediante la herramienta Jupyter Notebook con Python (2024).

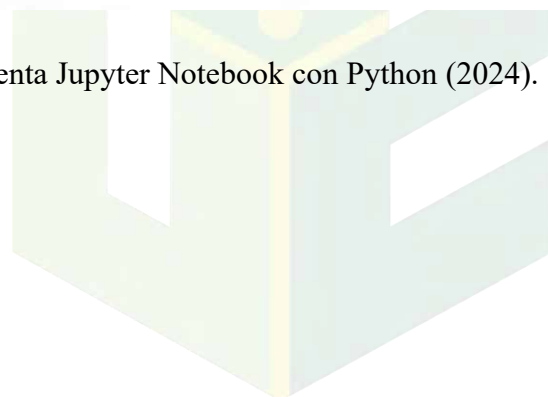
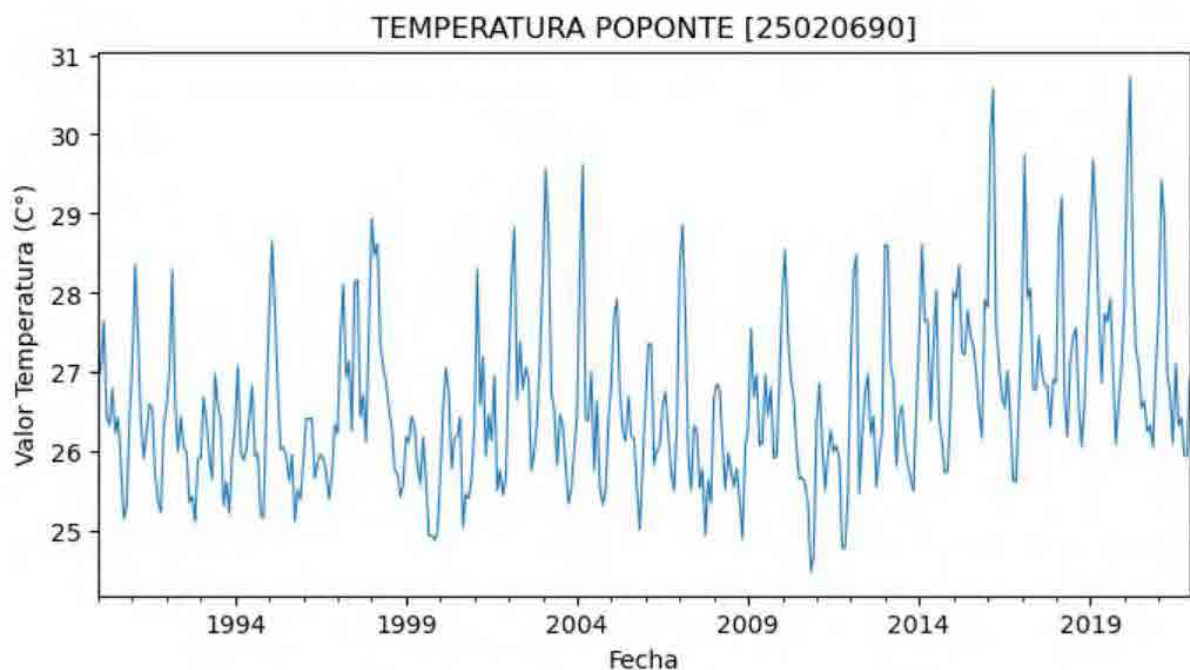


Tabla 28. Resumen estadístico para la estación POPONTE [250960]

POPONTE [25020960]	
Count	384
mean	26
std	1.289988
min	23.233783
25%	24.794
50%	25.55416
75%	26.507261
max	30.821442

Nota: Elaborado por el Autor 2024 mediante los datos obtenidos en el archivo CSV descargado de la plataforma Google Earth Engine.

Figura 29. Evolución Temporal de la Temperatura en la Estación POPONTE [25020690]



Nota: Elaborado por el Autor mediante la herramienta Jupyter Notebook con Python (2024).

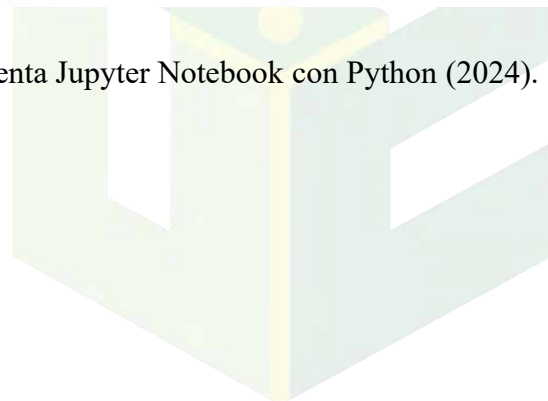
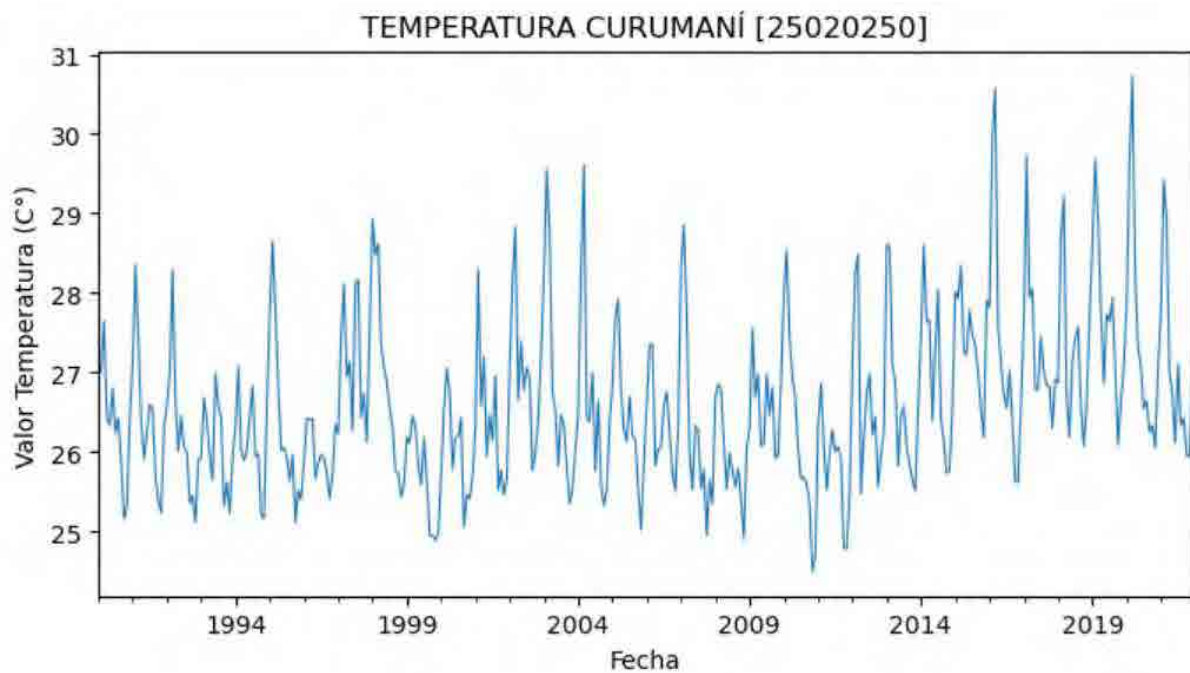


Tabla 29. Resumen estadístico para la estación CURUMANI [25020250]

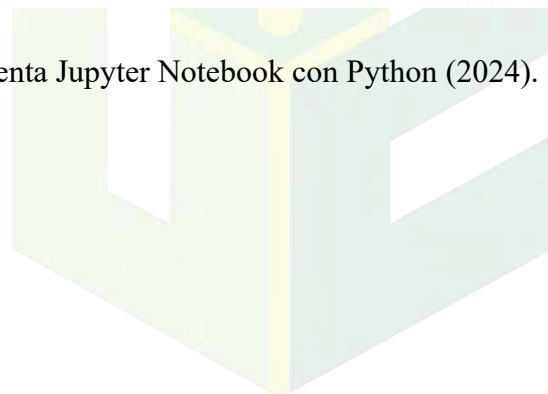
CURUMANI [25020250]	
Count	384
mean	25
std	1.135393
min	22.675797
25%	24.182928
50%	24.873579
75%	25.744065
max	29.359056

Nota: Elaborado por el Autor 2024 mediante los datos obtenidos en el archivo CSV descargado de la plataforma Google Earth Engine.

Figura 30. Evolución Temporal de la Temperatura en la Estación CURUMANI [25020250]



Nota: Elaborado por el Autor mediante la herramienta Jupyter Notebook con Python (2024).



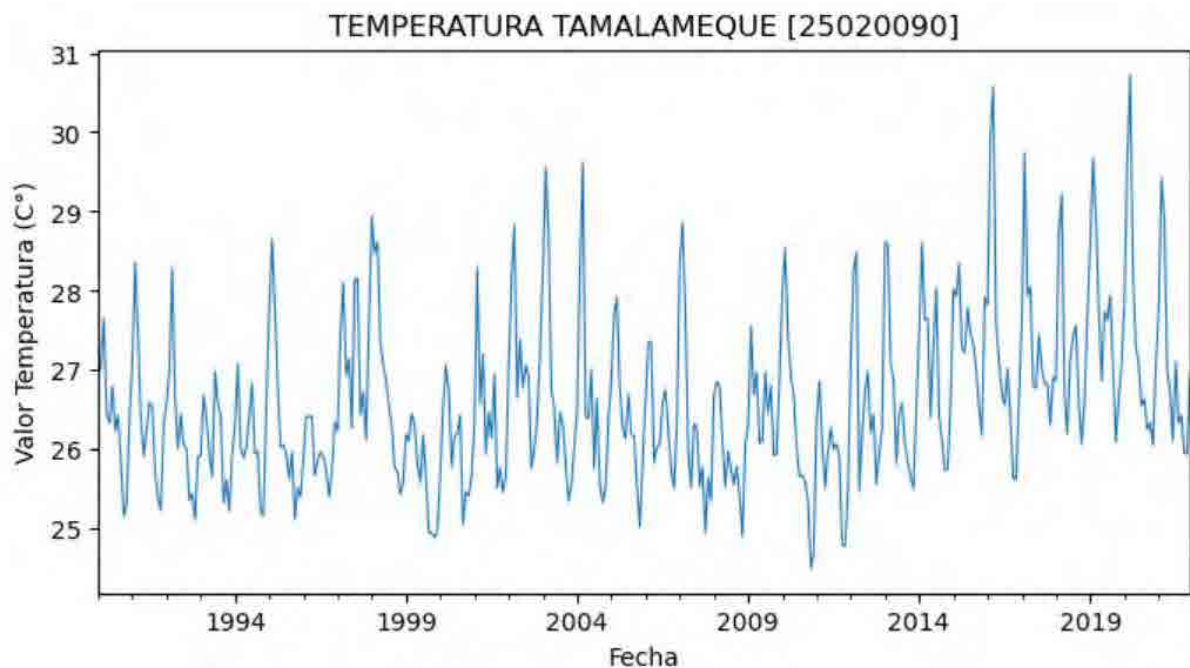
A continuación, se presenta los resúmenes estadísticos para las estaciones meteorológicas del Municipio de Tamalameque Cesar.

Tabla 30. Resumen estadístico para la estación TAMALAMEQUE [25020090]

TAMALAMEQUE [25020090]	
Count	384
mean	26
std	1.006707
min	24.381988
25%	25.733855
50%	26.224061
75%	26.828926
max	30.556706

Nota: Elaborado por el Autor 2024 mediante los datos obtenidos en el archivo CSV descargado de la plataforma Google Earth Engine.

Figura 31. Evolución Temporal de la Temperatura en la Estación TAMALAMEQUE [25020090]



Nota: Elaborado por el Autor 2024 mediante la herramienta Jupyter Notebook con Python

## 6.1.2. Tratamiento de las Variables Meteorológicas

### 6.1.2.1. Reconocimiento de Datos Atípicos

Para la identificación de los datos anómalos o atípicos se realiza con Python en dos fases, la primera fase consta de un análisis exploratorio con un gráfico boxplot por medio de las librerías Matplotlib y Seaborn para visualizar la distribución, dispersión y presencia de valores atípicos que serían aquellos valores que se encuentran fuera tanto en el primer cuartil como en el tercer cuartil en los DataFrames de la estaciones meteorológicas y la segunda fase se realiza implementando el método intercuartílico IQR que es un método sólido para etiquetar estos valores desarrollado por John Tukey (Oracle, 2024).

$$IQR = Q3 - Q1$$

Dónde:

Q1 es el valor que divide al 25% de los datos más bajos del resto.

Q3 es el valor que divide al 75% de los datos más bajos del resto.

Se establecen umbrales identificar valores atípicos en límites superior e inferior:

$$L_{inf} = Q1 - 1.5 \times IQR$$

$$L_{sup} = Q3 + 1.5 \times IQR$$

Para cualquier valor que esté por debajo del límite inferior o por encima del límite superior será considerado como un valor atípico.

Además, este cálculo ofrece una forma muy efectiva y sistemática de encontrar valores que son significativamente diferentes a la mayoría de los valores en un conjunto de datos; se utiliza principalmente para encontrar valores atípicos y la dispersión o variabilidad de los datos.

Este método se basa en la división de un conjunto de datos en cuartiles, es una medida de variabilidad. Un conjunto de datos clasificados se divide en cuatro partes iguales por cuartiles. El T1, el T2 y el T3. Los IQR se definen como  $Q3 - Q1$ , y los datos que no cumplen con los IQR  $Q3 + 1,5^*$  o  $Q1 - 1,5^*$  se consideran valores atípicos (Oracle, 2024).

Se implementó este método con el lenguaje Python para que recorriera de manera automatizada mediante el uso de la librería Pandas con la función `quantile()` que permite encontrar el primer y tercer cuartil Q1 Y Q3 dentro del DataFrame que presenta datos atípicos

```
import pandas as pd
```

```
import matplotlib as plt
```

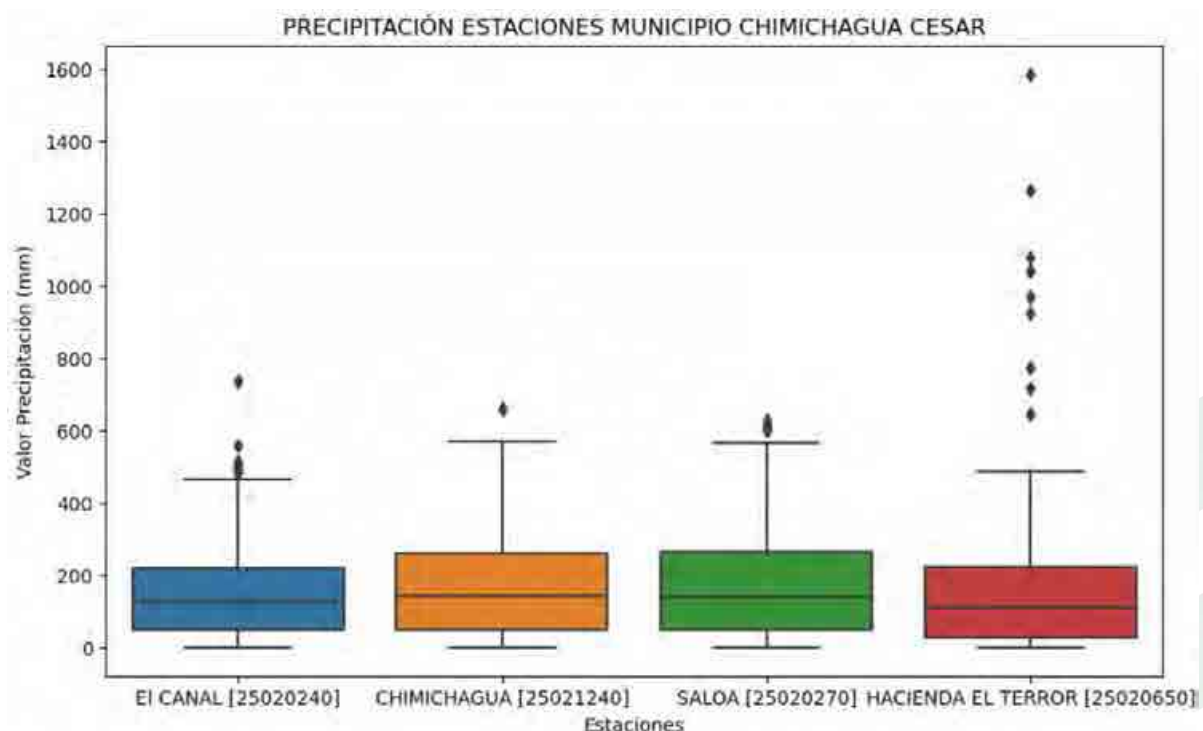
```
import seaborn as sns
```

#### 6.1.2.1.1. Variable de precipitación

Se realizó un análisis exploratorio mediante gráficos boxplot o de caja y bigotes para las estaciones de los municipios de estudio con la variable de precipitación, el cual permite obtener una representación visual de la variabilidad y dispersión con respecto a la medida de tendencia central que facilita la interpretación y la comprensión de las características de los conjuntos de datos para estas estaciones.

##### 6.1.2.1.1.1. Análisis para las estaciones del Municipio de Chimichagua Cesar

Figura 32. Gráfico caja y bigotes para las estaciones del municipio de Chimichagua Cesar



Nota: Elaborado por el Autor (2024) mediante la herramienta JupyterLab con Python

Tabla 31. Valores atípicos para las estaciones del Municipio de Chimichagua cesar

Fecha	Nombre Estación	Código	Valor
2000-09-01	CHIMICHAGUA [25021240]	25021240	658.4
2010-09-01	CHIMICHAGUA [25021240]	25021240	659.4
2005-10-01	SALOA [25020270]	25020270	600
2007-05-01	SALOA [25020270]	25020270	609
2010-09-01	SALOA [25020270]	25020270	627
2010-08-01	El CANAL [25020240]	25020240	497
2010-09-01	El CANAL [25020240]	25020240	500
2011-10-01	El CANAL [25020240]	25020240	558
2011-11-01	El CANAL [25020240]	25020240	735
2012-10-01	El CANAL [25020240]	25020240	511
2013-05-01	El CANAL [25020240]	25020240	483
2020-08-01	El CANAL [25020240]	25020240	482
2007-08-01	HACIENDA EL TERROR [25020650]	25020650	716.5
2019-11-01	HACIENDA EL TERROR [25020650]	25020650	1262
2021-04-01	HACIENDA EL TERROR [25020650]	25020650	646
2021-05-01	HACIENDA EL TERROR [25020650]	25020650	773
2021-06-01	HACIENDA EL TERROR [25020650]	25020650	1039
2021-07-01	HACIENDA EL TERROR [25020650]	25020650	968
2021-08-01	HACIENDA EL TERROR [25020650]	25020650	1585
2021-09-01	HACIENDA EL TERROR [25020650]	25020650	1080
2021-10-01	HACIENDA EL TERROR [25020650]	25020650	922

Nota: Elaborado por el Autor (2024) mediante los datos obtenidos de la plataforma DHIME del IDEAM

El análisis exploratorio con el método intercuartílico y el gráfico de caja y bigotes se pudieron observar los valores atípicos para las estaciones del municipio de Chimichagua Cesar con que se evidencia valores demasiado extremos para la estación “HACIENDA EL TERROR [2520650]” lo cuales están muy por encima de la media y el tercer cuartil, bajo este límite de control se reemplazó estos valores haciendo una imputación con los valores más cercano dentro del primer cuartil y tercer cuartil para evitar un sesgo en el modelo por estos valores que podrían ser producto de un mal funcionamiento del equipo de las estaciones como se puede observar un patrón consecutivo para la fecha 2021-06-01 hasta 2021-10-01 donde la estación reporta estos valores.

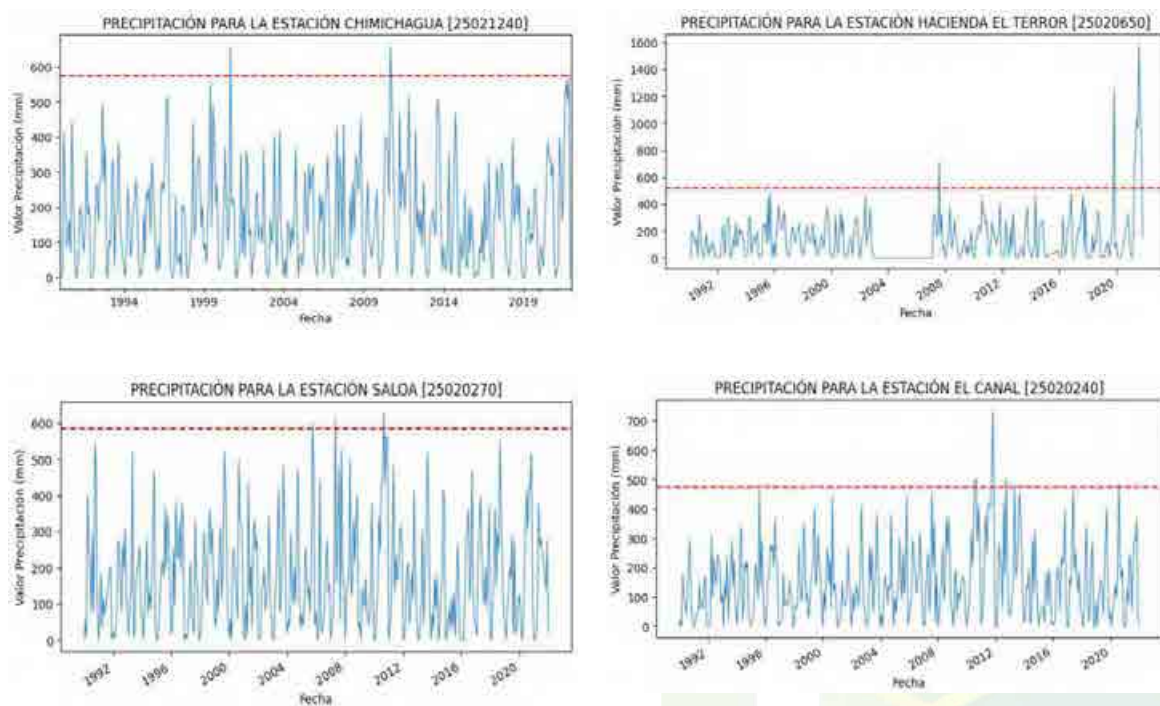
En cuanto por el resto de las estaciones, los valores atípicos que reportan muy similares como por ejemplo la coincidencia de valores atípicos para la fecha 2010-09-01 para

múltiples estaciones indica que podría haber habido un evento meteorológico significativo que afectó a toda la región en ese momento.

Sin embargo, al no conocer la naturaleza de estos valores de estas estaciones se someterán a tratamiento para estos valores atípicos reduciéndolos a la mediana de los datos para que estén dentro del límite superior que sería al cuartil número tres para estas estaciones para evitar introducir información que podría sesgar al modelo ARIMA a la hora de realizar los pronósticos.

Nota: "La línea intermedia indica los valores atípicicos, que son aquellos que superan el umbral del límite superior. Este límite se define como el cuartil número tres (Q3) más 1.5 veces el rango intercuartílico (IQR)."

Figura 33. Evoluciones Temporales de la Precipitación con Datos atípicos para las Estaciones del Municipio de Chimichagua.



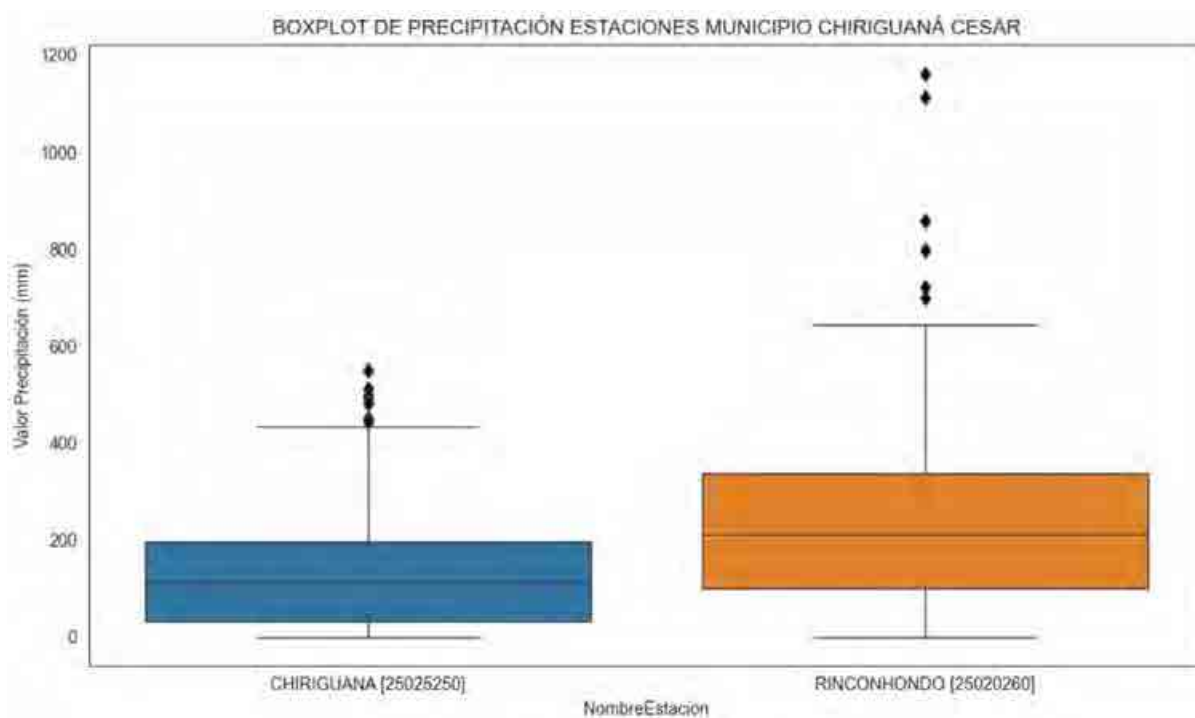
Nota: Elaborado por el Autor con la herramienta JupyterLab con Python mediante datos obtenidos de la plataforma DHIME del IDEAM (2024).

El comportamiento más inusual que podemos observar corresponde para la estación HACIENDA EL TERROR [25020650] donde podemos observar datos muy por encima del

resto y adicional a eso presenta datos faltantes para los años de 2004 a 2007, por lo tanto, que esta estación se debe someter a tratamiento para corregir estos datos dudosos y rellenar a las fechas donde presenta datos faltantes, para el resto de las estaciones también presentan datos atípicos, su comportamiento es muy similar entre si lo cual indica una mayor calidad de estos datos, sin embargo, también se someterán a tratamiento de dato atípicos para garantizar un comportamiento más homogéneo.

#### 6.1.2.1.2. Análisis para las estaciones del municipio de Chiriguaná Cesar

Figura 34. Gráfico caja y bigotes para las estaciones de Precipitación del Municipio de Chiriguaná Cesar



Nota: Elaborado por el Autor mediante la herramienta JupyterLab con Python (2024).

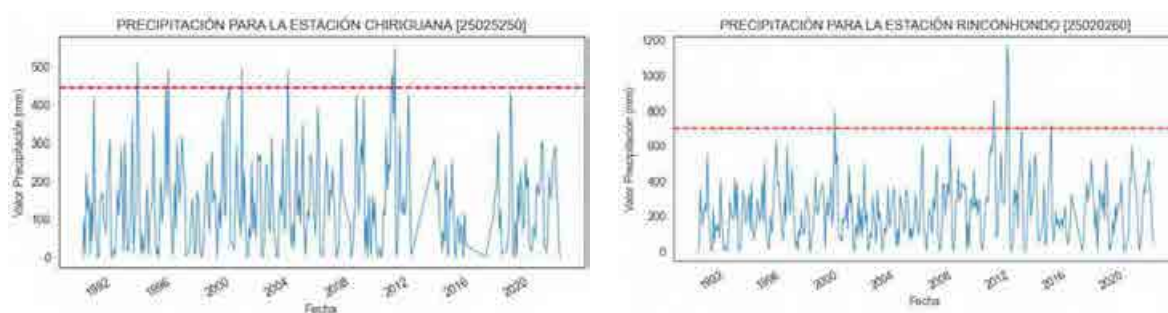
Tabla 32. Datos Atípicos Estaciones de Precipitación Municipio Chiriguaná Cesar

Fecha	Nombre Estación	Código estación	Valor
9/1/1993	CHIRIGUANA [25025250]	25025250	513.3
8/1/1995	CHIRIGUANA [25025250]	25025250	452.4
10/1/1995	CHIRIGUANA [25025250]	25025250	492.4
11/1/1999	CHIRIGUANA [25025250]	25025250	445.2
9/1/2000	CHIRIGUANA [25025250]	25025250	498.8
10/1/2003	CHIRIGUANA [25025250]	25025250	485.7

10/1/2010	CHIRIGUANA [25025250]	25025250	482.2
12/1/2010	CHIRIGUANA [25025250]	25025250	549.9
9/1/1999	RINCONHONDO [25020260]	25020260	799
11/1/2010	RINCONHONDO [25020260]	25020260	858
10/1/2011	RINCONHONDO [25020260]	25020260	1163
11/1/2011	RINCONHONDO [25020260]	25020260	1113
10/1/2012	RINCONHONDO [25020260]	25020260	700
11/1/2014	RINCONHONDO [25020260]	25020260	723

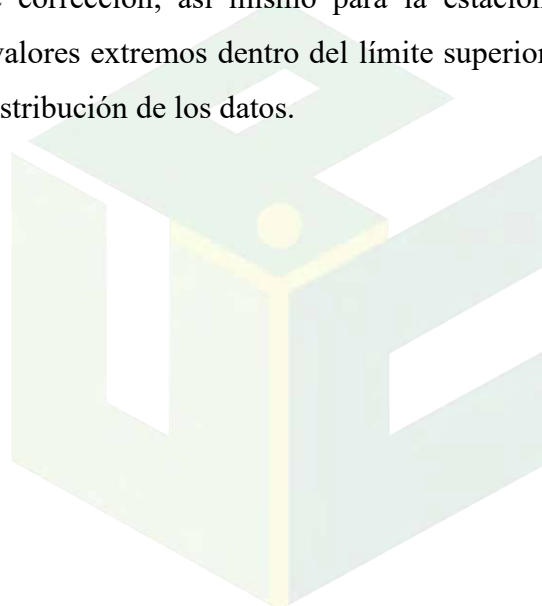
Nota: Elaborado por el Autor mediante datos obtenidos de la plataforma DHIME (2024).

Figura 35. Evoluciones Temporales de la Precipitación con Datos Atípicos para las Estaciones de Precipitación del Municipio de Chiriguana Cesar



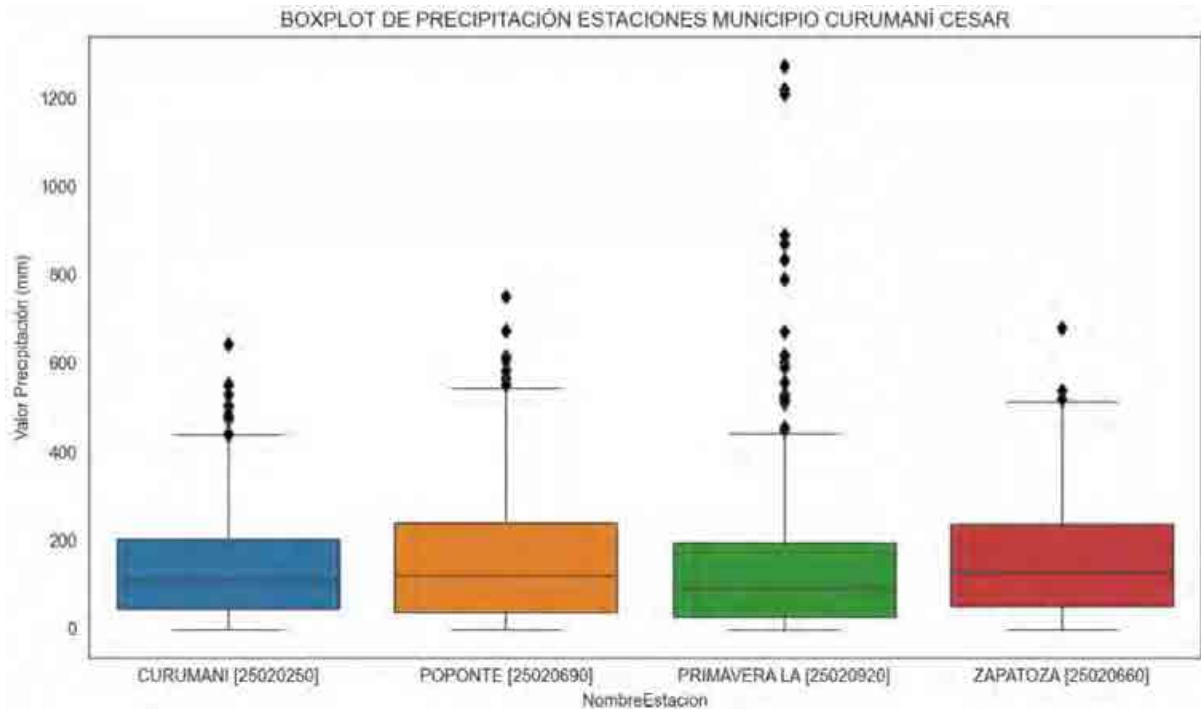
Nota: Elaborado por el Autor con la herramienta JupyterLab con Python mediante datos obtenidos de la plataforma DHIME del IDEAM (2024).

Para la estación CHIRIGUANA [25025250] se observa un comportamiento anómalo para los años 2012 y 2016 lo cual indica que presenta datos faltantes para dichas fechas por lo tanto será sometida al respectivo tratamiento de corrección, así mismo para la estación RINCONHONDO [25020260] para llevar a esos valores extremos dentro del límite superior del cuartil número 3 para garantizar una correcta distribución de los datos.



### 6.1.2.1.1.3. Análisis para las estaciones del municipio de Curumaní Cesar

Figura 36. Gráfico caja y bigotes para las Estaciones de precipitación del Municipio de Curumaní Cesar



Nota: Elaborado por el Autor mediante la herramienta JupyterLab con Python (2024)

Tabla 33. Datos Atípicos para las Estaciones del Municipio Curumaní Cesar

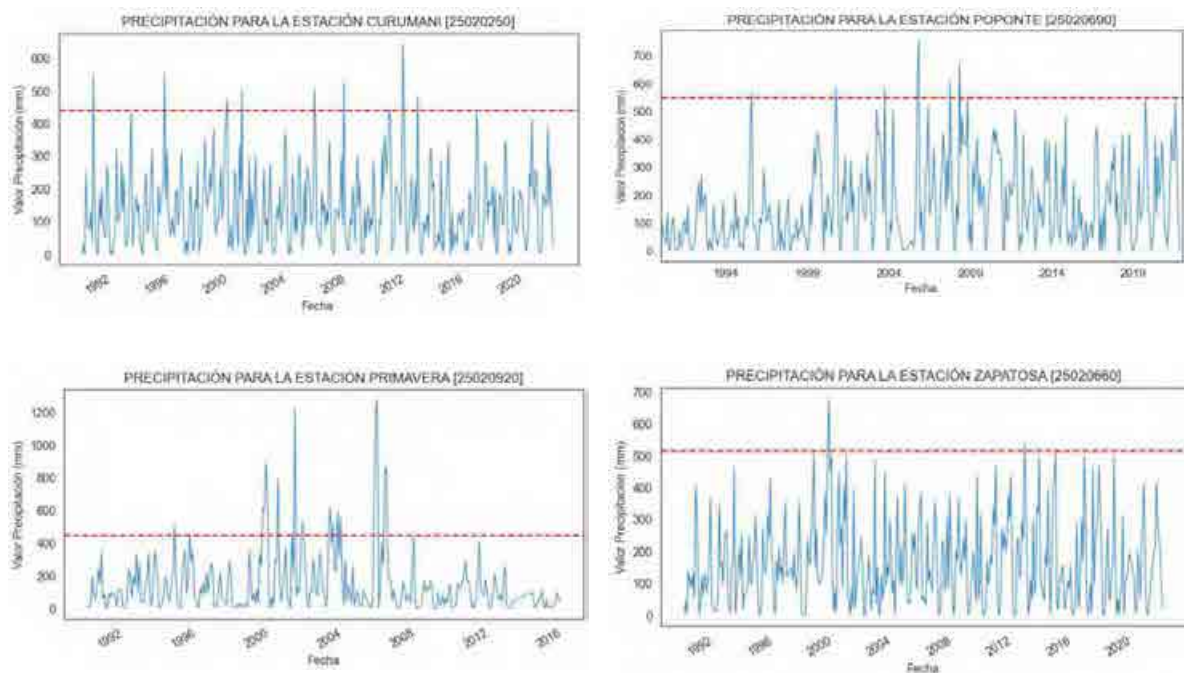
Fecha	Nombre Estación	Código Estación	Valor
10/1/1990	CURUMANI [25020250]	25020250	553
8/1/1995	CURUMANI [25020250]	25020250	554
11/1/1999	CURUMANI [25020250]	25020250	476.4
11/1/2000	CURUMANI [25020250]	25020250	504.2
10/1/2005	CURUMANI [25020250]	25020250	506.7
10/1/2007	CURUMANI [25020250]	25020250	529.6
11/1/2010	CURUMANI [25020250]	25020250	442.8
10/1/2011	CURUMANI [25020250]	25020250	644.3
11/1/2011	CURUMANI [25020250]	25020250	439.3
10/1/2012	CURUMANI [25020250]	25020250	484.1
8/1/1995	POPONTE [25020690]	25020690	566.6
10/1/2000	POPONTE [25020690]	25020690	585
10/1/2003	POPONTE [25020690]	25020690	584
10/1/2005	POPONTE [25020690]	25020690	616

<b>Fecha</b>	<b>Nombre Estación</b>	<b>Código Estación</b>	<b>Valor</b>
11/1/2005	POPONTE [25020690]	25020690	753
10/1/2007	POPONTE [25020690]	25020690	608
5/1/2008	POPONTE [25020690]	25020690	675.9
11/1/2008	POPONTE [25020690]	25020690	554
10/1/1994	PRIMAVERA LA [25020920]	25020920	510
8/1/1995	PRIMAVERA LA [25020920]	25020920	450
8/1/1999	PRIMAVERA LA [25020920]	25020920	618
9/1/1999	PRIMAVERA LA [25020920]	25020920	605
10/1/1999	PRIMAVERA LA [25020920]	25020920	890
11/1/1999	PRIMAVERA LA [25020920]	25020920	673
6/1/2000	PRIMAVERA LA [25020920]	25020920	790
3/1/2001	PRIMAVERA LA [25020920]	25020920	455
5/1/2001	PRIMAVERA LA [25020920]	25020920	1221
10/1/2001	PRIMAVERA LA [25020920]	25020920	530
4/1/2003	PRIMAVERA LA [25020920]	25020920	620
6/1/2003	PRIMAVERA LA [25020920]	25020920	521
9/1/2003	PRIMAVERA LA [25020920]	25020920	591
11/1/2003	PRIMAVERA LA [25020920]	25020920	558
10/1/2005	PRIMAVERA LA [25020920]	25020920	1210
11/1/2005	PRIMAVERA LA [25020920]	25020920	1274
4/1/2006	PRIMAVERA LA [25020920]	25020920	835
5/1/2006	PRIMAVERA LA [25020920]	25020920	870
9/1/1999	ZAPATOZA [25020660]	25020660	679
10/1/2012	ZAPATOZA [25020660]	25020660	539
11/1/2014	ZAPATOZA [25020660]	25020660	520

Nota: Elaborado por el Autor mediante los datos obtenidos de la plataforma DHIME del IDEAM (2024).



Figura 37. Evoluciones Temporales de la Precipitación con Datos Atípicos para las Estaciones del Municipio de Curumaní Cesar

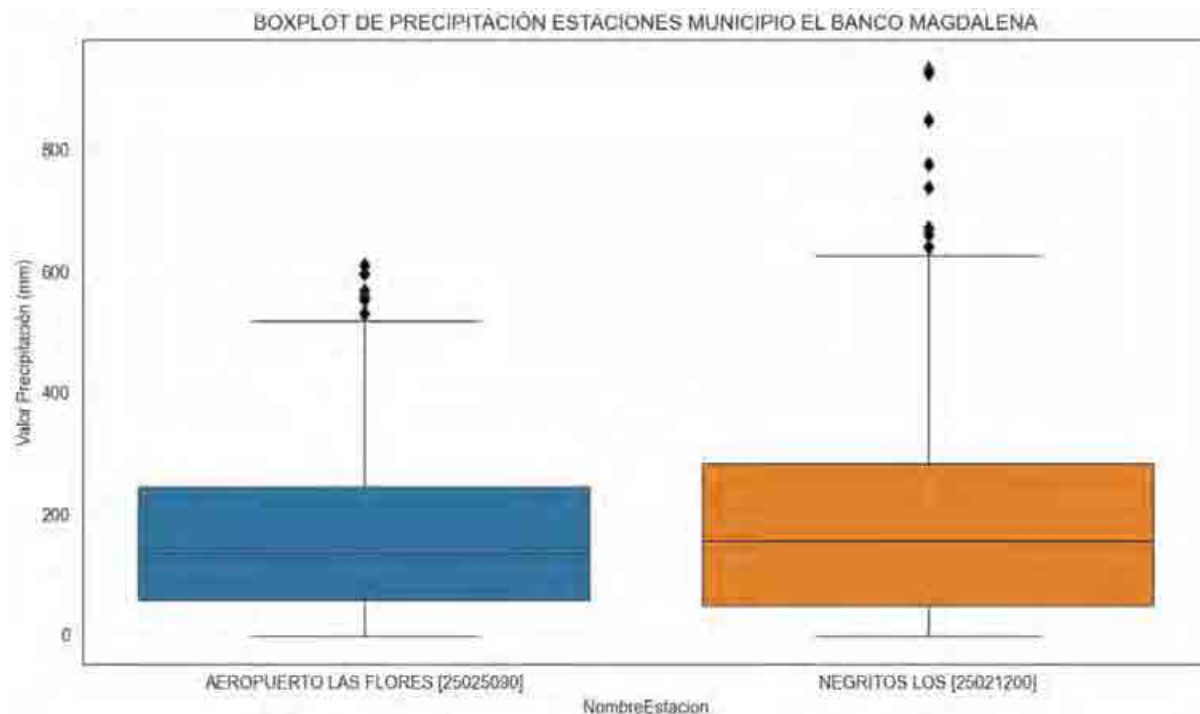


Nota: Elaborado por el Autor con la herramienta JupyterLab con Python mediante datos obtenidos de la plataforma DHIME del IDEAM (2024).

Al visualizar el gráfico de caja y bigotes se observa que la estación PRIMAVERA [25020920] se presentan un mayor número de datos atípicos que están muy por encima del límite superior del rango intercuartílico del tercer cuartil lo cual podemos corroborarlo en la tabla de número 36 de Datos Atípicos y en su Histograma podemos observar su comportamiento llamativo con picos de valores muy extremos, en la tabla 36 podemos corroborar que todas estaciones presentan datos atípicos, en cuanto a la estación ZAPATOSA [25020660], pero al no poder conocer la naturaleza de estos Datos Atípico lo más conveniente es someter a estas estaciones a tratamiento de esto valores para su corrección y así evitar introducir sesgo al pronóstico del modelo ARIMA.

#### 6.1.2.1.1.4. Análisis para las estaciones del municipio de El Banco Magdalena

Figura 38. Gráfico de caja y bigotes para las estaciones del Municipio El Banco Magdalena.



Nota: Elaborado por el Autor mediante la herramienta JupyterLab con Python (2024)

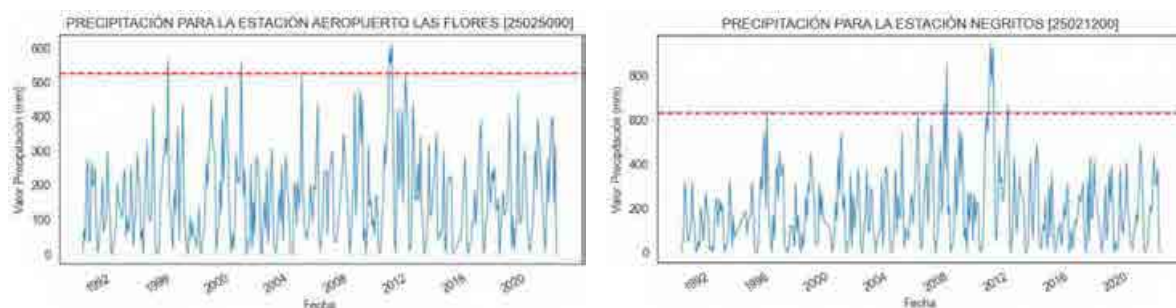
Tabla 34. Datos Atípicos para las Estaciones del Municipio de El Banco Magdalena

Fecha	Nombre Estación	Código Estación	Valor
10/1/1995	AEROPUERTO LAS FLORES [25025090]	25025090	567.7
9/1/2000	AEROPUERTO LAS FLORES [25025090]	25025090	558.2
10/1/2004	AEROPUERTO LAS FLORES [25025090]	25025090	530.6
9/1/2010	AEROPUERTO LAS FLORES [25025090]	25025090	596.1
10/1/2010	AEROPUERTO LAS FLORES [25025090]	25025090	552.9
11/1/2010	AEROPUERTO LAS FLORES [25025090]	25025090	609.3
10/1/1995	NEGRITOS LOS [25021200]	25021200	641
8/1/2007	NEGRITOS LOS [25021200]	25021200	671
10/1/2007	NEGRITOS LOS [25021200]	25021200	850
8/1/2010	NEGRITOS LOS [25021200]	25021200	739

Fecha	Nombre Estación	Código Estación	Valor
<b>9/1/2010</b>	NEGRITOS LOS [25021200]	25021200	934
<b>10/1/2010</b>	NEGRITOS LOS [25021200]	25021200	777
<b>11/1/2010</b>	NEGRITOS LOS [25021200]	25021200	926
<b>11/1/2011</b>	NEGRITOS LOS [25021200]	25021200	661

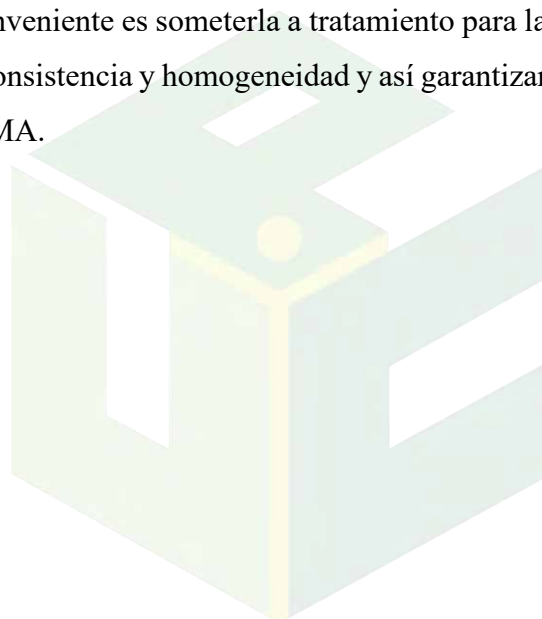
Nota: Elaborado por el Autor (2024) mediante los datos obtenidos de la plataforma DHIME del IDEAM.

Figura 39. Evoluciones Temporales de la Precipitación con Datos Atípicos para las Estaciones del Municipio de El Banco Magdalena



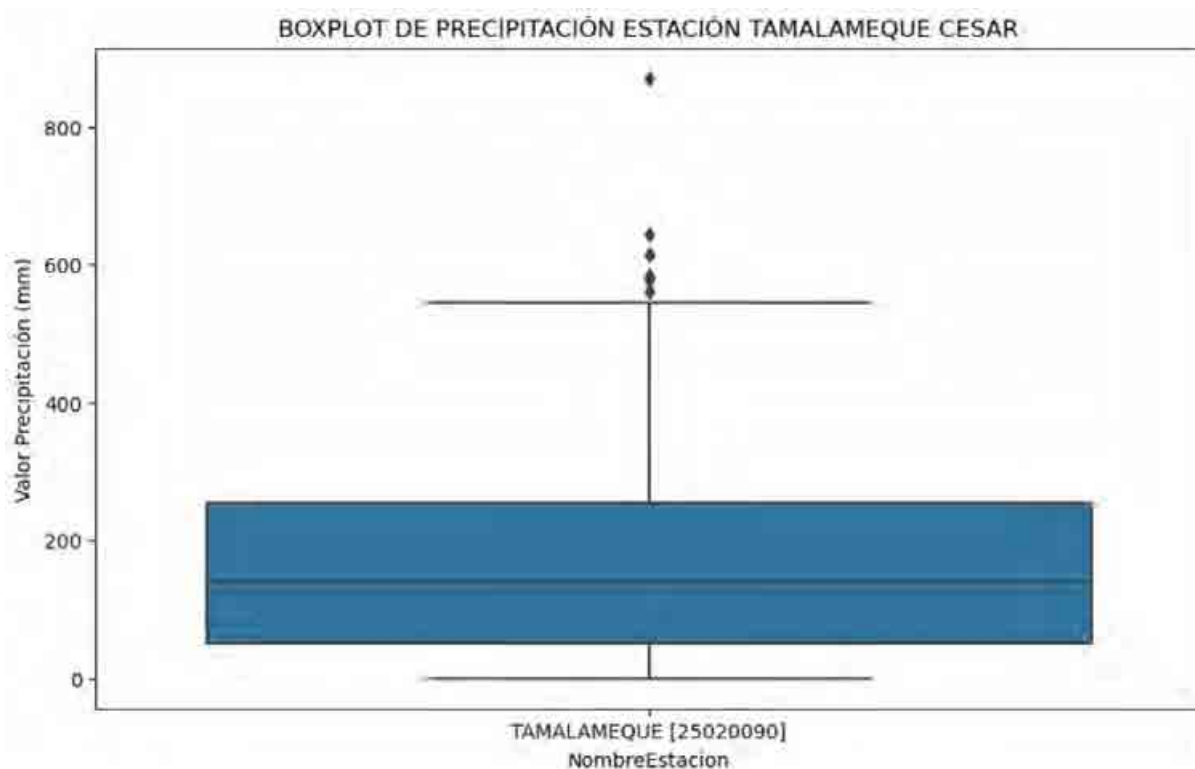
Nota: Elaborado por el Autor con la herramienta JupyterLab con Python mediante datos obtenidos de la plataforma DHIME del IDEAM (2024).

Las estaciones seleccionadas del municipio de El Banco Magdalena presentan una buena consistencia de los datos en cuanto a datos completos en el rango de fecha seleccionadas de 1990 a 2022, no obstante, esto no las deja exentas de presentar datos atípicos, debido a que no se conoce la naturaleza de estos datos lo más conveniente es someterla a tratamiento para la corrección de estos datos atípicos y así mejorar su consistencia y homogeneidad y así garantizar no introducir sesgo al pronóstico del modelo ARIMA.



**6.1.2.1.1.5. Análisis para las estaciones del Municipio de Tamalameque Cesar**

Figura 40. Gráfico de caja y bigotes para la Estación del Municipio Tamalameque Cesar



Nota: Elaborado por el Autor mediante la herramienta JupyterLab con Python (2024)

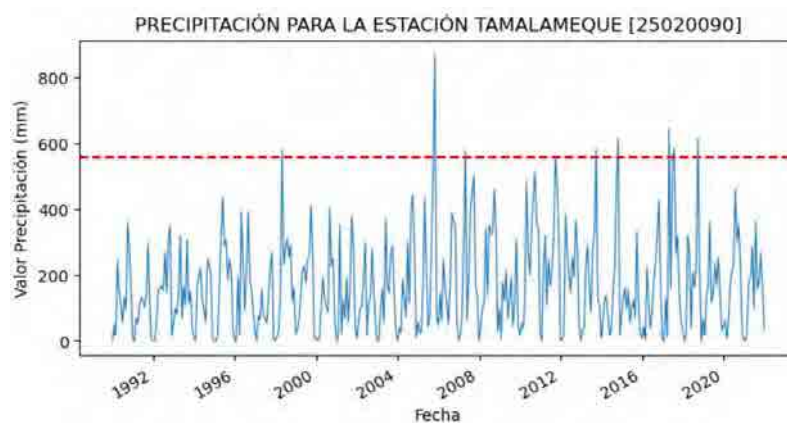
Tabla 35. Datos Atípicos para la Estación del Municipio de Tamalameque Cesar

<b>Fecha</b>	<b>Nombre Estación</b>	<b>Código Estación</b>	<b>Valor</b>
<b>5/1/1998</b>	TAMALAMEQUE [25020090]	25020090	582
<b>11/1/2005</b>	TAMALAMEQUE [25020090]	25020090	870.6
<b>5/1/2007</b>	TAMALAMEQUE [25020090]	25020090	577
<b>10/1/2011</b>	TAMALAMEQUE [25020090]	25020090	561
<b>10/1/2013</b>	TAMALAMEQUE [25020090]	25020090	582
<b>11/1/2014</b>	TAMALAMEQUE [25020090]	25020090	616
<b>5/1/2017</b>	TAMALAMEQUE [25020090]	25020090	645
<b>8/1/2017</b>	TAMALAMEQUE [25020090]	25020090	584

Fecha	Nombre Estación	Código Estación	Valor
10/1/2018	TAMALAMEQUE [25020090]	25020090	615

Nota: Elaborado por el Autor (2024) con la herramienta JupyterLab con Python mediante datos obtenidos de la plataforma DHIME del IDEAM.

Figura 41. Evolución Temporal de la Precipitación con Datos Atípicos para la estación del Municipio de Tamalameque Cesar



Nota: Elaborado por el Autor con la herramienta JupyterLab con Python mediante datos obtenidos de la plataforma DHIME del IDEAM (2024).

La estación para el municipio de Tamalameque presenta una buena consistencia a lo largo del periodo de tiempo seleccionado lo cual es indicio una buena integridad de sus datos. No obstante, presenta datos atípicos por lo que será sometida a tratamientos de estos para asegurar una integridad aún más fiable.



### 6.1.2.2. Estaciones Meteorológicas sin Datos Atípicos

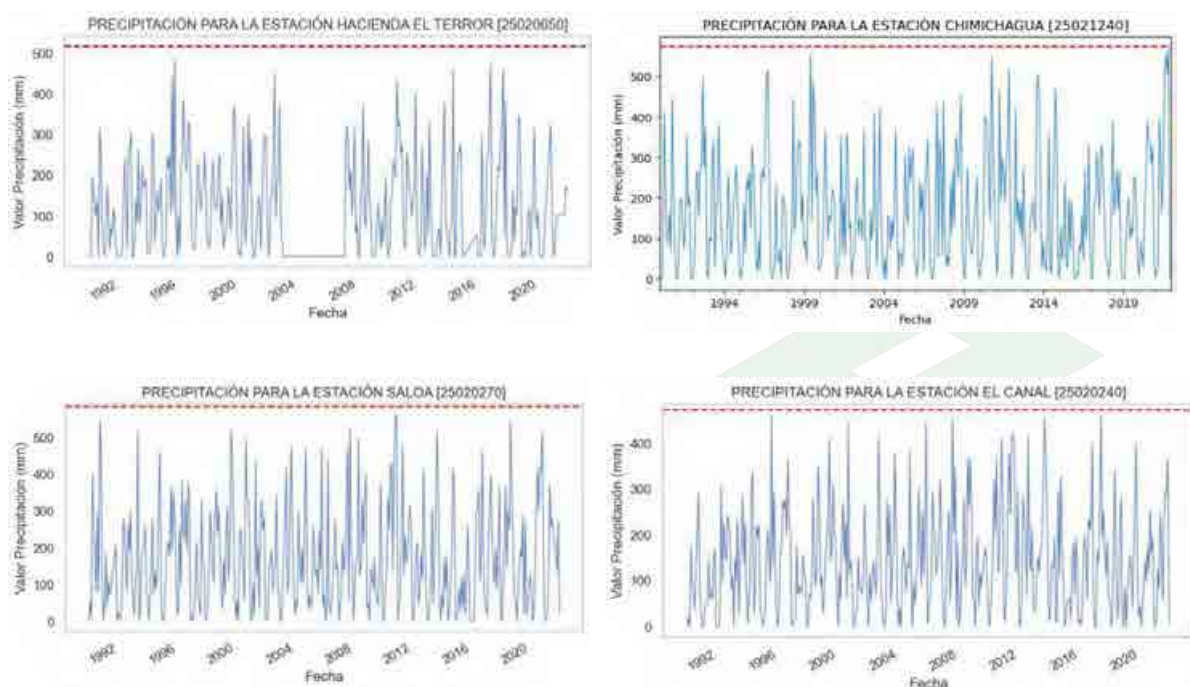
Nota: La línea en la parte superior de los Histograma representa al Limite Superior del rango intercuartílico, utilizado para detección de valores atípicos, es un valor calculado que actúa como un umbral para identificar como posibles valores atípicos aquellos valores que sean superiores al cuartil número tres (Q3) más la suma de 1.5 veces por el rango intercuartílico (IQR) en los conjunto de datos, una vez hecha la corrección los valores deben estar por debajo de este umbral en cada conjunto de datos.

$$L_{sup} = Q_3 + 1.5 * IQR$$

Para realizar la corrección de los valores atípicos en los conjuntos de datos de las estaciones meteorológicas para el estudio de este trabajo se optó por reemplazar los valores atípicos por la mediana de los valores no atípicos ya que esta presenta robustez ante los valores extremos, permitiendo así una estimación más robusta de la tendencia central de los datos.

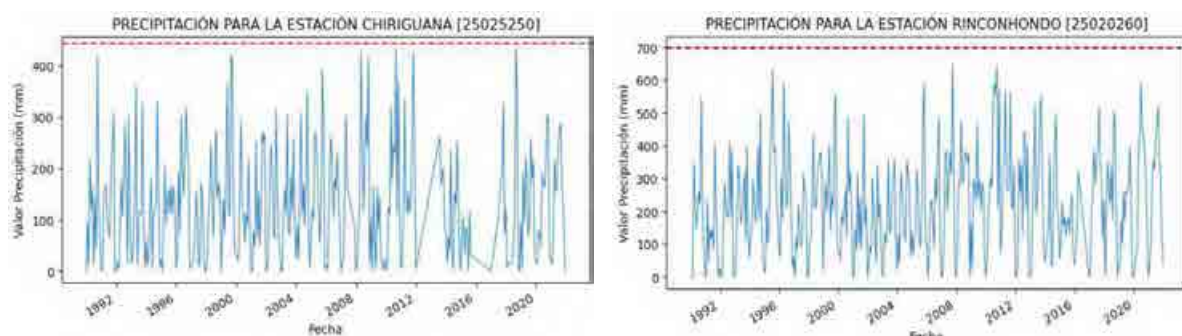
#### 6.1.2.2.1. Variable de precipitación

Figura 42. Evoluciones Temporales de la Precipitación sin Datos Atípicos para las Estaciones de Precipitación del Municipio de Chimichagua Cesar



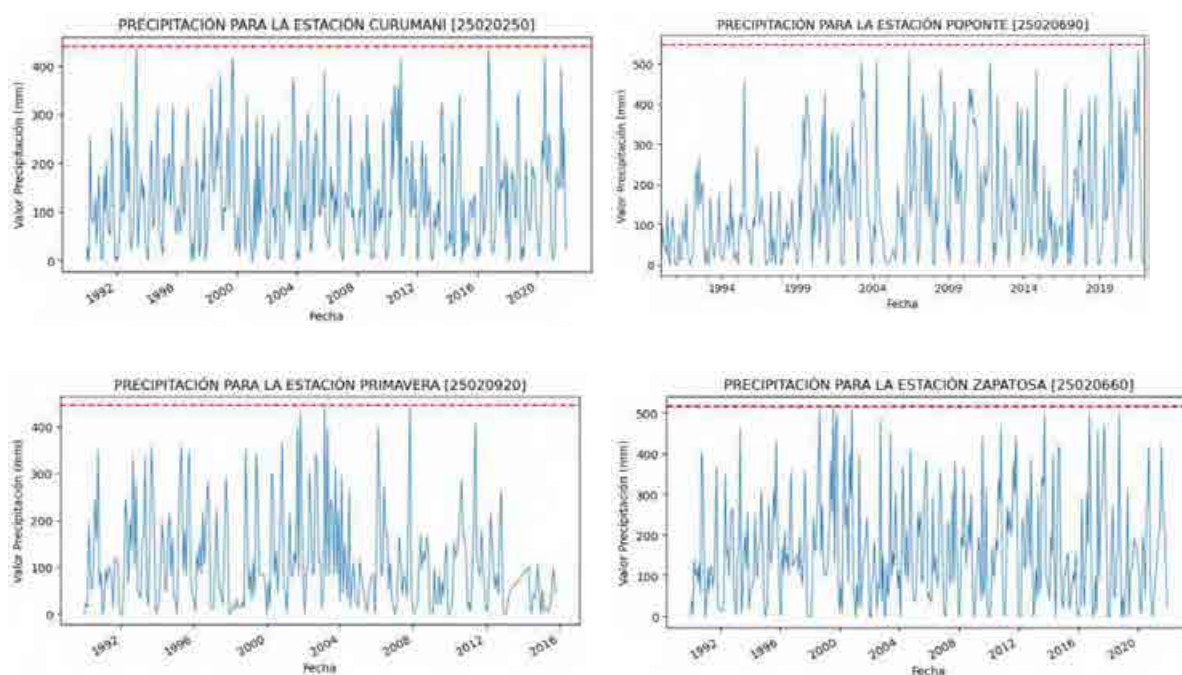
Nota: Elaborado por el Autor con la herramienta JupyterLab con Python mediante datos obtenidos de la plataforma DHIME del IDEAM (2024).

Figura 43. Evoluciones Temporales de la Precipitación sin Datos Atípicos para las Estaciones del Municipio de Chiriguaná Cesar



Nota: Elaborado por el Autor con la herramienta JupyterLab con Python mediante datos obtenidos de la plataforma DHIME del IDEAM (2024).

Figura 44. Evoluciones Temporales de la Precipitación sin Datos Atípicos para las Estaciones del Municipio de Curumaní Cesar



Nota: Elaborado por el Autor con la herramienta JupyterLab con Python mediante datos obtenidos de la plataforma DHIME del IDEAM (2024).

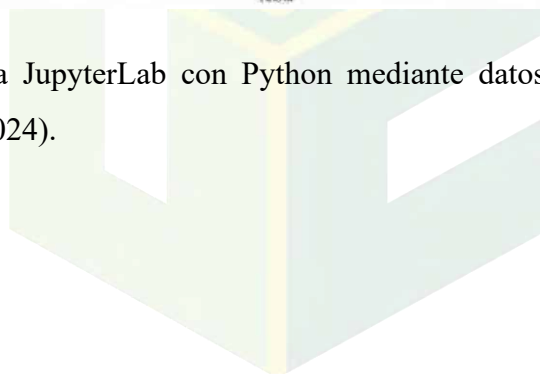
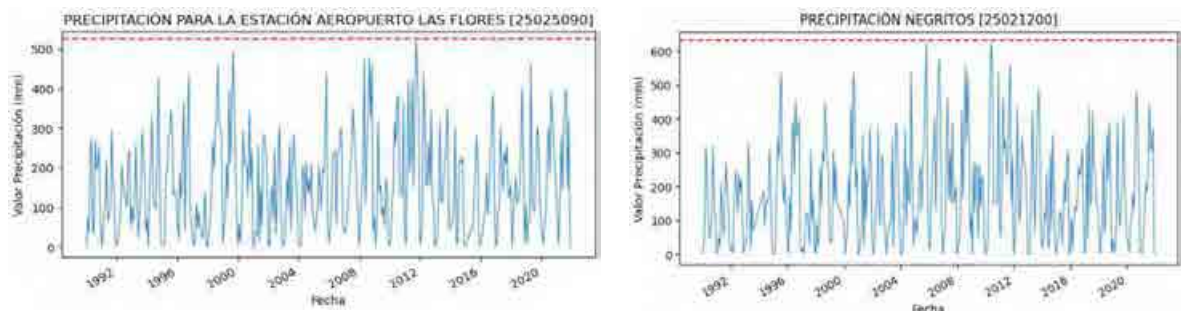


Figura 45. Histogramas sin Datos Atípicos para las Estaciones del Municipio de El Banco Magdalena

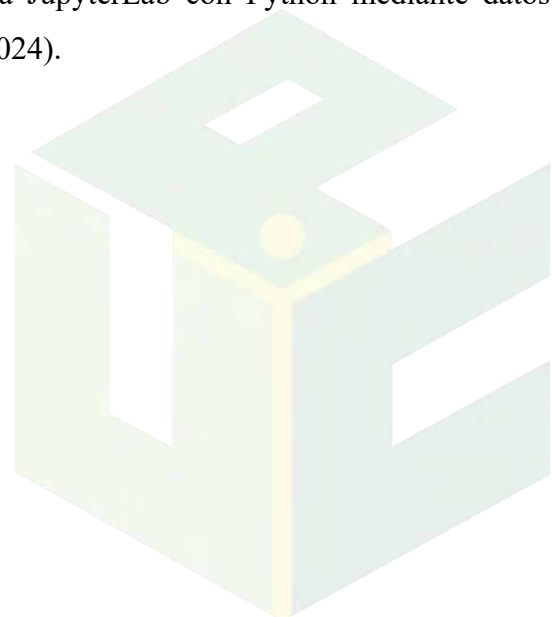


Nota: Elaborado por el Autor con la herramienta JupyterLab con Python mediante datos obtenidos de la plataforma DHIME del IDEAM (2024).

Figura 46. Evolución Temporal de la Precipitación sin Datos Atípicos para la Estación del Municipio del Tamalameque



Nota: Elaborado por el Autor con la herramienta JupyterLab con Python mediante datos obtenidos de la plataforma DHIME del IDEAM (2024).



### 6.1.2.3 Reconocimiento de Datos Faltantes

Para corregir los datos faltantes en la se hará mediante proceso de imputación de los datos en las series de tiempo de las estaciones que presentan datos faltantes o saltos en secuencia de datos con respecto a la fecha de mismos datos se realiza un proceso de interpolación utilizando el método de interpolación IDW (Inverse distance weighting) en combinación con el método de Haversine para calcular distancias utilizando un Script en Python.

El método IDW está basado principalmente en la inversa de la distancia elevada a una potencia matemática (esri, 2024). El parámetro Potencia permite controlar el significado de puntos conocidos en los valores interpolados, en función de su distancia respecto del punto de salida.

El método de la media ponderada por el inverso de la distancia (Inverse Distance Weighting) estima la variable Z a partir de medias ponderadas mediante la función (Gomariz, 2013):

$$Z(X_j) = \frac{\sum_{i=1}^n z(X_i) \cdot d_{ij}^{-\alpha}}{\sum_{i=1}^n d_{ij}^{-\alpha}}$$

Donde Z es el valor que se ha estimado en el punto  $X_j$  para estos datos.

El método de Haversine se utiliza para calcular la distancia entre dos puntos en una superficie esférica (como la Tierra) a partir de sus coordenadas de latitud y longitud. Esta distancia se emplea en el cálculo de los pesos en el método IDW (Guerrero, 2022) y su fórmula es:

$$d = 2r \arcsin \left( \sqrt{\sin^2 \left( \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{2} \right) + \cos(\varphi_1) \cdot \cos(\varphi_2) \cdot \sin^2 \left( \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{2} \right)} \right)$$

Dónde d se refiera a la distancia entre los dos puntos de interés a lo largo de una superficie esférica y r su radio.

$\varphi_1$ , es la latitud del punto 1 y  $\varphi_2$ , es la latitud del punto 2,

$\lambda_1$ , es la longitud del punto 1 y  $\lambda_2$  es la longitud del punto 2.

Este procedimiento se llevó a cabo haciendo uso del lenguaje de programación Python haciendo uso de su herramienta JupyterLab el cual posee múltiples librerías especializadas para su implementación y facilitar este proceso de manera automatizada, los paso este proceso se describe en detalle a continuación:

a. Se cargan los datos en JupyterLab

Se cargan los archivos CSV con los datos y se comienza a hacer una inspección visual en los DataFrame de las estaciones mediante un Histograma verificando si presentan saltos en la secuencia de los datos o utilizando las funciones `isna().sum()` combinados realizan una búsqueda automatizada en caso de haber valores NaN en el DataFrame lo cual se realiza con las siguientes librerías en de Python en JupyterLab:

```
import pandas as pd
```

```
import matplotlib as plt
```

Una vez que se ha identificado saltos o valores NaN en la secuencia de los meses de datos, en este caso no se encontró valores NaN, pero si se observó saltos en la secuencia de los meses de datos en los DataFrame para las estaciones HACIENDA EL TERROR [25020650] y CHIRIGUANA [25025250], para la primera se observa un salto desde las 2003-03-01 hasta la fecha 2007-01-01 y el segunda se observa que presenta dos saltos en la secuencia de los datos, el primer salto iba desde la fecha 2012-01-01 hasta 2013-08-01, el segundo salto iba desde la fecha 2015-09-01 hasta 2017-01-01.

b. Generación de DataFrame con secuencia de datos NaN

Una vez que se han identificado los saltos en las secuencias de los datos se procede generar un DataFrame con valores NaN con fechas dentro del rango de los saltos haciendo de la librería:

```
import numpy as np
```

La cual cuenta con una función `np.nan` y la librería Pandas con su función `pd.date_range()` en combinación con la función `pd.DataFrame()` de la librería Pandas

permiten generar un DataFrame con valores NaN dentro del rango en que se presentan los saltos de fechas.

c. Concatenación de los DataFrame

Una vez generado el DataFrame con valores NaN se procede hacer una concatenación que es unir los DataFrame tanto el original como el generado con los valores NaN en uno solo y esto se realiza con la librería Pandas haciendo de su función `pd.concat()` se realiza la concatenación del DataFrame generado con valores NaN con el DataFrame original dentro del rango de las fechas donde se presentan los saltos, esto se hizo para las estaciones HACIENDA EL TERROR [25020650] y CHIRIGUANA [25025250].

d. Imputación de los datos

Luego de haber hecho la concatenación se realiza la imputación de los datos por medio de construcción un Script de Python que realiza este proceso de manera automatizada haciendo uso de las librerías:

```
from scipy.spatial import distance
```

```
from math import radians
```

```
from sklearn.metrics.pairwise import haversine_distances
```

Las cuales permiten implementar el método de interpolación IDW (Inverse distance weighting) en combinación con el método para calcular la distancia de Haversine con lo que se hace las construcción tres funciones:

```
def distancia()
```

```
def calcular_peso()
```

```
def imputar()
```

1. `def distancia(lat1, lon1, lat2, lon2)`

Esta función utiliza la fórmula del haversine para calcular la distancia geográfica entre dos puntos en la superficie de la Tierra. Los parámetros `lat1`, `lon1`, `lat2` y `lon2` son las latitudes

y longitudes de cada uno de los dos puntos. La función convierte estas coordenadas de grados a radianes, calcula la distancia angular utilizando la fórmula del haversine y luego la multiplica por el radio de la Tierra, que es alrededor de 6371 kilómetros, para obtener la distancia en kilómetros.

## 2. def calcular\_peso(distancia, p)

Esta función calcula peso de interpolación utilizando la distancia y un parámetro de potencia  $p$ . La distancia elevada a la potencia  $p$  es inversamente proporcional al peso, lo que significa que los puntos más cercanos tendrán un mayor impacto (mayor peso) en la imputación que los puntos más lejanos. El peso se define como infinito si la distancia es cero (lo que significa que estamos en el mismo lugar), lo que técnicamente coloca toda la importancia allí.

## 3. def imputar(df, estaciones, p)

Esta función es el núcleo de la imputación. Toma como parámetro de entrada un DataFrame  $df$  que necesita imputación y una lista de DataFrames de estaciones que contienen los datos de las otras estaciones meteorológicas, y un parámetro  $p$  que se usa para calcular los pesos. La función:

Carga el DataFrame  $df$  para leer todos sus datos e iniciar a procesarlo.

Extrae las coordenadas de  $df$  y de cada DataFrame en la lista de estaciones.

Calcula las distancias y los pesos correspondientes entre  $df$  y cada estación.

Convierte las columnas de fecha a formato `datetime` para manejarlas más fácilmente.

Para cada registro en  $df$  que tiene un valor faltante se utiliza los datos de las estaciones junto con los pesos calculados para estimar los valores a imputar. Esto se hace mediante un promedio ponderado de los valores disponibles de las estaciones, donde los pesos están determinados por la inversa de la distancia elevada a  $p$ , y por último devuelve el DataFrame  $df$  con los valores imputados.

Para verificar que el proceso de imputación de los datos no haya causado una alteración en la variabilidad de los datos, ya que es de vital importancia porque cambios significativos en la varianza de los datos podría causar afectaciones a los pronósticos de los modelos predictivo,

por lo que optó en realizar el test de Levene mediante la librería Scipy de Python para este propósito de verificar que se no haya producido un cambio significativo en la varianza de los datos.

*from scipy.stats import levene*

El test de Levene es una prueba estadística utilizada para evaluar la igualdad de varianzas entre dos o más grupos de datos (Serrano, 2016).

El test de Levene utiliza el cálculo de una estadística de prueba para comparar las variaciones entre los grupos de datos. Todas las muestras provienen de poblaciones con varianzas iguales, según la hipótesis nula (H0). Según la hipótesis alternativa (H1), al menos una de las muestras se originó en una población con una varianza diferente.

$$W = \frac{(N - k)}{(k - 1)} \left[ \frac{\sum_{i=1}^k N_i (\bar{Z}_i - \bar{Z})^2}{\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{N_i} (Z_{ij} - \bar{Z}_i)^2} \right]$$

Donde:

N es el número de observaciones,

K es el número de grupos de muestras,

N<sub>i</sub> es el tamaño de la muestra en i,

Z<sub>i</sub> es la media de la muestra en i,

Z es media general de todas las observaciones,

Z<sub>ij</sub> es valor de las observaciones en j en la muestra i.

La estadística W sigue una distribución de Fisher con k - 1 y N - k grados de libertad bajo la hipótesis nula.

En que los resultados serán si el valor p asociado con la estadística de prueba es mayor que el nivel de significancia, generalmente 0.05, no hay evidencia suficiente para rechazar la hipótesis nula. Esto sugiere que no hay diferencias significativas en las varianzas entre la serie

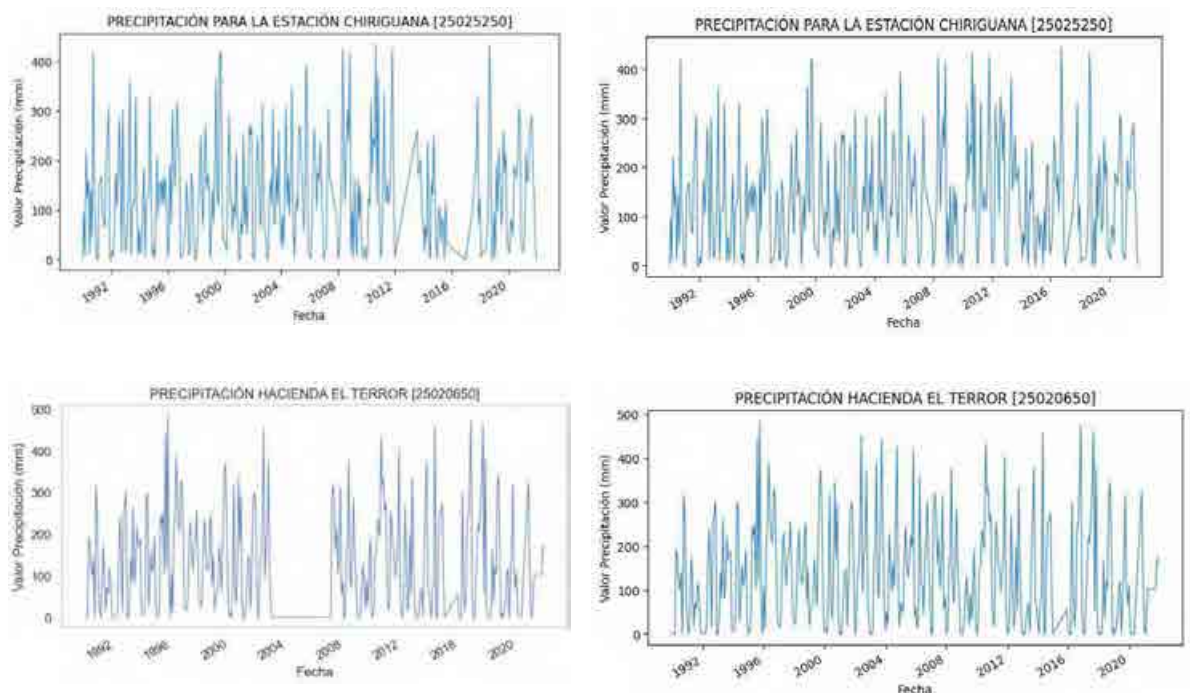
de tiempo a la que se le hizo la imputación de datos y serie original y que este proceso se realizó de manera correcta y eficiente con el método de interpolación IDW.

Si el valor  $p$  es menor que 0.05, se rechaza la hipótesis nula en favor de la hipótesis alternativa. Esto indica que al menos una de las series de tiempo tiene una varianza significativamente diferente a la original, por lo que este proceso no fue correcto y debe reintentar o usar otro método para realizar la imputación de los datos

### 6.1.2.3.1. Variable de Precipitación

Nota: Los Histogramas con datos faltantes son los que se encuentran a la izquierda y a la derecha después de realizar el proceso de imputación de datos con el método IDW.

Figura 47. Evoluciones Temporales de la Precipitación de Precipitaciones para las Estaciones CHIRIGUANA [25025250] y HACIENDA EL TERROR [25020650] antes y después de realizar la Imputación de los Datos Faltantes.



Nota: Elaborado por el Autor con la herramienta JupyterLab con Python mediante datos obtenidos de la plataforma DHIME del IDEAM (2024).

Una vez realizado el proceso de imputación de los datos faltantes se realizó el test de Levene con los siguientes resultados Para la estación CHIRIGUANA [25025250].

$$P \text{ valor} = 0.62$$

Al igual Para la estación HACIENDA EL TERROR [25020650] también se realizó se la prueba de Levene con el que se obtuvo el siguiente resultado una realizado.

$$P \text{ valor} = 0.995$$

Los valores P obtenidos en el test de Levene no rechazan la hipótesis nula lo que indican que la imputación no ha alterado significativamente la variabilidad de los datos de precipitación en estas estaciones. Esto es crucial porque garantiza que cualquier análisis realizado con estos datos imputados (como modelado hidrológico, predicción meteorológica o estudios de variabilidad climática) no se vea afectado negativamente por cambios en la dispersión de los datos causados por la imputación.

#### **6.1.2.3.2. Zonificación**

Este procedimiento se realizó con la herramienta de ESRI ArcGIS Pro cuyos pasos se describen de la siguiente manera.

- Preparación de datos:

Se Obtuvieron los datos de las estaciones meteorológicas para la variable de Precipitación, Temperatura y por último se obtienen las variables de Humedad Relativa y Velocidad del Viento se obtuvieron de la plataforma NASA POWER | DAV para cada coordenada de las estaciones de estudio, todas estas se fueron descargadas en formato .CSV, para su posterior ajuste en promedios multianuales el periodo de 1990 – 2021 para cargarse al software ArcGIS Pro.

Se configuró el software de ArcGIS Pro para trabajar en el sistema de coordenadas WGS84 UTM (Universal Transverse Mercator) reconocido por su precisión y capacidad para reducir distorsiones. Además, facilitó la interoperabilidad entre diferentes fuentes de datos geospaciales y permitió realizar cálculos de distancias y áreas de manera precisa, lo que fue esencial en el análisis espacial realizado.

Luego, se creó un nuevo Mapa al cual se agregaron todos los datos de las variables de estudio en formato .TXT para evitar posibles errores con los formatos .CSV y .XLSX utilizando la herramienta "Add Data". Posteriormente, se hace uso de la herramienta "Show Display X Y" donde se configura las coordenadas para Latitud y Longitud y el sistema de referencia de cada capa de Puntos como WGS 1984 Zone 18S.

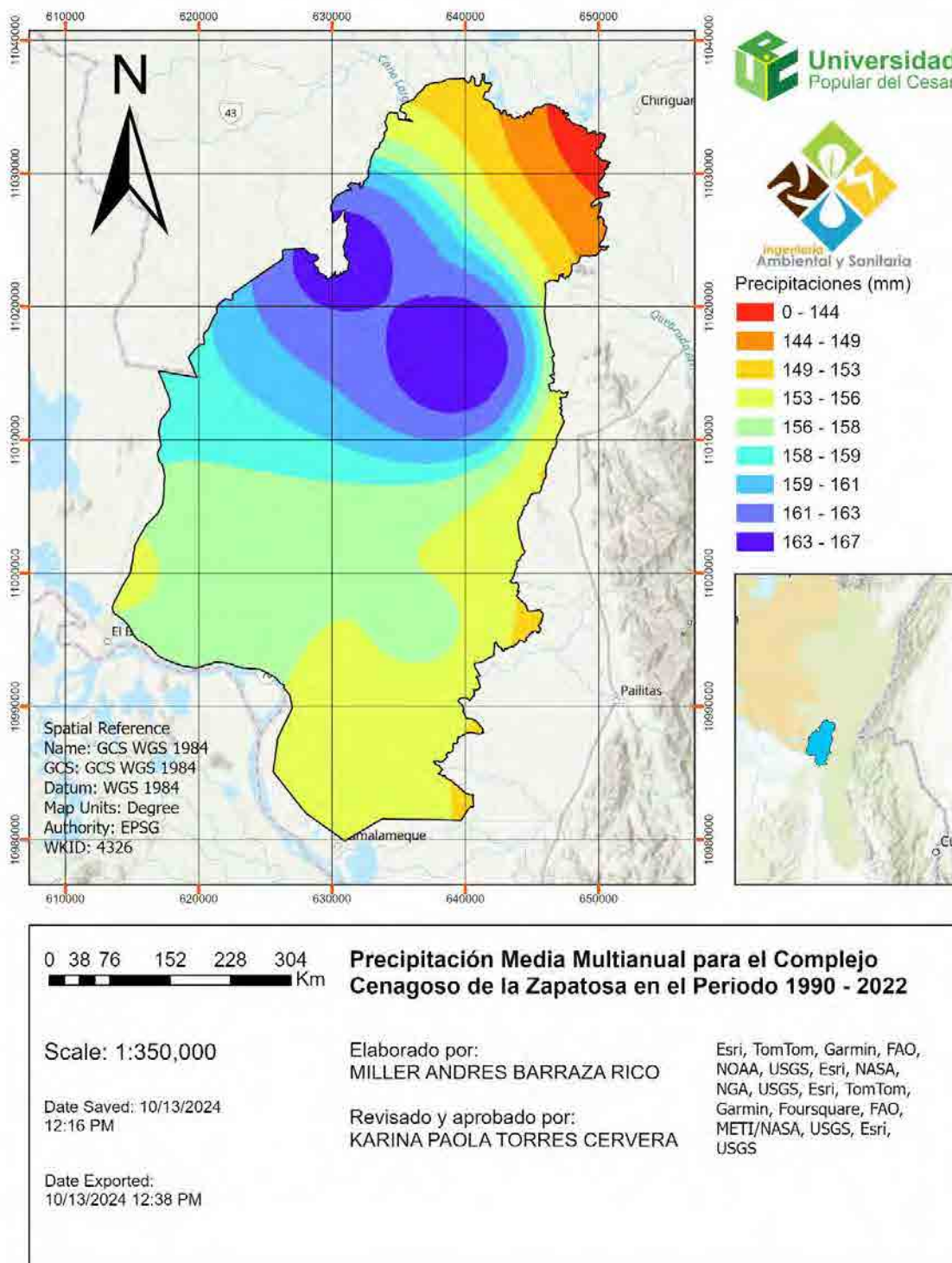
Luego, se añadió los archivos .SHP de los límites geográficos del Complejo Cenagoso de la Zapatosa y departamentales donde se unificaron todas las capas para proceder a realizar el proceso de interpolación de las isoyetas, se empleó la herramienta "IDW" (Inverse Distance Weighted) dentro del apartado de "Spatial Analyst Tools" con la herramienta "Interpolation". Se configuraron los parámetros de entrada, como las estaciones y sus valores de cada variable de estudio dentro del contorno de la capa del Complejo Cenagoso de la Zapatosa, para generar una capa ráster de superficie.

Finalmente, cada una de las capas ráster fue configurada para representar mapas de las variables mediante la propiedad de Simbología "Clasificar" con las paletas de colores las líneas de contorno de cada capa. Se ajustaron las clases e intervalos de colores de las isoyetas y se realizó el diseño final del mapa de exportación, incluyendo títulos y otros elementos gráficos. El diseño fue exportado en el formato JPG. Este proceso fue replicado para los datos de temperatura, generando isotermas y así mismo para las variables de Humedad relativa y Velocidad del viento.

A continuación, se presenta cada diseño para cada una de las variables seleccionadas.

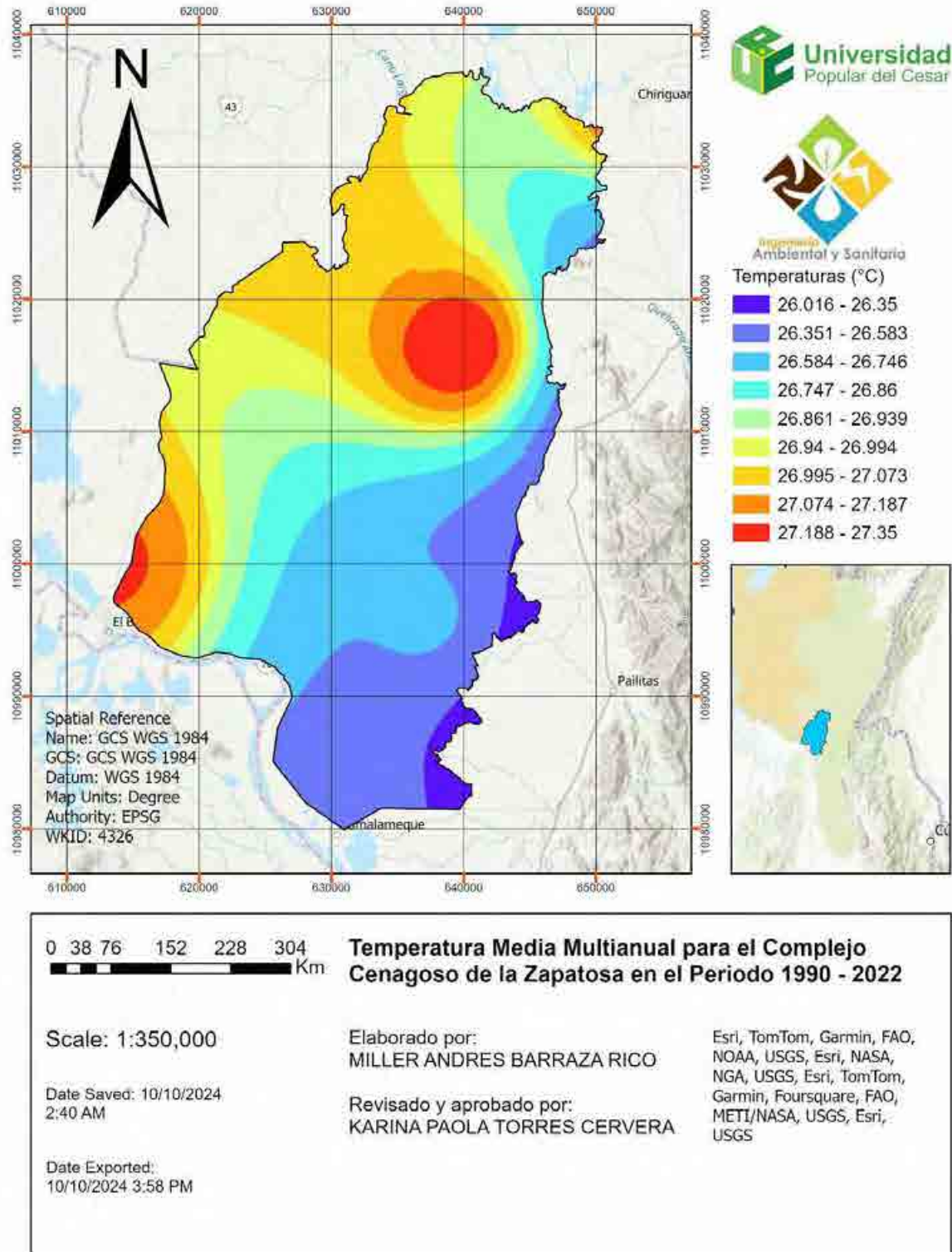


Figura 48. Mapa de Precipitaciones Multianual para Complejo Cenagoso de la Zapatosa en el periodo 1990-2021.



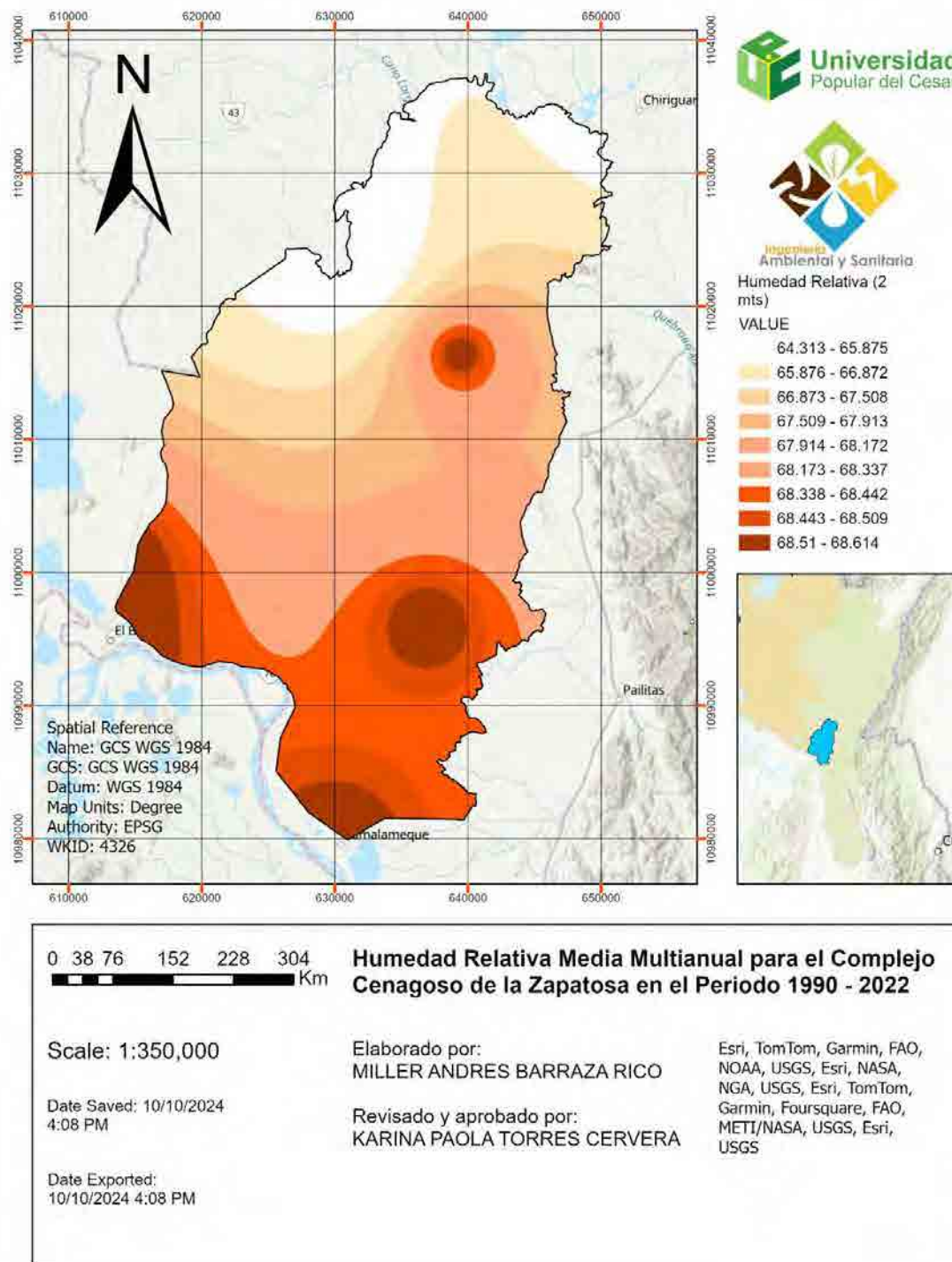
Nota: Elaborado por el Autor (2024) mediante el Software ArcGIS Pro

Figura 49. Mapa de Temperaturas Multianual para el Complejo Cenagoso de la Zapatosa en el periodo 1990-2021



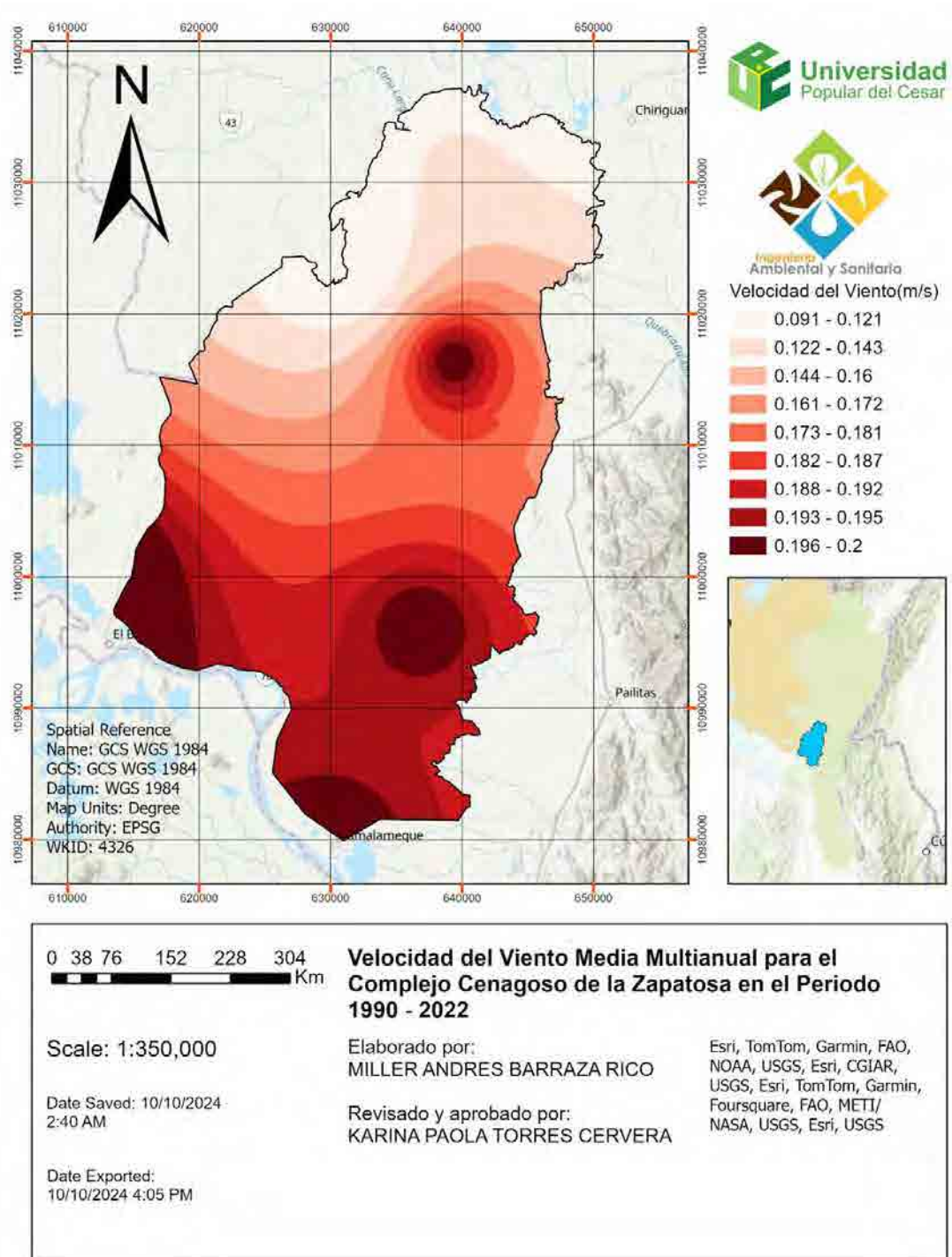
Nota: Elaborado por el Autor (2024) mediante el Software ArcGIS Pro

Figura 50. Mapa de Humedad Relativa Multianual para el Complejo Cenagoso de la Zapatosa en el periodo 1990-2021



Nota: Elaborado por el Autor (2024) mediante el Software ArcGIS Pro

Figura 51. Mapa de Velocidad del Viento para el Complejo Cenagoso de la Zapatosa en el periodo 1990-2021.



Nota: Elaborado por el Autor (2024) mediante el Software ArcGIS Pro

### 6.1.3. *Análisis de consistencias de las variables meteorológicas*

Para este análisis se realizó una curva doble masa para verificar la consistencia de los datos de precipitación lo largo del periodo seleccionado para el estudio en las estaciones del área de influencia del Complejo Cenagoso de la Zapatosa donde se optó tomar como datos de referencia los datos de precipitación de la colección de datos "UCSB-CHG/CHIRPS/DAILY" que es proveída por Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data (CHIRPS), que es un conjunto de datos de precipitación cuasi global de más de 30 años con una resolución espacial de 5,5 km, Su estimación se realiza con la combinación de datos de estaciones junto a estimaciones basadas en satélites de la NASA y NOAA. Esto permite obtener un producto mixto mejorado, evitando sesgos en zonas rurales y territorios complejos.

La obtención de estos se realizó mediante la herramienta Google Earth Engine seleccionando un punto con las mismas coordenadas de una de las estaciones de los municipios de área de influencia del Complejo Cenagoso de la Zapatosa como son las siguientes CHIMICHAGUA [25021240], CHIRIGUANA [25025250], CURUMANI [25020250], AEROPUERTO LAS FLORES [25025090] y TAMALAMEQUE [25020090] donde se seleccionó cada de las coordenadas geográficas se ubicó un punto en Google Earth Engine y se recreó una serie histórica de precipitación en las estaciones mencionadas que se usarán como referencia para evaluar la consistencia de cada una de las estaciones de precipitación de sus municipios.

Para corroborar este análisis realizó una correlación Spearman de las series histórica de precipitación del conjunto de datos CHIRPS con cada una de las estaciones donde en las que se tomaron las coordenadas geográficas para verificar que tan correlacionadas están los datos de CHIRPS con los de las estaciones.

Para la estación CHIMICHAGUA [25021240], el resultado de la correlación fue el siguiente:

$$r = 0.819$$

Para la estación CHIRIGUANA [25025250], el resultado de la correlación fue el siguiente:

$$r = 0.78$$

Para la estación CURUMANI [25020250], el resultado de la correlación fue el siguiente:

$$r = 0.79$$

Para la estación AEROPUERTO LAS FLORES [25025090], el resultado fue el siguiente:

$$r = 0.79$$

Para la estación TAMALAMEQUE [25020090], el resultado de la correlación fue el siguiente:

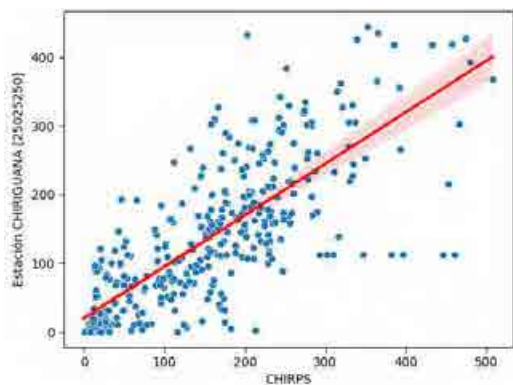
$$r = 0.83$$

las correlaciones obtenidas, todas son bastante altas ( $r=0.78$  a  $r=0.83$ ), lo que indica que hay una fuerte correlación monótonica entre las mediciones de precipitación de los datos de CHIRPS y las estaciones de los municipios de estudio. Esto podría indicar que los datos de CHIRPS son bastante confiables para estas áreas específicas o que ambos métodos de medición están capturando adecuadamente eventos de precipitación similares.

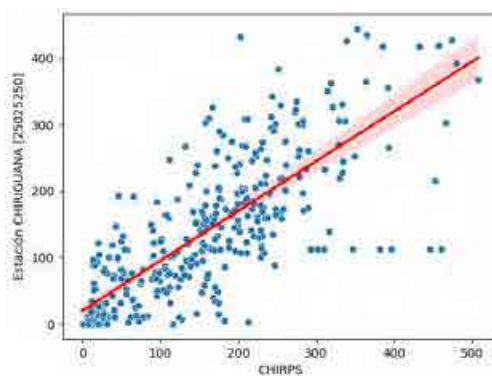


Figura 52. Gráficos de Correlación Datos de Estaciones vs Datos de Chirps

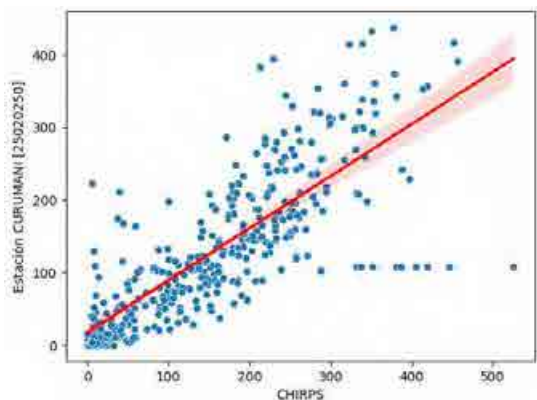
CHIMICHAGUA [25021240]



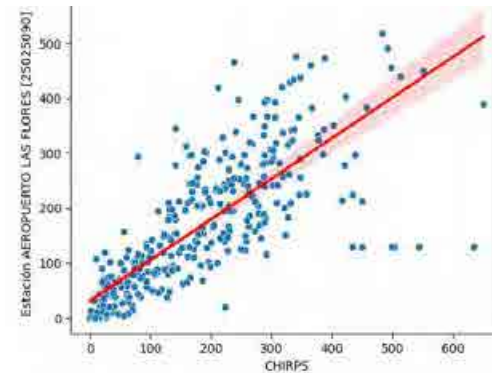
CHIRIGUANA [25025250]



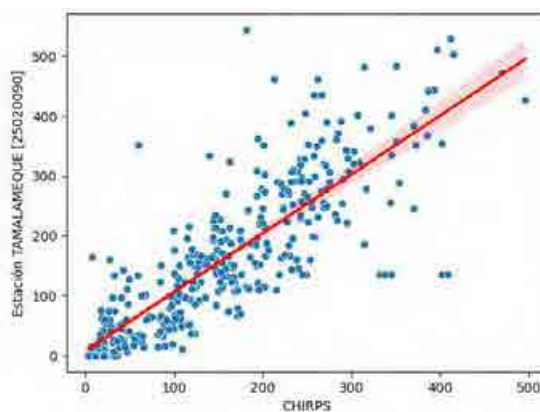
CURUMANI [25020250]



AEROPUERTO LAS FLORES [25025090]



TAMALAMEQUE [25020090]

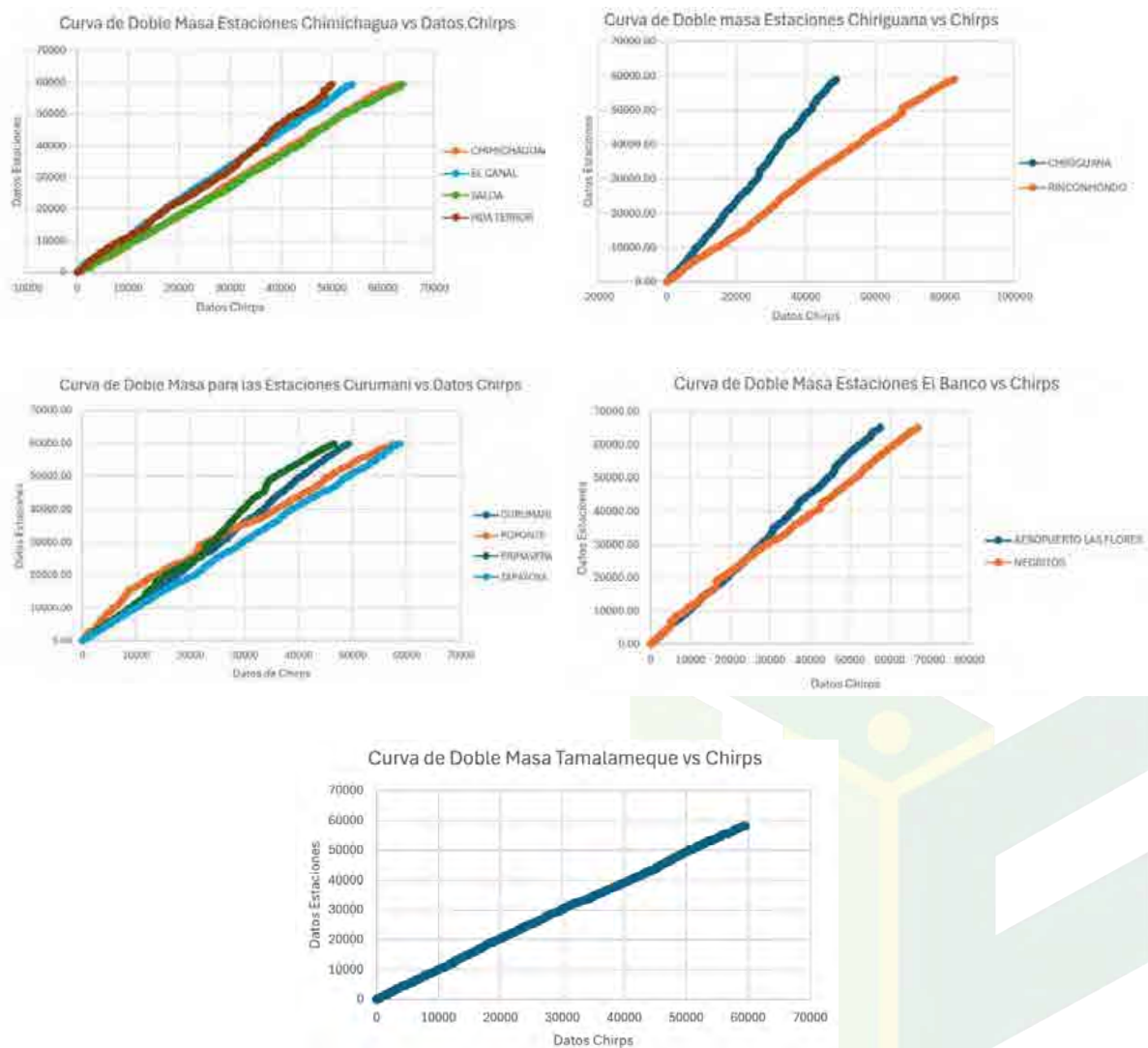


Nota: Elaborado por el Autor con la herramienta JupyterLab con Python mediante datos obtenidos de la plataforma DHIME del IDEAM y CHIRPS (2024).

Los gráficos y los coeficientes de correlación muestran una fuerte correlación positiva entre los datos de CHIRPS y las mediciones terrestres en todas estas estaciones. Estas correlaciones sugieren que CHIRPS puede ser un método útil para estimar la precipitación en estas áreas, los datos de CHIRPS pueden ser muy útiles para el análisis de curva de doble masa, proporcionando una serie de referencia continua y geográficamente extensa de alta resolución espacial que puede ayudar a evaluar y calibrar otros conjuntos de datos hidrometeorológicos como las estaciones en tierra como es el caso de las estaciones meteorológicas de los municipio en circundante al Complejo Cenagoso de la Zapatosa.

### 6.1.3.1. Análisis de consistencia

Figura 53. Gráficos de análisis de consistencia de datos de las estaciones de los municipios del CCZ vs Datos de Chirps



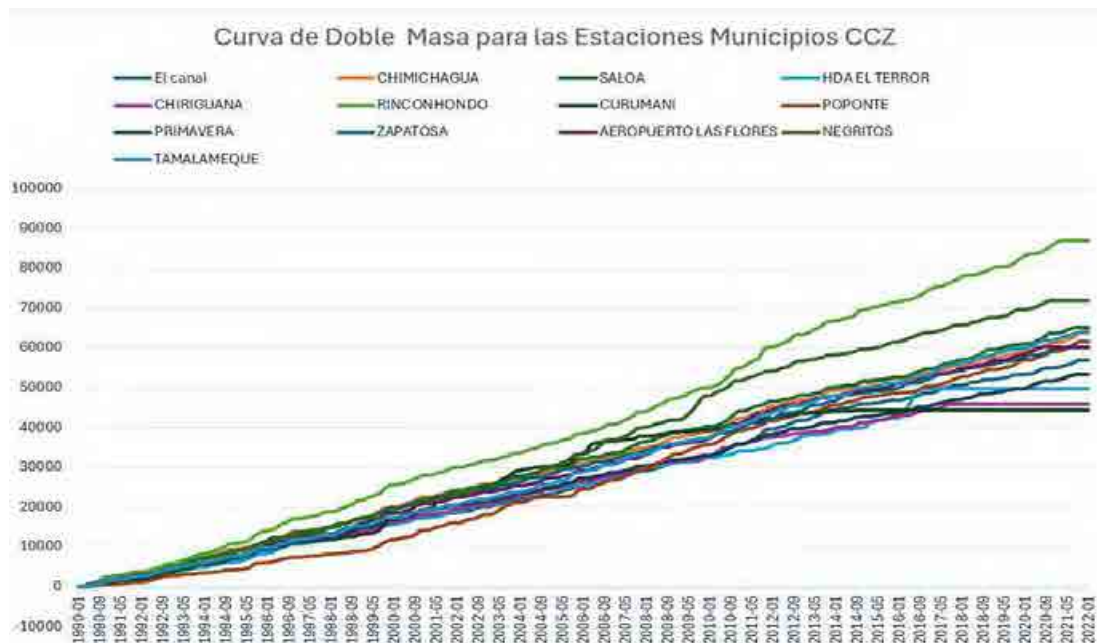
Nota: Elaborado por el Autor con la herramienta JupyterLab con Python mediante datos obtenidos de la plataforma DHIME del IDEAM y CHIRPS (2024).

El análisis anterior refleja claramente que hay una buena correlación entre los datos acumulados de las estaciones y los datos de referencia de CHIRPS. Esto sugiere que los datos de las estaciones son consistentes luego de realizar el tratamiento de los datos atípicos y faltantes y proporcionales a los datos de referencia a lo largo del tiempo.

### 6.1.3.2. Curva de doble masa

Para realizar este análisis se debe determinar una longitud temporal de los datos tantos para las estaciones bajo estudio, así como de los datos de referencia, con el fin de verificar si los datos ajustan correctamente, por lo que se presenta una curva de masa para los datos sin tratamiento, con datos faltantes y atípicos, y otra para los datos tratados, completos, consistentes, de calidad y homogéneos. La siguiente figura muestra los datos sin tratar respectivamente.

Figura 54. Curva de Doble Masa con Datos incompletos de la Variable de Precipitación

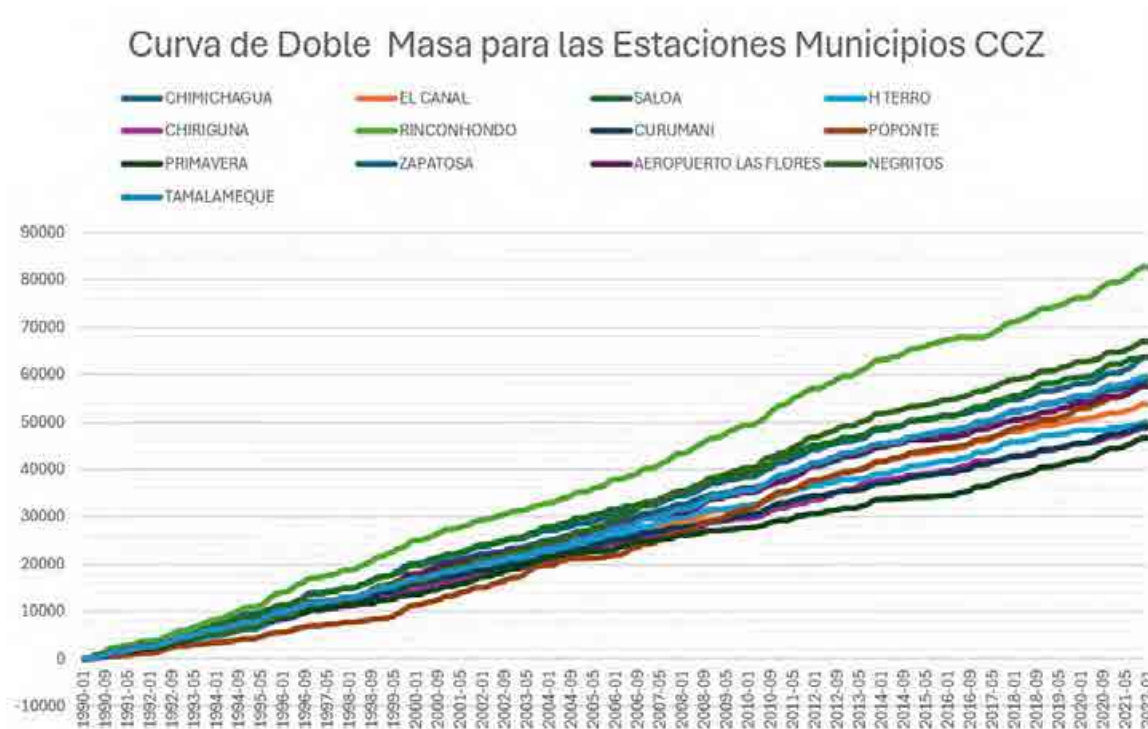


Nota: Elaborado por los Autores a partir de los datos obtenidos de la plataforma DHIME IDEAM (2024).

En los datos de precipitación algunas estaciones presentan desviaciones por lo que es un indicio de datos atípicos o faltantes a lo largo del periodo de las series de tiempo de las

estaciones que da lugar a las inconsistencias que se pueden observar, lo cual indica que puede deberse a poca calidad de los datos en los intervalos de tiempo donde se observan que no hay una homogeneidad consistente, después de someter a tratamiento los datos este panorama cambió dando los siguientes resultados.

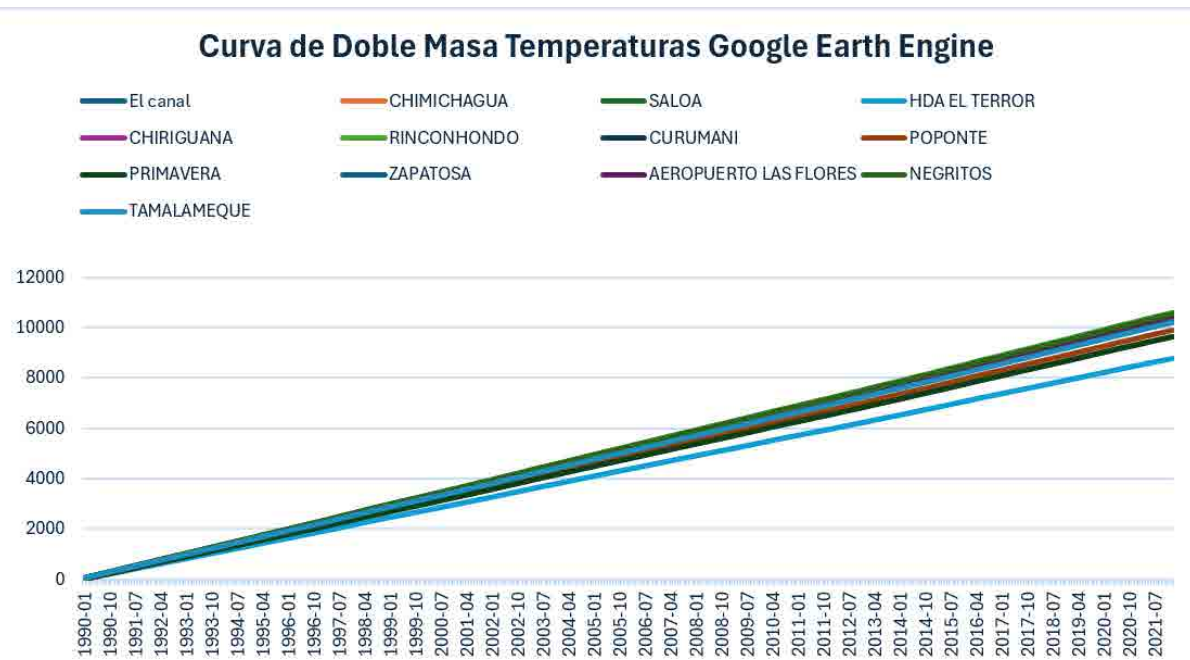
Figura 55. Curva de Doble Masa sin datos atípicos y completos de la Variable de Precipitación



Nota: Elaborado por los Autores a partir de los datos obtenidos de la plataforma DHIME IDEAM (2024).

En el gráfico después de realizar el tratamiento de los datos se observa una mayor consistencia y homogeneidad en todas las curvas que muestran un incremento progresivo en los datos acumulados de precipitación, lo que es típico en un gráfico de doble masa donde se espera que la acumulación de precipitación aumente con el tiempo. Lo cual nos dice que las pendientes son positivas que tienden a aumentar a lo que aumentan las precipitaciones, lo que refuerza la idea de que los métodos para tratar los datos han logrado una estandarización en la captura de datos entre estaciones. Esto es esencial para análisis comparativos y estudios de tendencias a largo plazo.

Figura 56. Curva de Doble Masa para las Temperaturas obtenidas mediante la herramienta Google Earth Engine.



Nota: Elaborado por los Autores a partir de los datos obtenidos de la plataforma DHIME IDEAM (2024).

La curva de doble masa de las temperaturas muestra una excelente consistencia y fiabilidad en los datos obtenidos a través de la colección de "ECMWF/ERA5\_LAND/MONTHLY\_AGGR" en Google Earth Engine. La uniformidad y precisión en estas mediciones hacen que la colección de datos sea una fuente valiosa para análisis climáticos y estudios relacionados, asegurando que las decisiones basadas en estos datos sean sólidas y confiables.



#### 6.1.4. *Descomposición de las series de tiempo de las variables meteorológicas.*

Se realizó una descomposición de una serie de tiempo consiste en fragmentar la serie temporal en sus tres componentes básico tendencia, estacionalidad y sus residuos (Arnau, 2001).

La idea principal de la descomposición de una serie de tiempo es expresar la serie ( $y(t)$ ) como una combinación de sus tres componentes (Codificando Bits, 2024):

$S(t)$ : estacionalidad

$T(t)$ : tendencia

$R(t)$ : residual (componente de error asociado a la descomposición)

Este proceso se realiza por medio de la librería de Python (Statsmodels) que provee el algoritmo computacional para este fin.

La descomposición de series temporales se realiza para extraer información que ayuda conocer todos sus componentes para la implementación de modelos predictivos. Este proceso identifica componentes como la tendencia, que muestra cambios a largo plazo, la estacionalidad, que revela patrones recurrentes en períodos específicos, y el componente residual, que captura irregularidades y fluctuaciones aleatorias.

Además, la prueba de Dickey-Fuller Aumentada (ADF) es esencial en el análisis de series temporales, ya que determina si una serie es estacionaria. Una serie no estacionaria, con media o varianza variable a lo largo del tiempo, puede llevar a errores en las conclusiones y a modelos predictivos poco efectivos.

La prueba de Dickey-Fuller Aumentada (ADF) es esencial para analizar series temporales, y se realiza principalmente observando el valor-p obtenido y los valores críticos (Dickey & Fuller, 1979). Y se realiza principalmente comprobar el nivel de significancia en el valor-p obtenido donde se espera un p valor como el siguiente:

$$p \text{ Value} < 0,05$$

Lo cual rechaza la hipótesis nula, concluyendo que la serie es estacionaria.

## 6.2. DETERMINACIÓN DEL IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO CON PROYECCIONES A 2040 EN LA ALTERACIÓN DE LAS VARIABLES CLIMATOLÓGICAS DE PRECIPITACIÓN Y TEMPERATURA EN EL COMPLEJO CENAGOSO DE LA ZAPATOSA.

### 6.2.1. Implementación del Modelo SARIMA.

Para realizar la implementación de los modelos SARIMA o Seasonal ARIMA en Python se realiza de la siguiente manera:

- *Importación de la librería necesarias:* Se realiza importación de la librería statsmodels que contiene las funciones necesarias para implementar los modelos SARIMA de la siguiente manera:

```
from statsmodels.tsa.statespace.sarimax import SARIMAX
```

- *Ajuste del modelo:* Para realizar el ajuste del en primer lugar se debe llamar a la función SARIMAX () contenida en el paquete de la librería statsmodels en la cual se debe configurar los parámetros (p,d,q) que representa la parte no estacional y (P,D,Q) que representa la parte estacional del modelo para encontrar el modelo más adecuado de acuerdo al criterio estadístico, como el AIC (Criterio de Información de Akaike) y se realiza de la siguiente manera:

```
model = SARIMAX(series, order = (p, d, q), seasonal_order = (P, D, Q, 12))
```

- *Configuración de los parámetros del modelo:* Para encontrar el mejor modelo SARIMA se realiza de manera automática realizando un script de Python, utilizando un enfoque de búsqueda por grilla (grid search). Esto implica definir un rango de posibles valores para cada parámetro y luego probar todas las combinaciones de estos valores hasta encontrar y seleccionar el modelo que minimice el criterio estadístico AIC (Criterio de Información de Akaike) expresado de la siguiente manera.

$$AIC = 2k - 2\ln(L)$$

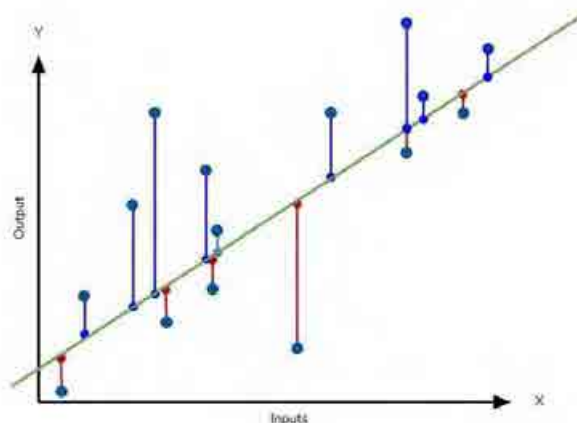
Donde:

- $k$  es el número de parámetros en el modelo.
- $L$  es la función de verosimilitud máxima del modelo.
- *Validación del modelo*: Este proceso se realiza dividiendo la serie de temporal en dos partes una para entrenamiento que corresponde al 80% de los datos y otra para prueba que corresponde al 20% de los dato, que primero se ajusta el modelo con la parte de entrenamiento y luego se realiza una predicción correspondiente a la fecha de la parte de prueba de los y se realiza una inspección visual mediante un gráfico donde observe la predicción hecha por modelo junto a los datos prueba donde se analiza si línea de predicción hecha por el modelo sigue de cerca a la línea de los datos prueba y corroborando con el Error Medio Absoluto (MAE) por sus siglas en inglés (Hernández, 2018), evalúa la precisión de un modelo al medir el promedio de las diferencias absolutas entre los valores predichos y los valores reales. Se calcula como:

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i|$$

Donde  $y_i$  son los valores reales,  $\hat{y}_i$  las predicciones del modelo y  $n$  el número de observaciones. Un MAE más bajo indica un modelo más preciso, ya que los errores promedio son menores.

Figura 57. Representación del Error Absoluto Medio (MAE) en Predicciones

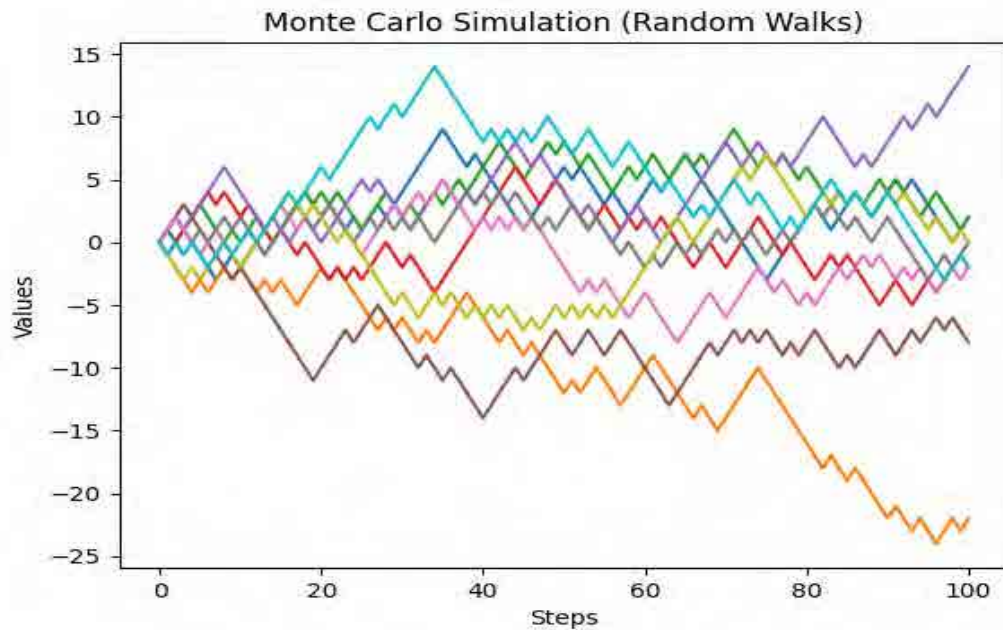


Nota: Tomado por el Autor de sefidian.com (2024)

### 6.2.2. Ejecución de la Simulación de Montecarlo.

- La simulación de Montecarlo se realiza basada en el modelo SARIMA para predecir valores futuros de una serie temporal para recrear múltiples trayectorias a futuro de la misma de la siguiente manera:

Figura 58. Representación Simulación Monte Carlo.



Nota: Elaborado por el Autor (2024)

- *Ajuste del modelo SARIMA*: Se aplica un modelo SARIMA a los datos históricos de la columna 'Valor' para capturar patrones temporales y estacionales, luego se realiza la prueba de Ljung-Box donde se espera obtener un P-valor  $> 0.5$  que indica que hay ruido blanco y que el modelo se ajusta bien.
- *Obtención de los residuos*: Se extraen los residuos del modelo ajustado, que representan las diferencias entre los valores observados y los predichos.
- *Ajuste de una distribución normal a los residuos*: Se calcula la media y la desviación estándar de los residuos, y se les aplica una distribución normal.

- *Configuración para las simulaciones:* Se establecen el número de simulaciones (1000) y el número de pasos futuros a predecir (216 meses), generando las fechas correspondientes.
- *Obtención del pronóstico:* Se realiza un pronóstico de los valores futuros utilizando el modelo SARIMA ajustado generando múltiples trayectorias del pronóstico mismo.

### 6.2.3. Resultados de la Simulación de Montecarlo

- *Visualización de las trayectorias de la simulación:* Una vez ejecutada la simulación de Montecarlo, se generará un DataFrame que contiene una columna con las fechas y 1000 columnas adicionales, donde cada una representa un escenario futuro posible. Utilizando la librería matplotlib de Python, estos escenarios se visualizarán en un gráfico. En el gráfico, cada escenario será mostrado con una paleta de colores que permitirá distinguir la densidad y variabilidad de los distintos resultados, facilitando su interpretación.
- *Identificación de Escenarios más comunes:* Este proceso se realiza mediante una técnica de agrupamiento llamada Clustering este método consiste en agrupar datos en conjuntos llamados clústeres de manera que los elementos dentro de cada grupo sean lo más similares posible. Con el uso de un algoritmo k-means, que funciona asignando datos a un total de k grupos con base en su distancia a un punto central o centroide (Unioviedo 2024) se implementa mediante la librería de Python sklearn en su función cluster(), El proceso sigue los siguientes pasos.
  - Se eligen k centroides al azar.
  - Cada dato se asigna al centroide más cercano.
  - Los centroides se actualizan calculando el promedio de las posiciones de los datos en cada grupo.
  - Se repiten los pasos hasta que los centroides y las asignaciones no cambien más.
  - Este enfoque permite organizar los datos de forma clara y útil para identificar patrones o tendencias.

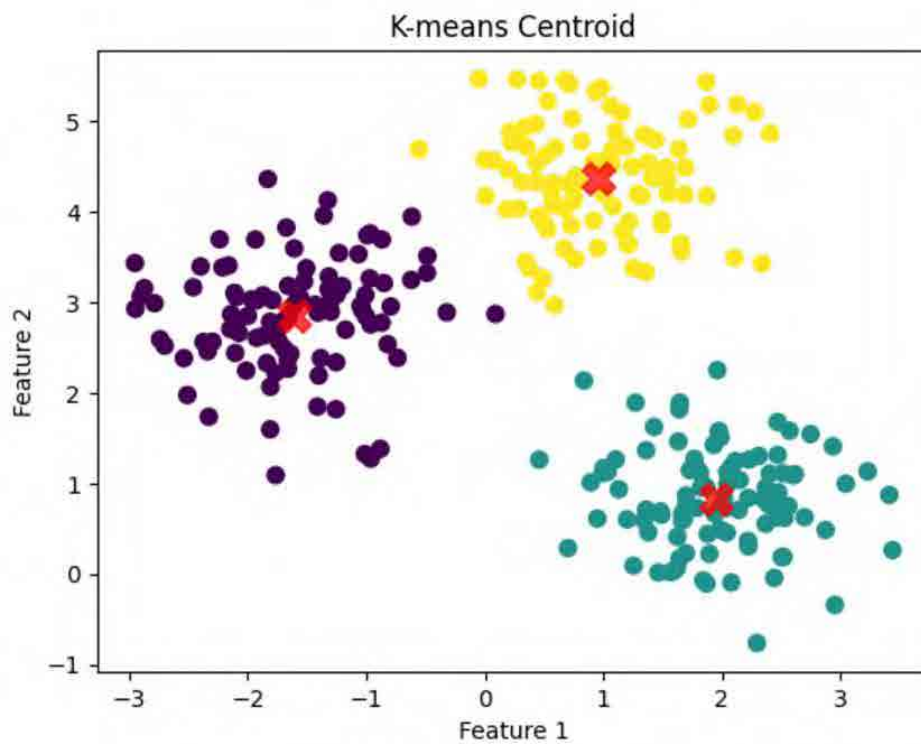
$$J = \sum_{j=1}^K \sum_{x_i \in C_j} \|x_i - \mu_j\|^2$$

Donde:

- $x_i$  es un punto de datos en el clúster  $C_K$
- $\mu_j$  es el centroide del clúster  $C_j$
- $\|x_i - \mu_j\|^2$  es la distancia euclidiana al cuadrado entre el punto  $x_i$  y el centroide  $\mu_j$
- $K$  es el número de clústeres.

Representado con siguiente figura donde las **X** representan el centroide de los  $K$  grupos.

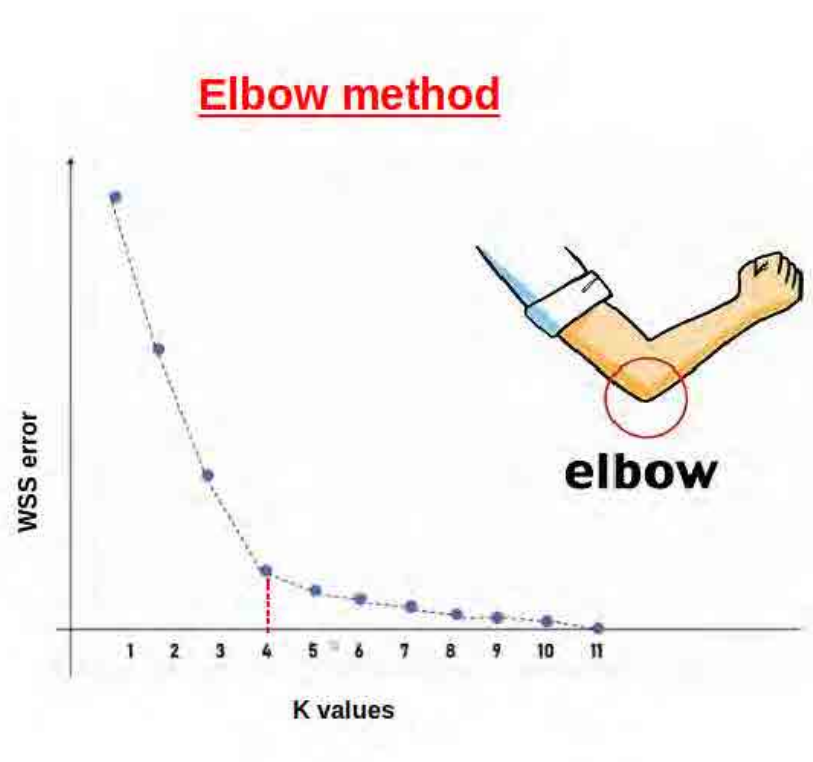
Figura 59. Representación de Agrupamiento por K-Means con Centroides



Nota: Elaborado por el Autor (2024)

Para elegir el número de K óptimo se emplea el método del codo que ayuda a encontrar el número ideal de grupos (k) en un análisis de Clustering. Consiste en graficar la relación entre el número de grupos y la distancia promedio de los datos al centro del grupo que les corresponde. A medida que aumenta k, la distancia disminuye, pero llega un punto donde la mejora se vuelve insignificante. Ese "punto de inflexión" en la gráfica se conoce como el codo y representa el número óptimo de clústeres.

Figura 60. Representación del Método del Codo para Determinar el Número Óptimo de Clústeres



Nota: Tomado por el Autor de Medium.com (2024)



- *Cálculo de probabilidades de cada clúster:* Una vez se haya determinado un número óptimo de Clústers se realiza un conteo de todas las simulaciones que pertenecen a cada Clústers mediante la función Counter() de la librería Sklearn de Python la cual proporciona la frecuencia absoluta de cada clúster, se realiza el cálculo del total de simulaciones determinando cuántas simulaciones se han realizado en total, lo que es necesario para calcular las probabilidades relativas. Finalmente, se calcula qué porcentaje del total de simulaciones corresponde a cada clúster, creando así un diccionario que mapea cada clúster a su probabilidad en porcentaje.

$$P(C_k) = \frac{N_k}{N} \times 100\%$$

Donde:

- $P(C_k)$  es la probabilidad del clúster k
- $N_k$  es el número de simulaciones en el clúster k
- $N$  es el número total de simulaciones.

Cálculo Variación Precipitación

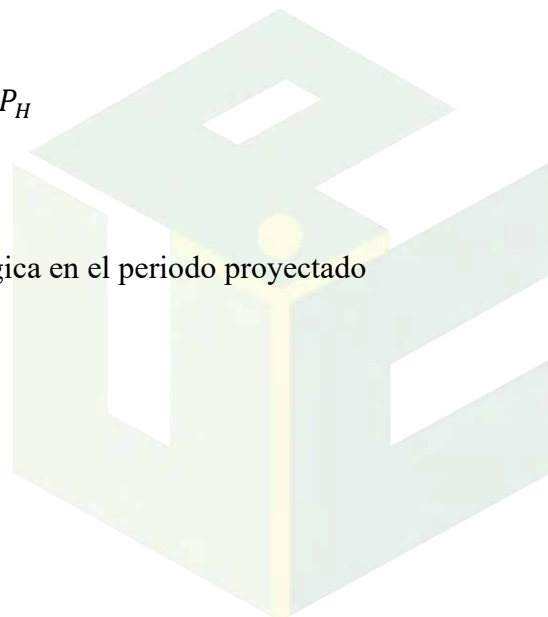
$$V = \frac{p_S - P_H}{P_H} \times 100$$

Cálculo Variación Temperatura

$$V = P_S - P_H$$

Donde:

- $V$  Cambio de la variable meteorológica en el periodo proyectado
- $P_S$  Promedio simulaciones
- $P_H$  Promedio de datos Históricos



#### 6.2.4. *Análisis de Tendencia de las Variables para el Municipio de Chimichagua Cesar con la Simulación Monte Carlo.*

Para el municipio de Chimichagua Cesar el análisis de variabilidad climática se realizó con las siguientes estaciones en la tabla a continuación.

Tabla 36. Estaciones en el municipio de Chimichagua Cesar

<b>Estación</b>	<b>Código</b>
CHIMICHAGUA	25021240
EL CANAL	25020240
SALOA	25020270
HACIENDA EL TERROR	25020650

Nota: Elaborado por el Autor (2024).

##### 6.2.4.1. **Análisis de Variable de Precipitación.**

Como resultado del análisis de series de tiempo de las estaciones meteorológicas seleccionadas, se identificaron los mejores modelos SARIMA de acuerdo con el criterio AIC para cada estación. A continuación, se presentan los modelos óptimos:

Los mejores modelos SARIMA, según el criterio AIC, para las estaciones son los siguientes:

CHIMICHAGUA [25021240]: ARIMA(2,0,2)(1,0,1)<sub>12</sub>

EL CANAL [25020240]: ARIMA(1,0,3)(1,0,1)<sub>12</sub>

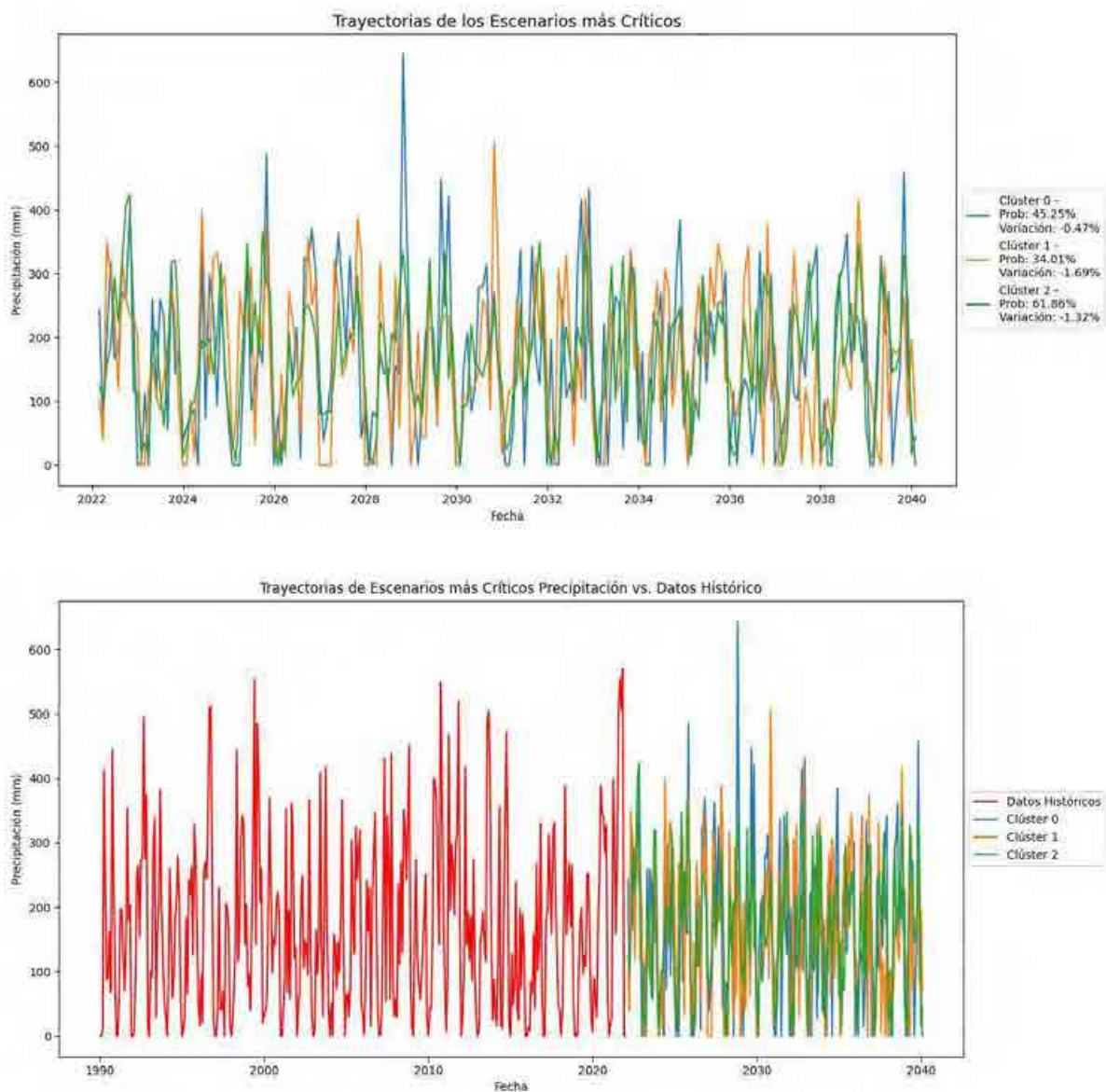
SALOA [25020270]: ARIMA(1,1,2)(1,1,1)<sub>12</sub>

HACIENDA EL TERROR [25020650]: ARIMA(2,0,2)(0,1,1)<sub>12</sub>

Estos modelos capturan de manera eficiente los patrones estacionales de las series de tiempo y la estacionalidad anual en cada estación.

### 6.2.4.1.1. Predicción para la Estación CHIMICHAGUA [25021240]

Figura 61. Trayectorias más representativas en probabilidad y porcentaje de variación para la estación CHIMICHAGUA [25021240].

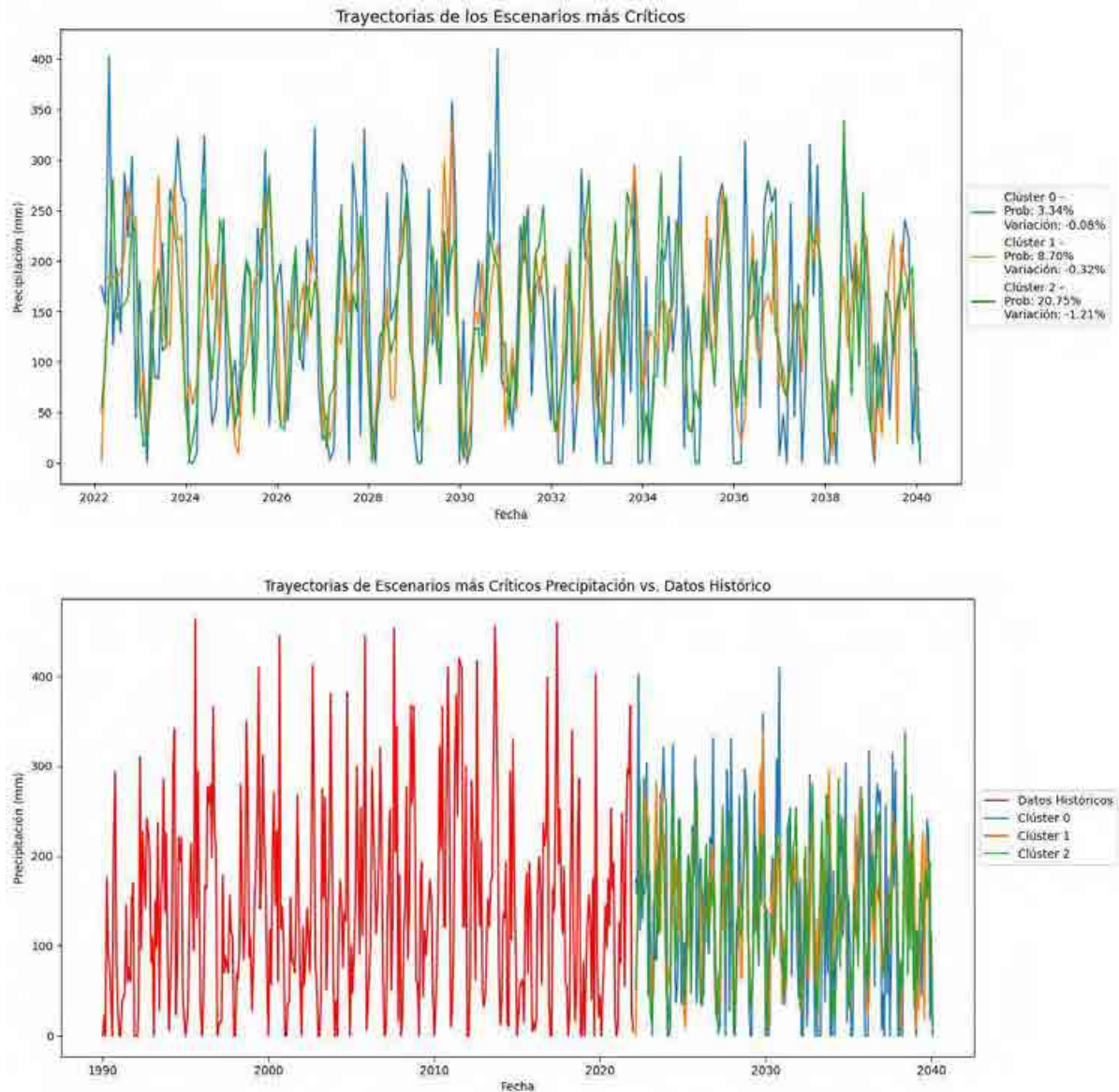


Nota: Elaborado por el Autor con la herramienta Google Colab con Python mediante datos obtenidos de la plataforma DHIME del IDEAM (2024).

Para la estación CHIMICHAGUA [25021240] se encontró que la trayectoria más representativa y de mayor probabilidad y su porcentaje de variación en el Clúster número dos en las figuras de la tabla anterior.

#### 6.2.4.1.2. Predicción para la Estación EL CANAL [25020240]

Figura 62. Trayectorias más representativas en probabilidad y porcentaje de variación para la estación EL CANAL [25020240].

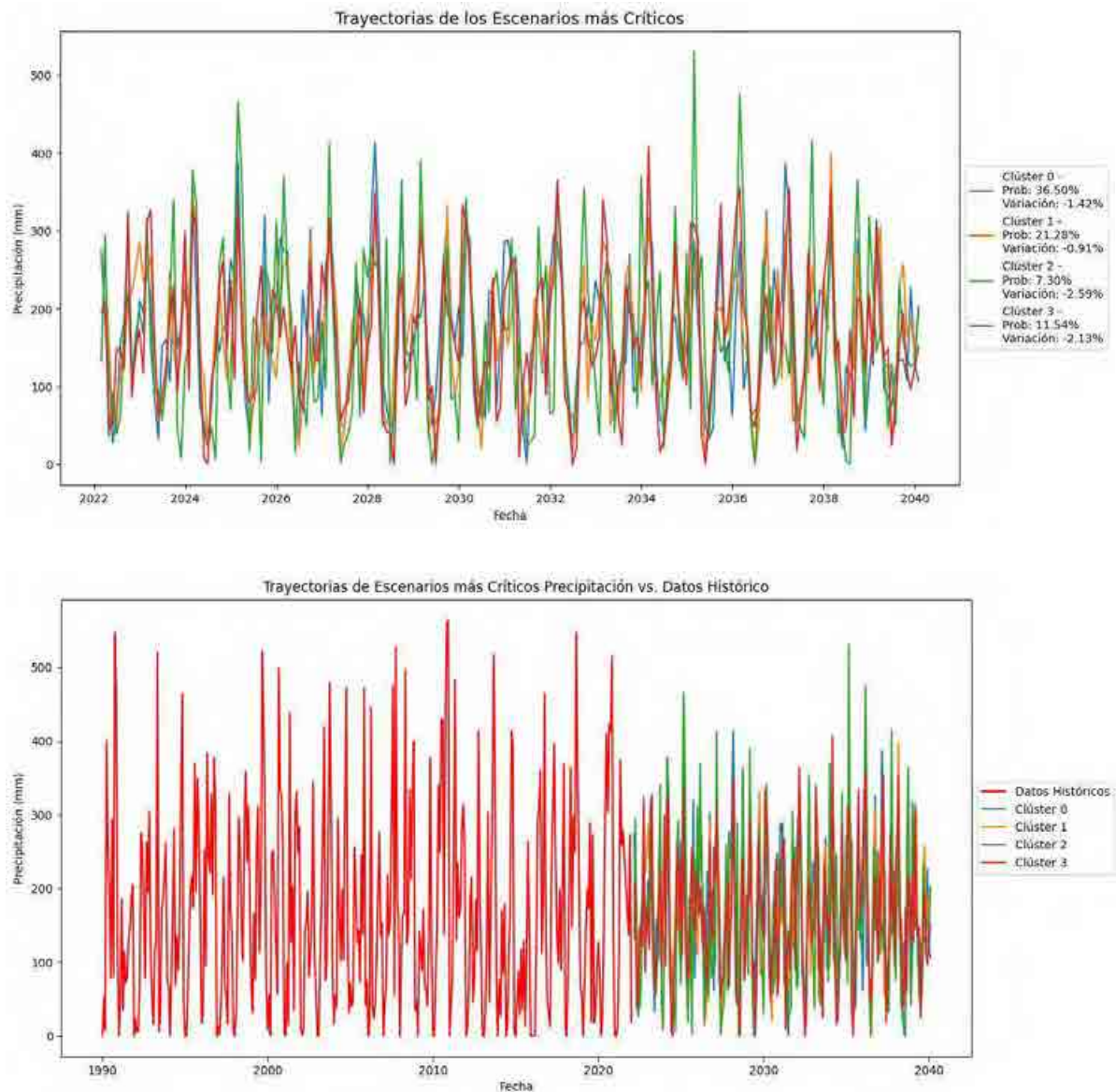


Nota: Elaborado por el Autor con la herramienta Google Colab con Python mediante datos obtenidos de la plataforma DHIME del IDEAM (2024).

Para la estación EL CANAL [25020240] se encontró que la trayectoria más representativa y de mayor probabilidad y su porcentaje de variación en el Clúster número dos en las figuras de la tabla anterior.

### 6.2.6.1.3 Predicción para Estación SALOA [25020270]

Figura 63. Trayectorias más representativas en probabilidad y porcentaje de variación para la estación SALOA [25020270].

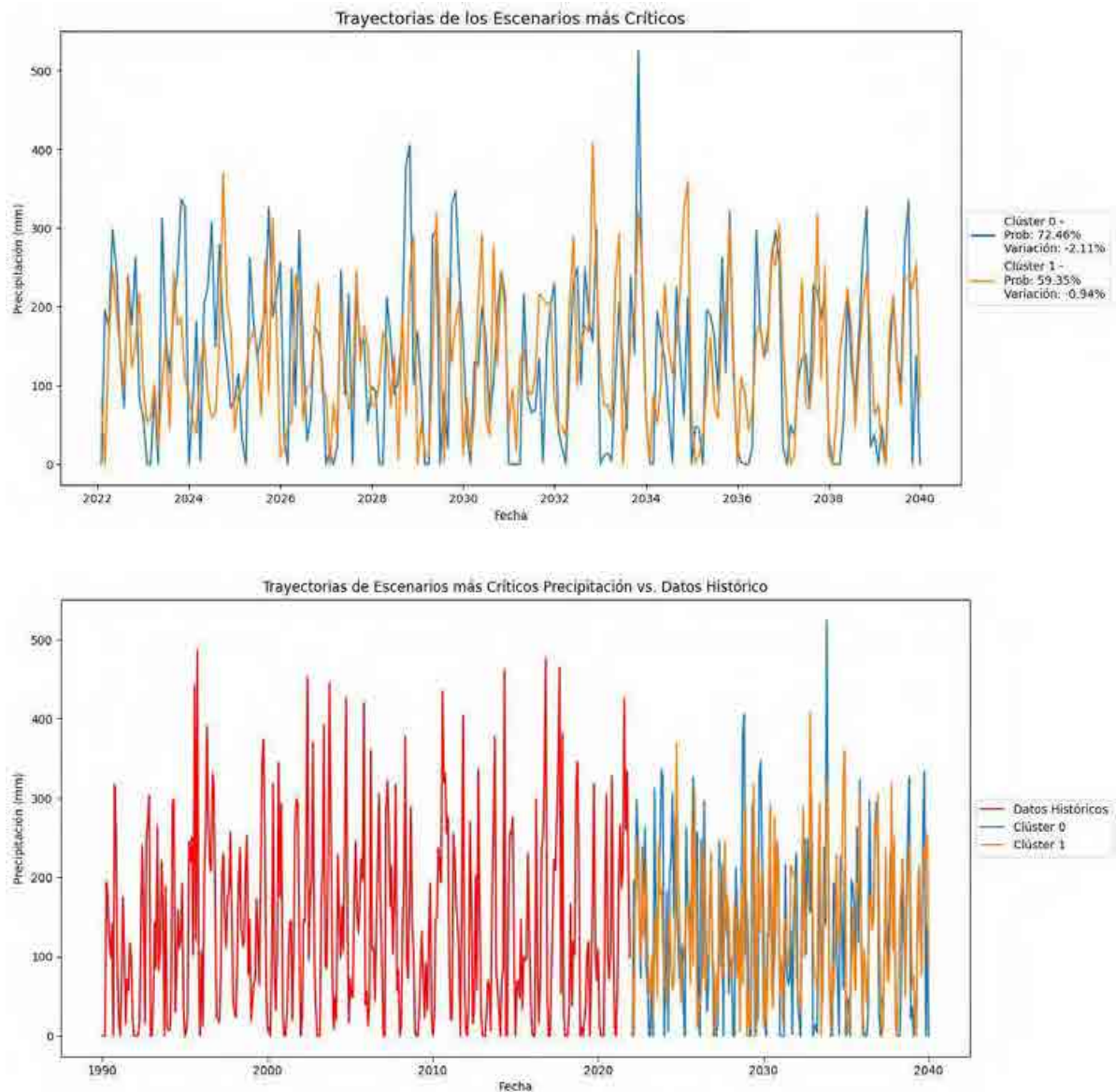


Nota: Elaborado por el Autor con la herramienta Google Colab con Python mediante datos obtenidos de la plataforma DHIME del IDEAM (2024).

Para la estación SALOA [25020270] se encontró que la trayectoria más representativa y de mayor probabilidad y su porcentaje de variación en el Clúster número cero en las figuras de la tabla anterior.

#### 6.2.6.1.4. Predicción para la Estación HACIENDA EL TERROR [25020650]

Figura 64. Trayectorias más representativas en probabilidad y porcentaje de variación para la estación HACIENDA EL TERROR [25020650].



Nota: Elaborado por el Autor con la herramienta Google Colab con Python mediante datos obtenidos de la plataforma DHIME del IDEAM (2024).

Para la estación HACIENDA EL TERROR [25020650] se encontró que la trayectoria más representativa y de mayor probabilidad y su porcentaje de variación en el Clúster número cero en las figuras de la tabla anterior.

### 6.2.6.2. Análisis de la Variable de Temperatura

Para la variable de temperatura en el municipio de Chimichagua, Cesar, se ajustó el mismo modelo SARIMA para todas las estaciones, dado que las temperaturas son muy similares en la zona donde se ubican. El modelo seleccionado, basado en el criterio AIC, es el siguiente para cada estación:

CHIMICHAGUA [25021240]: ARIMA(1,0,1)(0,1,1)<sub>12</sub>

EL CANAL [25020240]: ARIMA(1,0,1)(0,1,1)<sub>12</sub>

SALOA [25020270]: ARIMA(1,0,1)(0,1,1)<sub>12</sub>

HACIENDA EL TERROR [25020650]: ARIMA(1,0,1)(0,1,1)<sub>12</sub>

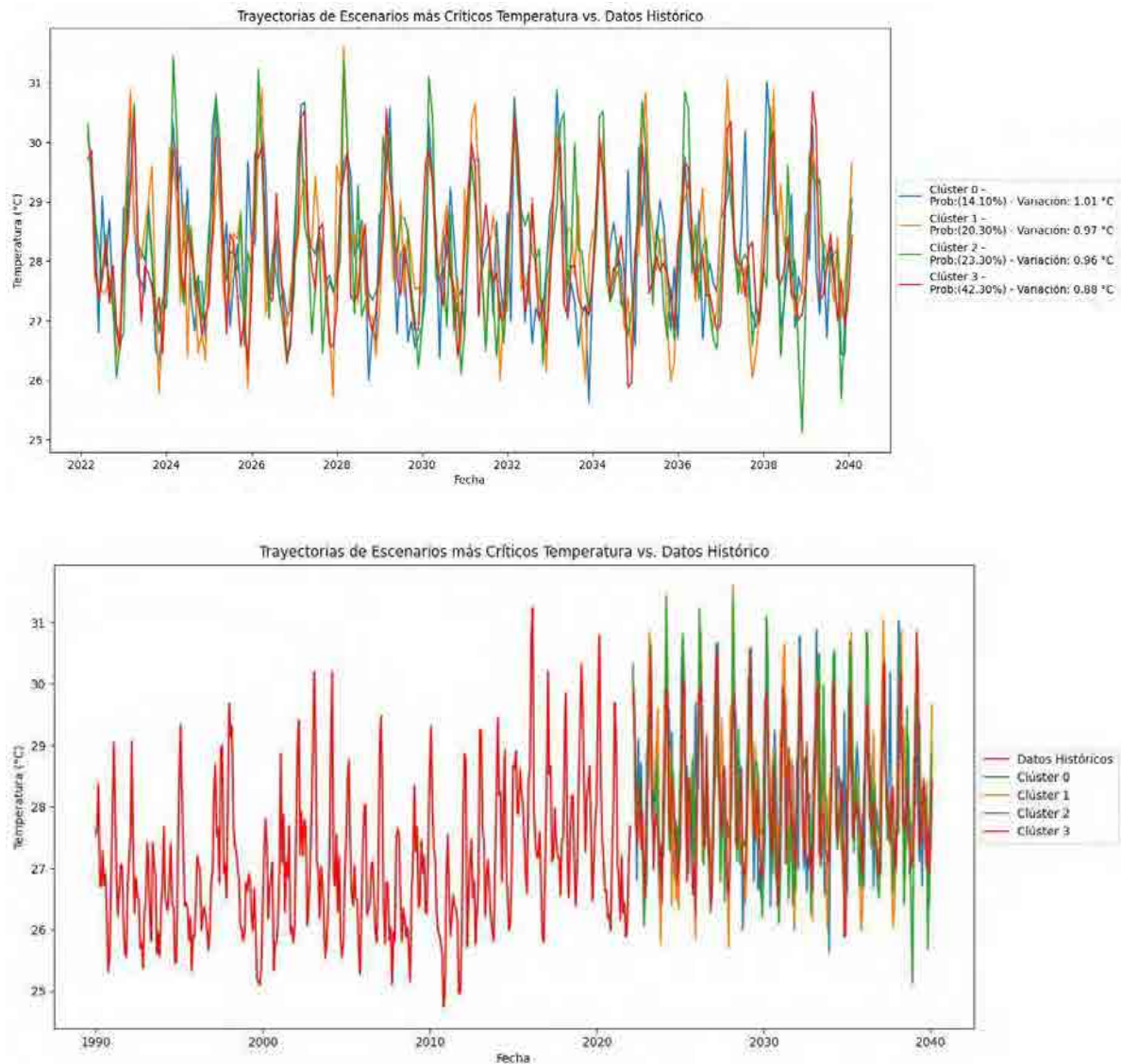
Este modelo se ajusta de manera óptima en todas las estaciones debido a la homogeneidad de las condiciones climáticas en la región, lo que permite utilizar el mismo enfoque para todas las series de tiempo de temperatura.

Este modelo capturó adecuadamente las dinámicas de la serie de tiempo de temperatura, incluyendo la estacionalidad anual, en todas las estaciones del municipio.



### 6.2.6.2.1. Predicción para la Estación CHIMICHAGUA [25021240]

Figura 65. Trayectorias más representativas en probabilidad y de variación para la estación CHIMICHAGUA [25021240].

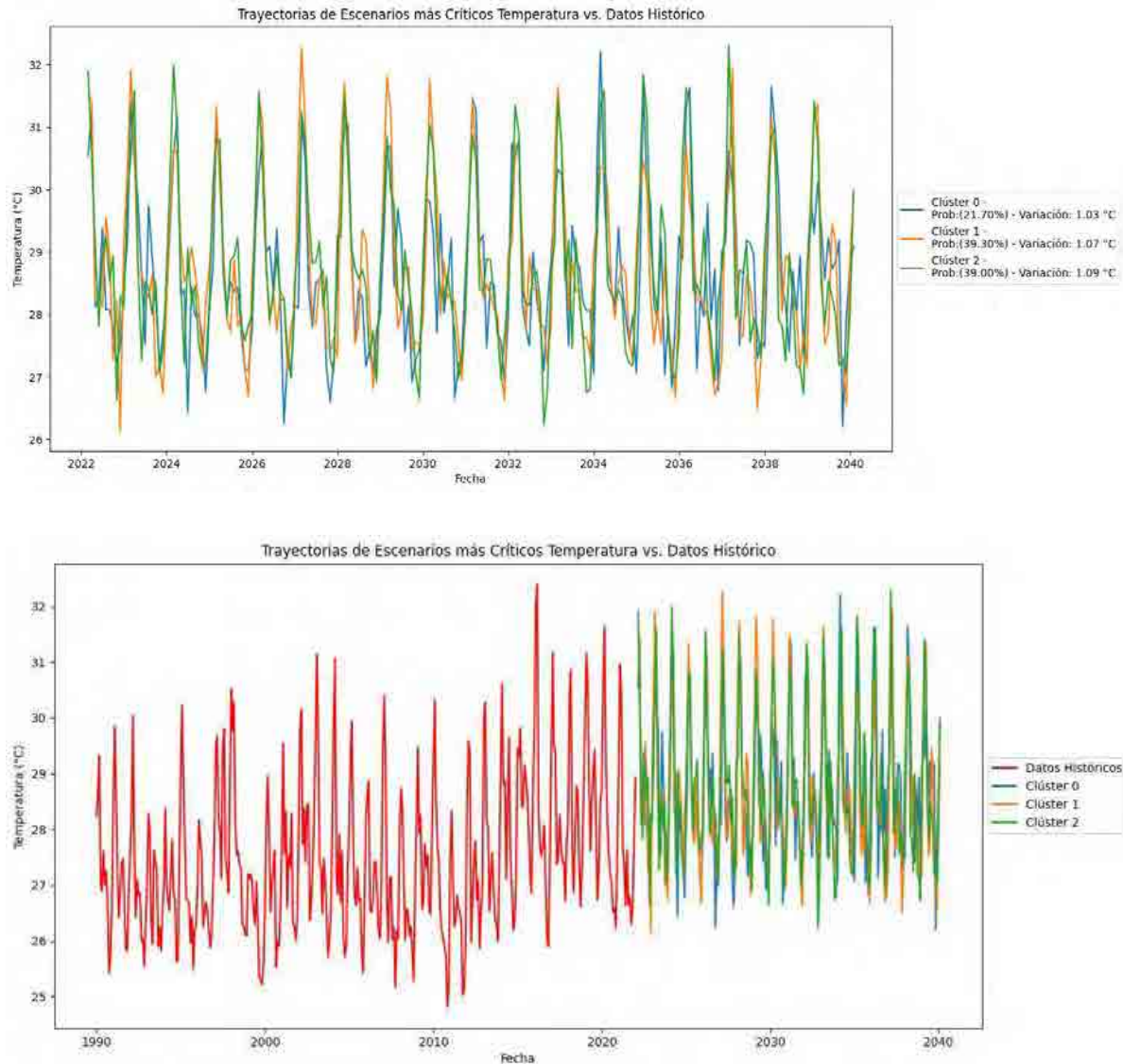


Nota: Elaborado por el Autor con la herramienta Google Colab con Python mediante datos obtenidos de la plataforma Google Earth Engine (2024).

Para la estación CHIMICHAGUA [25021240] se encontró que la trayectoria más representativa y de mayor probabilidad y su variación en el Clúster número tres en las figuras de la tabla anterior.

### 6.2.6.2.2. Predicción para la Estación EL CANAL [25020240]

Figura 66. Trayectorias más representativas en probabilidad y de variación para la estación EL CANAL [25020240].

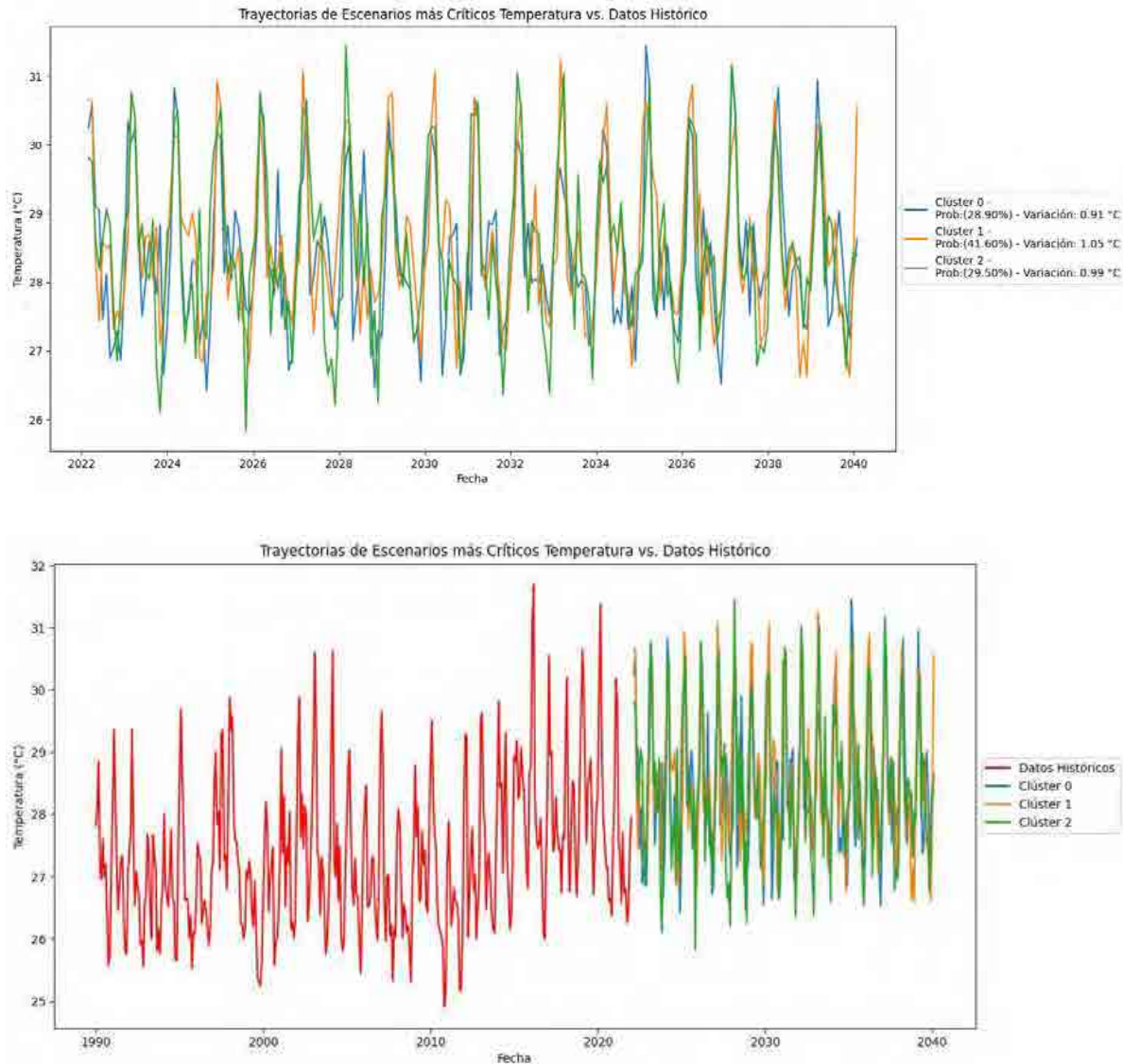


Nota: Elaborado por el Autor con la herramienta Google Colab con Python mediante datos obtenidos de la plataforma Google Earth Engine (2024).

Para la estación EL CANAL [25020240] se encontró que la trayectoria más representativa y de mayor probabilidad y su variación en el Clúster número uno en las figuras de la tabla anterior.

### 6.2.6.2.3. Predicción para Estación SALOA [25020270]

Figura 67. Trayectorias más representativas en probabilidad y de variación para la estación SALOA [25020270].

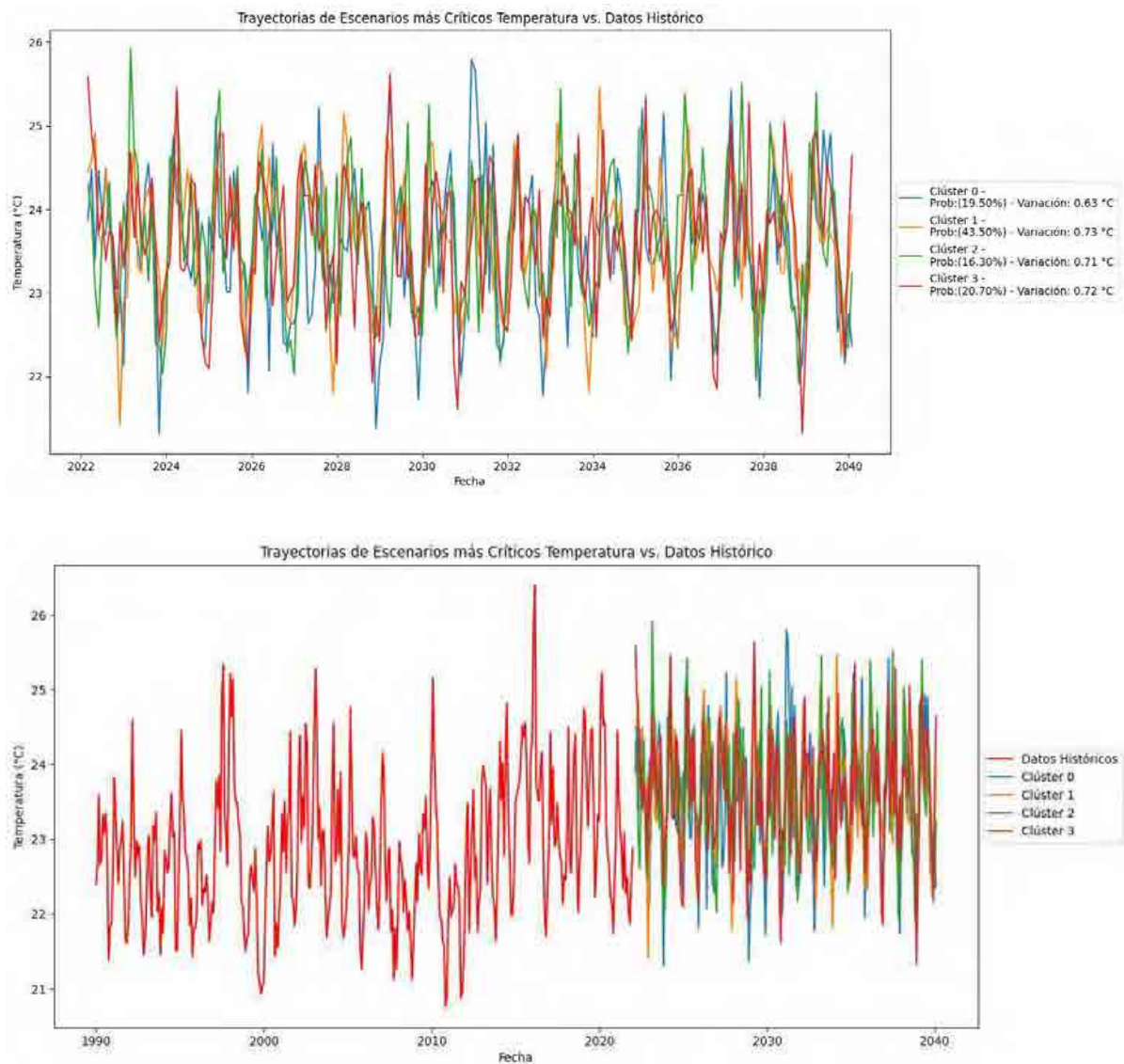


Nota: Elaborado por el Autor con la herramienta Google Colab con Python mediante datos obtenidos de la plataforma Google Earth Engine (2024).

Para la estación SALOA [25020270] se encontró que la trayectoria más representativa y de mayor probabilidad y su variación en el Clúster número uno en las figuras de la tabla anterior.

#### 6.2.6.2.4. Predicción para la Estación HACIENDA EL TERROR [25020650]

Figura 68. Trayectorias más representativas en probabilidad y de variación para la estación HACIENDA EL TERROR [25020650].



Nota: Elaborado por el Autor con la herramienta Google Colab con Python mediante datos obtenidos de la plataforma Google Earth Engine (2024).

Para la estación HACIENDA EL TERROR [25020650] se encontró que la trayectoria más representativa y de mayor probabilidad y su variación en el Clúster número uno en las figuras de la tabla anterior.

### 6.2.5. *Análisis de Tendencia de las Variables para el Municipio de Chiriguaná Cesar con la Simulación Monte Carlo.*

Para el municipio de Chiriguaná Cesar el análisis de variabilidad climática se realizó con las siguientes estaciones en la tabla a continuación.

Tabla 37. Estaciones para el Municipio de Chiriguaná Cesar

CHIRIGUANA	25025250
RINCON HONDO	25020260

Nota: Elaborado por el Autor (2024).

#### 6.2.5.1. **Análisis de la Variable de Precipitación.**

Para el municipio de Chiriguaná, Cesar, se identificaron los mejores modelos SARIMA para las estaciones de precipitación, de acuerdo con el criterio AIC. Los modelos seleccionados para cada estación son los siguientes:

Estación CHIRIGUANA [25025260]:  $ARIMA(2,0,0)(1,0,1)_{12}$

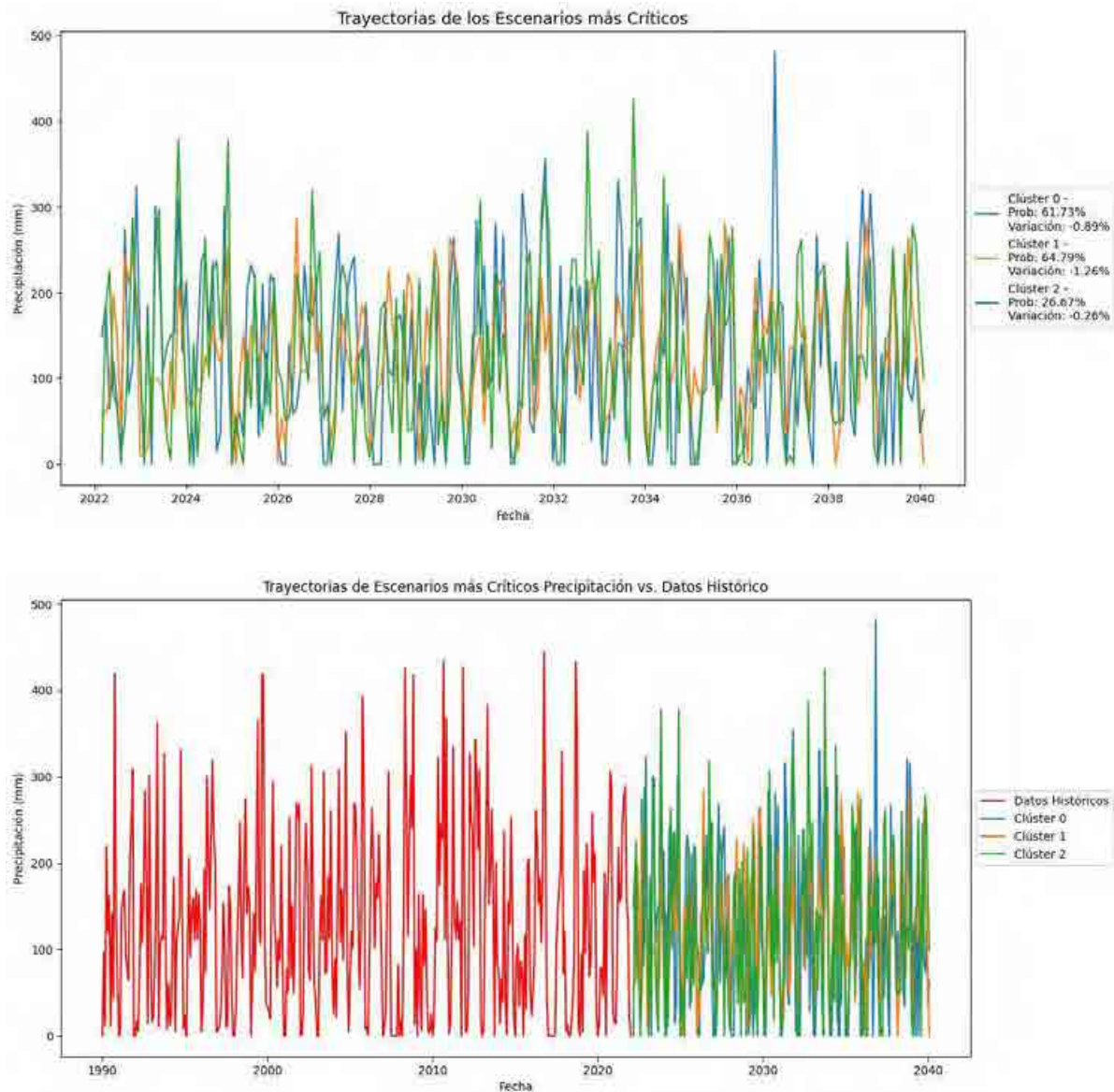
Estación RINCON HONDO [25020260]:  $ARIMA(1,0,2)(3,0,2)_{12}$

Estos modelos capturan las dinámicas de precipitación y los patrones estacionales anuales específicos de cada estación en el municipio.



### 6.2.5.1.1. Predicción para la Estación CHIRIGUANA [25025260]

Figura 69. Trayectorias más representativas en probabilidad y porcentaje de variación para la estación CHIRIGUANA [25025260]

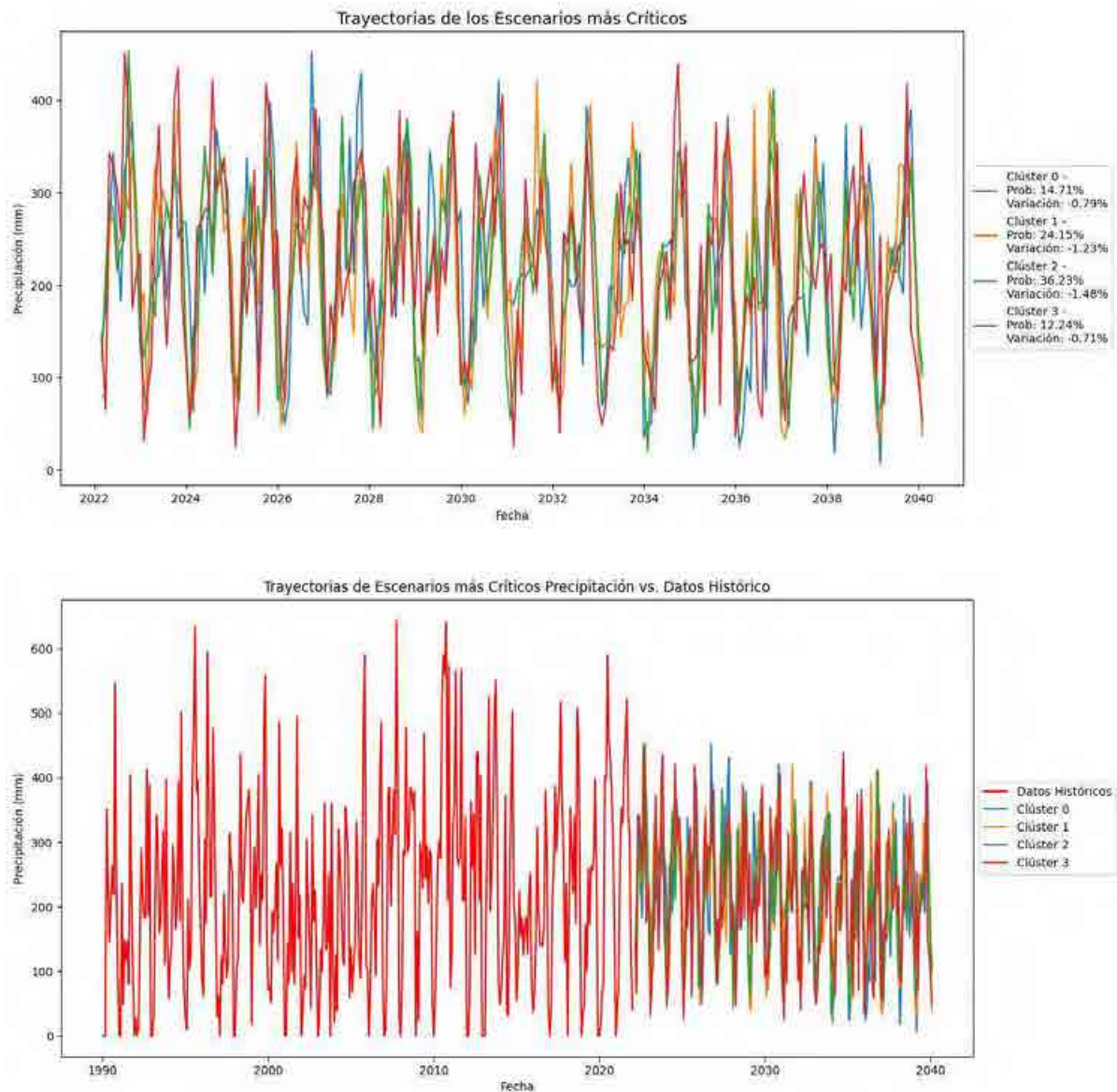


Nota: Elaborado por el Autor con la herramienta Google Colab con Python mediante datos obtenidos de la plataforma DHIME del IDEAM (2024).

Para la estación CHIRIGUANA [25025260] se encontró que la trayectoria más representativa y de mayor probabilidad y su porcentaje de variación en el Clúster número cero en las figuras de la tabla anterior.

### 6.2.5.1.2. Predicción para la Estación RINCON HONDO [25020260]

Figura 70. Trayectorias más representativas en probabilidad y porcentaje de variación para la estación RINCON HONDO [25020260]



Nota: Elaborado por el Autor con la herramienta Google Colab con Python mediante datos obtenidos de la plataforma DHIME del IDEAM (2024).

Para la estación RINCON HONDO [25020260] se encontró que la trayectoria más representativa y de mayor probabilidad y su porcentaje de variación en el Clúster número dos en las figuras de la tabla anterior.

### 6.2.5.2. Análisis de la Variable de Temperatura.

Para las estaciones de CHIRIGUANA [25025260] y RINCON HONDO [25020260] en el municipio de Chiriguaná, Cesar, se logró modelar la variable de temperatura utilizando el mismo modelo SARIMA, dado que las condiciones climáticas de la zona son bastante homogéneas en cuanto a la temperatura. El análisis reveló que el siguiente modelo ofreció el mejor ajuste según el criterio AIC:

CHIRIGUANA [25025260]: ARIMA(1,0,2)(0,1,0)<sub>12</sub>

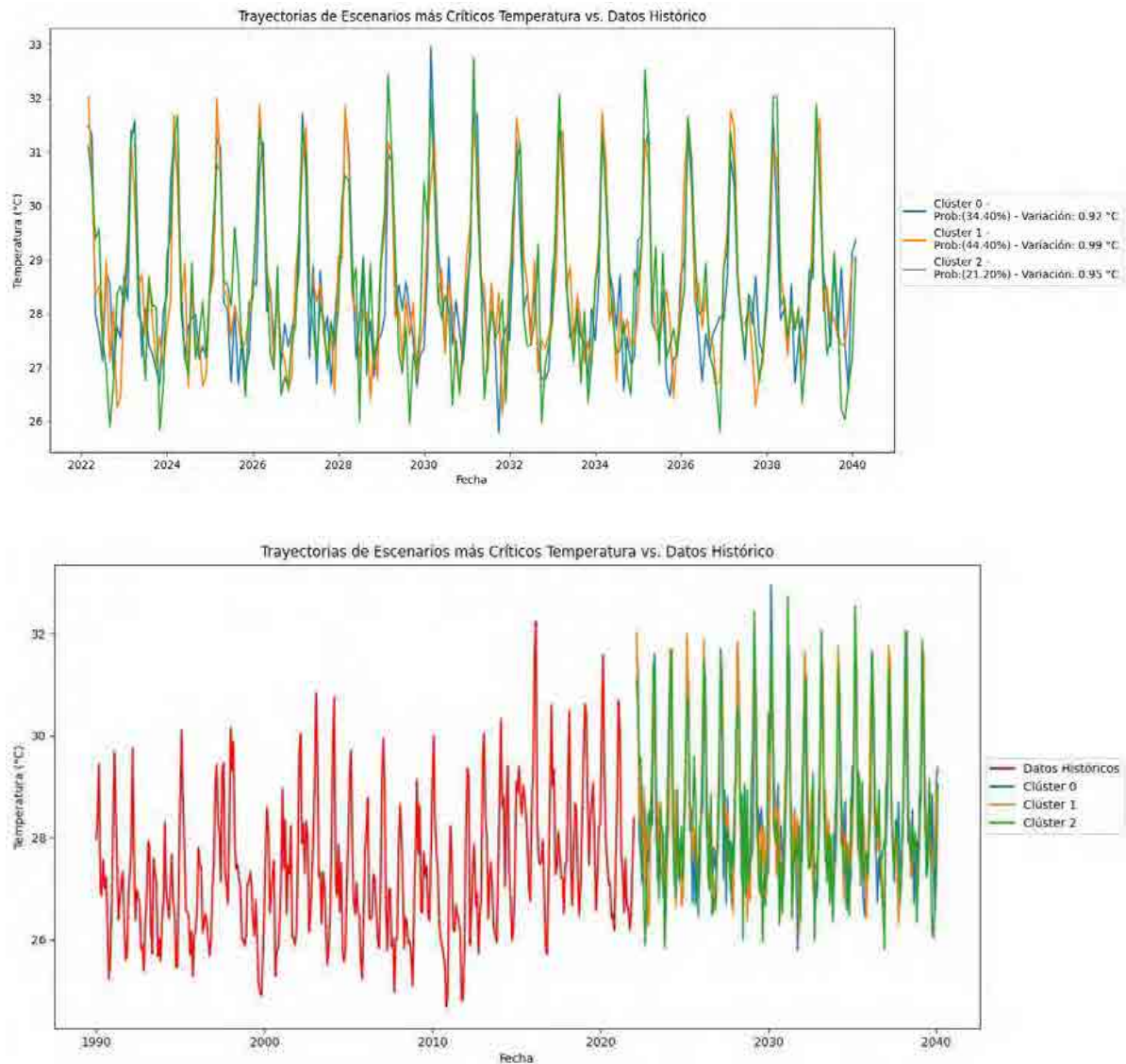
RINCON HONDO [25020260]: ARIMA(1,0,2)(0,1,0)<sub>12</sub>

Este modelo se aplicó de manera consistente en ambas estaciones debido a la similitud de las temperaturas en la región. La falta de variabilidad significativa en los patrones de temperatura entre las estaciones permitió utilizar el mismo conjunto de parámetros, lo que garantiza un buen ajuste para capturar tanto las tendencias como la estacionalidad anual (12 meses). En resumen, el modelo seleccionado refleja las condiciones climáticas uniformes de temperatura en Chiriguaná y Rincón Hondo.



### 6.2.5.2.1. Predicción para la Estación CHIRIGUANA [25025260]

Figura 71. Trayectorias más representativas en probabilidad y su variación para la estación CHIRIGUANA [25025260]

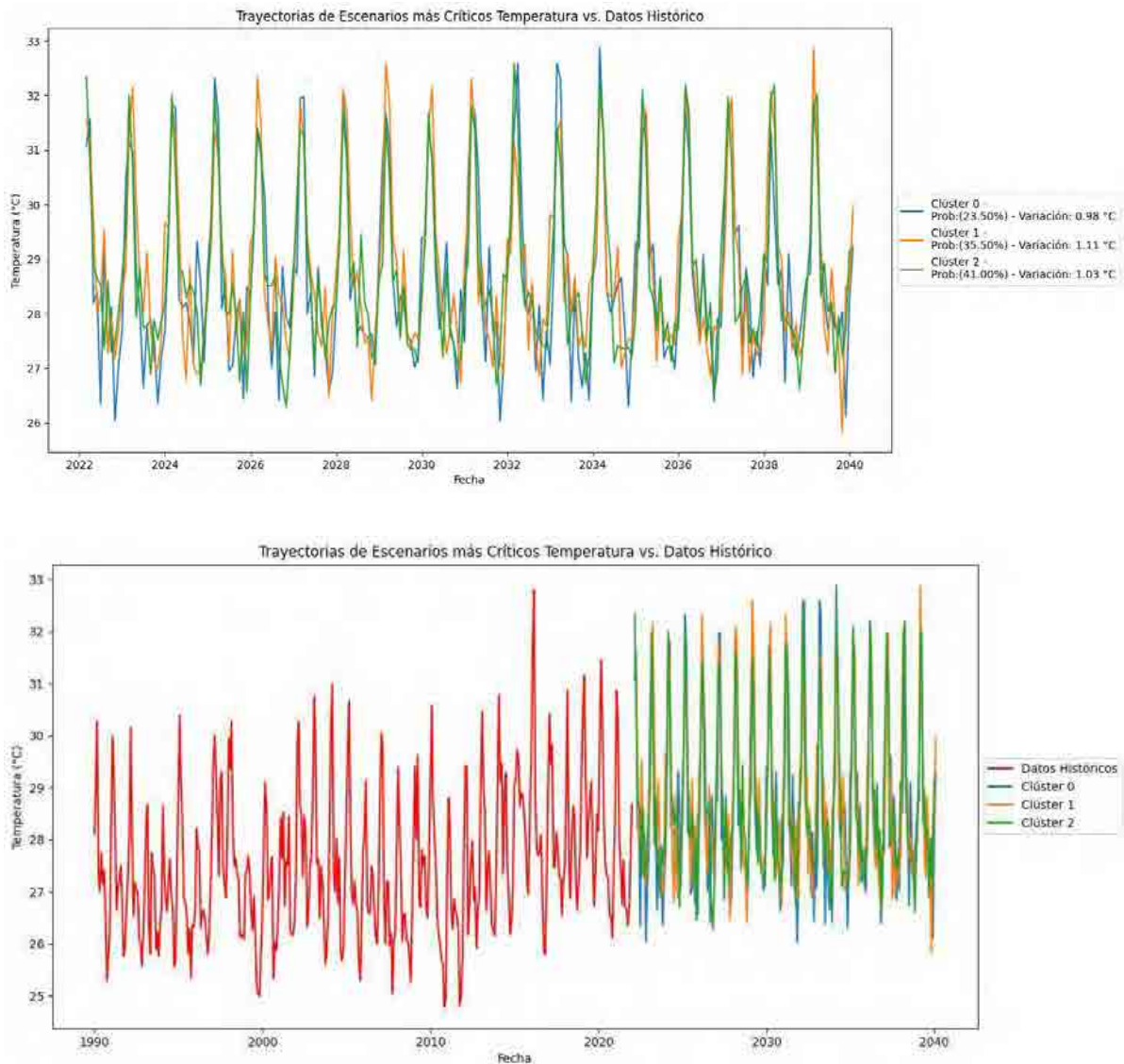


Nota: Elaborado por el Autor con la herramienta Google Colab con Python mediante datos obtenidos de la plataforma Google Earth Engine (2024).

Para la estación CHIRIGUANA [25025260] se encontró que la trayectoria más representativa y de mayor probabilidad y su porcentaje de variación en el Clúster número cero en las figuras de la tabla anterior.

### 6.2.5.2.2. Predicción para la Estación RINCON HONDO [25020260]

Figura 72. Trayectorias más representativas y su variación para la estación RINCON HONDO [25020260]



Nota: Elaborado por el Autor con la herramienta Google Colab con Python mediante datos obtenidos de la plataforma Google Earth Engine (2024).

Para la estación RINCON HONDO [25020260] se encontró que la trayectoria más representativa y de mayor probabilidad y su variación en el Clúster número dos en las figuras de la tabla anterior.

### **6.2.6. Análisis de Tendencia de las Variables para el Municipio de Curumaní Cesar con la Simulación Monte Carlo.**

Para el municipio de Curumaní Cesar el análisis de variabilidad climática se realizó con las siguientes estaciones en la tabla a continuación.

Tabla 38. Estaciones para el Municipio de Curumaní Cesar

CURUMANI	25020250
POPONTE	25020690
PRIMAVERA	25020920
ZAPATOSA	25020660

Nota: Elaborado por el Autor (2024)

#### **6.2.6.1. Análisis de la Variable de Precipitación.**

Para las estaciones del municipio de Curumaní, Cesar, se logró modelar la variable de precipitación con diferentes modelos SARIMA, seleccionados según el criterio AIC para capturar las características particulares de las series de tiempo de cada estación. Los modelos óptimos para cada estación son los siguientes:

CURUMANI [25020250]: ARIMA(1,0,2)(1,0,2)<sub>12</sub>

PRIMAVERA [25020920]: ARIMA(1,0,1)(2,0,1)<sub>12</sub>

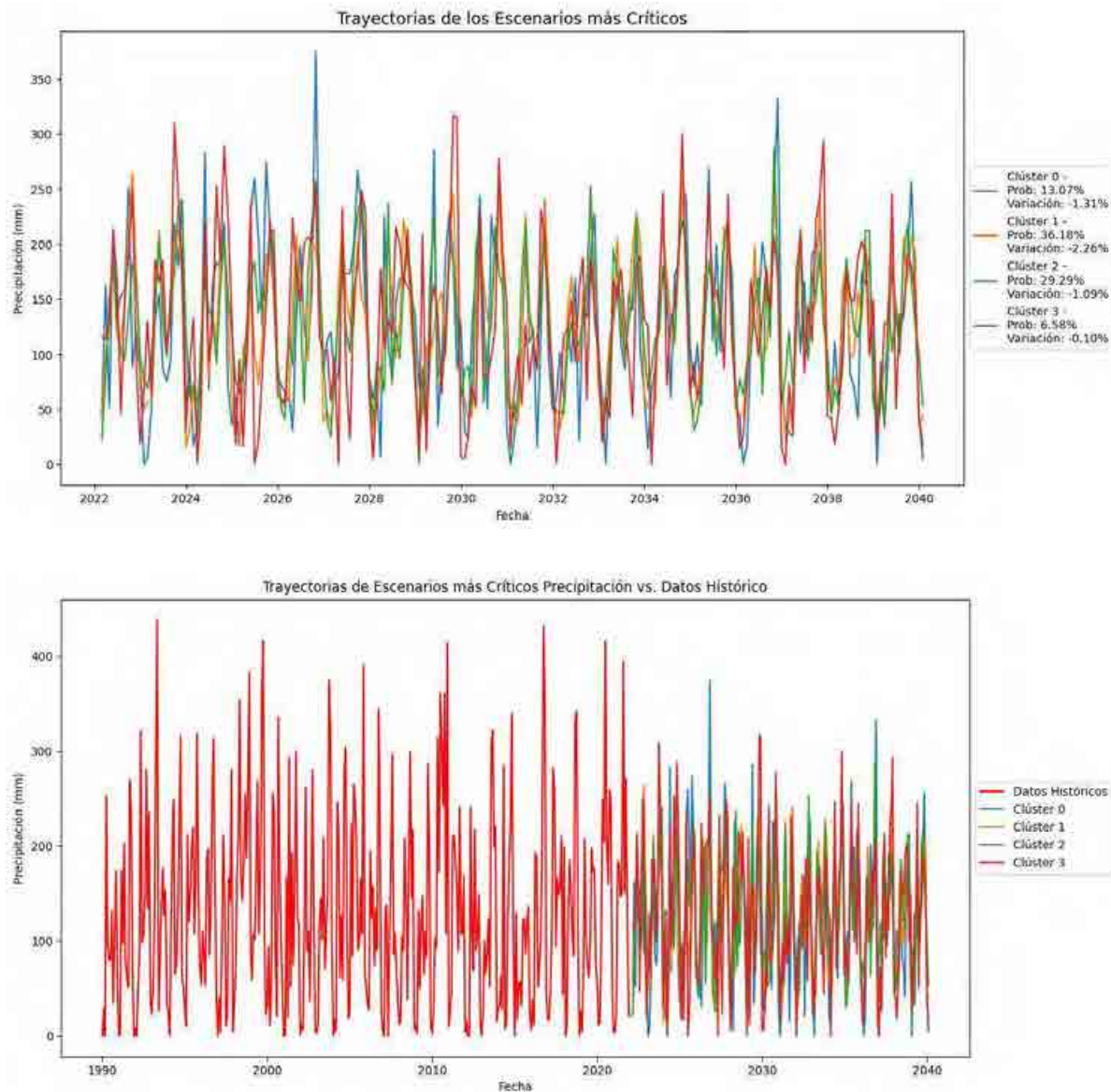
ZAPATOSA [25020690]: ARIMA(1,0,1)(2,0,1)<sub>12</sub>

POPONTE [25020660]: ARIMA(1,0,2)(3,0,2)<sub>12</sub>

Estos modelos reflejan las condiciones de precipitación de cada estación en el municipio de Curumaní, ajustándose a las particularidades de los datos mediante combinaciones de parámetros que capturan tanto las tendencias locales como la estacionalidad anual.

### 6.2.6.1.1. Predicción para la Estación CURUMANI [25020250]

Figura 73. Trayectorias más representativas en probabilidad y porcentaje de variación para la estación CURUMANI [25020250]

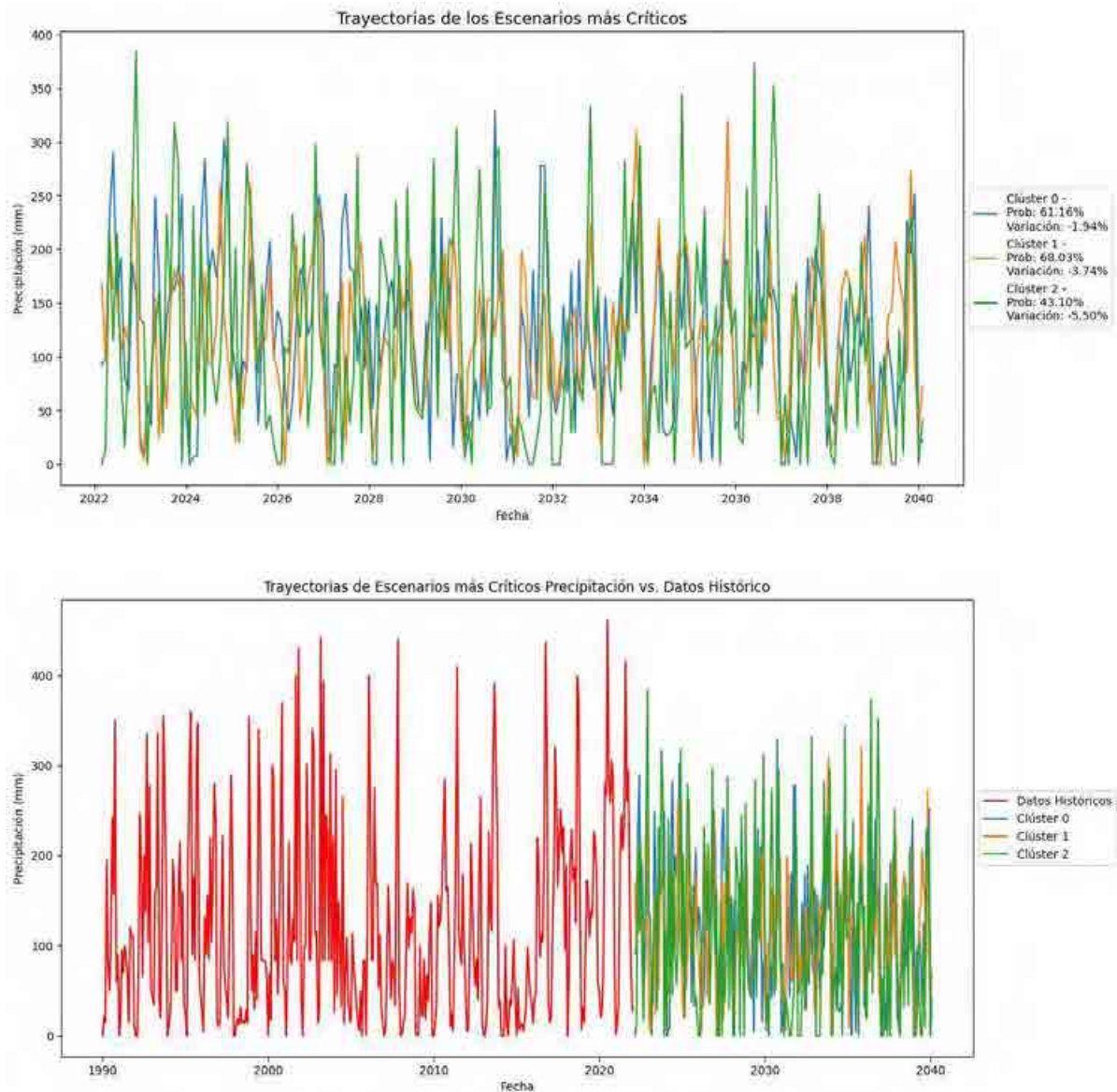


Nota: Elaborado por el Autor con la herramienta Google Colab con Python mediante datos obtenidos de la plataforma DHIME del IDEAM (2024).

Para la estación CURUMANI [25020250] se encontró que la trayectoria más representativa y de mayor probabilidad y su porcentaje de variación en el Clúster número uno en las figuras de la tabla anterior.

### 6.2.6.1.2. Predicción para la Estación PRIMAVERA [25020920]

Figura 74. Trayectorias más representativas en probabilidad y porcentaje de variación para la estación PRIMAVERA [25020920]

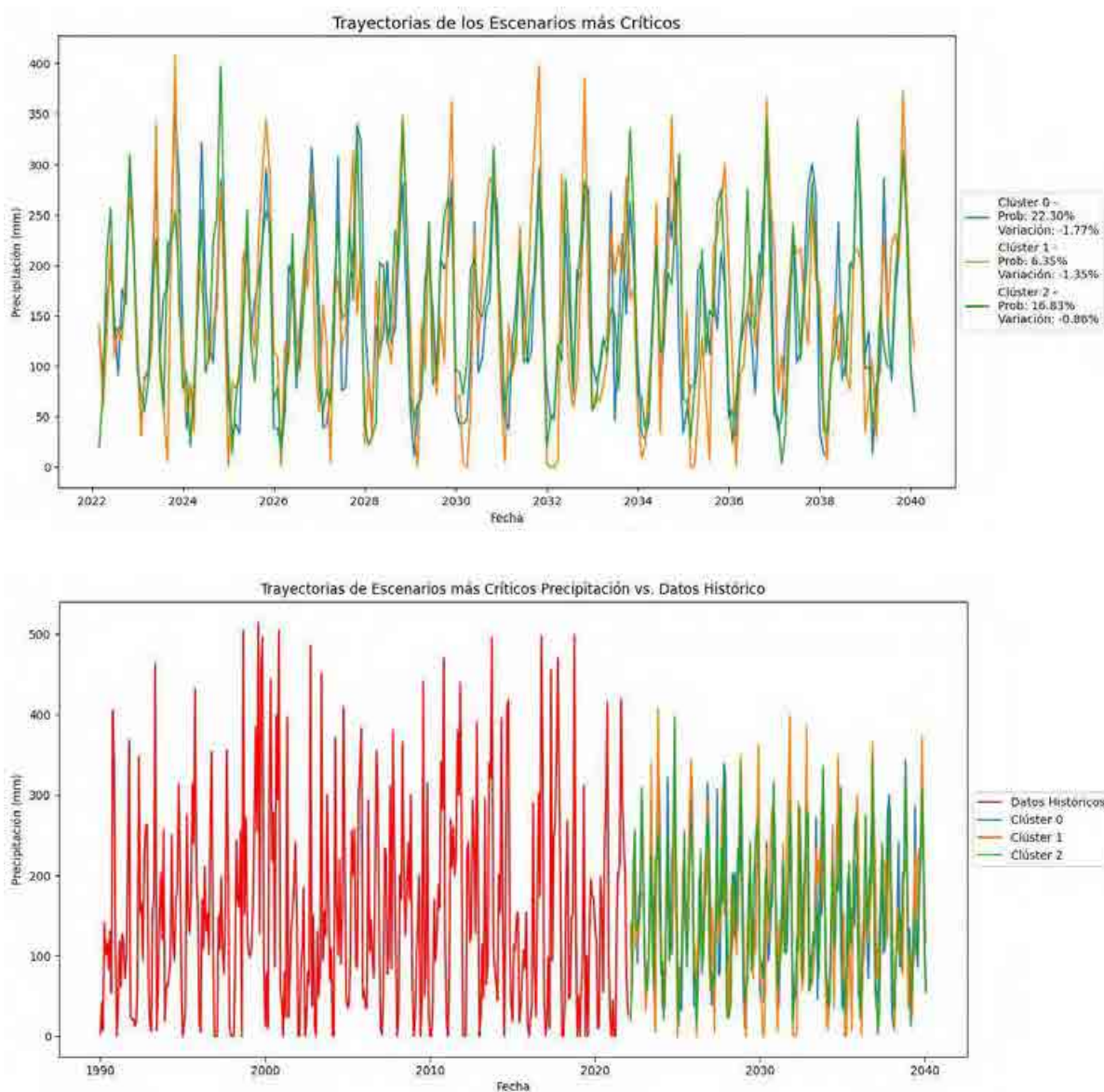


Nota: Elaborado por el Autor con la herramienta Google Colab con Python mediante datos obtenidos de la plataforma DHIME del IDEAM (2024).

Para la estación PRIMAVERA [25020920] se encontró que la trayectoria más representativa y de mayor probabilidad y su porcentaje de variación en el Clúster número uno en las figuras de la tabla anterior.

### 6.2.8.1.3. Predicción para la Estación ZAPATOSA [25020690]

Figura 75. Trayectorias más representativas en probabilidad y porcentaje de variación para la estación ZAPATOSA [25020690]

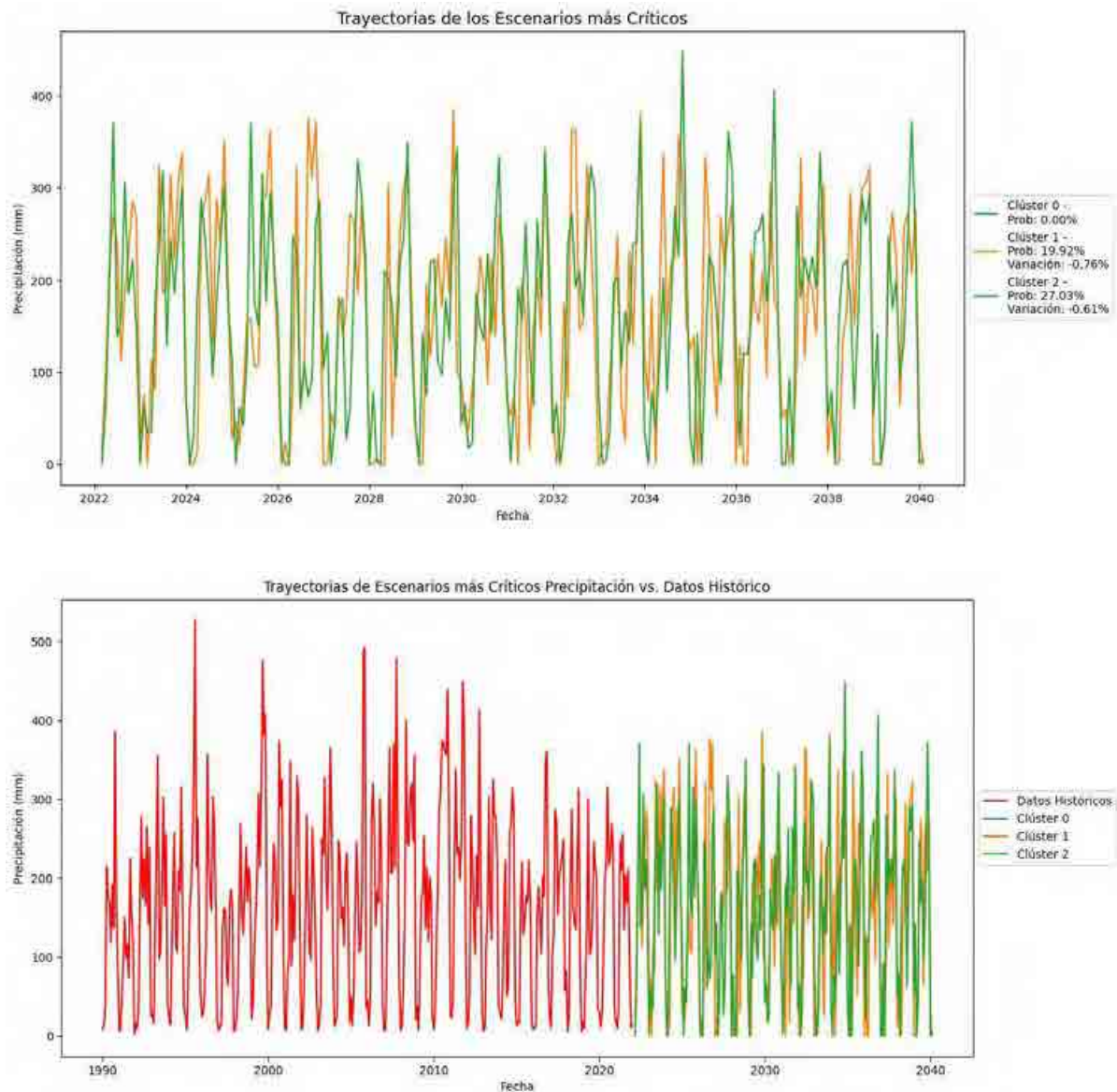


Nota: Elaborado por el Autor con la herramienta Google Colab con Python mediante datos obtenidos de la plataforma DHIME del IDEAM (2024).

Para la estación ZAPATOSA [25020690] se encontró que la trayectoria más representativa y de mayor probabilidad y su porcentaje de variación en el Clúster número cero en las figuras de la tabla anterior.

#### 6.2.8.1.4. Predicción para la Estación POPONTE [25020660]

Figura 76. Trayectorias más representativas en probabilidad y su variación para la estación POPONTE [25020660]



Nota: Elaborado por el Autor con la herramienta Google Colab con Python mediante datos obtenidos de la plataforma DHIME del IDEAM (2024).

Para la estación POPONTE [25020660] se encontró que la trayectoria más representativa y de mayor probabilidad y su porcentaje de variación en el Clúster número dos en las figuras de la tabla anterior.

### 6.2.6.2. Análisis para la Variable de Temperatura.

Para la variable de temperatura en las estaciones del municipio de Curumaní, Cesar, se ajustaron diferentes modelos SARIMA, adaptados a las características de las series de tiempo de cada estación. Los mejores modelos, basados en el criterio AIC, son los siguientes:

CURUMANI [25020250]: ARIMA(2,0,2)(0,1,0)<sub>12</sub>

Este modelo captura tanto la dinámica de corto plazo como los patrones estacionales anuales, ofreciendo un buen ajuste para la temperatura en la estación Curumaní.

PRIMAVERA [25020920]: ARIMA(2,0,2)(1,1,1)<sub>12</sub>

La diferenciación estacional adicional en esta estación refleja una mayor variabilidad en los datos de temperatura, haciendo necesario un modelo más complejo para capturar las fluctuaciones.

POPONTE [25020660]: ARIMA(1,0,2)(0,1,1)<sub>12</sub>

En la estación Poponte, se aplicó un modelo con parámetros más simples, que aún logra capturar de manera efectiva tanto las tendencias como la estacionalidad anual.

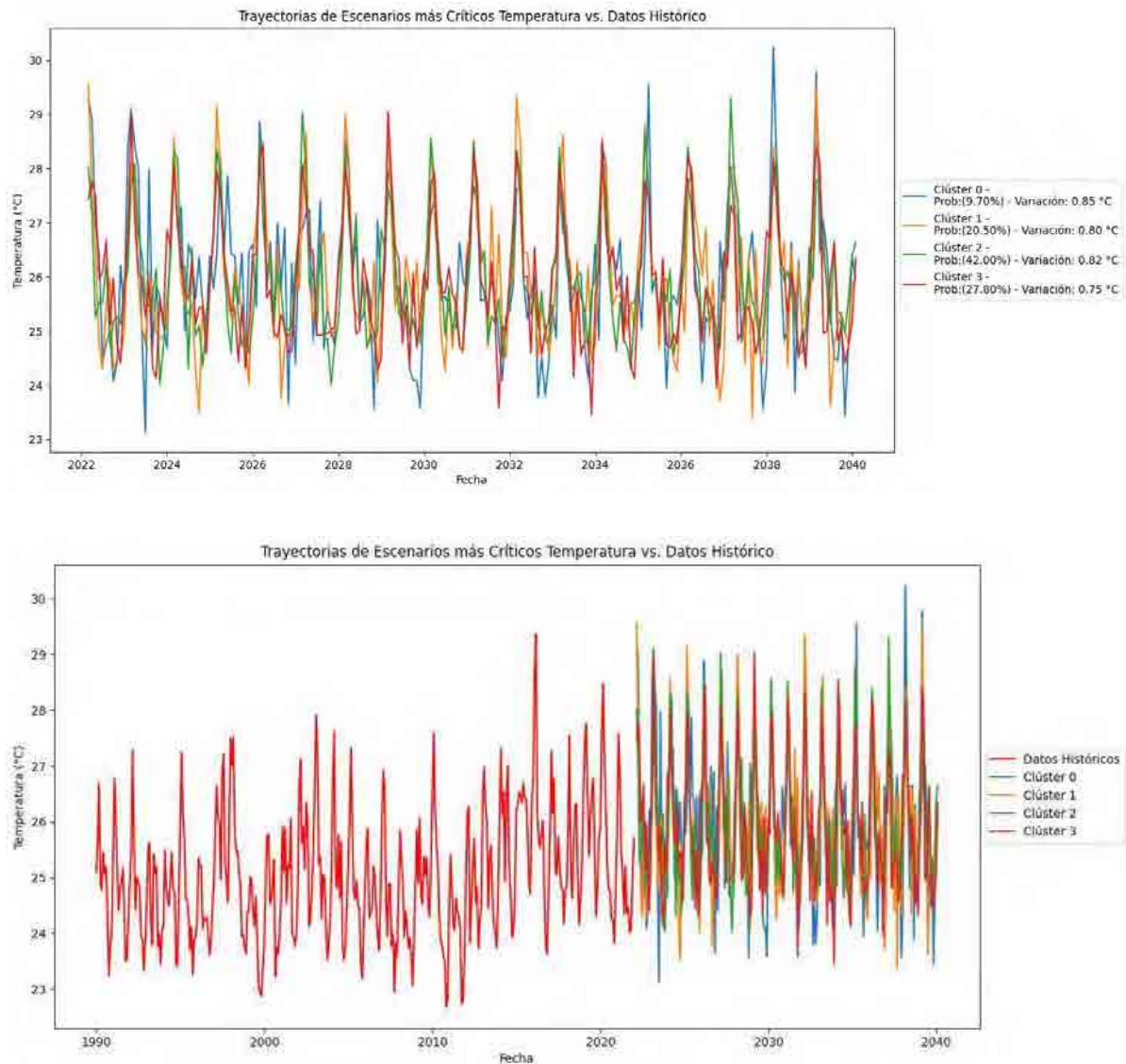
ZAPATOSA [25020690]: ARIMA(1,0,2)(0,1,1)<sub>12</sub>

Similar al modelo utilizado para Poponte, el modelo para Zapatososa captura adecuadamente los patrones de temperatura, con una estructura estacional sencilla pero eficiente.

Estos modelos reflejan la capacidad de capturar las dinámicas de la temperatura en cada estación, ajustándose a las particularidades climáticas de cada una y mostrando cómo las características estacionales influyen en las variaciones de temperatura en esta región de Curumaní, Cesar.

### 6.2.6.2.1. Predicción para la Estación CURUMANI [25020250]

Figura 77. Trayectorias más representativas en probabilidad y su variación para la estación CURUMANI [25020250]

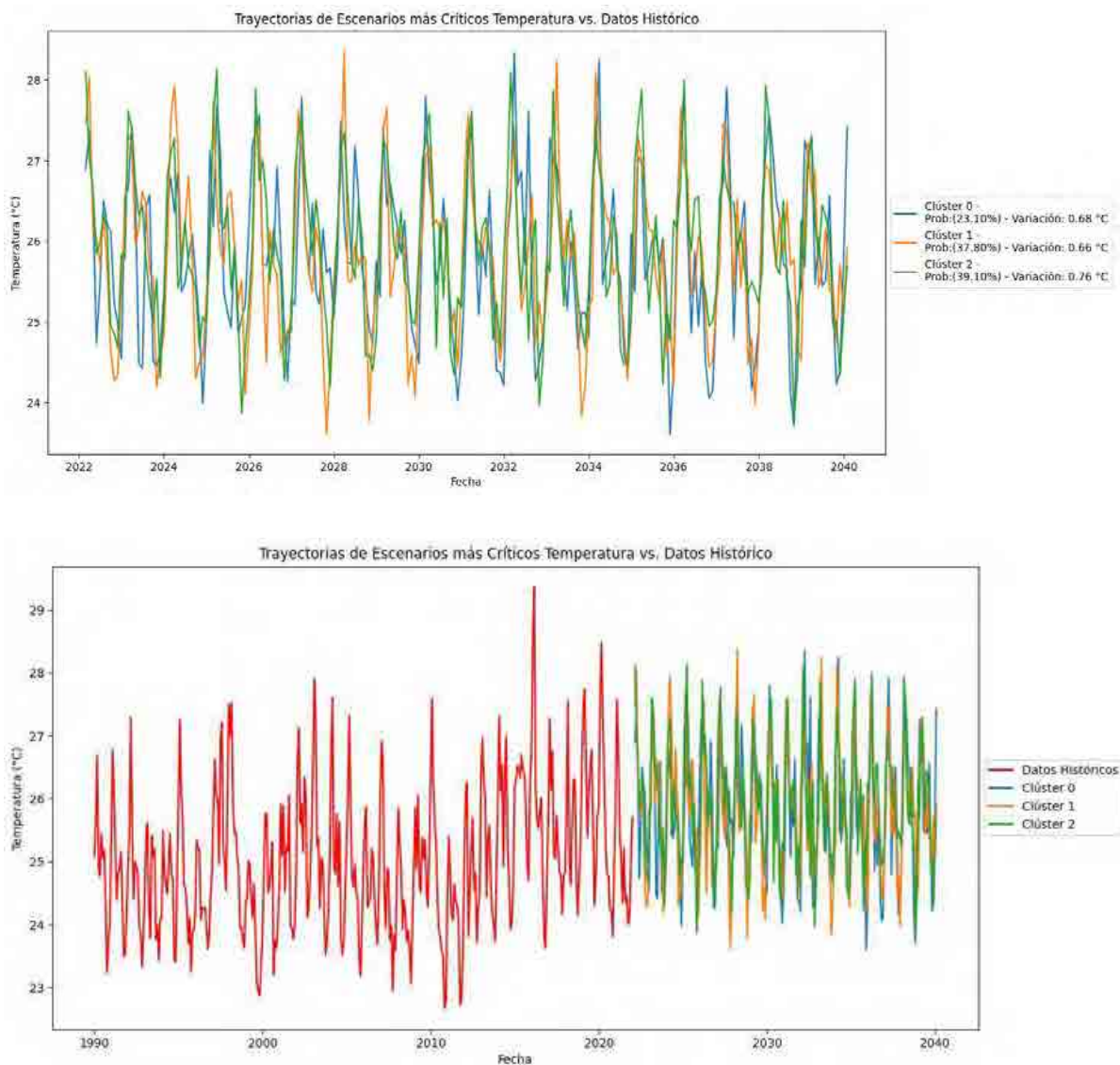


Nota: Elaborado por el Autor con la herramienta Google Colab con Python mediante datos obtenidos de la plataforma Google Earth Engine (2024).

Para la estación CURUMANI [25020250] se encontró que la trayectoria más representativa y de mayor probabilidad y su porcentaje de variación en el Clúster número dos en las figuras de la tabla anterior.

### 6.2.6.2.2. Predicción para la Estación PRIMAVERA [25020920]

Figura 78. Trayectorias más representativas en probabilidad y su variación para la estación PRIMAVERA [25020920]

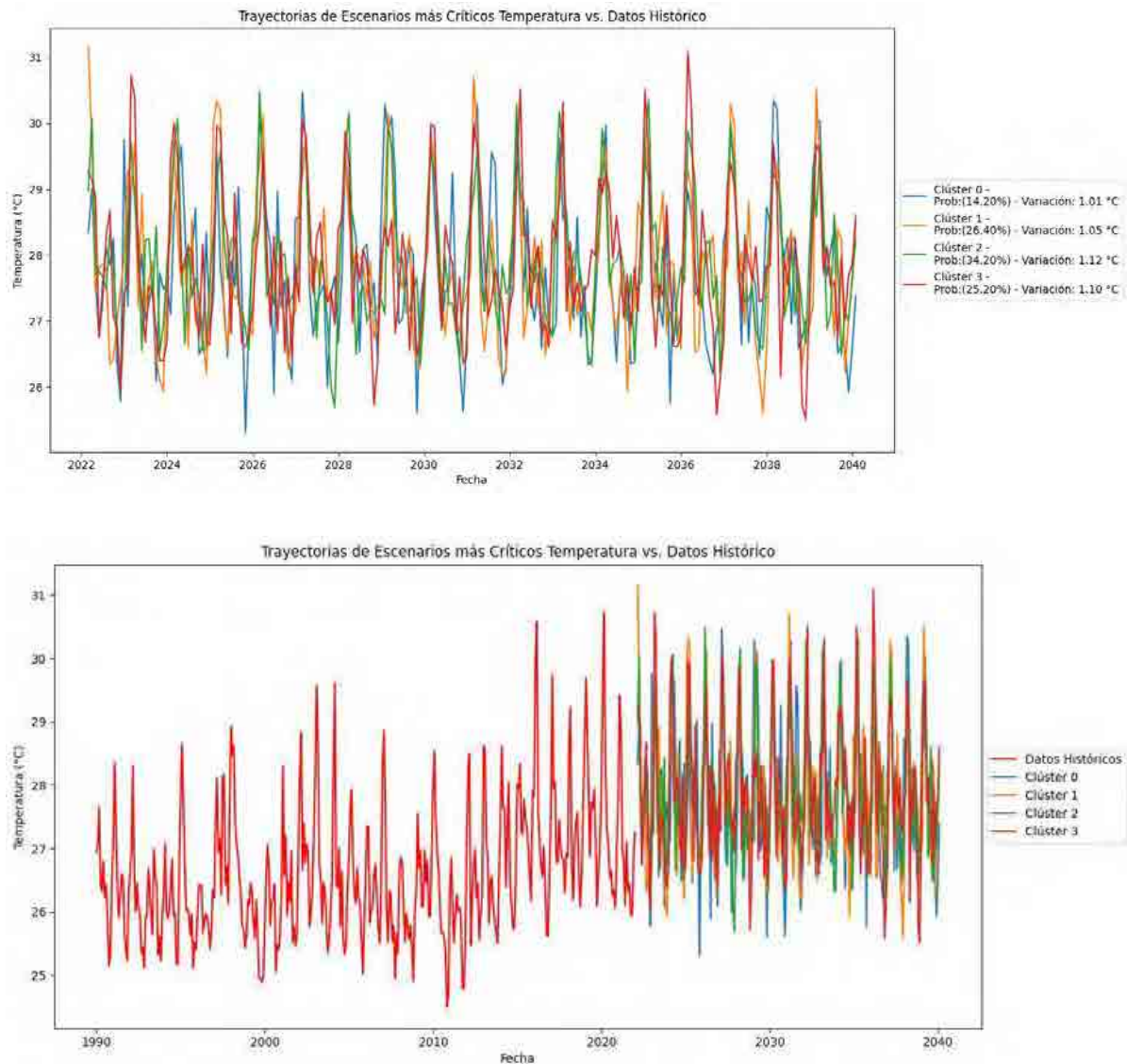


Nota: Elaborado por el Autor con la herramienta Google Colab con Python mediante datos obtenidos de la plataforma Google Earth Engine (2024).

Para la estación PRIMAVERA [25020920] se encontró que la trayectoria más representativa y de mayor probabilidad y su porcentaje de variación en el Clúster número dos en las figuras de la tabla anterior.

### 6.2.6.2.3. Predicción para la Estación ZAPATOSA [25020690]

Figura 79. Trayectorias más representativas en probabilidad y su variación para la estación ZAPATOSA [25020690]

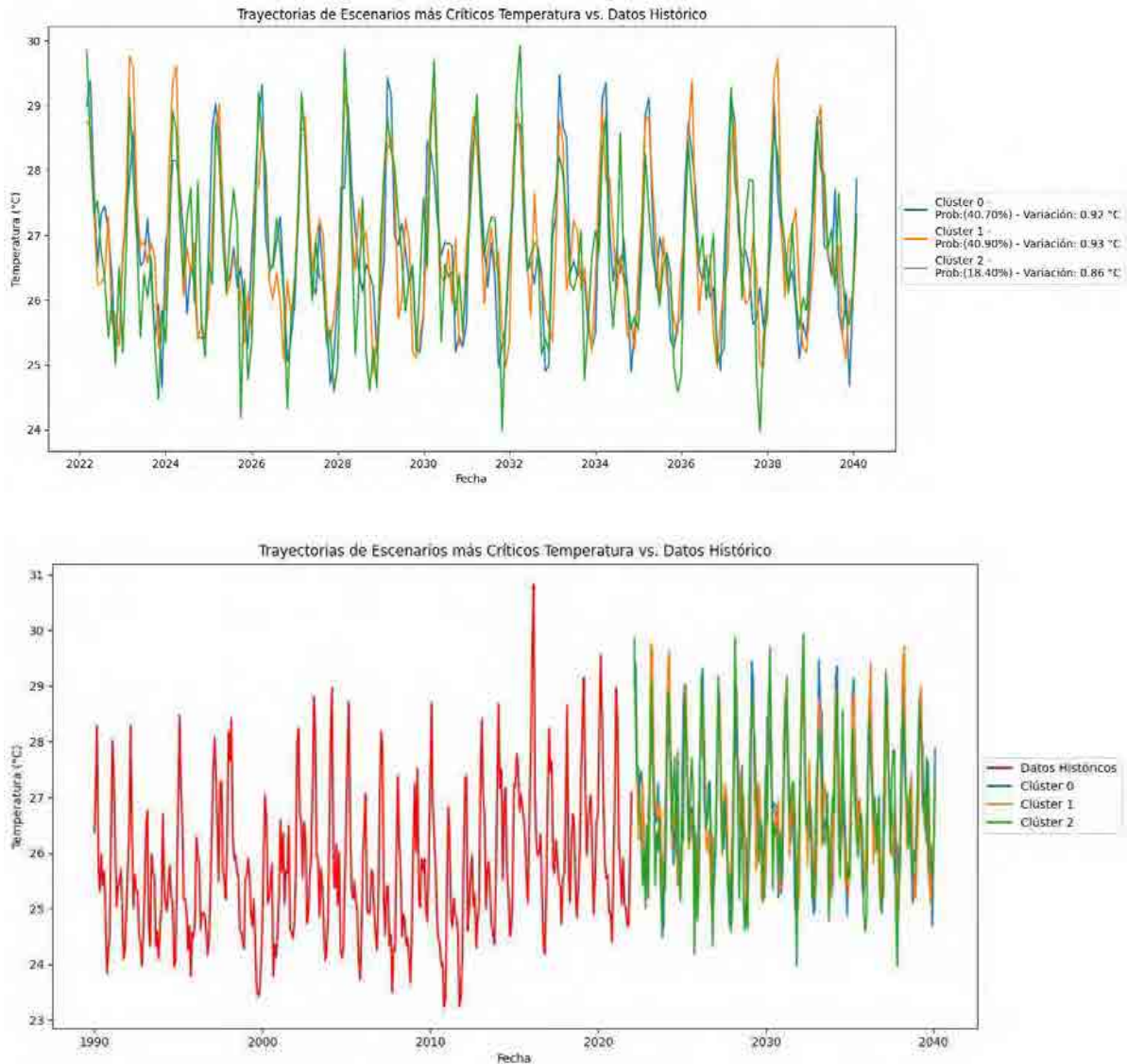


Nota: Elaborado por el Autor con la herramienta Google Colab con Python mediante datos obtenidos de la plataforma Google Earth Engine (2024).

Para la estación ZAPATOSA [25020690] se encontró que la trayectoria más representativa y de mayor probabilidad y su porcentaje de variación en el Clúster número dos en las figuras de la tabla anterior.

#### 6.2.8.2.4. Predicción para la Estación POPONTE [25020660]

Figura 80. Trayectorias más representativas en probabilidad y su variación para la estación POPONTE [25020660]



Nota: Elaborado por el Autor con la herramienta Google Colab con Python mediante datos obtenidos de la plataforma Google Earth Engine (2024).

Para la estación POPONTE [25020660] se encontró que la trayectoria más representativa y de mayor probabilidad y su porcentaje de variación en el Clúster número dos en las figuras de la tabla anterior.

### 6.2.7. *Análisis de Tendencia de las Variables para el Municipio de El Banco Magdalena con la Simulación Monte Carlo.*

Para el municipio de El Banco Magdalena el análisis de variabilidad climática se realizó con las siguientes estaciones en la tabla a continuación.

Tabla 39. Estaciones para El Banco Magdalena

APTO LAS FLORES	25025090
LOS NEGRITOS	25021200

Nota: Elaborado por el Autor (2024)

#### 6.2.7.1. Análisis de la Variable de Precipitación

Para el municipio de El Banco, Magdalena, se lograron ajustar los siguientes modelos SARIMA para la variable de precipitación, de acuerdo con el criterio AIC, en las estaciones:

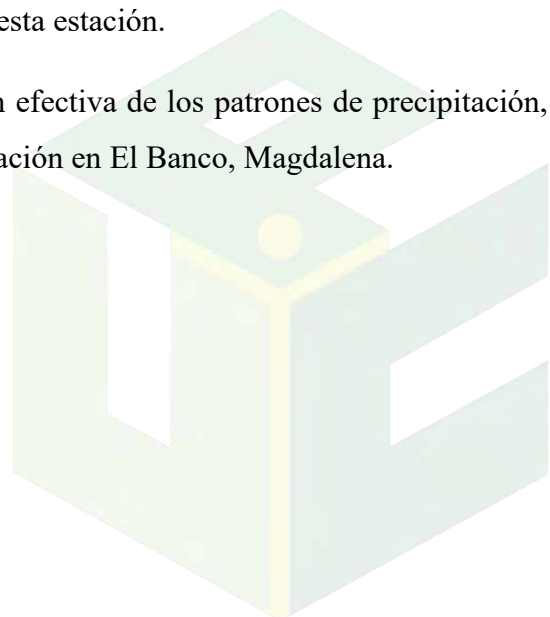
AEROPUERTO LAS FLORES [25025090]: ARIMA(2,0,2)(3,0,3)<sub>12</sub>

Este modelo incluye una estacionalidad compleja para reflejar de manera precisa los patrones de precipitación, con componentes autorregresivos y de media móvil tanto en la parte no estacional como en la estacional, capturando las variaciones anuales en la estación.

LOS NEGRITOS [25021200]: ARIMA(2,0,1)(2,0,3)<sub>12</sub>

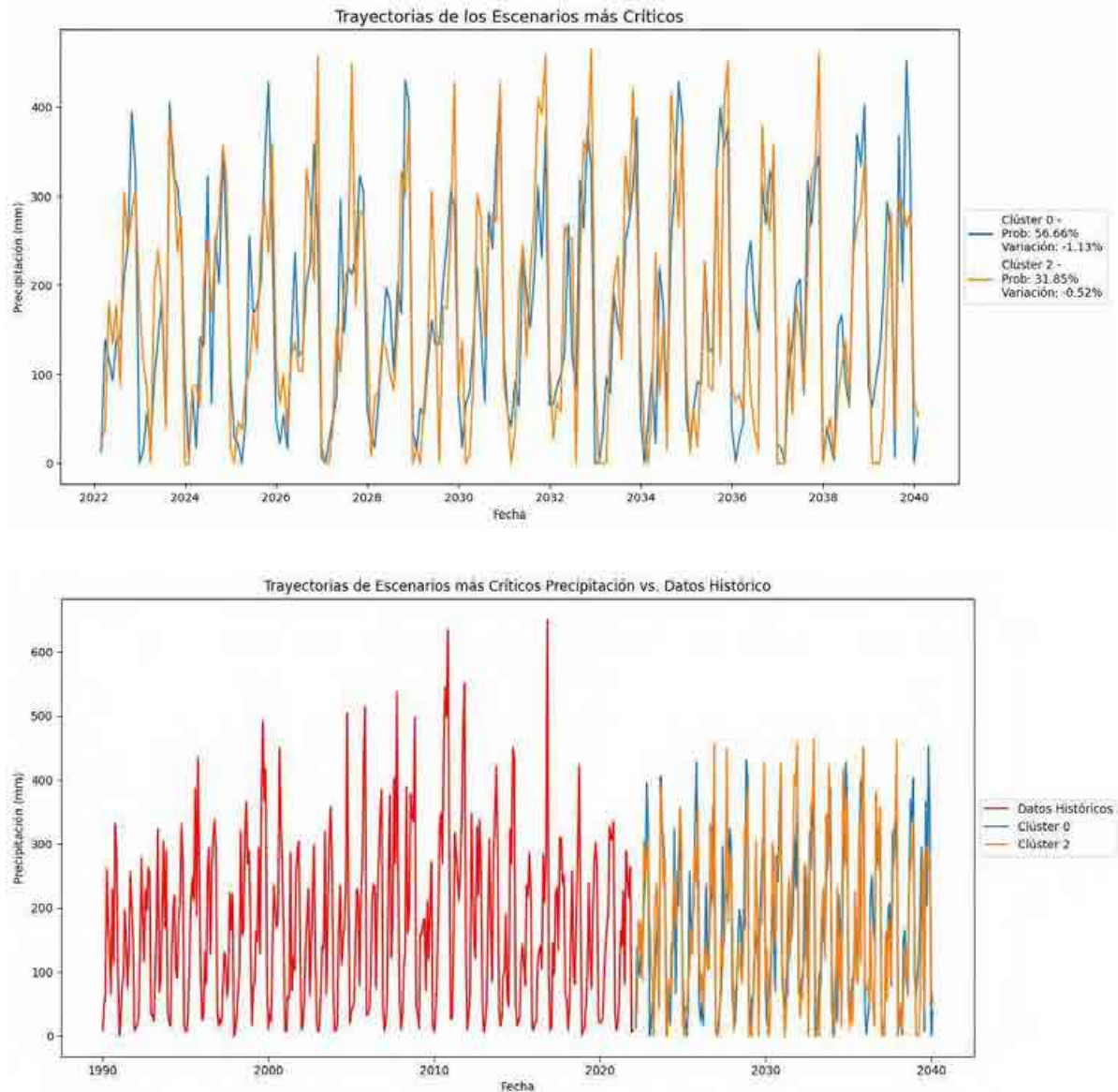
Para Los Negritos, se utilizó un modelo con menos parámetros en la parte no estacional pero una estacionalidad aún significativa, que permite capturar adecuadamente las fluctuaciones en las precipitaciones observadas en esta estación.

Estos modelos permiten una representación efectiva de los patrones de precipitación, ajustándose a las características locales de cada estación en El Banco, Magdalena.



### 6.2.7.1.1. Predicción para la Estación AEROPURTO LAS FLORES [25025090]

Figura 81. Trayectorias más representativas en probabilidad y su porcentaje de variación para la estación AEROPURTO LAS FLORES [25025090]

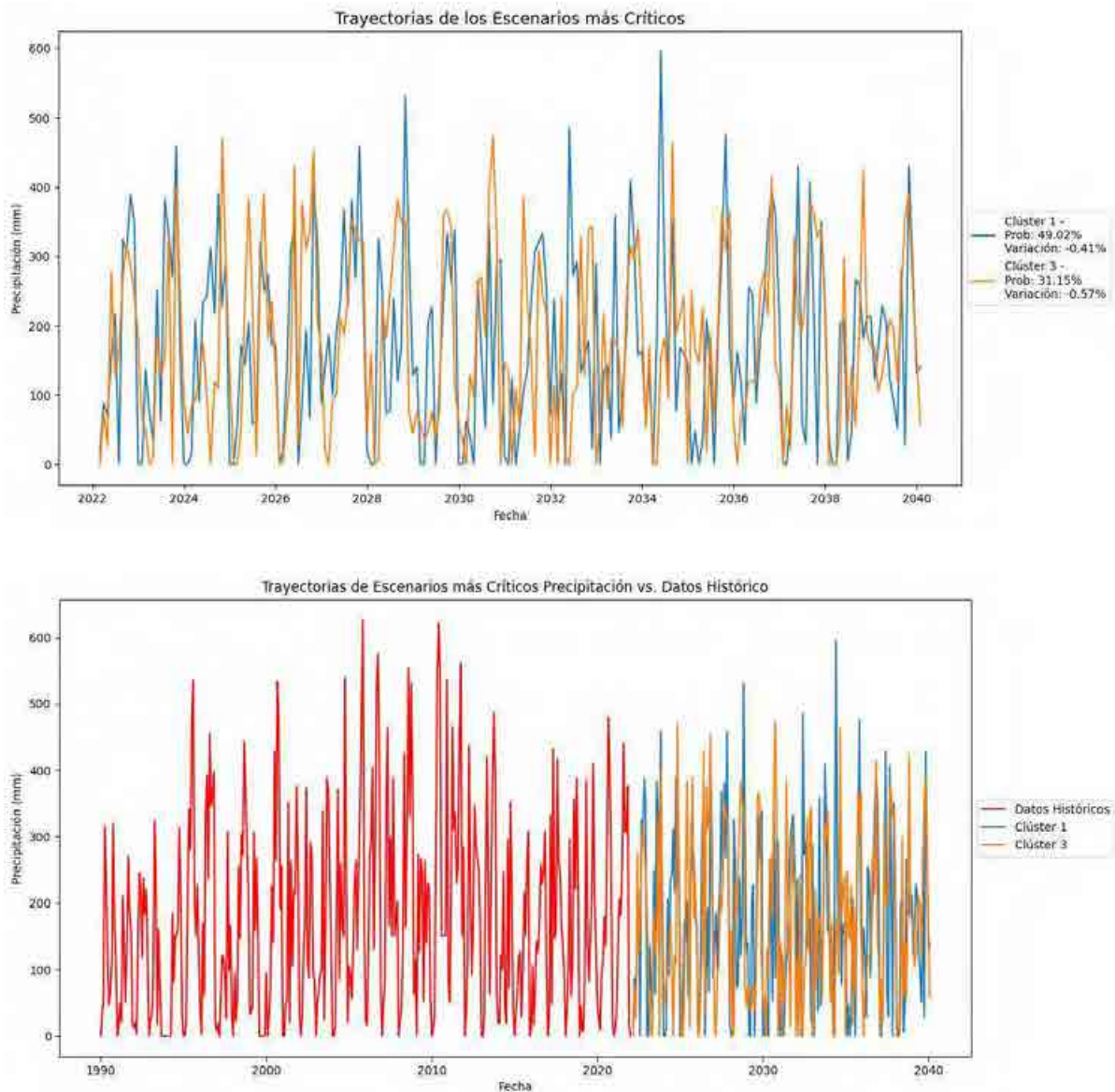


Nota: Elaborado por el Autor con la herramienta Google Colab con Python mediante datos obtenidos de la plataforma DHIME del IDEAM (2024).

Para la estación AEROPURTO LAS FLORES [25025090] se encontró que la trayectoria más representativa y de mayor probabilidad y su porcentaje de variación en el Clúster número cero en las figuras de la tabla anterior.

### 6.2.9.1.2. Predicción para la Estación LOS NEGRITOS [25021200]

Figura 82. Trayectorias más representativas en probabilidad y su porcentaje de variación para la estación LOS NEGRITOS [25021200]



Nota: Elaborado por el Autor con la herramienta Google Colab con Python mediante datos obtenidos de la plataforma DHIME del IDEAM (2024).

Para la estación LOS NEGRITOS [25021200] se encontró que la trayectoria más representativa y de mayor probabilidad y su porcentaje de variación en el Clúster número uno en las figuras de la tabla anterior.

### 6.2.7.2. Análisis de la Variable de Temperatura.

Para la variable de temperatura en el municipio de El Banco, Magdalena, se ajustaron los siguientes modelos SARIMA para las estaciones Aeropuerto Las Flores y Los Negritos, basados en el criterio AIC. Estos modelos reflejan tanto las tendencias a corto plazo como los patrones estacionales anuales en cada estación:

AEROPUERTO LAS FLORES [25025090]:  $ARIMA(1,0,2)(1,1,0)_{12}$

Este modelo presenta una estructura que captura las fluctuaciones de temperatura a lo largo del tiempo, con un componente de media móvil moderado ( $q=2$ ) y un término estacional simple. La diferenciación estacional ( $D=1$ ) permite capturar de manera adecuada los cambios en la temperatura a lo largo de los 12 meses del año, ajustándose bien a los datos de la estación.

LOS NEGRITOS [25021200]:  $ARIMA(2,0,2)(1,1,0)_{12}$

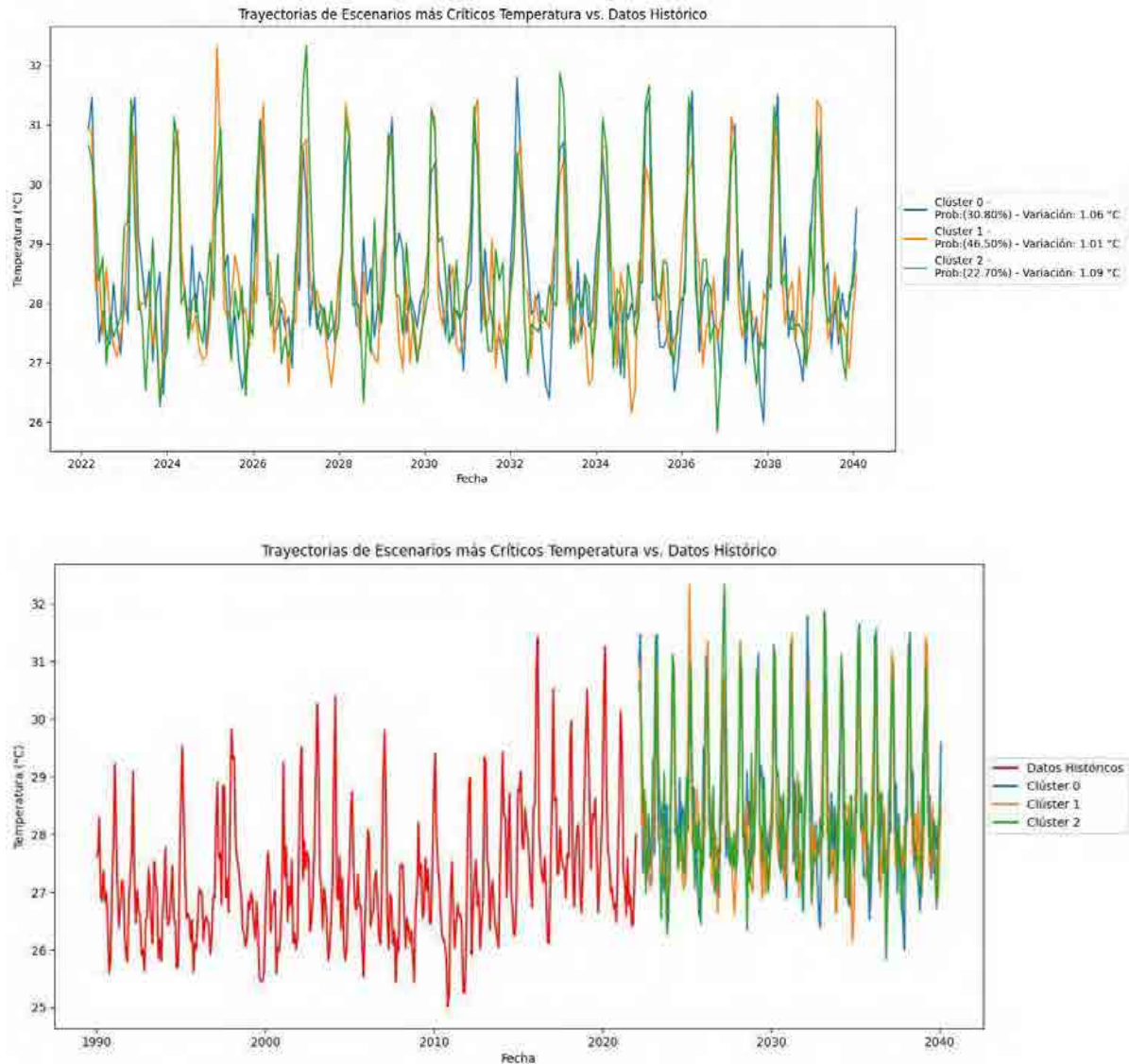
El modelo para Los Negritos incorpora tanto componentes autorregresivos ( $p=2$ ) como de media móvil ( $q=2$ ), lo que refleja la necesidad de capturar fluctuaciones más complejas en la serie de tiempo de temperatura. La diferenciación estacional también es clave para modelar los ciclos anuales de temperatura, lo que permite un ajuste más preciso en esta estación.

Ambos modelos SARIMA se ajustan bien a las condiciones climáticas de El Banco, destacando cómo las variaciones estacionales y las fluctuaciones locales de temperatura influyen en las series de tiempo de cada estación. Esto garantiza una buena representación de las dinámicas de temperatura en la región.



### 6.2.9.2.1. Predicción para la Estación AEROPUERTO LAS FLORES [25025090]

Figura 83. Trayectorias más representativas en probabilidad y su variación para la estación AEROPUERTO LAS FLORES [25025090]

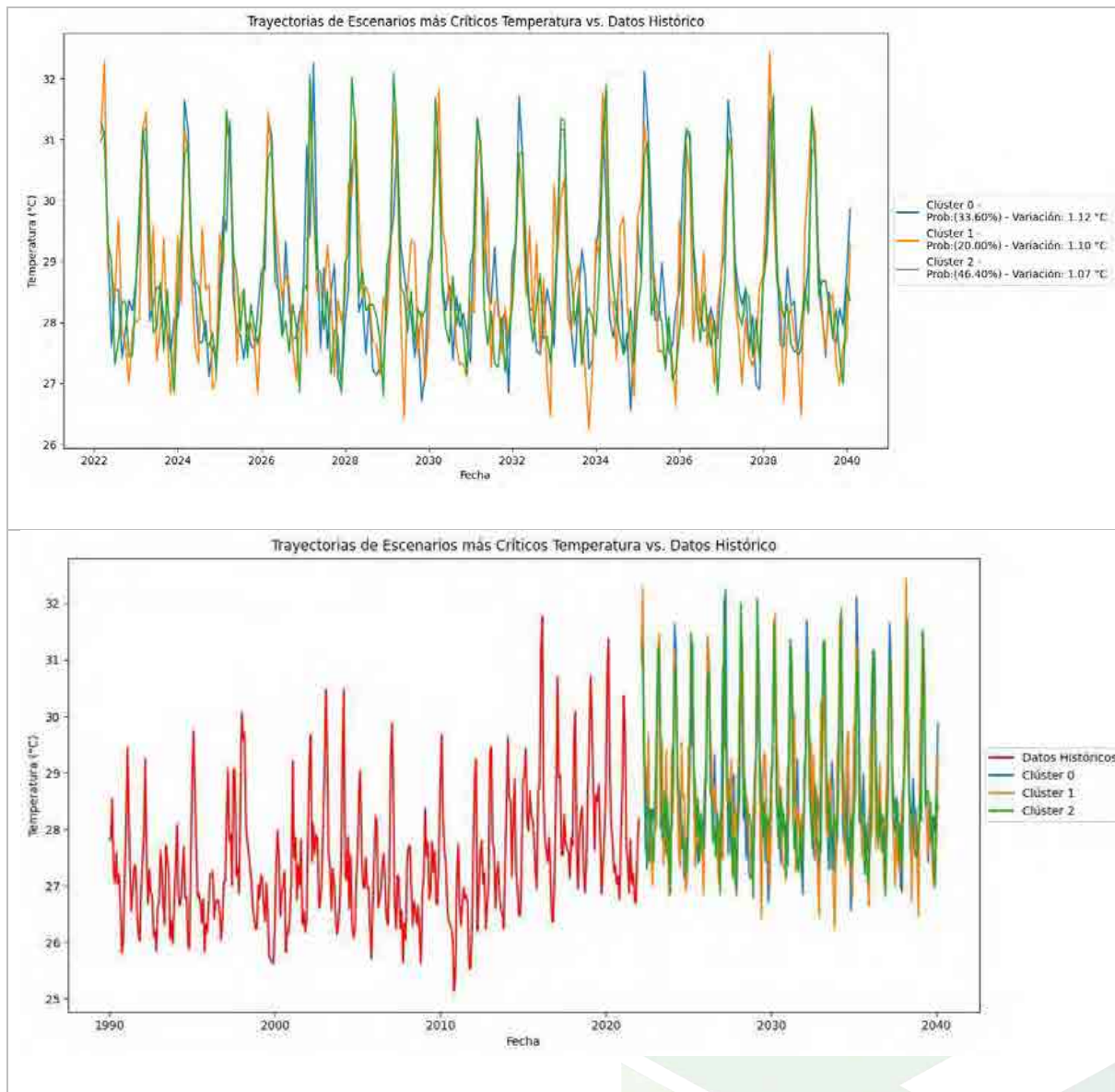


Nota: Elaborado por el Autor con la herramienta Google Colab con Python mediante datos obtenidos de la plataforma Google Earth Engine (2024).

Para la estación AEROPUERTO LAS FLORES [25025090] se encontró que la trayectoria más representativa y de mayor probabilidad y su porcentaje de variación en el Clúster número uno en las figuras de la tabla anterior.

### 6.2.9.2.2. Predicción para la Estación LOS NEGRITOS [25021200]

Figura 84. Trayectorias más representativas en probabilidad y su variación para la estación LOS NEGRITOS [25021200]



Nota: Elaborado por el Autor con la herramienta Google Colab con Python mediante datos obtenidos de la plataforma Google Earth Engine (2024).

Para la estación LOS NEGRITOS [25021200] se encontró que la trayectoria más representativa y de mayor probabilidad y su porcentaje de variación en el Clúster número dos en las figuras de la tabla anterior.

### **6.2.8. Análisis de Tendencia de las Variables para el Municipio de Tamalameque Cesar con la Simulación Monte Carlo.**

Para el municipio de Tamalameque Cesar el análisis de variabilidad climática se realizó para la única estación de precipitación disponible en el municipio.

TAMALAMEQUE [25020090]

#### **6.2.8.1. Análisis para la Variable de Precipitación.**

En el municipio de Tamalameque, Cesar, para la única estación disponible que mide la variable de precipitación, se logró ajustar el siguiente modelo SARIMA, basado en el criterio AIC:

Estación Tamalameque:

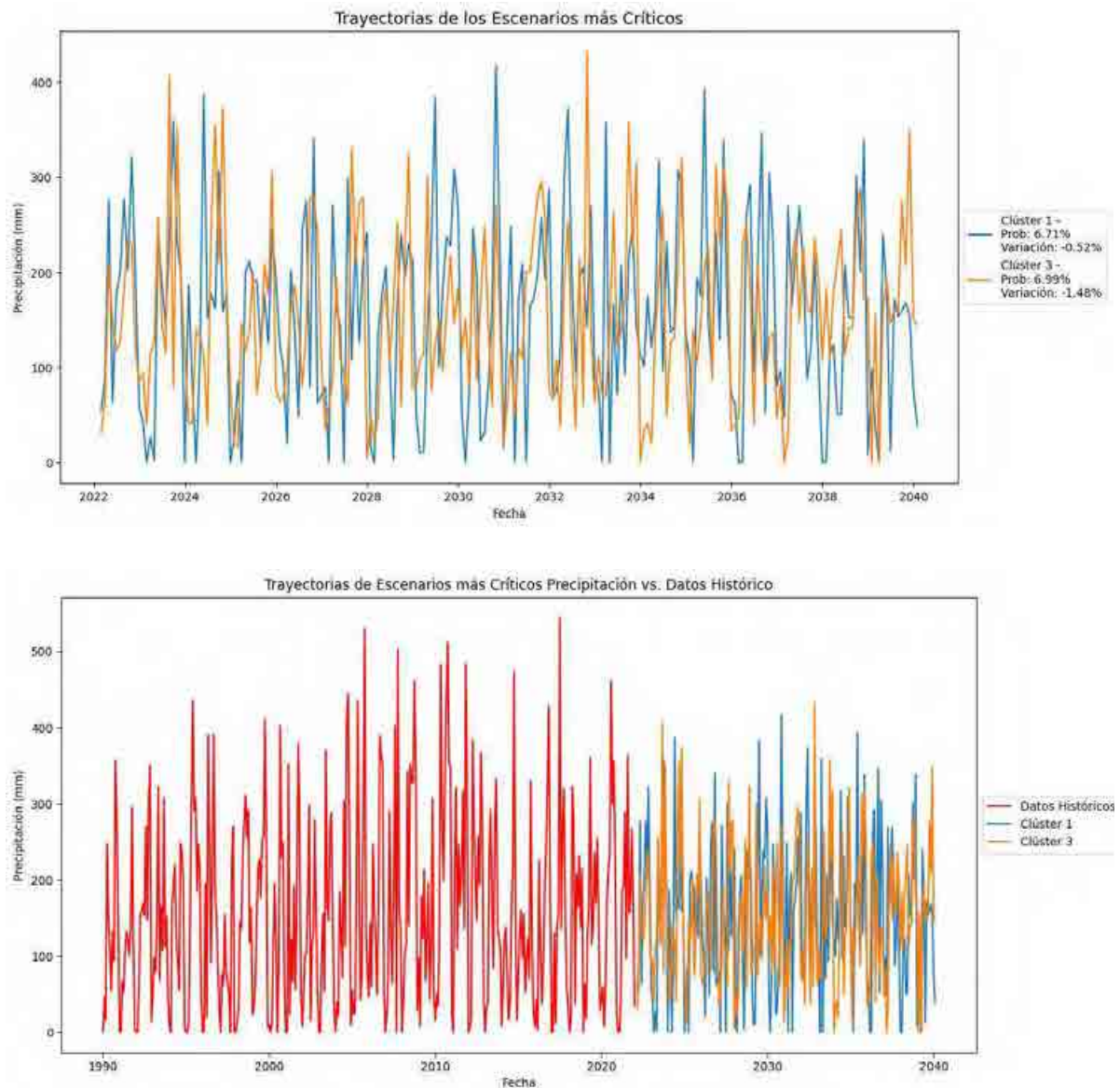
TAMALAMEQUE [25020090]: ARIMA(3,0,3)(1,0,1)<sub>12</sub>

Este modelo incorpora tanto componentes autorregresivos ( $p=3$ ) como de media móvil ( $q=3$ ) en la parte no estacional, lo que permite capturar con precisión las fluctuaciones y variaciones de corto plazo en la serie de tiempo. Además, la estacionalidad anual (12 meses) está reflejada mediante un término estacional simple, que ajusta el comportamiento repetitivo anual de las precipitaciones en la región. Este modelo proporciona un ajuste sólido para representar los patrones de precipitación en la estación de Tamalameque.



### 6.2.8.1.1. Predicción para la Estación TAMALAMEQUE [25020090]

Figura 85. Trayectorias más representativas en probabilidad y su variación para la estación TAMALAMEQUE [25020090]



Nota: Elaborado por el Autor con la herramienta Google Colab con Python mediante datos obtenidos de la plataforma DHIME del IDEAM (2024).

Para la estación TAMALAMEQUE [25020090] se encontró que la trayectoria más representativa y de mayor probabilidad y su porcentaje de variación en el Clúster número tres en las figuras de la tabla anterior.

### 6.2.8.2. Análisis para para la Variable de Temperatura.

Para la variable de temperatura en el municipio de Tamalameque, Cesar, se ajustó el siguiente modelo SARIMA, identificado como el más adecuado según el criterio AIC:

Estación Tamalameque:

TAMALAMEQUE [25020090]: ARIMA(2,0,2)(1,1,0)<sub>12</sub>

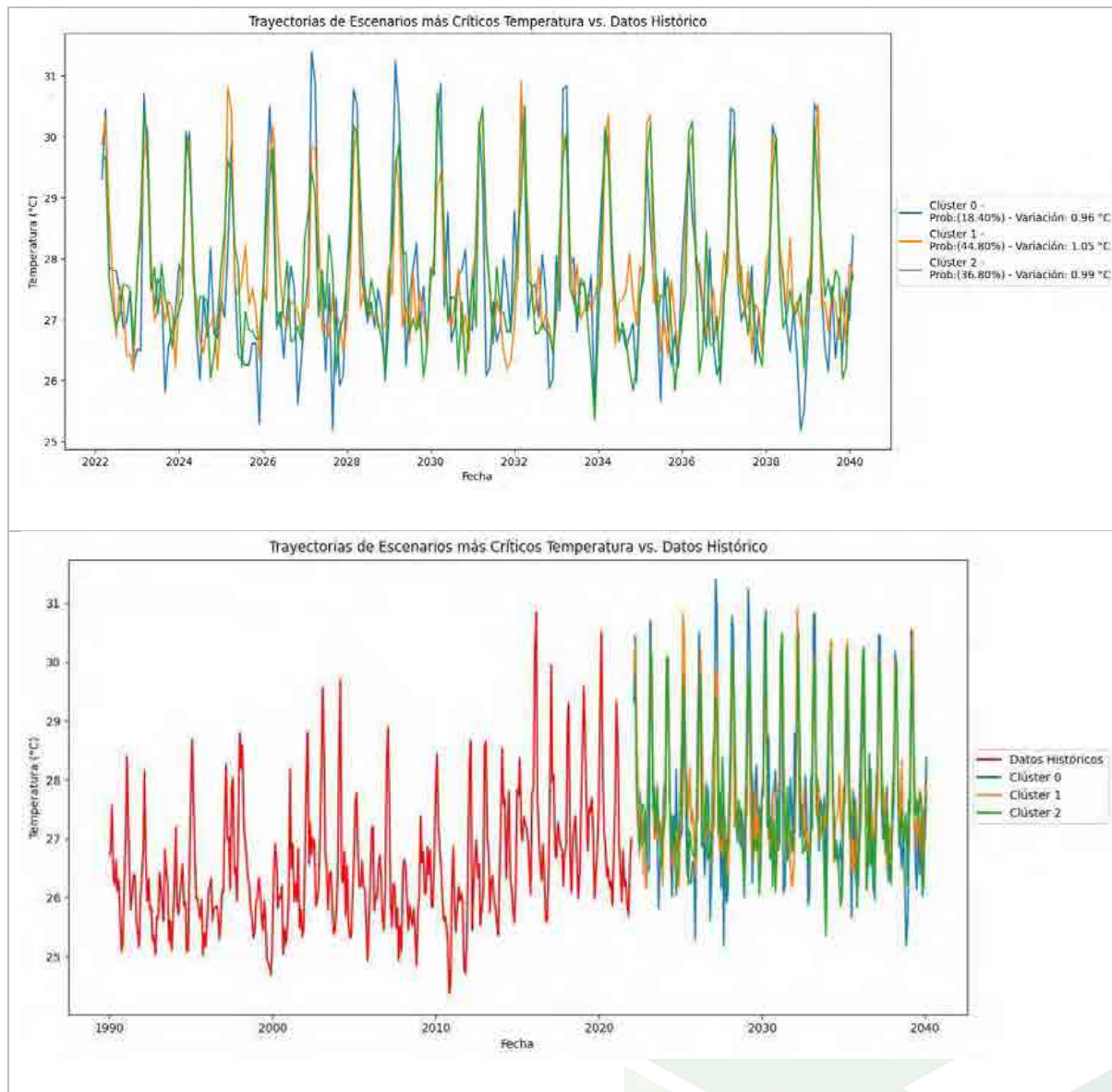
Este modelo combina componentes autorregresivos ( $p=2$ ) y de media móvil ( $q=2$ ) en la parte no estacional, lo que permite capturar de manera precisa las fluctuaciones de corto plazo en la serie de tiempo de temperatura. Además, incluye una diferenciación estacional ( $D=1$ ) que se ajusta a los ciclos anuales de 12 meses, permitiendo reflejar los patrones estacionales característicos de la temperatura en la región.

El término estacional autorregresivo ( $P=1$ ) refleja la influencia de los valores de temperatura del año anterior en los datos actuales, lo que mejora la capacidad predictiva del modelo. Este enfoque es útil para capturar la dinámica climática en Tamalameque, donde las variaciones de temperatura siguen un patrón relativamente estable a lo largo del tiempo, pero con fluctuaciones anuales que requieren una estructura estacional adecuada.



### 6.2.8.2.1. Predicción para la Estación TAMALAMEQUE [25020090]

Figura 86. Trayectorias más representativas en probabilidad y su variación para la estación TAMALAMEQUE [25020090]

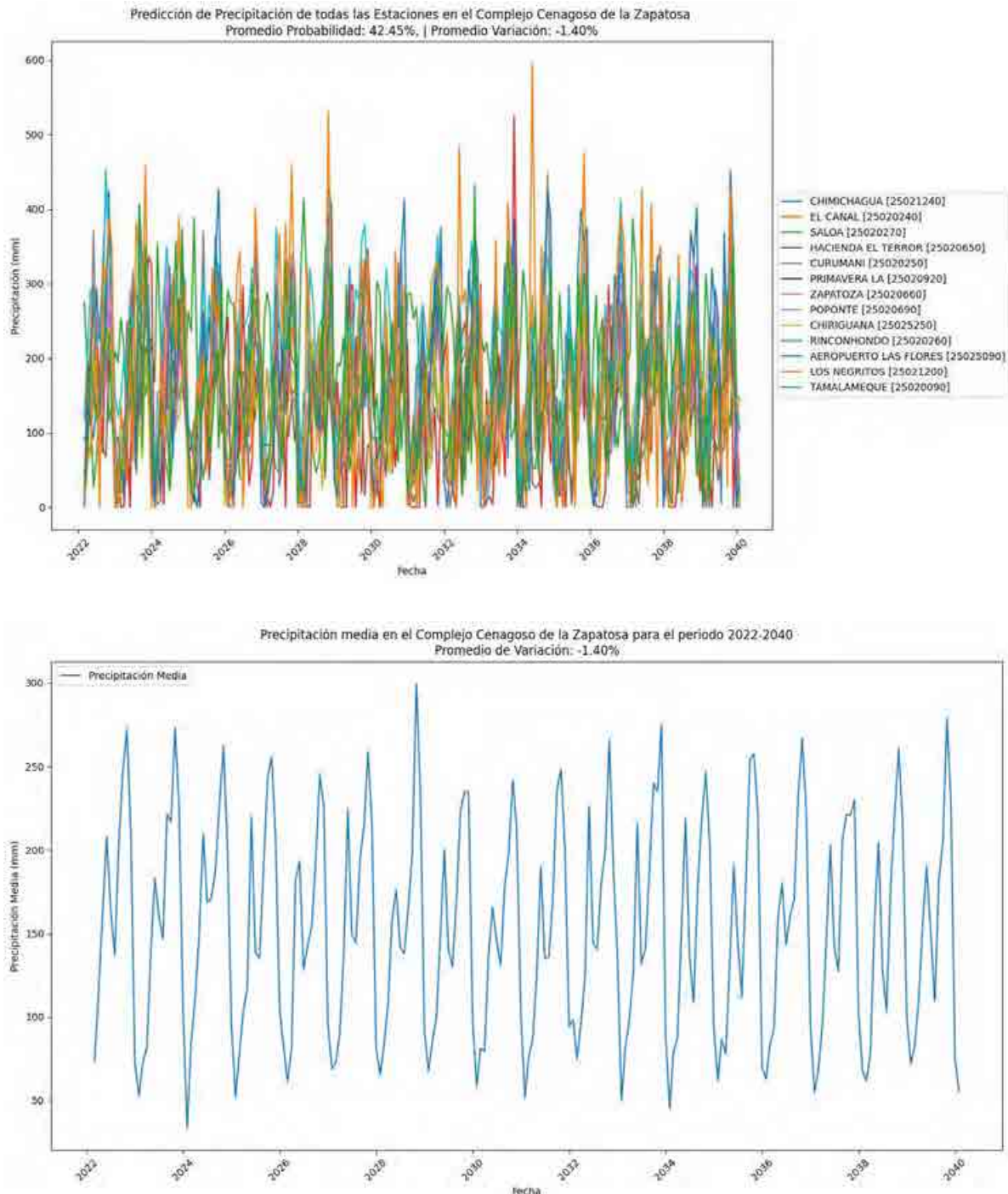


Nota: Elaborado por el Autor con la herramienta Google Colab con Python mediante datos obtenidos de la plataforma Google Earth Engine (2024).

Para la estación TAMALAMEQUE [25020090] se encontró que la trayectoria más representativa y de mayor probabilidad y su porcentaje de variación en el Clúster número uno en las figuras de la tabla anterior.

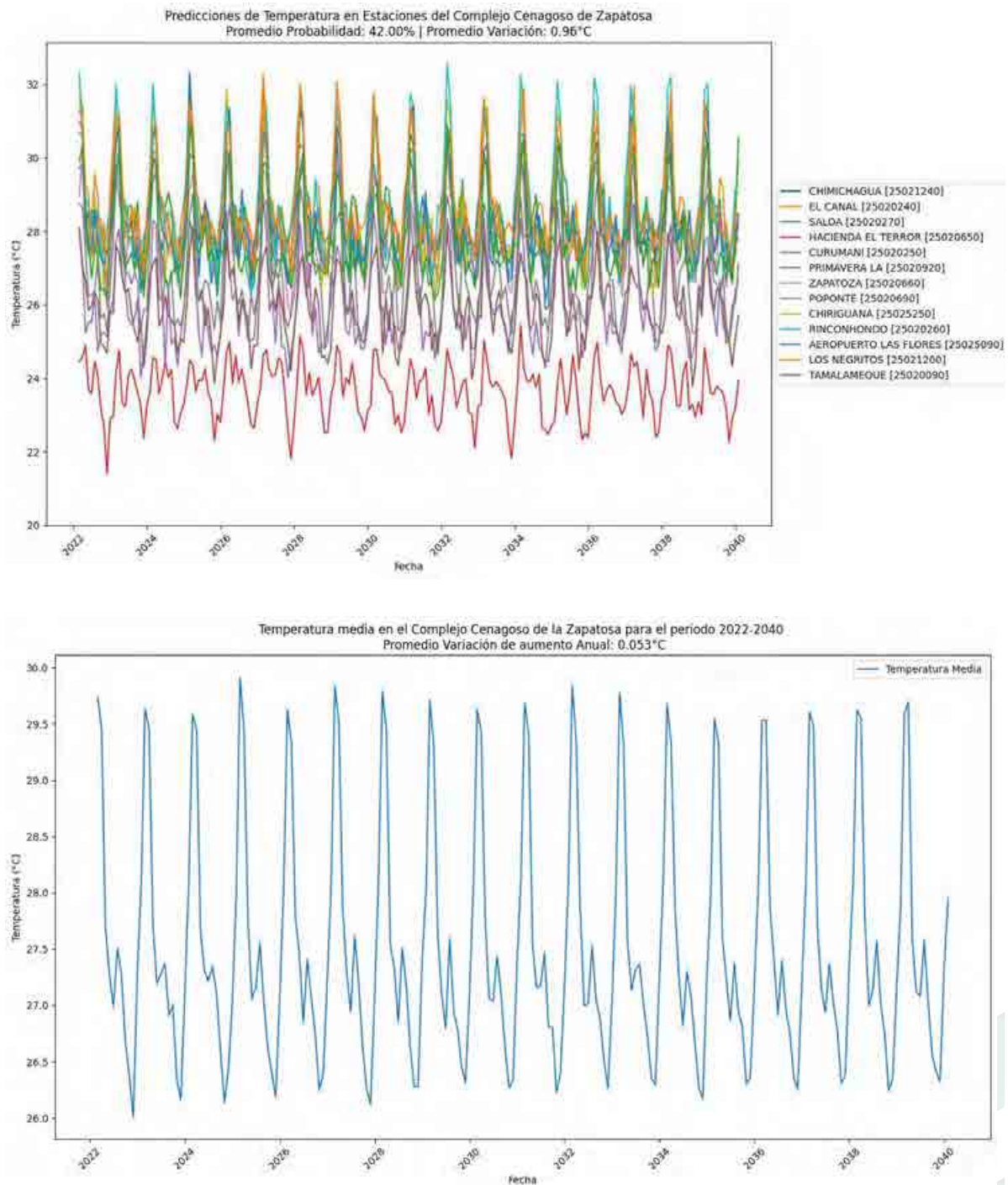
**6.2.9. Análisis de los Resultado de la Simulación Monte Carlo para el Complejo  
 Cenagoso de la Zapatosa para las Variables de Precipitación y Temperatura.**

Figura 87. Trayectorias de Mayor probabilidad de todas las Estaciones del Complejo cenagoso de la Zapatosa | Precipitación Media para todo el Complejo.



Nota: Elaborado por el Autor con la herramienta Google Colab con Python (2024)

Figura 88. Trayectorias de Mayor probabilidad de todas las Estaciones del Complejo cenagoso de la Zapatosa | Temperatura Media para todo el Complejo.



Nota: Elaborado por el Autor con la herramienta Google Colab con Python (2024)

### **6.2.9.1. Impacto en las Precipitaciones y Temperatura para el periodo 2022-2040 en el Complejo Cenagoso de la Zapatosa.**

Se proyecta una disminución promedio del 1.40% en las precipitaciones entre 2022 y 2040. Aunque esta disminución parece algo moderada, pero su efecto acumulativo a lo largo del tiempo podría ser severo para la dinámica hídrica de la ciénaga, afectando la disponibilidad de agua, que es esencial para el equilibrio de estos ecosistemas. La reducción sostenida en las precipitaciones aumentará la vulnerabilidad del área a sequías, afectando los ciclos naturales de inundación y sequía, y provocando cambios ecológicos que impactarían tanto a la flora como a la fauna.

La probabilidad moderada del 42.45% sugiere que esta disminución es posible, pero no está garantizada, lo que introduce un nivel de incertidumbre. Sin embargo, la tendencia general hacia una reducción plantea riesgos considerables para el sistema hídrico y las comunidades que de él dependen.

En cuanto a las Temperatura se proyecta incremento de 0.96°C proyectado para 2040, con un aumento promedio anual de 0.053°C, que tiene implicaciones directas sobre el ecosistema cenagoso, especialmente en términos de aumento de la evaporación. Este incremento afectará también a los patrones de biodiversidad, ya que el aumento de la temperatura altera los hábitats acuáticos y terrestres.

La probabilidad moderada del 42.00% sugiere un escenario plausible donde este aumento de temperatura podría ocurrir, exacerbando los efectos negativos en los ecosistemas del complejo cenagoso como el impacto en la biodiversidad, la fauna y flora de la ciénaga están adaptadas a un rango específico de condiciones climáticas. Un aumento en la temperatura podría llevar a la migración o extinción de especies sensibles al calor, alterando las cadenas alimenticias y los ciclos ecológicos del área.

### 6.2.9.2. Impacto en las Poblaciones de los Municipios en el Área de Influencia del Complejo Cenagoso de la Zapatosa.

Para determinar la población futura afectada por los cambios en la temperatura y precipitación, se realizó una proyección de la población del Complejo Cenagoso de la Zapatosa. Para este fin, se utilizaron diferentes métodos de ajuste, y se eligió el método de regresión polinómica de grado 2 debido a que fue el que mejor se adaptó a los datos de población. Este modelo obtuvo un coeficiente de determinación ( $R^2$ ) de aproximadamente 0.8190, lo que indica un ajuste más preciso y cercano a los datos observados en comparación con los modelos lineal y exponencial. Gracias a este modelo, se pudieron obtener proyecciones más confiables de la población, lo cual es crucial para entender el impacto de la variabilidad climática en la región.

El ajuste de un polinómico de grado 2 se realizó utilizando las funciones de la librería Numpy de Python como `np.polyfit(years, population, 2)`, que genera un polinomio de la forma  $(ax^2+bx+c)$ . Esto proporciona los coeficientes (a, b y c) que describe la relación entre los años y la población. A continuación, se usó `np.polyval(coeffs_poly, years)` para calcular los valores estimados de la población para los años analizados, aplicando estos coeficientes.

$$P(x) = ax^2 + bx + c$$

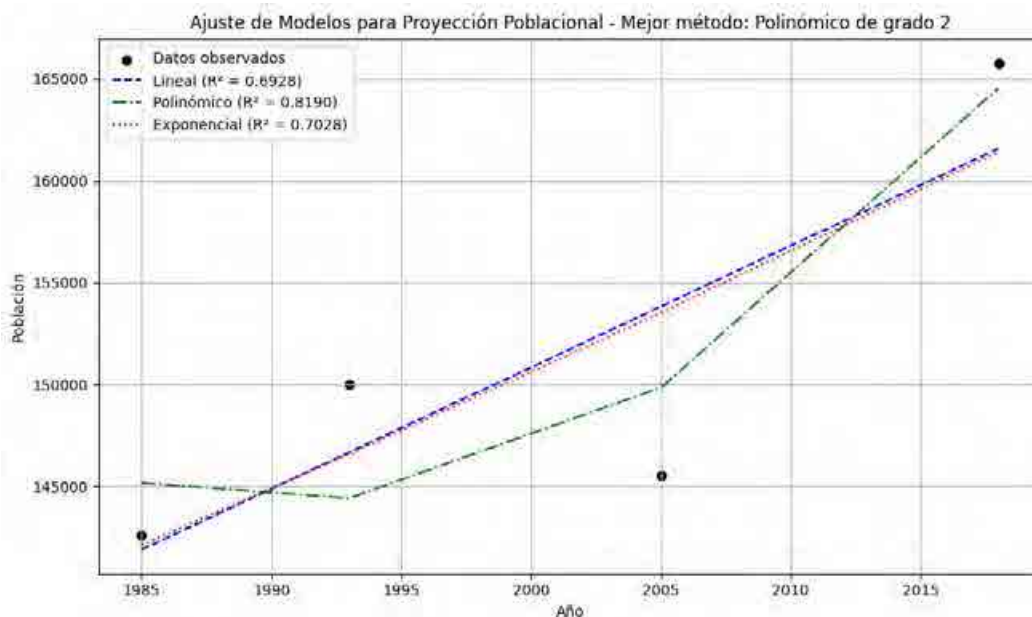
Finalmente, para evaluar qué tan bien se ajusta el modelo a los datos reales, se utilizó de la librería de Python la función `r2score(population, population_pred_poly)`, que calcula el coeficiente  $R^2$ . Un  $R^2$  cercano a 1 indica que el modelo se ajusta adecuadamente a los datos observados, lo cual respalda la elección del modelo polinómico para realizar proyecciones más precisas.

El coeficiente de determinación  $R^2$  es una medida estadística que indica qué tan bien un modelo de regresión se ajusta a los datos observados. Su valor varía entre 0 y 1 (IBM, 2024).

$$R^2 = 1 - \frac{SS_{res}}{SS_{tot}}$$

- $SS_{res}$ : Suma de los cuadrados de los residuos (errores entre el valor predicho y el observado).
- $SS_{tot}$ : Suma de los cuadrados totales (variación de los datos con respecto a su media).

Figura 89. Gráfico de ajuste de mejor método de proyección Poblacional para el CCZ



Nota: Elaborado por el Autor con la herramienta Google Colab con Python (2024).

Tabla 40. Población censada para los municipios del CCZ 1985-2018.

Año	Chimichagua	Chiriguaná	Curumaní	El Banco	Tamalameque	Total, CCZ
1985	28884	21241	29363	47778	15352	142618
1993	29186	23540	29165	54992	13134	150017
2005	30116	21494	26740	53544	13636	145530
2018	30289	27006	34838	59594	14063	165790

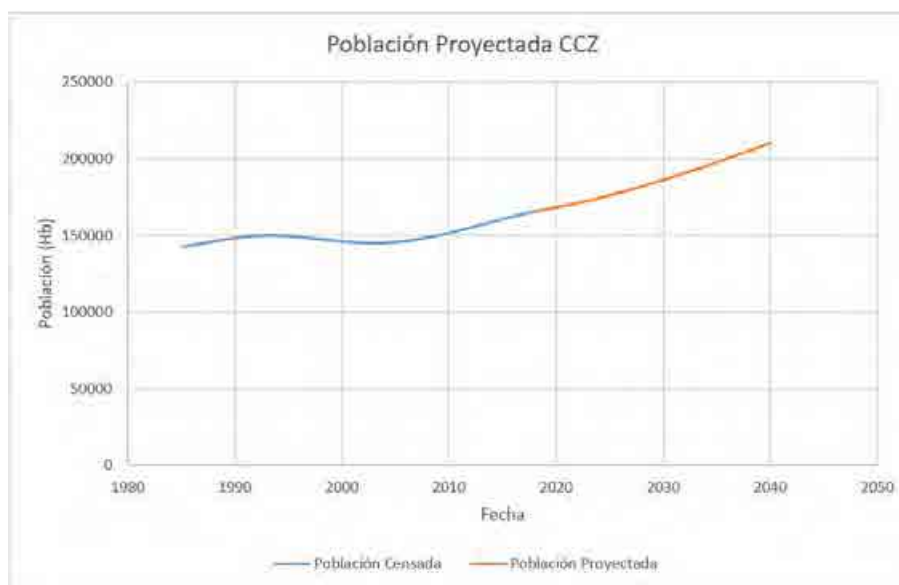
Nota: Elaborador por el Autor mediante de Datos del DANE (2024)

Tabla 41. Población Proyecta al periodo 2040.

Año	Población Total (Hab), CCZ
1985	142618
1993	150017
2005	145530
2018	165790
2023	172639
2028	182101
2033	192922
2038	205103
2040	210356

Nota: Elaborado por el Autor con la herramienta Google Colab con Python (2024).

Figura 90. Proyección para Complejo Cenagoso de la Zapatosa.



Nota: Elaborado por el Autor con la herramienta Microsoft Excel (2024).

- *Población Afectada:* El Complejo Cenagoso de la Zapatosa sustenta a una población total de 165,790 personas distribuidas en los cinco municipios de su área de influencia que este número será mayor en el año 2040 para número estimado de 210356 personas. Las comunidades dependen fuertemente de los recursos acuáticos y terrestres del complejo para su sustento. La agricultura, la pesca, ganadería y otras actividades productivas están directamente relacionadas con la disponibilidad de agua y el clima en los municipios del Complejo Cenagoso de la Zapatosa.
- *Impacto en la Agricultura:* La disminución de las precipitaciones y el aumento de la temperatura afectarán la capacidad de producción agrícola, especialmente en lo que respecta a cultivos que requieren un suministro constante de agua. Esto podría llevar a:
- *Reducción en la productividad de cultivos:* La escasez de agua afectará la producción agrícola, limitando la disponibilidad de productos básicos y afectando la seguridad alimentaria.
- *Mayor dependencia de técnicas de riego:* En áreas con mayor disponibilidad de agua, se requerirá una mayor inversión en infraestructura de riego, lo que representa un costo significativo para los pequeños agricultores.

- *Impacto en la Pesca:* La pesca, una actividad central para la economía de la región, también se verá afectada por la reducción en los niveles de agua y el aumento en la evaporación. Las especies de peces pueden migrar a otras áreas o disminuir en número debido a la degradación de sus hábitats naturales.
- *Desempleo y Migración:* El informe del BID Los mercados laborales y el cambio climático ¿Cómo adaptar las políticas laborales y mejorar las oportunidades de empleo? (2024), destaca cómo el cambio climático puede aumentar la desigualdad, y este es un riesgo real para las comunidades del Complejo Cenagoso. La pérdida de empleos en sectores como la pesca y la agricultura podría llevar a una mayor migración, especialmente hacia centros urbanos. Además, la falta de acceso a empleos verdes y sostenibles en la región limitará las oportunidades de adaptación económica.

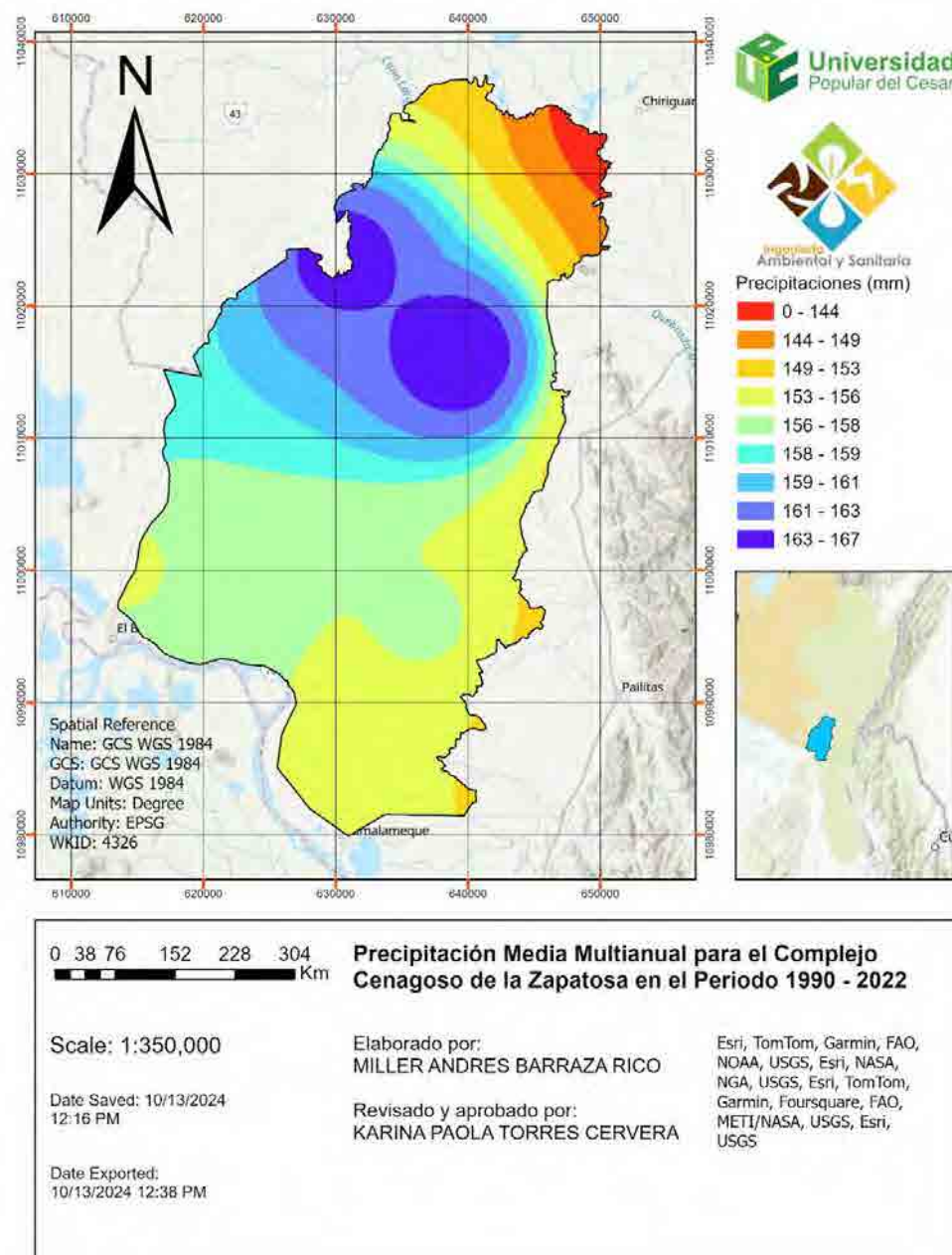
Adema el BID en su informe también señala que el aumento de temperaturas y los eventos climáticos extremos incrementan el estrés térmico, lo que afecta tanto la productividad como las horas de trabajo, especialmente en sectores vulnerables como la agricultura y la pesca. En el caso del Complejo Cenagoso, este aumento de temperatura podría no solo reducir la productividad en estos sectores, sino también poner en peligro la salud y los medios de vida de los trabajadores que dependen de estos ecosistemas. Además, la pérdida de biodiversidad vinculada a la degradación del ecosistema también impactaría negativamente el empleo y la estabilidad económica local.

- *Impacto General:* Los cambios climáticos proyectados para el Complejo Cenagoso de la Zapatosa, con una disminución en la precipitación y un aumento en la temperatura, implican serias amenazas para la estabilidad hídrica, la biodiversidad y las comunidades humanas que dependen de estos recursos. El escenario más probable apunta a una combinación de menor disponibilidad de agua y mayor evaporación, lo que podría provocar pérdidas significativas en sectores productivos como la pesca, ganadería y la agricultura, Según (Caira & López, 2021) el cambio climático afecta los rendimientos agrícolas, especialmente en cultivos sensibles a las variaciones de temperatura y precipitación. En el Complejo Cenagoso, la disminución de las precipitaciones y el aumento de la temperatura traerán consigo un impacto que afectaría tanto a los cultivos como al suelo, que podría no retener suficiente humedad para un cultivo efectivo. Esto

resultaría en una disminución de la productividad agrícola, afectando la seguridad alimentaria y los ingresos de las familias que dependen de la agricultura

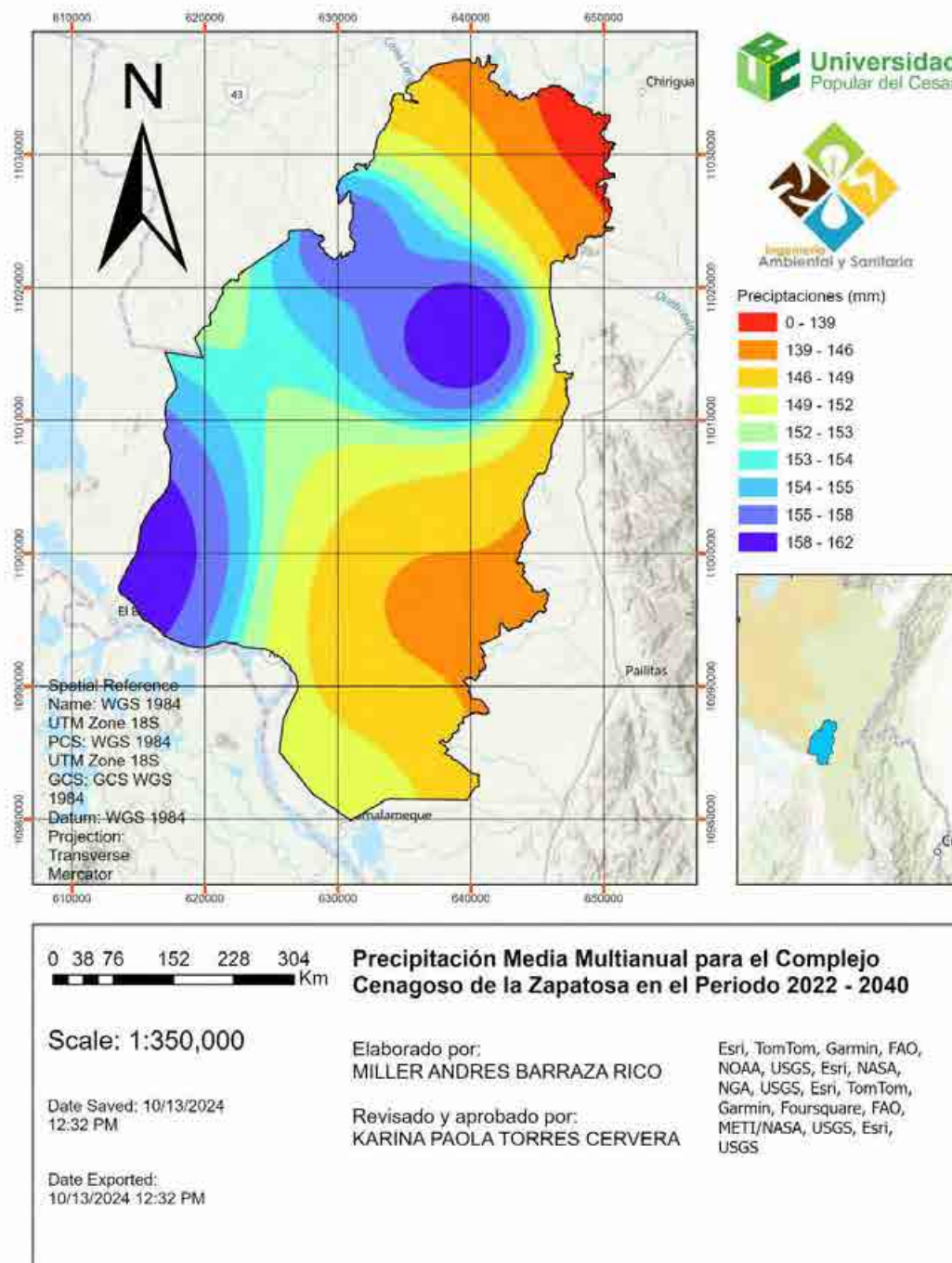
### 6.2.9.3. Escenarios de Variación Climática para el Periodo 2022 – 2040 en el Complejo Cenagoso de la Zapatosa.

Figura 91. Escenarios de Precipitaciones para el periodo 1990-2022



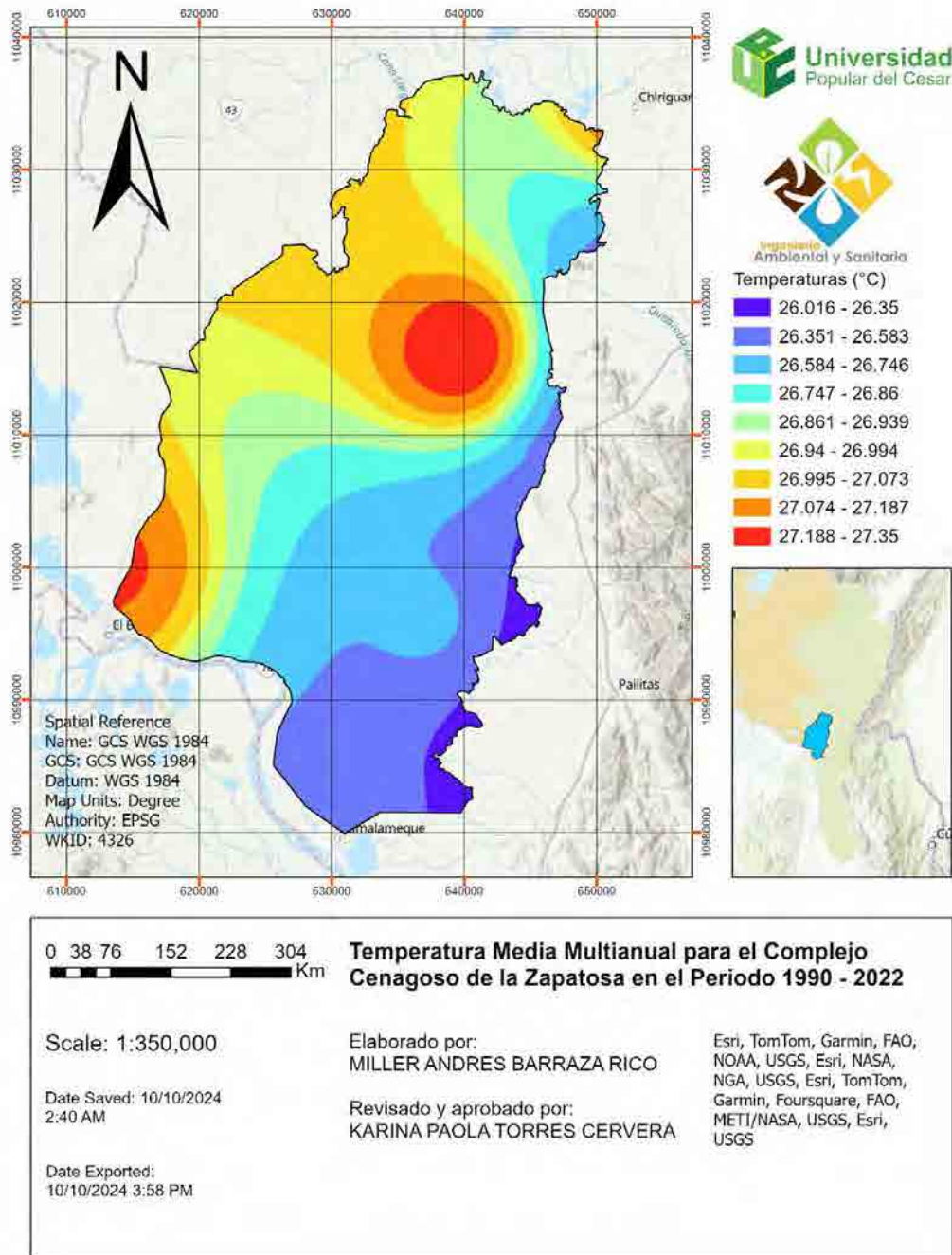
Nota: Elaborado por el Autor mediante el Software SIG ArcGIS Pro de Esri (2024)

Figura 92. Escenarios de Precipitaciones para el Periodo 2022-2040



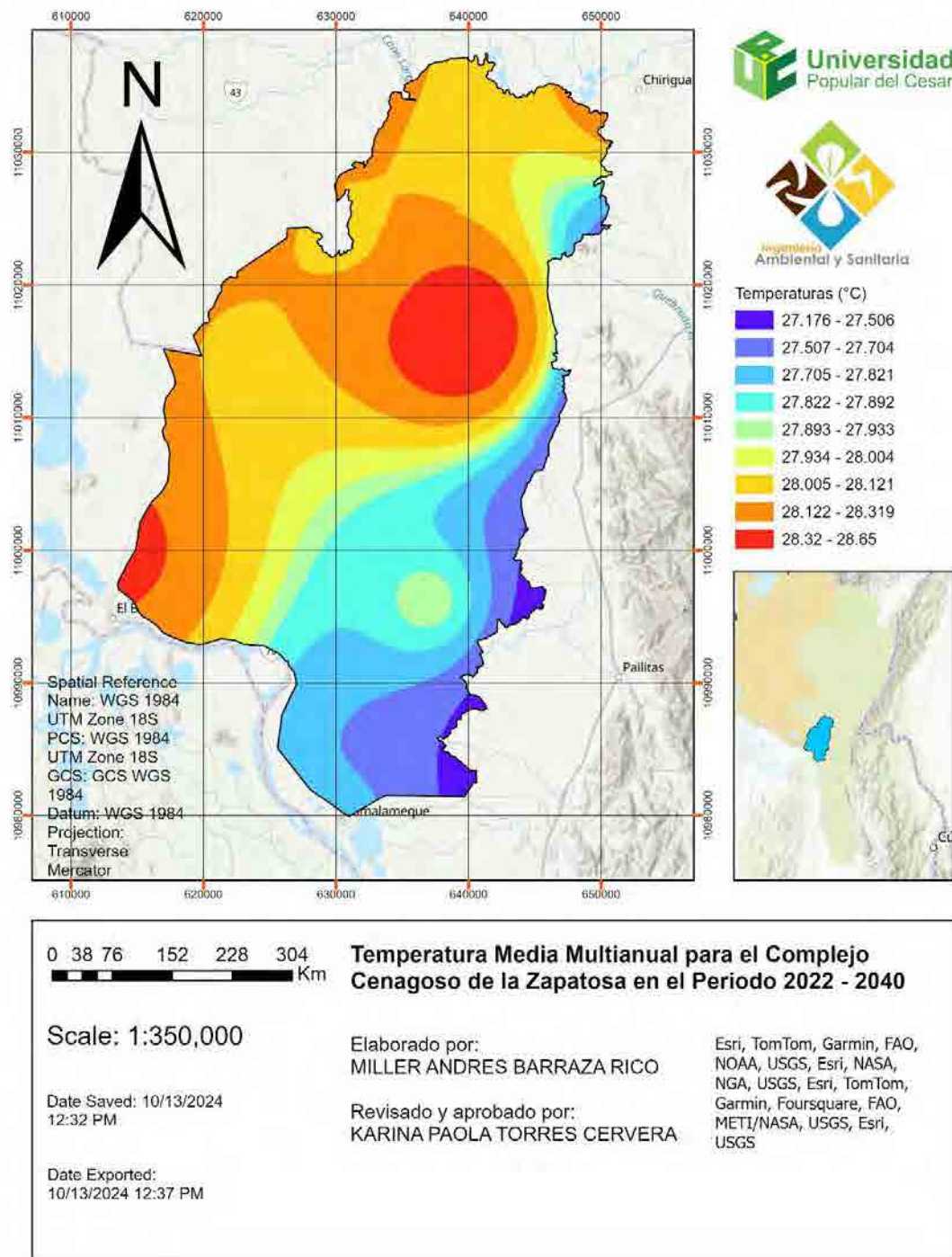
Nota: Elaborado por el Autor mediante el Software SIG ArcGIS Pro de Esri (2024)

Figura 93. Escenarios de Temperaturas para el Periodo 1990-2022



Nota: Elaborado por el Autor mediante el Software SIG ArcGIS Pro de Esri (2024)

Figura 94. Escenarios de Temperaturas en el Periodo 2022-2040



Nota: Elaborado por el Autor mediante el Software SIG ArcGIS Pro de Esri (2024)

Los mapas resultantes de Precipitaciones y Temperaturas en el Complejo Cenagoso de la Zapatosa para el periodo de 2022-2040 revelan cambios notorios en la distribución espacial en la media Anual tanto para Precipitación Temperatura con respecto al periodo 1990-2022 en el Complejo Cenagoso.

- *Precipitación:* En los mapas de precipitación se evidencia una reducción progresiva en los valores máximos de precipitación entre ambos periodos. En el periodo 1990-2022, las áreas con mayores precipitaciones, que alcanzan hasta 167 mm/año, se concentran en la región suroccidental del complejo, con una extensión considerable hacia el centro. Sin embargo, en el escenario proyectado para 2022-2040, estas áreas muestran una disminución significativa, con valores máximos que apenas superan los 162 mm/año, afectando especialmente a los municipios de Chiriguaná, Curumaní y Tamalameque. Este cambio puede atribuirse al impacto del cambio climático global, que modifica los patrones de circulación atmosférica, reduciendo la frecuencia e intensidad de lluvias en la región, combinado con factores locales como la deforestación y la degradación del suelo, que afectan la capacidad de retención hídrica y la formación de precipitaciones.
- *Temperatura:* En los mapas de temperaturas se muestra un claro incremento en la temperatura media anual para el periodo proyectado de 2022-2040. En el escenario de 1990-2022, los valores máximos de temperatura se sitúan entre 27.18-27.35 °C, concentrados en el centro del complejo cenagoso. Sin embargo, para 2022-2040, estos valores aumentan notablemente hasta un rango de 28.32-28.65 °C, lo que representa un incremento significativo en la temperatura media que abarca una mayor extensión de zonas cálidas en el Complejo Cenagoso de la Zapatosa. Este cambio en municipios como Chimichagua (Cesar), El Banco (Magdalena) y Chiriguaná (Cesar) podría deberse al aumento global de las emisiones de gases de efecto invernadero, lo que intensifica el calentamiento regional. Adicionalmente, factores locales como la deforestación, el uso intensivo del suelo y la reducción de cobertura vegetal en áreas circundantes amplifican el efecto de calentamiento, contribuyendo a un ambiente más cálido para el periodo proyectado.
- *Implicaciones Espaciales:* Los cambios que se observan en los mapas de precipitaciones y temperaturas en el periodo proyectado con respecto al periodo 1990-2022, sugieren

una transición hacia un escenario climático más seco y cálido en el Complejo Cenagoso de la Zapatosa. Las áreas que solían recibir mayores niveles de precipitación están disminuyendo, lo que puede estar vinculado al aumento de las temperaturas y la consecuente mayor evaporación. Para corroborar esta información, sería esencial analizar variables físicas ambientales como la velocidad del viento, la radiación solar y los cambios en el uso del suelo, ya que estas pueden influir en la redistribución de la humedad y el calor.

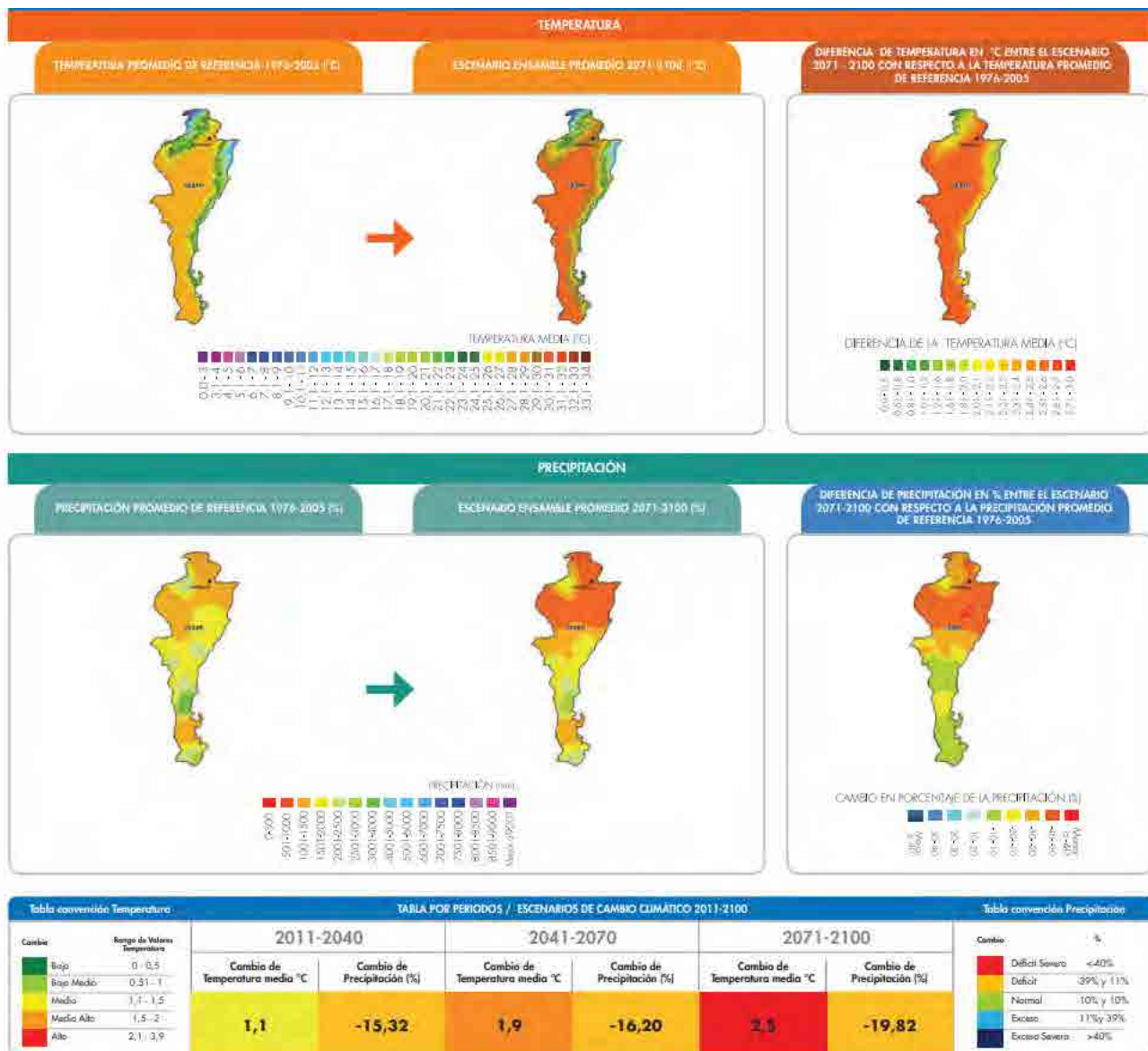
#### ***6.2.9.3.1. Comparación con los resultados de Nuevos Escenarios de Cambio Climático para Colombia 2011-2100 del IDEAM***

El análisis de la comparación entre los resultados de la evaluación climática del Complejo Cenagoso de la Zapatosa y los proporcionados por el IDEAM para los departamentos de Cesar y Magdalena reveló varios puntos clave de la dinámica del clima para la zona de estudio. Los resultados obtenidos en la variable de temperatura, ambos estudios evidenciaron un incremento proyectado hasta el año 2040. Mientras que el estudio sobre el Complejo Cenagoso de la Zapatosa identificó un aumento de  $0.96^{\circ}\text{C}$ , el IDEAM proyectó incrementos de  $1.1^{\circ}\text{C}$  para el Cesar y  $1.0^{\circ}\text{C}$  para el Magdalena. Esta similitud se atribuye a la influencia de patrones de calentamiento a nivel regional, que afecta de manera consistente las áreas cercanas. Debido a la ubicación del Complejo Cenagoso de la Zapatosa entre ambos departamentos, se consideró razonable que las tendencias de temperatura fueran similares. Aunque el área del complejo cenagoso ( $1217.25\text{ km}^2$ ) era relativamente pequeña, las variaciones de temperatura respondieron a las tendencias más amplias observadas en las proyecciones de los departamentos que lo rodean en relación con el estudio del IDEAM.

Respecto a la variable de precipitación, se obtuvo una variación considerable entre los en ambos estudios. En el Complejo Cenagoso de la Zapatosa se muestra una reducción del 1.40%, en cambio, el IDEAM proyectó unas disminuciones más marcadas: -15.32% para el Departamento Cesar y -18.65% para el Departamento del Magdalena. Esta discrepancia fue atribuye a la característica específica de la zona de estudio. El Complejo Cenagoso de la Zapatosa, al ser una zona de humedales, suele tener un comportamiento hidrológico y climático particular, que no necesariamente representa las condiciones de los departamentos en su conjunto. Los humedales, como el Complejo Cenagoso de la Zapatosa, tienden a presentar una dinámica específica de retención y reciclaje de agua, lo que puede aliviar las fluctuaciones en

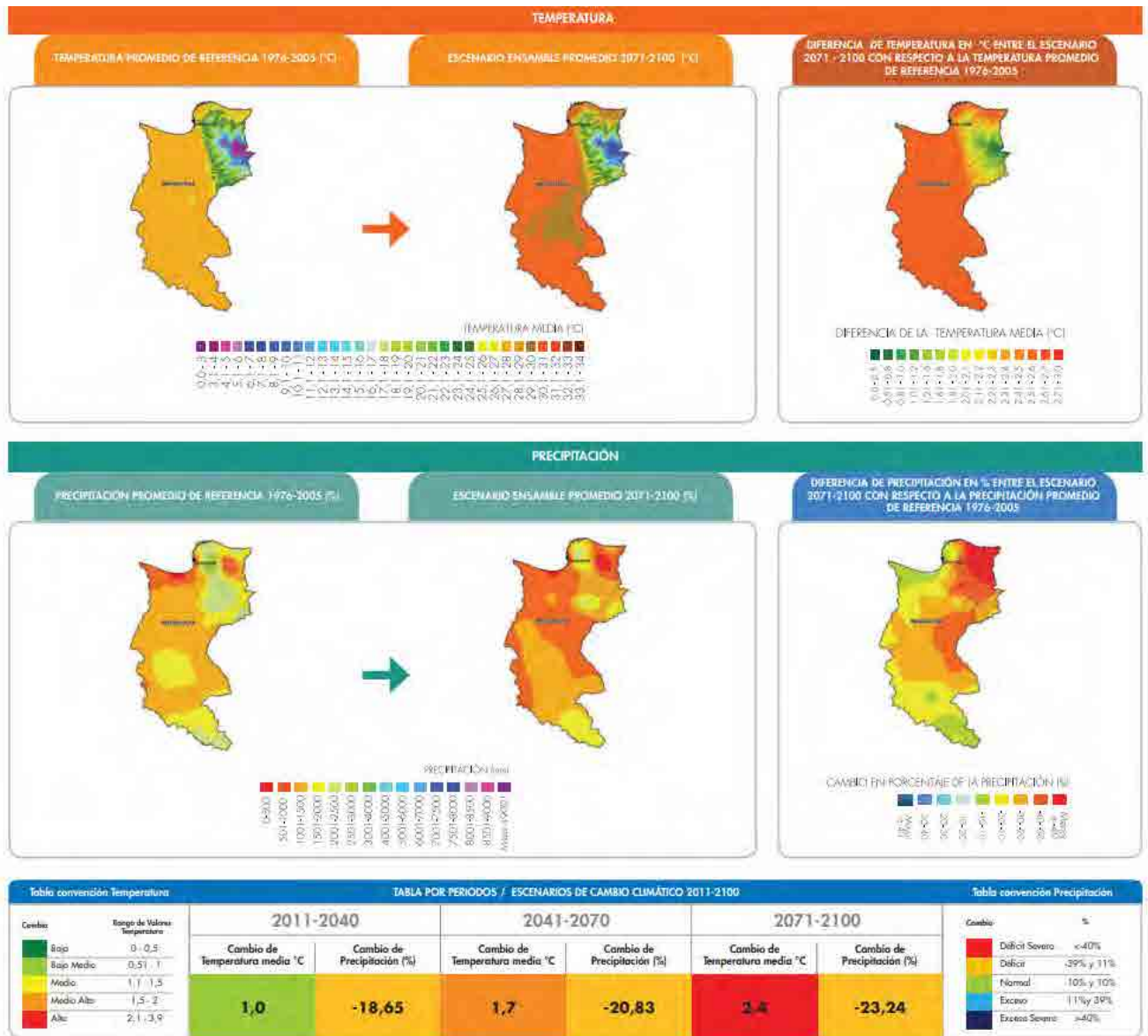
la precipitación. Esto significa que, a pesar de que las zonas más extensas de los departamentos sufrirían una disminución significativa en las lluvias, el efecto en una región de humedales como la del complejo cenagoso fuera menos severo.

Figura 95. Escenarios del IDEAM para Precipitación y Temperatura para el Departamento del Cesar para los años 240, 2070 y 2100.



Nota: Tomado por el Autor de Nuevos Escenarios Climático para Colombia 2011-2100 del IDEAM, (2024).

Figura 96. Escenarios del IDEAM para Precipitación y Temperatura para el Departamento del Magdalena para los años 240, 2070 y 2100.



Nota: Tomado por el Autor de Nuevos Escenarios Climático para Colombia 2011-2100 del IDEAM, (2024).

### **6.3. ESTABLECIMIENTO DEL MARCO DE EVALUACIÓN DE LOS RESULTADOS BASADO EN LA TERCERA COMUNICACIÓN NACIONAL DEL CAMBIO CLIMÁTICO (TCNCC) Y LOS INDICADORES DEL NDC COLOMBIA, ESPECÍFICAMENTE PARA EL COMPLEJO CENAGOSO DE LA ZAPATOSA.**

El cambio en las precipitaciones y la temperatura puede afectar directamente a los municipios que forman parte del Complejo Cenagoso de la Zapatosa. Según la TCNCC, los escenarios futuros sugieren modificaciones en la distribución espacial de la precipitación y la temperatura que pueden generar:

- *Variabilidad en las áreas de precipitación:* Las fluctuaciones en las áreas de mayor y menor precipitación pueden tener impactos en la productividad agrícola, afectando la disponibilidad de agua para el riego y la calidad de los cultivos.
- *Cambios en la temperatura media anual:* Un aumento en la temperatura podría elevar el estrés térmico en los cultivos, afectando su rendimiento y la disponibilidad de alimentos.

#### ***6.3.1. Análisis para los Indicadores Biofísico del TCNCC para el Complejo Cenagoso de la Zapatosa***

Consultando los documentos técnicos de la Tercera Comunicación Nacional del Cambio Climático (TCNCC) y en el contexto del Complejo Cenagoso de la Zapatosa, se pueden realizar los análisis con los datos reportados de amenaza, sensibilidad y capacidad adaptativa. Estos análisis permitirán evaluar los impactos del cambio climático en los componentes críticos de la región, como la seguridad alimentaria, los recursos hídricos y la biodiversidad y servicios ecosistémicos, proporcionando un marco claro para la toma de decisiones adaptativas y de mitigación en los municipios que forman parte del complejo.

##### **6.3.1.1. Seguridad Alimentaria**

Los cambios en la variable de Precipitación Total Media Anual proyectados para el Complejo Cenagoso de la Zapatosa pueden tener implicaciones significativas en la seguridad alimentaria de la región. A continuación, se presenta una comparación de los resultados de los mapas de precipitación y temperatura para los años 2022-2040, y su posible impacto en la seguridad alimentaria.

### 6.3.1.1.1. Indicadores de Amenaza.

Figura 97. Indicadores de Amenaza TCNCC

Ítems	Indicadores_Amenaza	Nombre del Indicador
SA	A.SA.01	Cambio en la superficie de las zonas óptimas agroclimáticas en el cultivo de Yuca
SA	A.SA.02	Cambio en la superficie de las zonas óptimas agroclimáticas en el cultivo de Arroz
SA	A.SA.03	Cambio en la superficie de las zonas óptimas agroclimáticas en el cultivo de Plátano
SA	A.SA.04	Cambio en la superficie de las zonas óptimas agroclimáticas en el cultivo de Caña Panelera
SA	A.SA.05	Cambio en la superficie de las zonas óptimas agroclimáticas en el cultivo de Papa
SA	A.SA.06	Cambio en la superficie de las zonas óptimas agroclimáticas en el cultivo de Maíz
SA	A.SA.07	Cambio en la superficie de las zonas óptimas agroclimáticas en el cultivo de Frijol
SA	A.SA.08	Cambio en la superficie de las zonas óptimas agroclimáticas en el cultivo de Café
SA	A.SA.09	Cambio proyectado en oferta/demanda de agua para uso pecuario
SA	A.SA.10	Cambio proyectado en oferta/demanda de agua para uso agrícola
SA	A.SA.01.CT	% de áreas agropecuarias municipales susceptibles de inundaciones por ANM.
SA	A.SA.02.CT	Áreas agropecuarias municipales susceptibles de inundaciones por CLC.

Nota: Tomado por el Autor del TCNCC y NDC (2024)

En las áreas de precipitación se observa una variabilidad notable en las áreas de precipitación a lo largo del periodo analizado. Aunque los rangos de precipitación en el Complejo permanecen relativamente consistentes, ciertas áreas muestran una tendencia a recibir menos precipitación en determinados años. Por ejemplo, algunas zonas experimentan una disminución significativa en la cantidad de precipitación hacia el 2040, lo que podría llevar a un mayor riesgo de sequía en esa región. Este cambio afectaría la disponibilidad de agua para cultivos, lo que a su vez impactaría la producción agrícola y la estabilidad alimentaria.

Los cambios en la temperatura media anual también presentan importantes desafíos en el aumento del estrés térmico en algunas regiones del complejo, como el centro-norte, los valores más altos de temperatura continúan aumentando en 2040, alcanzando hasta 28.65°C. Este aumento del estrés térmico puede afectar negativamente los cultivos que podrían sensibilidad al calor, reduciendo su rendimiento y aumentando la necesidad de riego. Los agricultores de estas zonas tendrán que adaptarse mediante la selección de cultivos resistentes al calor y la adopción de prácticas agrícolas sostenibles, como el uso de coberturas vegetales o la implementación de cultivos más adaptados a condiciones áridas.

### 6.3.1.1.2. Indicadores de Sensibilidad.

Figura 98. Índice de amenaza TCNCC

Indicadores_Sensibilidad	Nombre del Indicador
S.SA.01	Porcentaje del PIB de otros cultivos a precios constantes (Miles de millones de pesos) respecto al PIB total departamental
S.SA.02	Porcentaje del PIB cultivo del café a precios constantes (Miles de millones de pesos) respecto al PIB total departamental
S.SA.03	Porcentaje de área asegurada respecto al total de área sembrada
S.SA.04	Porcentaje del PIB de la producción pecuaria a precios constantes (Miles de millones de pesos) respecto al total del PIB departamental
S.SA.05	Severidad pobreza monetaria extrema
S.SA.01.CT	PIB agrícola y pecuario de los municipios costeros (Miles de millones de pesos) respecto al PIB de la misma rama departamental.

Nota: Tomado por el Autor del TCNCC y NDC (2024)

El porcentaje de aporte de los ingresos de los cultivos al PIB de los municipios que forman parte del Complejo Cenagoso de la Zapatosa podría verse afectado por los cambios en las condiciones climáticas. Las variaciones en la precipitación y la temperatura proyectadas para el periodo 2022-2040 pueden influir directamente en la producción y la rentabilidad de cultivos como la yuca, el plátano, el café y el arroz, que son esenciales en la región. Estos cambios en

la productividad agrícola afectarían la contribución de estos cultivos al PIB, impactando así la economía local de los municipios de Chimichagua, Chiriguaná, Curumaní, Tamalameque, y El Banco.

En cuanto a los aportes al PIB de la producción pecuaria a precios constantes respecto al total del PIB departamental, este indicador también se verá afectado por los cambios climáticos en la región. Las variaciones en la disponibilidad de agua y la calidad de los pastos como resultado de la disminución de la precipitación y el aumento de la temperatura influirán directamente en la producción pecuaria. Esto afectará la contribución económica de la producción ganadera al PIB departamental en municipios como Tamalameque Cesar y El Banco Magdalena, que dependen en gran medida de este sector.

El PIB agrícola y pecuario de los municipios costeros, y su relación con el PIB departamental también se verá afectado por los eventos climáticos extremos asociados a la precipitación y la temperatura. Estos municipios están expuestos a riesgos como inundaciones y tormentas, que podrían dañar significativamente la producción agrícola y pecuaria. Las pérdidas en estos sectores pueden disminuir su contribución económica a nivel departamental.

#### **6.3.1.1.3. Indicadores de Capacidad Adaptativa.**

Figura 99. Índice de capacidad Adaptativa TCNCC

Indicadores_Capacidad_Adaptativa	Nombre del Indicador
CA.SA.01	Grado de asistencia técnica prestada por UPA (AGR)
CA.SA.02	Acceso a maquinaria agrícola por UPA (AGR)
CA.SA.03	Acceso a maquinaria pecuaria por UPA (GAN)
CA.SA.04	Créditos otorgados por departamento / superficie agrícola total
CA.SA.05	Porcentaje de la superficie agrícola con irrigación
CA.SA.06	Inversión en política de seguridad alimentaria y nutricional

Nota: Tomado por el Autor del TCNCC y NDC (2024)

La capacidad adaptativa en el Complejo Cenagoso de la Zapatosa debe relacionarse con la capacidad de sus municipios para adaptarse a los cambios en las condiciones climáticas proyectadas para el futuro. Aumentar la asistencia técnica, mejorar el acceso a maquinaria agrícola y pecuaria, y garantizar el financiamiento y la inversión en políticas alimentarias son elementos clave para enfrentar los desafíos climáticos y asegurar la sostenibilidad y la seguridad alimentaria en la región.

- *Asistencia técnica agrícola:* Los agricultores necesitarán capacitación y apoyo técnico para adoptar prácticas resilientes, como la agricultura de conservación y la optimización del riego, para mitigar los impactos del cambio climático.
- *Acceso a maquinaria agrícola:* Será crucial disponer de maquinaria especializada, como sistemas de riego eficientes y equipos para labranza mínima, para enfrentar las condiciones climáticas cambiantes.
- *Acceso a maquinaria pecuaria:* En el sector ganadero, el acceso a equipos como sistemas de ventilación para manejo eficiente del ganado será vital para garantizar la sostenibilidad ante los desafíos climáticos.
- *Créditos para el sector agrícola:* El financiamiento adecuado permitirá a agricultores y ganaderos adquirir maquinaria y adoptar prácticas más sostenibles y resilientes.
- *Superficie agrícola con irrigación:* Ampliar el uso de sistemas de riego será esencial para gestionar eficientemente el agua y reducir la dependencia de la lluvia en épocas de sequía.
- *Inversión en seguridad alimentaria:* Las políticas de seguridad alimentaria deberán enfocarse en fortalecer la infraestructura y apoyar a las comunidades rurales para garantizar la sostenibilidad y la producción ante el cambio climático.

### 6.3.1.2. Recurso Hídrico

Los cambios climáticos en el Complejo Cenagoso de la Zapatosa presentan un desafío importante para la sostenibilidad hídrica de la región. Adaptarse a estos cambios requerirá de un enfoque integrado que combine políticas de gestión hídrica, tecnologías de riego eficiente,

y la protección de los ecosistemas acuáticos para asegurar la disponibilidad de agua a largo plazo.

#### 6.3.1.2.1. Indicadores de Amenaza.

Figura 100. Índice de Amenaza TCNCC

RH	A.RH.01	Índice de disponibilidad hídrica
----	---------	----------------------------------

Nota: Tomado por el Autor del TCNCC y NDC (2024)

Los cambios en la variable de precipitación total media anual proyectados para el Complejo Cenagoso de la Zapatosa que muestra una disminución promedio del 1.40% anual con una probabilidad del 42.45% pueden tener diversas implicaciones para los recursos hídricos en los municipios de la región, como Chimichagua, Chiriguaná, Curumaní, Tamalameque, y El Banco.

Los cambios en la temperatura media anual también tendrán efectos significativos en los recursos hídricos del Complejo Cenagoso de la Zapatosa. El aumento proyectado de 0.96°C para 2040 incrementará los procesos de evapotranspiración, lo que afectará tanto la disponibilidad de agua en el suelo como la demanda hídrica de los cultivos y la vegetación.

- *Evapotranspiración:* Con el aumento de la temperatura, la evapotranspiración incrementará, lo que significa que más agua se perderá por evaporación desde el suelo y por la transpiración de las plantas. Esto llevará a una mayor demanda de agua para la agricultura y otros usos, lo que, combinado con la disminución de la precipitación, podría generar estrés hídrico en la región.
- *Cambios en los Patrones de Lluvia:* El aumento de la temperatura podría alterar los patrones de lluvia, haciendo que los periodos de lluvias sean menos frecuentes, pero más intensos. Esto puede generar problemas de escorrentía y erosión del suelo, dificultando la recarga de los acuíferos y empeorando la situación de los cuerpos de agua superficiales.

- *Disminución de la Disponibilidad de Agua Superficial:* La combinación de mayor evaporación y menores precipitaciones podría resultar en una reducción significativa de la disponibilidad de agua superficial en ríos, lagos y embalses. Esto afectará el abastecimiento de agua tanto para el consumo humano como para los sistemas agrícolas y ganaderos, generando un escenario de competencia por los recursos hídricos.
- *Impactos en los Ecosistemas Acuáticos:* El aumento de la temperatura del agua afectará a los ecosistemas acuáticos en el Complejo Cenagoso de la Zapatosa. Es probable que se produzcan alteraciones en los patrones de migración y reproducción de las especies acuáticas, lo que afectará la biodiversidad de la región. Además, los cambios en la temperatura del agua y la reducción de los niveles de agua pueden afectar la calidad de los hábitats acuáticos, poniendo en riesgo a muchas especies endémicas y afectando la pesca, un recurso importante para la economía local.
- *Estrés Hídrico:* El aumento de la temperatura también incrementará el estrés hídrico en áreas propensas a la sequía. Los municipios dentro del Complejo Cenagoso, ya afectados por la disminución en la precipitación, enfrentarán una mayor competencia por el agua disponible. Esto puede generar impactos significativos en la producción agrícola y la seguridad alimentaria, afectando tanto a los ecosistemas como a las comunidades locales.

#### **6.3.1.2.2. Indicadores de Sensibilidad.**

los resultados proyectados de las variaciones en la precipitación (disminución promedio del 1.40% anual con una probabilidad del 41.83%) y el aumento de temperatura (0.96°C para 2040) en el Complejo Cenagoso de la Zapatosa, se pueden prever escenarios futuros para los indicadores de sensibilidad que afectan la seguridad alimentaria y los recursos hídricos de la región.

Figura 101. Índice de Sensibilidad TCNCC

S.RH.01	Índice de presión hídrica al ecosistema
S.RH.02	Índice de agua no retornada a la cuenca
S.RH.03	Índice de retención y regulación hídrica
S.RH.04	Índice de uso del agua superficial (Medio)
S.RH.05	Brecha de acueducto
S.RH.06	Índice de Aridez

Nota: Tomado por el Autor del TCNCC y NDC (2024)

*Índice de Presión Hídrica al Ecosistema:* Este indicador mide la presión ejercida sobre los recursos hídricos por el uso humano y las actividades económicas, en relación con la disponibilidad de agua. En el escenario proyectado de disminución de la precipitación y aumento de la temperatura, es probable que este índice se vea negativamente afectado en el Complejo Cenagoso. La disponibilidad de agua para consumo humano, agrícola y ganadero disminuirá, mientras que la demanda seguirá siendo alta, lo que incrementará la presión sobre los ecosistemas acuáticos. Esto puede resultar en una mayor extracción de agua subterránea y una reducción en la calidad de los cuerpos de agua.

*Índice de Agua No Retomada a la Cuenca:* Este indicador evalúa la cantidad de agua que no se retiene dentro de la cuenca hidrográfica debido a las variaciones climáticas y las prácticas de gestión del agua. Con el aumento de la temperatura y la disminución de la precipitación, es probable que haya una mayor evaporación y menos agua disponible para la recarga de los cuerpos de agua. Este índice se verá afectado, ya que una menor cantidad de agua regresará a la cuenca, reduciendo la capacidad de los ecosistemas para mantenerse y afectando tanto la biodiversidad acuática como la seguridad hídrica de las comunidades locales.

*Índice de Retención y Regulación Hídrica:* El índice de retención y regulación hídrica mide la capacidad de los ecosistemas y las infraestructuras naturales (como los humedales) para retener y regular el agua. En el Complejo Cenagoso de la Zapatosa, los humedales juegan un papel crucial en la regulación hídrica. Sin embargo, con la disminución de las precipitaciones y el aumento de la evaporación, se espera que la capacidad de estos ecosistemas para retener y regular el agua se vea comprometida. Esto afectará la disponibilidad de agua para diversos usos, incluyendo el abastecimiento de agua potable y la irrigación de cultivos, lo que impactará tanto la seguridad hídrica como la seguridad alimentaria.

*Índice de Uso del Agua Superficial (Medio):* El índice de uso del agua superficial mide la eficiencia en el uso de los cuerpos de agua superficiales, como ríos y lagos, para el consumo humano, la agricultura y otras actividades. En un escenario de mayor demanda de agua debido al aumento de la temperatura y la disminución de las precipitaciones, la eficiencia en el uso del agua se verá cada vez más comprometida. La necesidad de agua para riego aumentará, lo que obligará a mejorar las prácticas agrícolas y promover una gestión más eficiente de los recursos hídricos para evitar el estrés hídrico en la región.

*Brecha de Acueducto:* La brecha de acueducto mide la diferencia entre la demanda de agua potable y la disponibilidad de agua para el abastecimiento de la población. Con las proyecciones de reducción en la precipitación y el aumento de la temperatura, esta brecha se ampliará, ya que habrá menos agua disponible para abastecer a las comunidades de la región. El acceso al agua potable se verá comprometido, afectando la calidad de vida de los habitantes y poniendo en riesgo la seguridad hídrica del Complejo Cenagoso de la Zapatosa.

*Índice de Aridez:* El índice de aridez evalúa la relación entre la precipitación y la evaporación en una región. Con la disminución proyectada en las precipitaciones y el aumento de la temperatura, se espera que el nivel de aridez en la región del Complejo Cenagoso de la Zapatosa aumente significativamente. Esto tendrá implicaciones negativas para la disponibilidad de agua en los sistemas de producción agrícola y ganadera, incrementando el estrés hídrico y afectando tanto la seguridad alimentaria como la sostenibilidad de los ecosistemas.

### 6.3.1.2.3. Indicadores de Capacidad Adaptativa.

los indicadores de capacidad adaptativa en base a los resultados proyectados para el Complejo Cenagoso de la Zapatosa, como el Índice de Eficiencia en el Uso del Agua y las Inversiones Sectoriales de Entidades Territoriales, reflejan la importancia de adoptar medidas proactivas para mejorar la gestión de los recursos hídricos en un contexto de variabilidad climática en la optimización del uso del agua.

Figura 102. Índice de Capacidad Adaptativa TCNCC

CA.RH.01	Índice de eficiencia en el uso del agua
CA.RH.02	Inversiones sectoriales de entidades territoriales dentro y fuera del Plan departamental de Agua

Nota: Tomado por el Autor del TCNCC y NDC (2024)

#### Índice de Eficiencia en el Uso del Agua

El Índice de Eficiencia en el Uso del Agua evalúa la capacidad de los diferentes sectores (agricultura, consumo humano, industria) para gestionar adecuadamente los recursos hídricos. En el contexto del Complejo Cenagoso de la Zapatosa, las variaciones en la precipitación y el aumento de la temperatura proyectados para 2040 implican que la disponibilidad de agua será cada vez más limitada. Esto requerirá una mejora en la eficiencia del uso del agua en todas las actividades económicas.

- En el sector agrícola, el riego eficiente y la adopción de tecnologías avanzadas de conservación de agua serán cruciales para garantizar la productividad sin agotar los recursos hídricos. El uso eficiente del agua permitirá a los agricultores mantener su producción y enfrentar los períodos de sequía previstos.
- En el consumo humano, el uso racional del agua y la mejora de la infraestructura de distribución de agua potable serán necesarios para reducir las pérdidas por fugas y garantizar el acceso a agua segura.

- En el sector industrial, se requerirá la implementación de tecnologías más limpias que optimicen el consumo de agua, disminuyendo el impacto sobre los recursos hídricos..

Inversiones Sectoriales de Entidades Territoriales dentro y fuera del Plan Departamental de Agua

El indicador de Inversiones Sectoriales de Entidades Territoriales refleja la capacidad financiera y los recursos destinados a mejorar la gestión del agua en la región. En el Complejo Cenagoso de la Zapatosa, donde se prevé una disminución en la disponibilidad de agua debido a las variaciones climáticas, las inversiones en infraestructura hídrica y gestión eficiente del recurso serán fundamentales para garantizar la resiliencia de los sistemas hídricos.

- Inversiones en infraestructura hídrica: Estas incluyen la construcción o mejora de sistemas de riego, presas, embalses, y plantas de tratamiento de agua, que permitirán aumentar la capacidad de almacenamiento y suministro de agua durante los períodos de baja precipitación.
- Inversiones en prácticas de gestión del agua: La implementación de políticas de conservación, la promoción del uso sostenible de los recursos hídricos y el fortalecimiento de la gobernanza del agua en los municipios del complejo serán esenciales para adaptarse a los cambios en las condiciones climáticas.
- Medidas de adaptación al cambio climático: Estas inversiones deben enfocarse en mejorar la resiliencia de la infraestructura hídrica y promover tecnologías que optimicen el uso del agua.

### **6.3.1.3. Biodiversidad y Servicios Ecosistémicos.**

Los cambios proyectados en las variables de precipitación y temperatura podrán tener implicaciones críticas para la biodiversidad y los servicios ecosistémicos en el Complejo Cenagoso de la Zapatosa. Tanto la disminución en la cantidad de lluvia como el aumento de la temperatura afectarán la capacidad de los ecosistemas acuáticos y terrestres para sostener la biodiversidad y proporcionar los servicios esenciales que dependen de ellos. Para mitigar estos impactos, será fundamental implementar estrategias de conservación y restauración de ecosistemas, así como promover políticas que aseguren la gestión sostenible de los recursos naturales y mejoren la resiliencia de los ecosistemas frente a los desafíos del cambio climático.

### 6.3.1.3.1. Indicadores de Amenaza.

los cambios proyectados en los patrones de precipitación y temperatura representarán un aumento en las amenazas para la biodiversidad y los servicios ecosistémicos. La pérdida de vegetación natural, la reducción en la cobertura de manglares, y la disminución de áreas idóneas para especies amenazadas son indicadores clave que muestran cómo el cambio climático afectará negativamente los hábitats naturales y los servicios que estos ecosistemas prestan a las comunidades locales.

Figura 103. Índice de Amenaza TCNCC

A.BD.01	Pérdida de área idónea para especies amenazadas y de uso
A.BD.02	Cambio proyectado en % de área con vegetación natural
A.BD.03	Cambio proyectado en la superficie con aptitud forestal
A.BD.01.CT	Cambio proyectado en la cobertura del ecosistema de Manglar por CLC
A.BD.02.CT	Cambio proyectado en la cobertura del ecosistema de Manglar por ANM
A.BD.03.CT	Pérdida de area idonea para especies de manglar

Nota: Tomado por el Autor del TCNCC y NDC (2024)

*Cambio Proyectado en el Porcentaje de Área con Vegetación Natural:* El cambio proyectado en el porcentaje de área con vegetación natural es un indicador clave para medir la amenaza a la biodiversidad y a los servicios ecosistémicos. La vegetación natural en el Complejo Cenagoso de la Zapatosa proporciona una variedad de hábitats esenciales para muchas especies y desempeña un papel fundamental en la regulación climática, la purificación del agua, y la prevención de la erosión.

*Escenario Futuro:* Si los cambios proyectados en las precipitaciones y temperaturas resultan en una disminución en la cobertura de vegetación natural, esto representaría una amenaza significativa para la biodiversidad. La pérdida de hábitat y la fragmentación del paisaje pueden tener impactos negativos en las especies dependientes de estos ecosistemas. Además, la pérdida de vegetación natural afectaría los servicios ecosistémicos como el almacenamiento de carbono, la retención de suelo y la protección contra inundaciones. Este cambio podría también aumentar la vulnerabilidad de los ecosistemas frente a las inundaciones y la erosión, agravando los problemas de seguridad hídrica en la región.

*Cambio Proyectado en la Superficie con Aptitud Forestal:* El cambio proyectado en la superficie con aptitud forestal es un indicador que evalúa la capacidad de la región para mantener y promover bosques saludables y funcionales. En el Complejo Cenagoso de la Zapatosa, los ecosistemas forestales proporcionan importantes servicios ecosistémicos y hábitats para la fauna.

*Escenario Futuro:* Los cambios en las precipitaciones y el aumento de la temperatura podrían influir negativamente en la idoneidad y la productividad de los bosques. Un cambio negativo en este indicador podría significar una reducción en la aptitud forestal, lo que llevaría a la pérdida de especies y la degradación del ecosistema. Además, la disminución de la superficie con aptitud forestal afectaría la capacidad de los bosques para ofrecer servicios como la regulación del clima, la captura de carbono, y la protección contra la erosión. Esto incrementaría la amenaza a la biodiversidad y reduciría la resiliencia del ecosistema frente a los cambios climáticos.

**Pérdida de Área Idónea para Especies Amenazadas y de Uso:** La pérdida de área idónea para especies amenazadas es un indicador importante de la amenaza a la biodiversidad. Muchas especies del Complejo Cenagoso dependen de áreas específicas con condiciones climáticas adecuadas para su supervivencia y reproducción.

*Escenario Futuro:* Con la disminución de las precipitaciones y el aumento de la temperatura, se produciría una reducción en las áreas idóneas para especies amenazadas. Esto podría aumentar el riesgo de extinción local para algunas especies y alterar los patrones de distribución de la biodiversidad. La pérdida de estas áreas afectaría tanto la biodiversidad como

los servicios ecosistémicos asociados, como el turismo ecológico, la polinización, y el control de plagas.

*Cambio Proyectado en la Cobertura del Ecosistema de Manglar:* Los manglares en el Complejo Cenagoso de la Zapatosa son ecosistemas críticos para la protección costera, la biodiversidad, y la regulación climática. Existen dos indicadores clave en cuanto a la cobertura de manglares: el cambio proyectado en la cobertura del ecosistema de manglar por CLC (Cambio de Uso del Suelo por Condiciones Locales de Clima) y el cambio proyectado en la cobertura de manglar por ANM (Anomalías en la Naturaleza de la Marea).

*Escenario Futuro (CLC):* Si las condiciones climáticas locales siguen empeorando debido a las altas temperaturas y la disminución de las precipitaciones, los manglares podrían sufrir una reducción significativa en su cobertura, lo que afectaría la biodiversidad costera y los servicios ecosistémicos relacionados con la protección contra tormentas y la fijación de carbono. Los manglares desempeñan un papel clave en la regulación hídrica y son esenciales para proteger la región contra la erosión.

*Escenario Futuro:* Las anomalías en los patrones en los patrones climáticos podrían alterar aún más la cobertura de manglares. La pérdida de estos ecosistemas aumentaría la vulnerabilidad de las áreas costeras a los desastres naturales y afectaría los hábitats de muchas especies acuáticas que dependen de los manglares para su reproducción y alimentación.

*Pérdida de Área Idónea para Especies de Manglar:* El manglar es un ecosistema clave en el Complejo Cenagoso de la Zapatosa, y la pérdida de áreas idóneas para especies de manglar es un indicador crítico de la amenaza que enfrenta este ecosistema.

*Escenario Futuro:* Si los cambios en la temperatura y precipitación afectan negativamente las áreas idóneas para los manglares, se produciría una disminución en la biodiversidad de especies de manglar, muchas de las cuales están estrechamente vinculadas a la regulación de carbono y a la pesca local. Esta pérdida no solo afectará a las especies que habitan en los manglares, sino también a los servicios ecosistémicos que proporcionan, como la protección contra tormentas, la filtración de sedimentos, y el suministro de recursos pesqueros para las comunidades locales.

### 6.3.1.3.2. Indicadores de Sensibilidad.

Los indicadores de sensibilidad para el Complejo Cenagoso de la Zapatosa muestran un panorama complejo en cuanto a la seguridad de la biodiversidad y los servicios ecosistémicos. La disminución de las áreas de bosques y de otros ecosistemas naturales no solo afectará la biodiversidad, sino que también impactará negativamente en la provisión de servicios ecosistémicos que son esenciales para la estabilidad ecológica y económica de la región. Asimismo, la disminución de la productividad forestal afectará a las actividades económicas dependientes de los recursos naturales, reduciendo la capacidad de las comunidades para gestionar estos recursos de manera sostenible.

Figura 104. Indicadores de Sensibilidad TCNCC

S.BD.01	% del área del Municipio correspondiente a Bosque
S.BD.02	% de área por Municipio correspondiente a ecosistema natural
S.BD.03	Porcentaje del PIB de la silvicultura, extracción de madera y actividades conexas a precios constantes (Miles de millones de pesos) respecto al PIB departamental
S.BD.01.CT	Estado de salud y prioridad de restauración de Ecosistema Manglar

Nota: Tomado por el Autor del TCNCC y NDC (2024)

*Porcentaje del Área del Municipio Correspondiente a Bosque:* El porcentaje de área de bosque es un indicador que refleja la extensión de los ecosistemas forestales dentro de cada municipio del Complejo Cenagoso de la Zapatosa. Los bosques desempeñan un papel crucial en la regulación climática, la conservación de la biodiversidad, y la protección contra la erosión.

*Escenario Futuro:* Los cambios proyectados en las precipitaciones y la temperatura pueden afectar negativamente la salud de las zonas boscosas. La disminución de la

precipitación puede reducir la tasa de regeneración de los bosques, mientras que el aumento de la temperatura podría aumentar el estrés térmico en las especies de árboles. Como resultado, este indicador podría mostrar una reducción en el porcentaje de área de bosque en los municipios, lo que impactaría no solo la biodiversidad, sino también la capacidad de captura de carbono y la protección contra la erosión que estos ecosistemas ofrecen.

*Porcentaje de Área por Municipio Correspondiente a Ecosistema Natural:* El porcentaje de área de ecosistema natural mide la extensión de áreas que no han sido alteradas significativamente por actividades humanas y que conservan su composición ecológica original. Estos ecosistemas naturales incluyen humedales, bosques y manglares, que son cruciales para mantener la biodiversidad y los servicios ecosistémicos en el Complejo Cenagoso.

Escenario Futuro: La reducción de la precipitación y el aumento de la temperatura pueden comprometer la viabilidad de estos ecosistemas. Los humedales podrían sufrir desecación debido a la menor disponibilidad de agua, mientras que los bosques y manglares enfrentarían un mayor riesgo de degradación. Como resultado, este indicador podría mostrar una reducción en el porcentaje de área de ecosistemas naturales, afectando la capacidad de los ecosistemas para proporcionar servicios clave como la regulación climática, la purificación del agua, y la protección de la biodiversidad.

Porcentaje del PIB de la Silvicultura, Extracción de Madera y Actividades Conexas: Este indicador mide la contribución económica de las actividades relacionadas con la silvicultura, la extracción de madera, y otras actividades conexas al PIB departamental.

Estado de Salud y Prioridad de Restauración del Ecosistema Manglar: Este indicador evalúa el estado de salud de los manglares y la prioridad de restauración en función de su degradación y funcionalidad ecológica. Los manglares del Complejo Cenagoso de la Zapatosa son ecosistemas clave para la protección costera, la captura de carbono, y el hábitat de especies acuáticas.

Escenario Futuro: Los cambios en los patrones de precipitación y temperatura pueden agravar la situación de los manglares, afectando su salud y aumentando la necesidad de restauración. La reducción en la recarga de agua debido a la disminución de las precipitaciones

y el aumento de la evaporación podrían generar un desequilibrio hídrico que afectaría la capacidad de los manglares para cumplir con sus funciones ecológicas. Si no se implementan medidas adecuadas de restauración, este indicador podría reflejar un deterioro significativo en la salud de los manglares y la urgencia de implementar programas de restauración para proteger estos valiosos ecosistemas.

#### 6.3.1.3.3. Indicadores de Capacidad Adaptativa.

Los indicadores de capacidad adaptativa relacionados con la seguridad de la biodiversidad y los servicios ecosistémicos en el Complejo Cenagoso de la Zapatosa resaltan la importancia de expandir y fortalecer las áreas protegidas y los manglares bajo zonificación ambiental adecuada.

Figura 105. Índice de capacidad Adaptativa

CA.BD.01	Porcentaje de área del municipio con áreas protegidas registradas en RUNAP
CA.BD.01.CT	Porcentaje de áreas de manglar con zonificación aprobada para su manejo y ordenamiento ambiental

Nota: Tomado por el Autor del TCNCC y NDC (2024)

*Porcentaje de Área del Municipio con Áreas Protegidas Registradas en RUNAP:* El porcentaje de área del municipio que está registrada como área protegida en el Registro Único Nacional de Áreas Protegidas (RUNAP) es un indicador clave de la capacidad adaptativa de la región para conservar su biodiversidad y los servicios ecosistémicos asociados. Las áreas protegidas desempeñan un papel crucial en la preservación de hábitats valiosos y la protección de especies amenazadas, además de proporcionar una estructura legal para la gestión sostenible de los recursos naturales.

*Escenario Futuro:* A medida que los cambios en la precipitación y la temperatura afecten la biodiversidad en el Complejo Cenagoso, un mayor porcentaje de áreas protegidas registradas en el RUNAP indicará una mayor capacidad adaptativa para mitigar estos efectos. Estas áreas proporcionan un marco para implementar medidas de protección, restauración y

monitoreo continuo, esenciales para enfrentar los desafíos que plantea el cambio climático. Además, el fortalecimiento de las áreas protegidas permitirá la conservación de corredores ecológicos, conectando diferentes hábitats y facilitando el movimiento de especies que pueden verse afectadas por los cambios en el clima.

*Porcentaje de Áreas de Manglar con Zonificación Aprobada para su Manejo y Ordenamiento Ambiental:* El porcentaje de áreas de manglar que cuentan con zonificación aprobada para su manejo y ordenamiento ambiental es otro indicador importante de la capacidad adaptativa de la región para proteger los ecosistemas costeros clave. Los manglares en el Complejo Cenagoso de la Zapatosa son esenciales para la protección costera, la captura de carbono, y la regulación hídrica, desempeñando un papel vital en la mitigación de los impactos del cambio climático.

*Escenario Futuro:* En un entorno donde la precipitación y la temperatura están cambiando, la zonificación ambiental adecuada de los manglares permitirá su gestión efectiva. El ordenamiento ambiental asegurará que estas áreas se mantengan funcionales y puedan seguir proporcionando sus servicios ecosistémicos esenciales. La restauración y manejo sostenible de los manglares mediante la zonificación permitirá mitigar los impactos de las mareas altas, tormentas costeras, y la erosión, que podrían incrementarse debido a los cambios proyectados en las condiciones climáticas.

### **6.3.2. Análisis Política Nacional para Humedales Interiores de Colombia.**

La Política Nacional para Humedales Interiores de Colombia establece estrategias que destaca varias consideraciones relevantes para la conservación, manejo y planificación para estos ecosistemas que se deberían tener en cuenta para el Complejo Cenagoso de la Zapatosa.

*Manejo y Uso Racional:* La política establece la necesidad de integrar los humedales en los procesos de planificación y ordenamiento territorial, buscando su uso racional y sostenible. Esto se alinea con la situación del Complejo Cenagoso de la Zapatosa, que requiere ser considerado en los planes de desarrollo local y regional, dados sus beneficios ecosistémicos y su papel en la regulación hidrológica.

La caracterización del Complejo Cenagoso, que incluye la identificación de usos y problemas específicos, permite definir acciones adaptadas a su contexto. Este enfoque es

crucial para un área con características particulares como la Zapatosa, que presenta una dinámica hidrológica única debido a su naturaleza de humedal y su importancia en la regulación del ciclo del agua en la región.

*Conservación y Restauración:* La estrategia de conservación enfatiza la importancia de proteger humedales que, como la Zapatosa, tienen funciones ecológicas esenciales, tales como la retención de agua y la provisión de hábitat para la biodiversidad. La restauración de áreas degradadas es fundamental para mantener la capacidad del complejo cenagoso de amortiguar los efectos de la disminución de la precipitación, tal como se observó en el análisis de su variabilidad climática.

La política resalta la necesidad de identificar áreas prioritarias para la conservación y de implementar planes de manejo participativos. Esto es especialmente relevante para la Zapatosa, dado que su manejo debe incluir la participación de actores locales, como pescadores y agricultores, que dependen directamente de los servicios ecosistémicos del humedal.

*Sostenibilidad Ambiental Sectorial:* En cuanto a la sostenibilidad ambiental, la política promueve la evaluación de los impactos de proyectos de desarrollo sobre los humedales, algo esencial para el Complejo Cenagoso de la Zapatosa debido a las presiones provenientes de actividades agrícolas y ganaderas en la región. Implementar estudios de impacto ambiental rigurosos ayuda a mitigar el deterioro de los recursos hídricos y a preservar la calidad del agua en el complejo cenagoso.

La incorporación de criterios ambientales en los planes sectoriales y de ordenamiento territorial busca armonizar las actividades económicas con la conservación de los humedales. Esto es pertinente para el Complejo Cenagoso de la Zapatosa, donde la agricultura y la pesca requieren estrategias que balanceen la productividad con la preservación del ecosistema.

*Concientización y Sensibilización:* La estrategia de concientización apunta a aumentar el conocimiento sobre la importancia de los humedales entre las comunidades locales. Esto es particularmente relevante para la Zapatosa, donde la sensibilización puede fortalecer la participación comunitaria en la protección y el manejo sostenible del complejo. La conciencia pública es clave para reducir prácticas que pueden llevar a la degradación del humedal, como la sobreexplotación de recursos y la contaminación.

Promover la inclusión de los temas de humedales en la educación básica y media es una acción que puede contribuir a la formación de una cultura de conservación desde edades tempranas en los municipios que rodean el Complejo Cenagoso de la Zapatosa.

*Investigación y Monitoreo:* La política subraya la importancia de generar información científica para la toma de decisiones. En el caso del Complejo Cenagoso de la Zapatosa, esto se traduce en la necesidad de continuar con investigaciones que detallen la dinámica hidrológica del complejo, su capacidad de retención de agua, y los efectos del cambio climático en la zona. Esto es fundamental para ajustar las estrategias de manejo y para realizar proyecciones más precisas sobre la variabilidad de la precipitación y la temperatura.

El establecimiento de un sistema de monitoreo para los humedales, tal como propone la política, ayudaría a evaluar de manera continua la salud del Complejo Cenagoso de la Zapatosa y su capacidad de adaptación a los cambios ambientales, lo que puede ser vital para detectar a tiempo cambios negativos en su estado ecológico.

*Aplicación de la Política:* La Política Nacional para Humedales Interiores de Colombia en el manejo del Complejo Cenagoso de la Zapatosa, un sitio Ramsar desde 2018 de importancia internacional, destaca la necesidad de acciones integradas que incluyan la planificación territorial, la restauración ecológica, la educación ambiental y el monitoreo continuo. Las normativas como la Ley 357 de 1997 y la Ley 99 de 1993, junto con las directrices de la Convención Ramsar, proporcionan un marco robusto para la protección de este ecosistema único, garantizando su resiliencia y capacidad de proporcionar servicios ecosistémicos esenciales a las comunidades locales y la región Caribe del país.



## 7. CONCLUSIONES

El análisis de los impactos climáticos proyectados para el Complejo Cenagoso de la Zapatosa entre 2022 y 2040 revela una serie de desafíos significativos que afectarán tanto a los ecosistemas naturales como a las comunidades humanas que dependen de ellos. La disminución promedio anual del 1.40% en las precipitaciones y el incremento de 0.96°C en la temperatura para 2040 plantean riesgos considerables para la dinámica hídrica y la biodiversidad del complejo cenagoso. Estos cambios climáticos no solo alterarán los ciclos naturales del complejo cenagoso, sino que también impactarán la disponibilidad de agua de mediano a largo plazo que es un recurso esencial para el equilibrio de estos ecosistemas.

La probabilidad moderada de estos cambios, aunque no asegurada, introduce un nivel de incertidumbre que debe ser gestionado con precaución. La tendencia general hacia una reducción en las precipitaciones y un aumento en la temperatura exacerbará los efectos negativos en los ecosistemas del complejo cenagoso, afectando tanto a la flora como a la fauna. La migración o extinción de especies sensibles al calor, junto con la alteración de las cadenas alimenticias y los ciclos ecológicos, son consecuencias previsibles que requieren una atención urgente.

Otro factor importante para considerar es el impacto en las poblaciones de los municipios dentro de la zona de influencia del Complejo Cenagoso de Zapatosa, es en la población ya que se proyecta un aumento de 165,790 personas en la actualidad a 210,356 en 2040 destaca la necesidad de planificar y realizar ajustes para aliviar los impactos del cambio climático en estas sociedades. La agricultura, la pesca y la ganadería, que son importantes para la economía local, estarán en serias dificultades debido a la reducción en la producción agrícola y el suministro de agua. La integración de prácticas de gestión de riego y el uso de prácticas agrícolas sostenibles serán cruciales para la seguridad alimentaria y los medios de vida de estas comunidades poblacionales.

Los cambios que se producirán en el clima entre el año 2022 al 2040, los cuales se encuentran en los pronósticos elaborados por el IDEAM, sustentan el hecho de que el clima al interior del Complejo Cenagoso de la Zapatosa será cálido con tendencias a sequías. El estimado que las áreas de alta precipitación disminuirán mientras que las temperaturas medias

anuales aumentarán, generan una perspectiva mundial más restrictiva para los ecosistemas y las poblaciones humanas. El avance de un aumento en áreas cálidas y la disminución en áreas con temperaturas templadas, repercutirán a una cantidad considerable de estrés térmico que afectará la biodiversidad y futuras reservas de agua.

La comparación con los resultados de los Nuevos Escenarios de Cambio Climático para Colombia 2011-2100 del IDEAM, posee similitudes en cuanto a las tendencias de temperatura, no obstante, los resultados de las precipitaciones suelen ser distinta con respecto al estudio del IDEAM que tiende a una disminución mayor en para todos los departamentos de Cesar y Magdalena. Esta variación se explica a la capacidad de retención y manera de reciclar agua que posee el Complejo Cenagoso de la Zapatosa lo que hace tener una dinámica hidrológica distinta. En cualquier caso, la tendencia a la disminución resulta preocupante para los ecosistemas de la región, en especial para acerca de la sostenibilidad en el tiempo.

Como resultado de establecer un marco para la evaluación en el marco de la Tercera Comunicación Nacional sobre Cambio Climático (TNCCC) y los indicadores NDC Colombia, los municipios del Complejo de Humedales de Zapatosa proporcionan una base coherente para la toma de decisiones adaptativas y de mitigación. La cantidad de precipitación recibida en su área, así como el aumento en la temperatura anual media, tendrán un impacto en la productividad agrícola, la cantidad de agua disponible para riego y la calidad de los cultivos, por lo que habrá un imperativo para el manejo óptimo del agua y la adopción de métodos agrícolas amigables con el medio ambiente.

La seguridad alimentaria, los recursos hídricos y los servicios ecosistémicos son componentes que deben ser abordados y gestionados de manera integrada. El cambio en la precipitación, junto con el aumento de la temperatura, impactará la disponibilidad de agua, la evapotranspiración y la demanda de agua por parte de los cultivos y la vegetación. La adopción de técnicas de riego eficientes y la conservación de los ecosistemas de agua dulce serán clave para mejorar la sostenibilidad de los recursos hídricos en el futuro.

La riqueza natural y los servicios del ecosistema del Complejo Cenagoso de la Zapatosa también corren grandes riesgos a causa de los cambios dispuestos en las precipitaciones y la temperatura. El deterioro en la vegetación natural, la reducción de la cobertura de los mangles y el achicamiento del hábitat de las especies amenazadas son ejemplos precisos que dan cuenta

de cómo el cambio climático en un periodo futuro afectará de manera adversa los ecosistemas y sus respectivos servicios a las comunidades locales. La adopción de medidas que buscan aumentar la conservación, la restauración de ecosistemas, la adopción de políticas de administraciones que aseguren la explotación eficiente de los recursos del medio será importantes en la contención de dichos efectos.

El tener en cuenta las estrategias de la Política Nacional para Humedales Interiores de Colombia que ofrece un marco clave para la conservación y manejo del Complejo Cenagoso de la Zapatosa, al integrar la planificación territorial, la conservación, y la participación comunitaria que es esencial para mantener su función de regulación hídrica y biodiversidad, especialmente ante la variabilidad climática. La investigación y el monitoreo continuo son vitales para ajustar estrategias y garantizar la resiliencia del complejo, asegurando la sostenibilidad de sus servicios ecosistémicos para la región y sus comunidades.



## 8. RECOMENDACIONES

*Monitoreo y gestión de los recursos hídricos:* Es fundamental implementar programas de monitoreo continuo de los recursos hídricos en el Complejo Cenagoso de la Zapatosa, mediante la instalación de estaciones meteorológicas modernas y sistemas de detección temprana de sequías. Además, se debe contar con sistemas de riego tecnificado y prácticas agrícolas que promuevan un uso eficiente del agua, con el fin de contrarrestar la disminución proyectada en la disponibilidad hídrica. Fomentar el uso de riego por goteo y la captación de agua de lluvia en las áreas agrícolas será clave para reducir la dependencia de fuentes de agua que se volverán menos confiables debido al cambio climático. También es necesario establecer un plan integral de gestión hídrica, que incluya tanto el uso eficiente como la conservación del agua disponible en la región. Contar con un sistema de monitoreo adecuado permitirá una gestión informada y oportuna de los recursos hídricos, minimizando los impactos sobre los sectores productivos y las comunidades locales.

*Programas de restauración de manglares y ecosistemas acuáticos:* implementar programas de restauración de manglares y otros ecosistemas acuáticos degradados, mediante la plantación de especies nativas y la rehabilitación de humedales. Priorizar áreas de manglares que hayan sido identificadas como esenciales para la protección costera y la captura de carbono.

Los manglares son ecosistemas clave que desempeñan un rol fundamental en la mitigación del cambio climático y la protección de la biodiversidad costera. La restauración de estos ecosistemas ayudará a mejorar la capacidad adaptativa de la región frente a los cambios climáticos proyectados.

*Conservación de especies sensibles y planes de manejo adaptativo:* Desarrollar planes de manejo adaptativo para las especies más sensibles al aumento de la temperatura y la reducción de la precipitación, priorizando aquellas que juegan un rol clave en los ecosistemas del Complejo Cenagoso de la Zapatosa. Promover la investigación científica para identificar las especies más vulnerables y desarrollar estrategias de conservación específicas, el aumento de la temperatura proyectado afectará la biodiversidad, con la posible migración o extinción de especies sensibles. Proteger estas especies es crucial para mantener el equilibrio ecológico y los servicios ecosistémicos en la región.

*Promoción de empleos verdes y sostenibles:* Desarrollar programas que fomenten la creación de empleos verdes en sectores sostenibles, como el turismo ecológico, la agricultura climáticamente inteligente, y la gestión sostenible. Incentivar la capacitación de las comunidades locales en prácticas sostenibles y el uso de tecnologías limpias, promover empleos verdes mejorará las oportunidades de adaptación económica para las comunidades locales, permitiéndoles diversificar sus fuentes de ingresos.

*Fortalecimiento de la infraestructura para el turismo sostenible:* Invertir en la creación de infraestructura adecuada para el turismo sostenible, que destaque los atractivos naturales del Complejo Cenagoso de la Zapatosa, como sus humedales y la biodiversidad que este posee. Promover prácticas turísticas responsables que no afecten negativamente los ecosistemas ya que el turismo ecológico representa una oportunidad importante para generar ingresos locales, al tiempo que promueve la conservación de la biodiversidad. Esta actividad puede ser una fuente de empleo sostenible si se gestiona adecuadamente, respetando los límites ecológicos de la región.

*Seguridad alimentaria y producción agrícola climáticamente inteligente:* Fomentar la adopción de prácticas agrícolas resilientes al clima, tales como el uso de cultivos resistentes a la sequía, la implementación de técnicas de conservación de agua, y la diversificación de los sistemas de producción agrícola, la adopción de agricultura climáticamente inteligente permitirá mitigar estos impactos y asegurar una producción estable y sostenible de alimentos.

*Políticas públicas para la gestión sostenible del agua:* Desarrollar políticas públicas específicas para la gestión sostenible del agua, que incluyan la protección de fuentes hídricas, la conservación de acuíferos, y el fortalecimiento de los marcos regulatorios para el uso responsable de los recursos hídricos. La gestión del agua será clave para enfrentar los desafíos de disponibilidad hídrica en el Complejo Cenagoso de la Zapatosa, protegiendo los recursos a largo plazo.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alvarino Gaitán, Y. y Ocampo Bautista, V.C. (2015). *Análisis de las variables climatológicas temperatura, humedad relativa, precipitación, evaporación, brillo solar, radiación, velocidad y dirección del viento, medidas por la estación meteorológica “Argelia” entre los años 1993 – 2013 para verificar la variabilidad climática del municipio de Girardot (Trabajo de grado)*. Universidad de Cundinamarca.
- Arnau Jaume. (2001). *Diseños de Series Temporales: Técnicas de Análisis*. Spain: Publicacions i Edicions de la Universitat de Barcelona.
- Baptista, D., Manuel, J., Ayala, S., Noh, H., & Novella, R. (n.d.). *Los mercados laborales y el cambio climático: ¿Cómo adaptar las políticas laborales y mejorar las oportunidades de empleo?* Retrieved October 16, 2024, from <https://fedemaderas.org.co/wp-content/uploads/2024/08/Los-mercados-laborales-y-el-cambio-climatico-Como-adaptar-las-politicas-laborales-y-mejorar-las-oportunidades-de-empleo.pdf>
- Box, G. E., & Jenkins, G. M. (1970). *Time series analysis: forecasting and control*. Holden-Day.
- Box, G. E., Jenkins, G. M., Reinsel, G. C., & Ljung, G. M. (2015). *Time series analysis: forecasting and control*. John Wiley & Sons.
- Bruce, P., Bruce, A., Gedeck, P. (2020). *Practical Statistics for Data Scientists: 50+ Essential Concepts Using R and Python*. United States: O'Reilly Media.
- Buitrago Vargas, A. F. (2023). *Simulación Hidrológica de los Impactos Potenciales del Cambio Climático en la Parte Alta del Río Iquira, Huila, Colombia (Trabajo de grado)*. Universidad Cooperativa de Colombia, Colombia.
- Carolina, Z., Vargas, M., Paredes Tavares, J., Ivvan Valdez, S., Fandila, S., Querétaro, M., Autor, S., & Ivvan Valdez. (2022). Estimación de datos faltantes de temperatura combinando IDW y una serie truncada de Fourier. 22, 130–147. <https://rclimatol.eu/wp-content/uploads/2022/11/Articulo22i.pdf>
- Chimichagua: Alcaldía de Chimichagua. (2020). *Plan de Desarrollo Municipal Chimichagua Productiva 2020 - 2023*.
- Climate change widespread, rapid, and intensifying – IPCC — IPCC. (2019). [Ipcc.ch; IPCC. https://www.ipcc.ch/2021/08/09/ar6-wg1-20210809-pr/](https://www.ipcc.ch/2021/08/09/ar6-wg1-20210809-pr/)
- Cómo funciona IDW—ArcGIS Pro | Documentación. (2024). [Arcgis.com. https://pro.arcgis.com/es/pro-app/latest/tool-reference/3d-analyst/how-idw-](https://pro.arcgis.com/es/pro-app/latest/tool-reference/3d-analyst/how-idw-)

works.htm#:~:text=El%20m%C3%A9todo%20IDW%20est%C3%A1%20basado,resp ecto%20del%20punto%20de%20salida.

Constitución Política de Colombia. (1991).

Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. (1992, 9 de mayo).

Convención Ramsar. (1971). Relativa a los Humedales de Importancia Internacional Especialmente como Hábitat de Aves Acuáticas.

CORPAMAG, UNIMAGDALENA. (2017). Actualización del Plan de Ordenamiento y Manejo de la Cuenca Hidrográfica (POMCA) del complejo cenagoso Zapatosa en jurisdicción de la Corporación Autónoma Regional del Magdalena (CORPAMAG).

Cryer, J. D., & Chan, K. S. (2008). Time series analysis with applications in R. Springer Science & Business Media.

Decreto 1076. (2015, 26 de mayo). Por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible.

Decreto 2245. (2017, 29 de diciembre). Por el cual se reglamenta el artículo 206 de la Ley 1450 de 2011 y se adiciona una sección al Decreto 1076 de 2015, Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible, en lo relacionado con el acotamiento de rondas hídricas.

Distancia entre dos puntos de la superficie terrestre mediante la fórmula de Haversine con Python. (2012, November 13). El Blog de José Guerrero; El Blog de José Guerrero. <https://joseguerreroa.wordpress.com/2012/11/13/distancia-entre-dos-puntos-de-la-superficie-terrestre-mediante-la-formula-de-haversine-con-python/>

Economipedia. (Simulación de Montecarlo). (2020). - Qué es, definición y concepto.

[Simulación de Montecarlo - Qué es, definición y concepto | 2023 | Economipedia](#)

Equipos Humedales Fondo Adaptación Instituto Humboldt (2016). Propuesta de Límite para la Ciénaga de Zapatosa.

Fatichi, S., Ivanov, V. Y., & Caporali, E. (2016). A mechanistic ecohydrological model to investigate complex interactions in cold and warm water-controlled environments: 1. Theoretical framework and plot-scale analysis. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 8(2), 673-688.

Fátima, D., & Serrano, O. (n.d.). TÉCNICAS ESTADÍSTICAS APLICADAS EN NUTRICIÓN Y SALUD.

<https://www.ugr.es/~fmocan/MATERIALES%20DOCTORADO/testt2016.pdf>

Gomariz, F. (2013). Distribución espacial: interpolación espacial.

<https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/29116/1/presentaD2.pdf>

Hanke, J. E., & Wichern, D. W. (2009). Pronósticos en los negocios. Pearson Educación.

Hernández S., R., & Mendoza T., C. (2018). Metodología de la Investigación las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta. Ciudad de México D.F.: McGraw Hill.

Hernández S., R., Fernández C., C., & Baptista L., P. (2014). Metodología de la Investigación. Ciudad de México D.F.: McGraw Hill.

Hernández Suárez, C. A. (2018). Modelo de predicción de la ocupación espectral para el análisis y diseño de redes de radio cognitiva. Colombia: Editorial Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Editorial UD.

HubSpot. (2024). ¿Qué es Python para que sirve? |Claudio Frisoli. Hubspot.es.  
<https://blog.hubspot.es/website/autor/claudio-frisoli>

IBM. (¿Qué es la simulación Montecarlo?). (2021). [¿Qué es la simulación Montecarlo? | IBM](#)

IDEAM. (02 de agosto de 2023). Consulta y Descarga de Datos Hidrometeorológicos. Obtenido de Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM: <http://dhime.ideam.gov.co/atencionciudadano/>.

IPCC (2014). Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland.

IPCC (Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático). (2021). Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Cambridge University Press. (Páginas 782).

IQR (Rango intercuartílico). (2024). Oracle.com.  
[https://docs.oracle.com/cloud/help/es/pbcs\\_common/PFUSU/insights\\_metrics\\_IQR.htm#PFUSU-GUID-CF37CAEA-730B-4346-801E-64612719FF6B](https://docs.oracle.com/cloud/help/es/pbcs_common/PFUSU/insights_metrics_IQR.htm#PFUSU-GUID-CF37CAEA-730B-4346-801E-64612719FF6B)

Leal, A. D., & Portes, S. T. (2020). *Análisis de las variables climatológicas de precipitación y temperatura de los municipios de Tocaima y Jerusalén* [Trabajo de grado, Universidad Piloto de Colombia]. Repositorio Institucional Universidad Piloto de Colombia. <https://repository.unipiloto.edu.co/handle/20.500.12277/11270>

Ley 1523. (2012, 24 de abril). Por la cual se adopta la política nacional de gestión del riesgo de desastres y se establece el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres y se dictan otras disposiciones.

Ley 1931. (2018, 17 de julio). Por la cual se establecen directrices para la gestión del cambio

climático.

- Mamani, C. M. C., Loayza, C. L., & Molleda, Y. F. C. (2021). Efecto de la temperatura y precipitación sobre la agricultura en la cuenca Coata-Puno, Perú. *Revista Alfa*, 5(14), 285-296.
- MINAMBIENTE. (2020). Actualización de la Contribución Determinada a Nivel Nacional de Colombia (NDC). Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2020). Actualización de la Contribución Determinada a Nivel Nacional (NDC) de Colombia 2020.  
<https://www4.unfccc.int/sites/ndcstaging/PublishedDocuments/Colombia%20First/NDC%20Actualizada%20de%20Colombia.pdf>
- Modelo Ecohidrológico (Fundación Natura Colombia, 2020). En La Ciénaga de Zapatosa, Un Caso Ejemplar Para La Conservación En América Latina.
- ONF Andina. (2013). Plan de Manejo Ambiental del Complejo Cenagoso de Zapatosa, en los Departamentos del Cesar y Magdalena. Fortalecimiento de Capacidades para la Reducción de Emisiones por Deforestación y Degradación – REDD (PREPAREDD), ONFA, ONFI, FFEM, AFD, CORMAGDALENA, CORPOCESAR. Valledupar, Cesar. Colombia.
- O'Sullivan, D., & Unwin, D. J. (2010). Geographic information analysis. John Wiley & Sons.
- Pareekshith Katti. (2023, August 18). Inverse Distance Weighting Interpolation in Python - Pareekshith Katti - Medium. Medium; Medium.  
<https://pareekshithkatti.medium.com/inverse-distance-weighting-interpolation-in-python-68351fb612d2>
- Prudhomme, C., Wilby, R. L., Crooks, S., Kay, A. L., & Reynard, N. S. (2010). Scenario-neutral approach to climate change impact studies: Application to flood risk. *Journal of Hydrology*, 390(3-4), 198-209.
- Ramos Jauregui, L. Y. (2014). Estimación del efecto del cambio climático en la precipitación de la Costa Norte del Perú usando simulaciones de modelos climáticos globales [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Agraria La Molina]. Repositorio Institucional - UNALM. <http://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/UNALM/1874>.
- Resolución 0957. (2018, 31 de mayo). Por la cual se adopta la Guía Técnica de criterios para el acotamiento de las rondas hídricas en Colombia y se dictan otras disposiciones.
- Rodríguez Lara, N. y Salazar Ventura, I. (2023). Análisis de la influencia del fenómeno de La Niña 2020-2022 en la precipitación y temperatura del aire en Chile continental [Trabajo de titulación, Escuela Superior Politécnica del Litoral]. Repositorio de la

Biblioteca de la ESPOL.

REPÚBLICA DE COLOMBIA MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE CONSEJO NACIONAL AMBIENTAL POLÍTICA NACIONAL PARA HUMEDALES INTERIORES DE COLOMBIA ESTRATEGIAS PARA SU CONSERVACIÓN Y USO RACIONAL Bogotá, Diciembre De 2001. (N.D.).  
<https://Www.Minambiente.Gov.Co/Wp-Content/Uploads/2021/10/Poli%CC%81tica-Nacional-De-Humedales.Pdf>

Rodríguez Salazar, M. E. (2000). Coeficientes de Asociación. Mexico: Plaza y Valdes.

Ruíz Morillas, E. (2016). Estadística aplicada a experimentos y mediciones: de Santos.

Saravia, J. (2015, March 10). ¡Pero qué linda relación tienen! La correlación de Pearson. Stats SOS; Stats SOS. <https://statsos.wordpress.com/2015/03/10/pero-que-linda-relacion-tienen-la-correlacion-de-pearson/>

Schumacker, R. E. (2014). Learning Statistics Using R. United States: SAGE Publications.

Smith, J., Johnson, A., Williams, B., et al. (2019). Impacts of Anthropogenic Activities on Global Climate Change: Altered Temperatures and Precipitation Patterns. Environmental Science and Climate Change, 45, 112-130.

Steinschneider, S., & Brown, C. (2013). A semiparametric multivariate, multi-site weather generator with low-frequency variability for use in climate risk assessments. Water Resources Research, 49(11), 7205-7220.

Tucci, C. E. M. (2005). Gestión de inundaciones urbanas. Porto Alegre: ABRH.

UNICESAR. (2021). Acuerdo N°003 del 08 de julio de 2021 “por medio del cual se adoptan las líneas de investigación de los programas de Pregrado de la Facultad de Ingeniería y Tecnológicas sede Valledupar, y se dictan otras disposiciones”. Valledupar, Cesar: Universidad Popular del Cesar.

UNICESAR. (2021). Acuerdo N°003 del 08 de julio de 2021 “por medio del cual se adoptan las líneas de investigación de los programas de Pregrado de la Facultad de Ingeniería y Tecnológicas sede Valledupar, y se dictan otras disposiciones”. Valledupar, Cesar: Universidad Popular del Cesar.

UNICESAR. (2023). Lineamientos y Guía Orientadora para la Estructuración de Informes de Prácticas Académicas en el Programa de Ingeniería Ambiental y Sanitaria de la Universidad Popular del Cesar. Valledupar, Cesar, Colombia: Universidad Popular del Cesar.

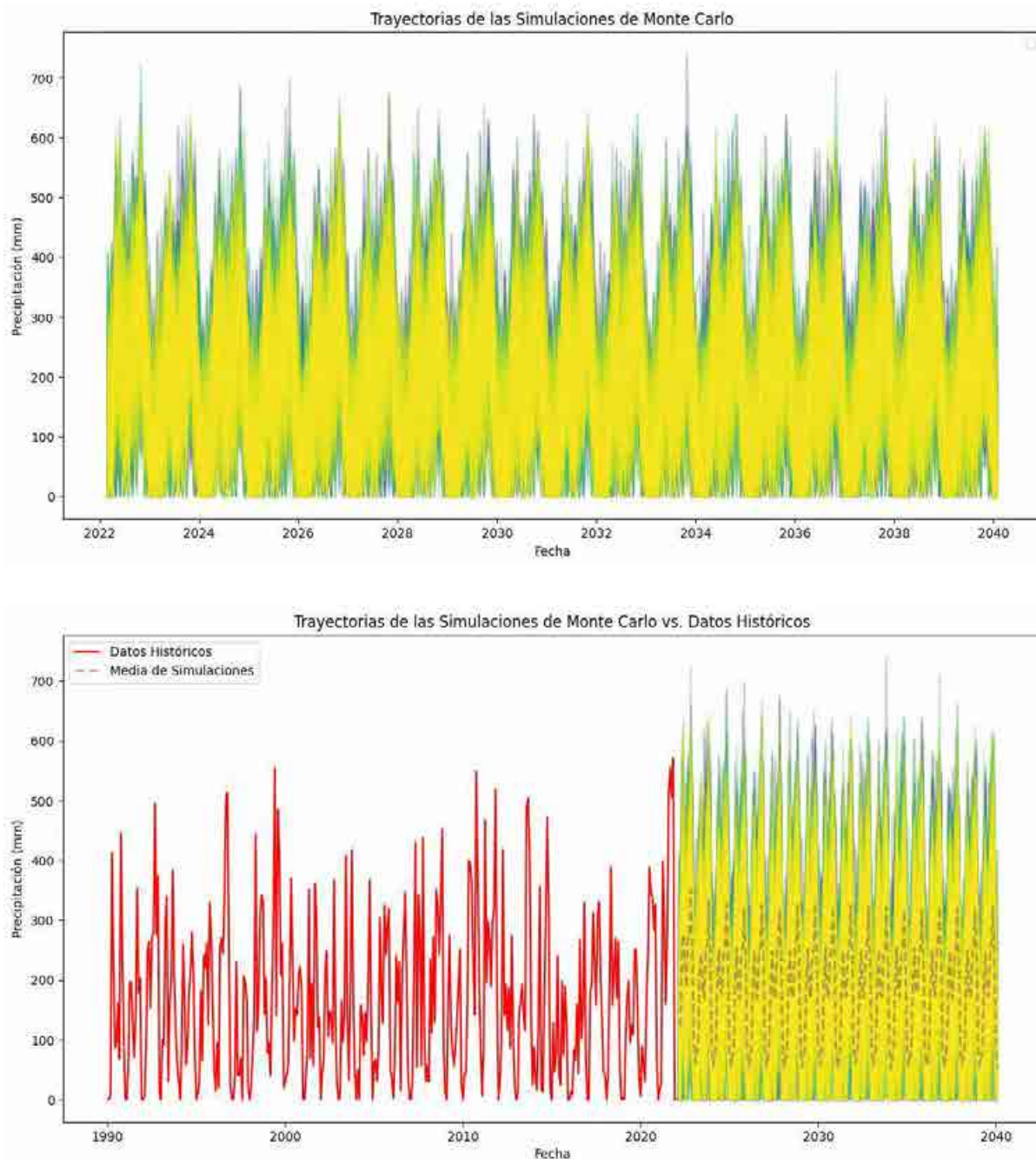
Viloria de la Hoz, J. (2008). Ciénagas de la costa Caribe de Colombia. Banco de la República.

## ANEXOS

### Anexos Simulaciones para la Variable de Precipitación

#### *Estaciones del municipio de Chimichagua*

Figura 106. Simulaciones Vs Datos Históricos para la estación CHIMICHAGUA [25021240]



Nota: Elaborado por el Autor (2024) con la herramienta Google Colab con Python

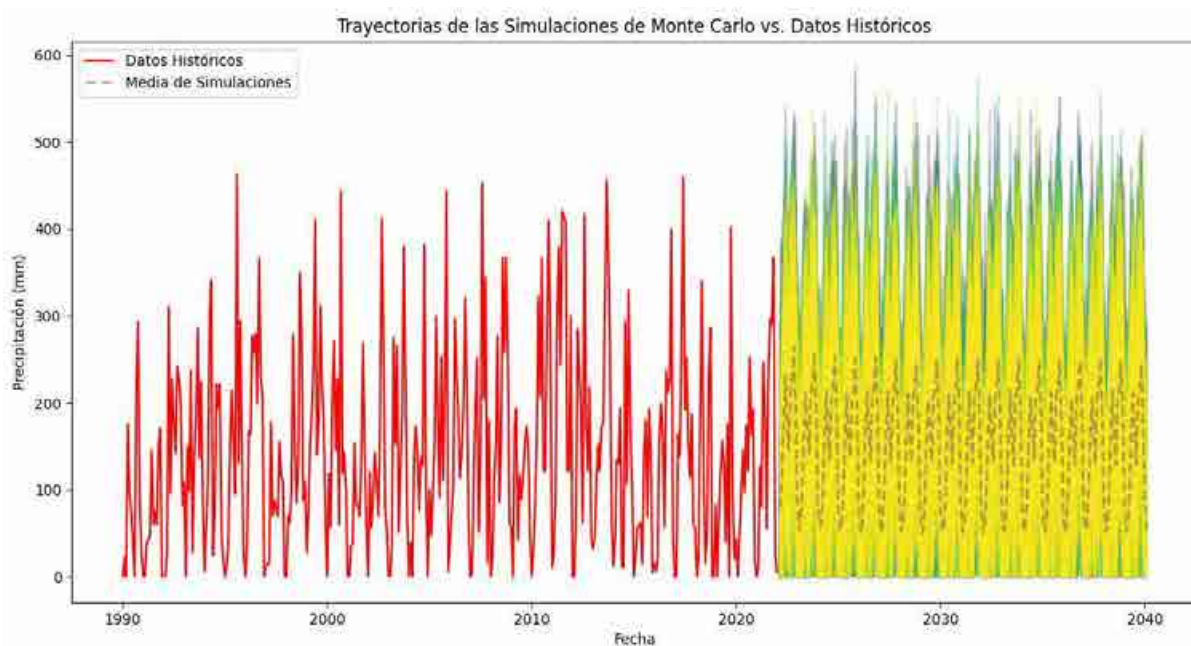
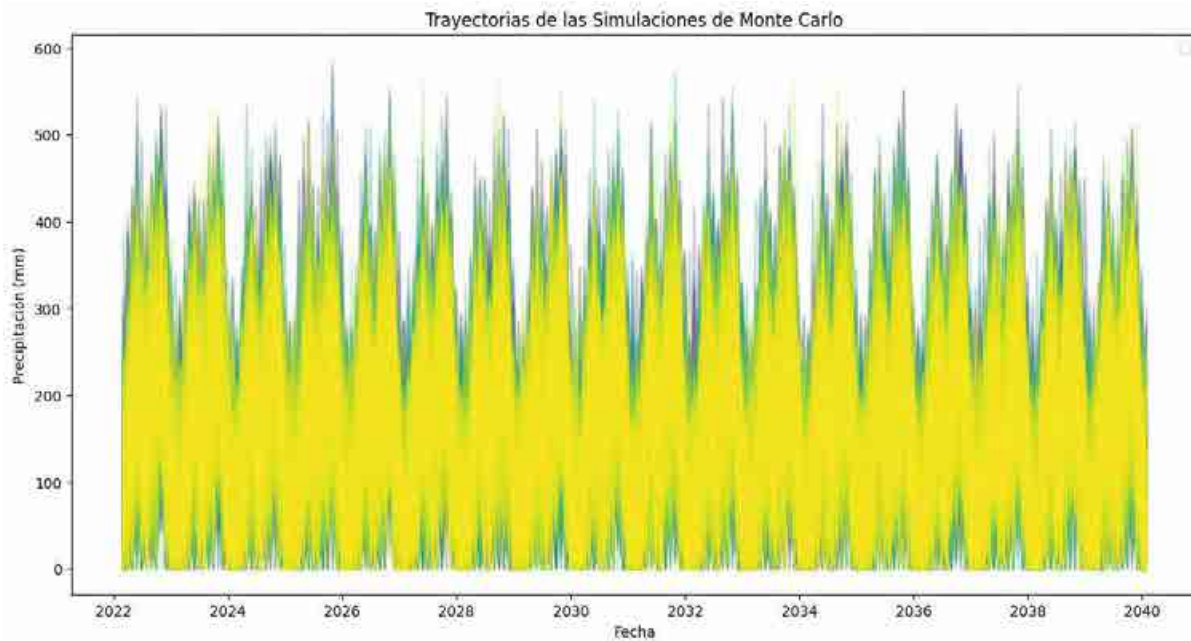
[www.unicesar.edu.co](http://www.unicesar.edu.co)

Teléfono conmutador PBX: (+57 605 588 5592)

Balneario Hurtado, Vía a Patillal

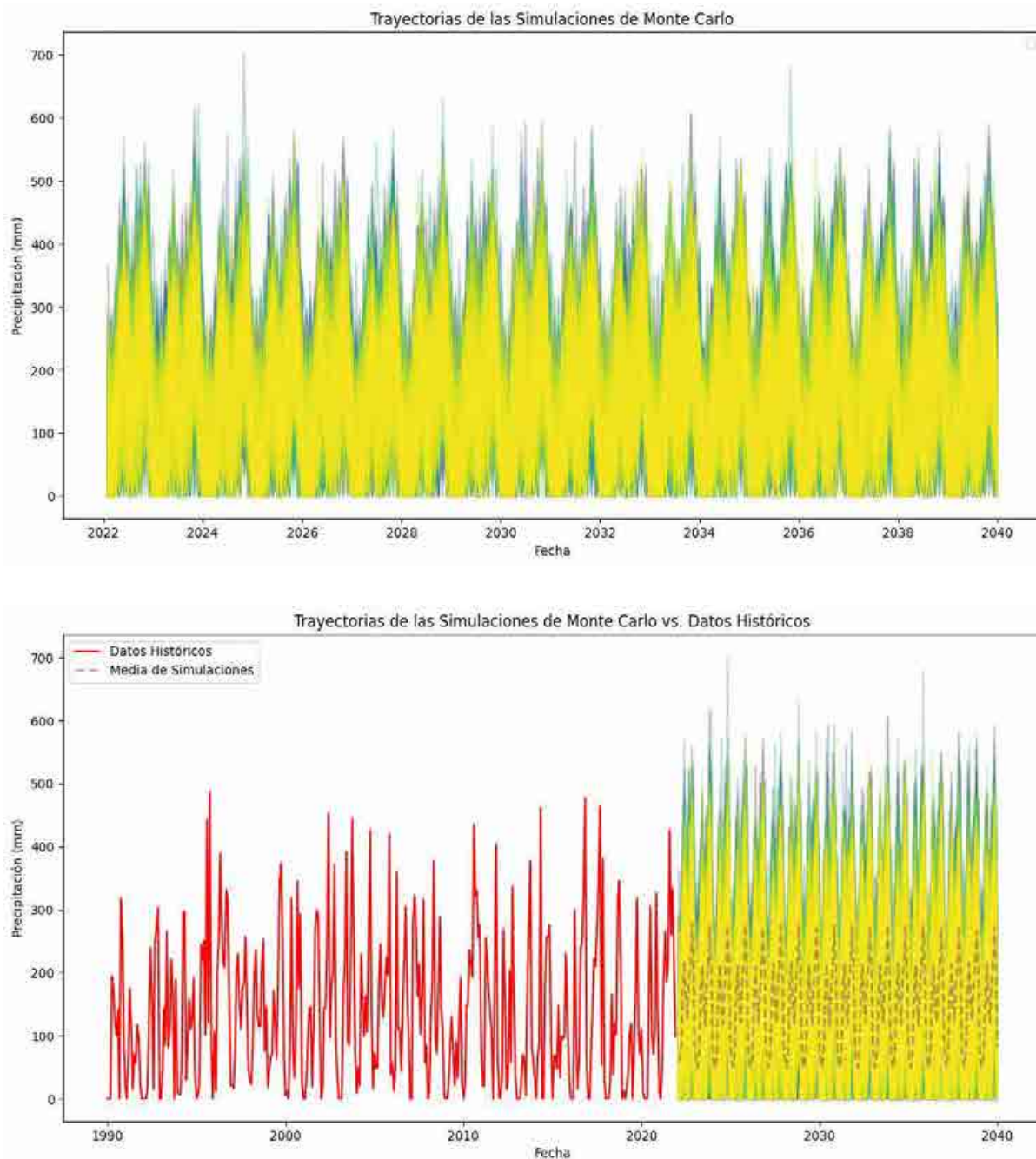
Valledupar – Cesar, Colombia

Figura 107. Simulaciones Vs Datos Históricos para la estación EL CANAL [25020240]



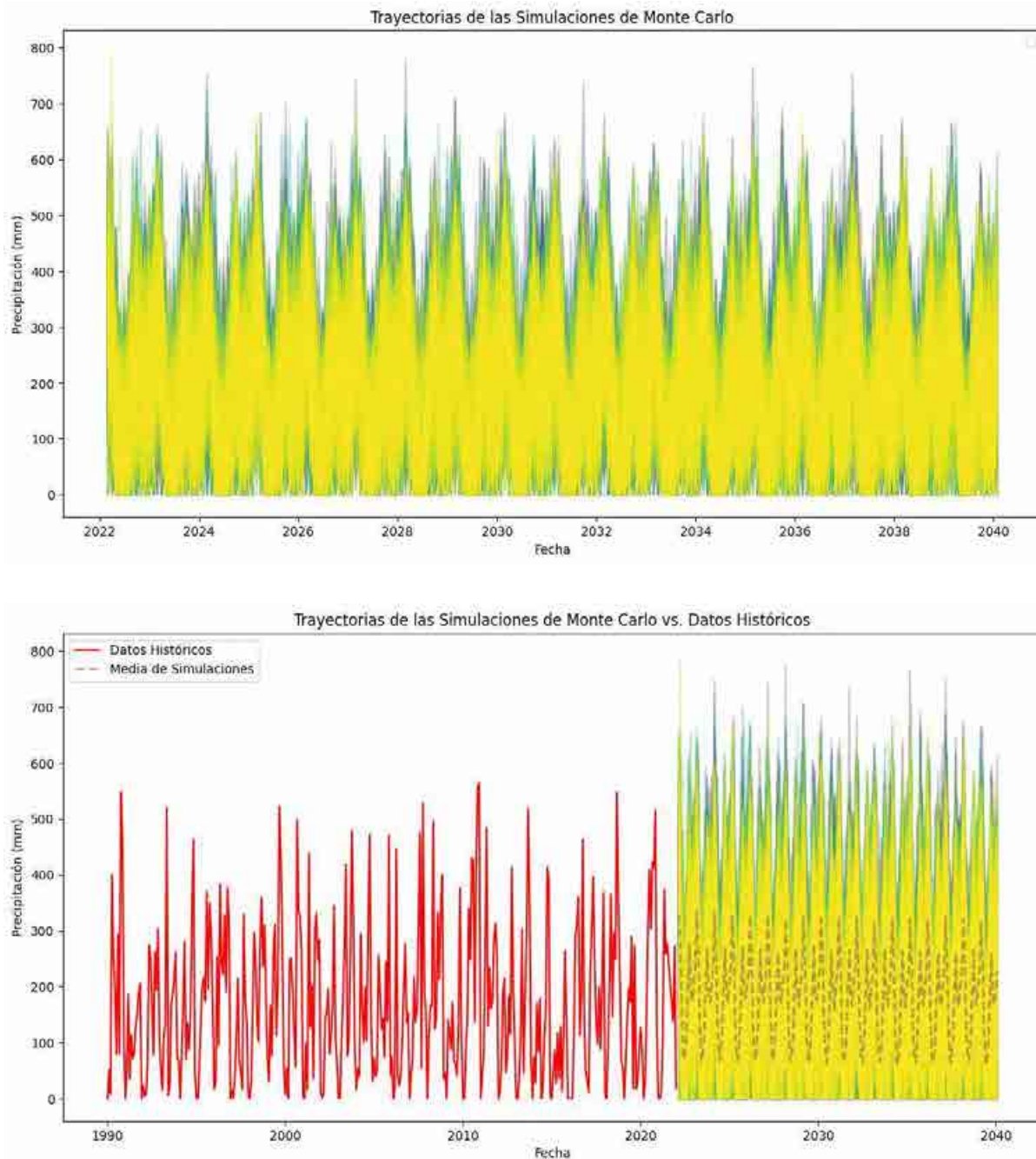
Nota: Elaborado por el Autor (2024) con la herramienta Google Colab con Python mediante datos obtenidos de la plataforma DHIME del IDEAM (2024).

Figura 108. Simulaciones Vs Datos Históricos para la estación HACIENDA EL TERROR [25020650]



Nota: Elaborado por el Autor (2024) con la herramienta Google Colab con Python mediante datos obtenidos de la plataforma DHIME del IDEAM (2024).

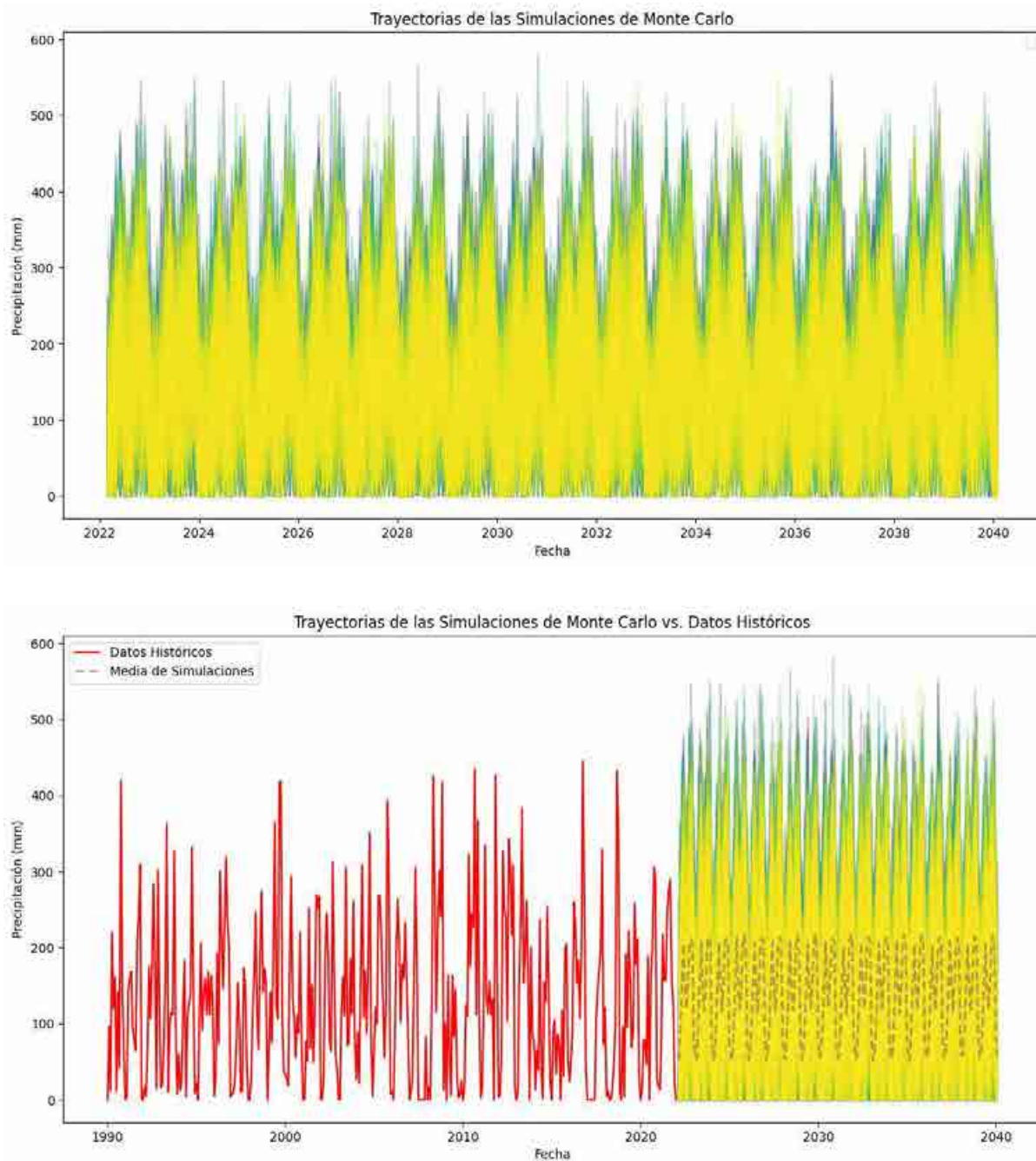
Figura 109. Simulaciones Vs Datos Históricos para la estación SALOA [25020270]



Nota: Elaborado por el Autor (2024) con la herramienta Google Colab con Python mediante datos obtenidos de la plataforma DHIME del IDEAM (2024).

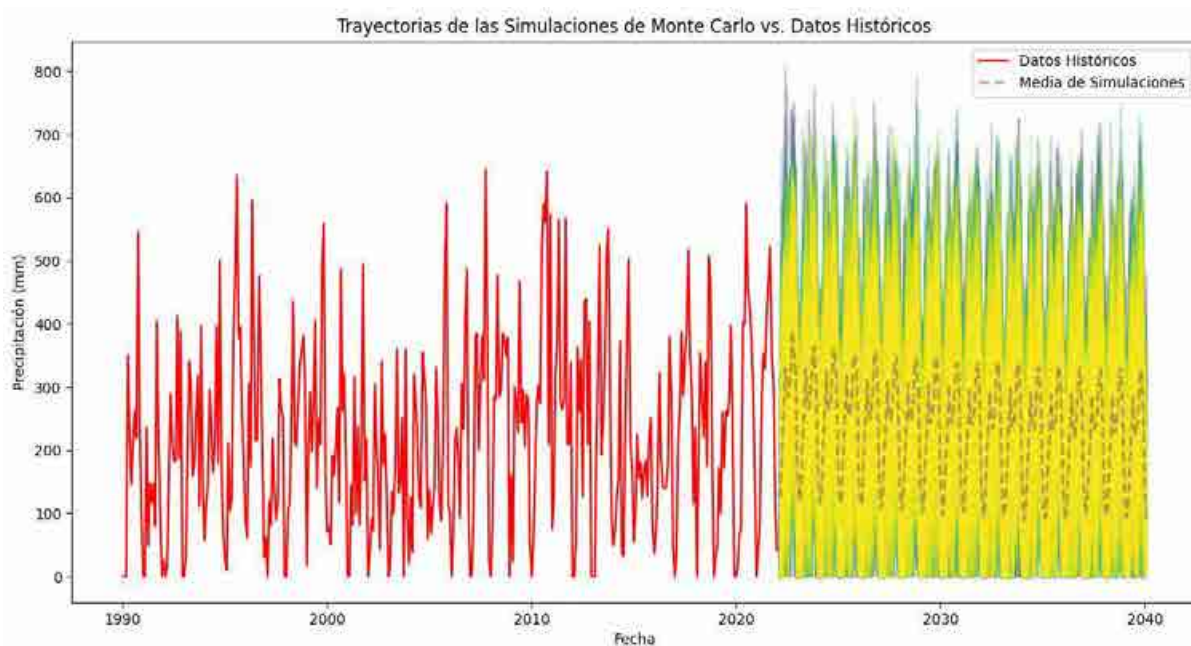
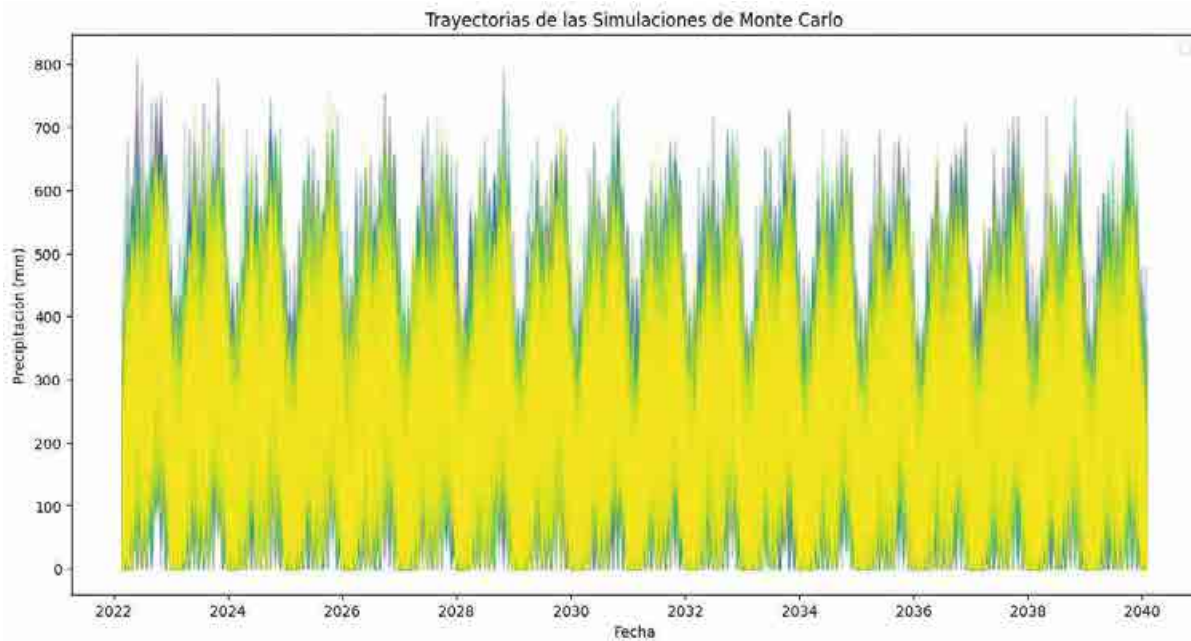
### Estaciones para el Municipio de Chiriguana

Figura 110. Simulaciones Vs Datos Históricos para la estación CHIRIGUANA [25025250]



Nota: Elaborado por el Autor (2024) con la herramienta Google Colab con Python mediante datos obtenidos de la plataforma DHIME del IDEAM (2024).

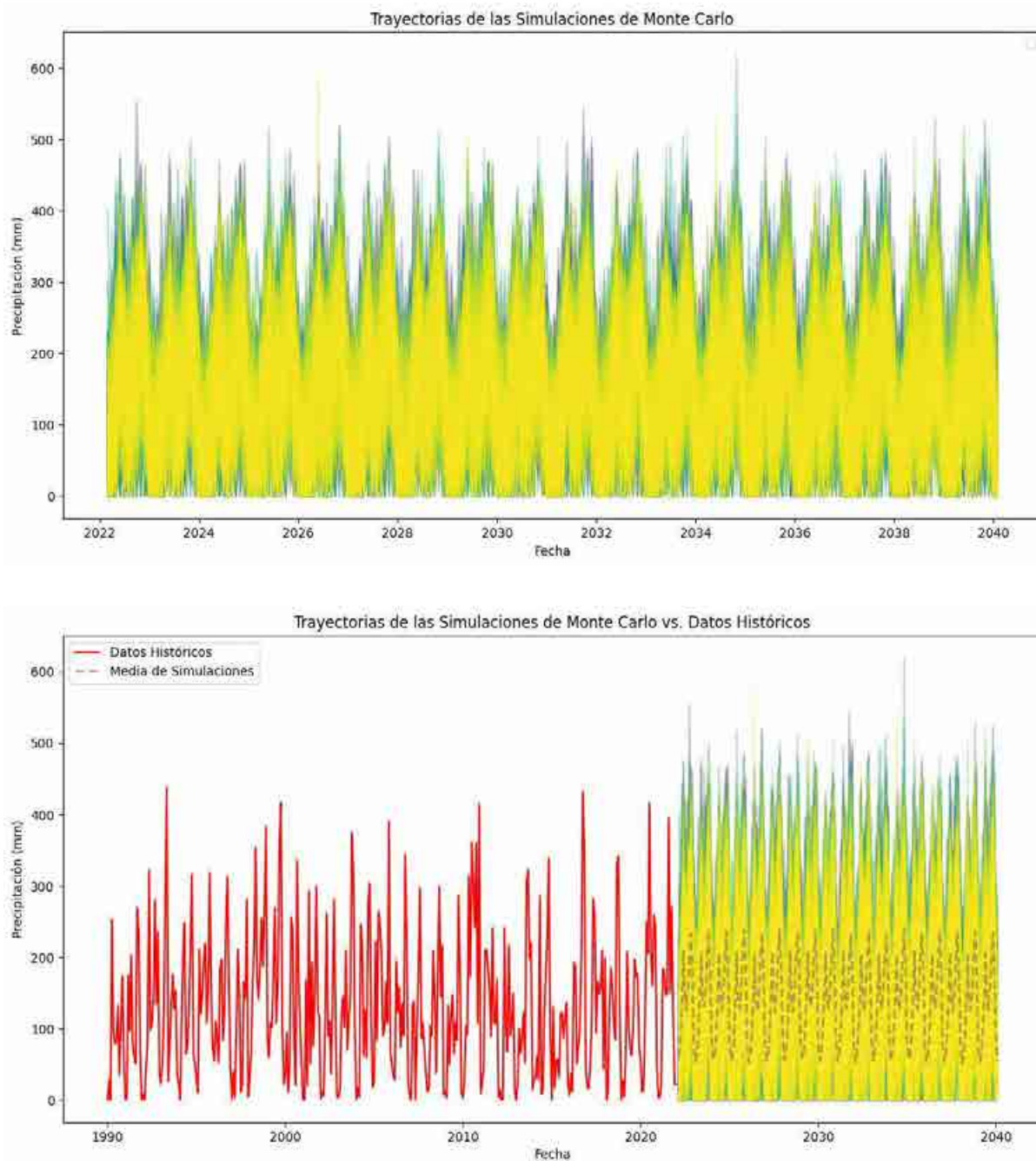
Figura 111. Simulaciones Vs Datos Históricos para la estación RINCONHONDO [25020260]



Nota: Elaborado por el Autor (2024) con la herramienta Google Colab con Python mediante datos obtenidos de la plataforma DHIME del IDEAM (2024).

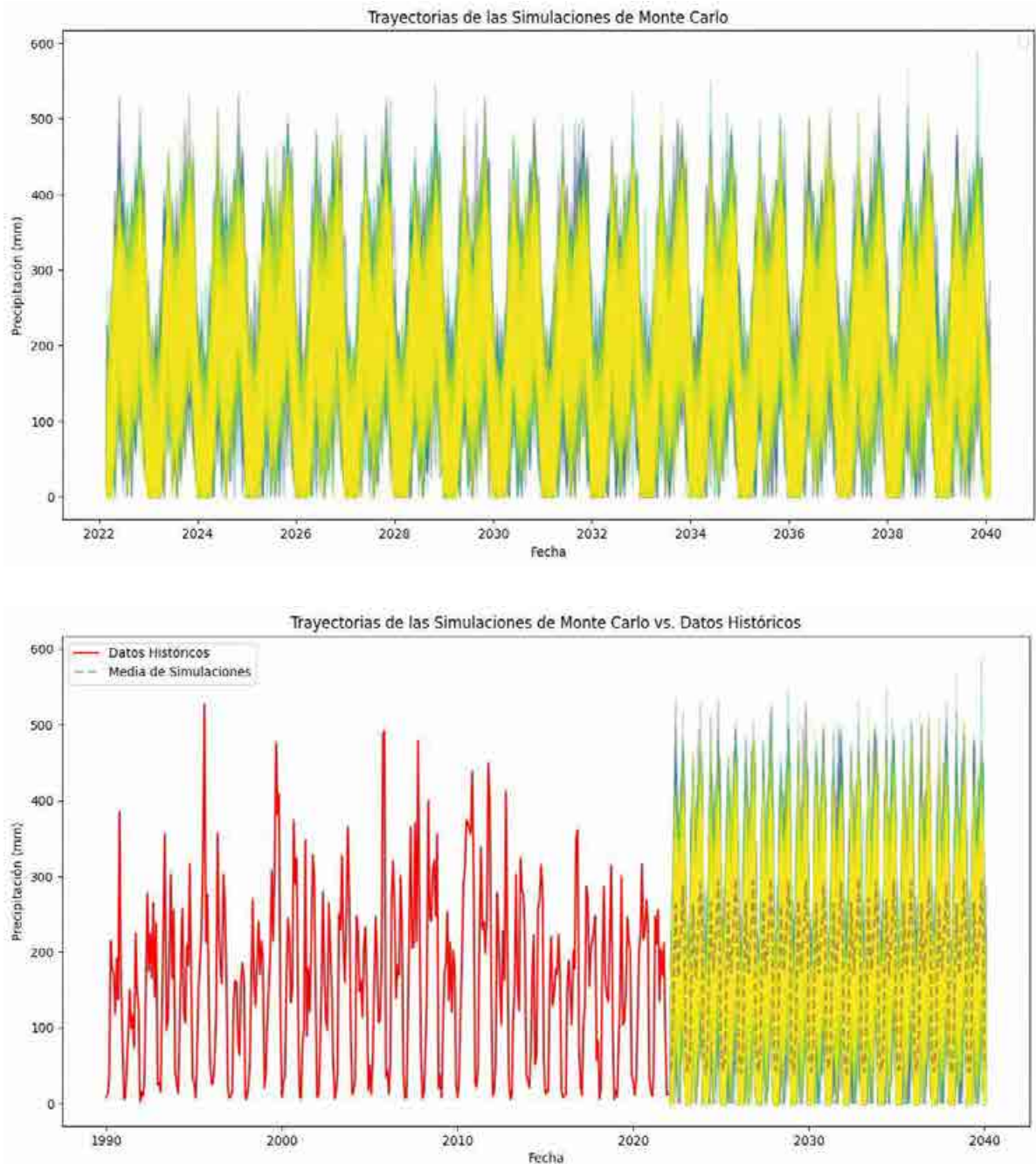
***Estaciones para el Municipio de Curumani***

Figura 112. Simulaciones Vs Datos Históricos para la estación CURUMANI [25020250]



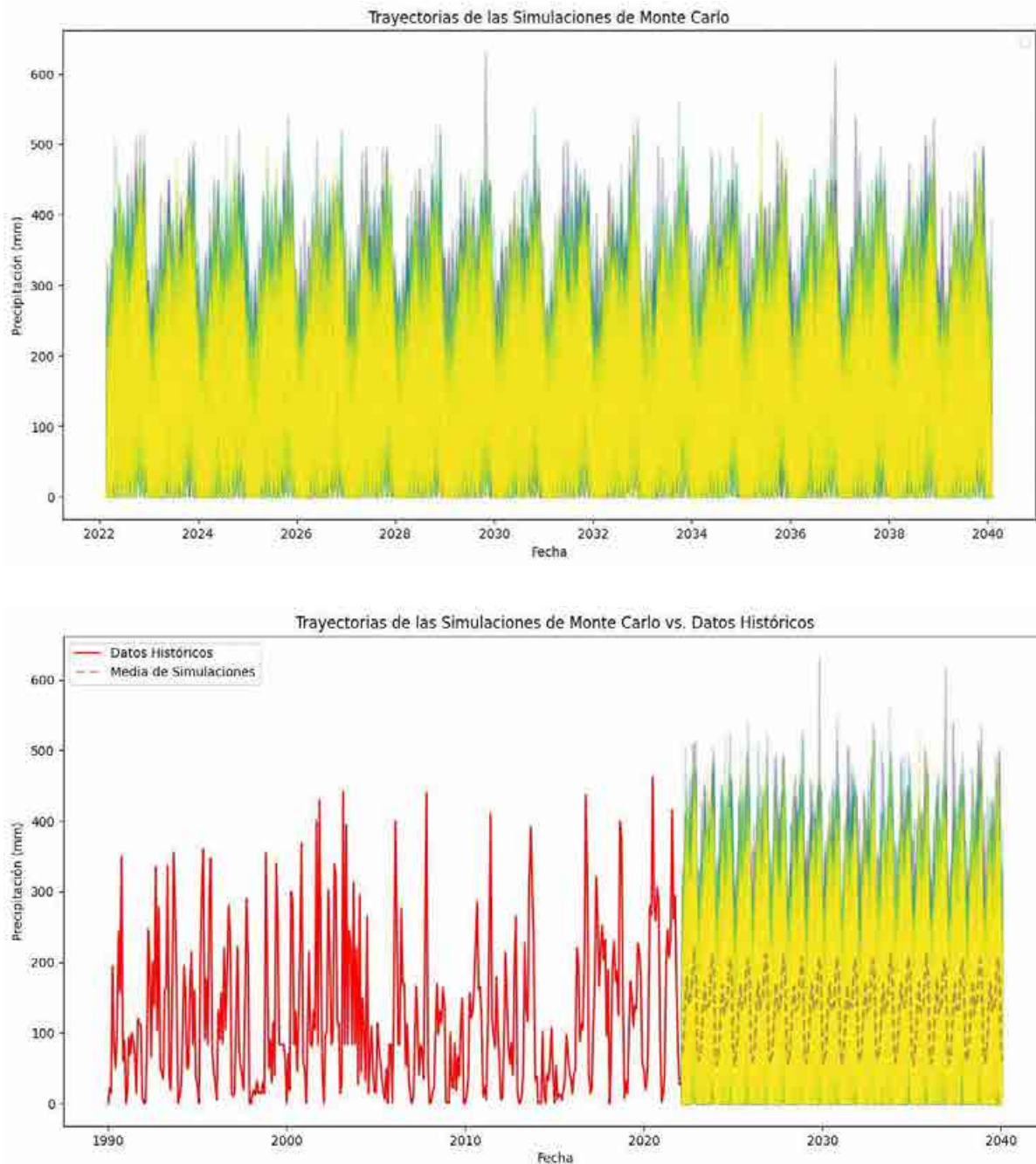
Nota: Elaborado por el Autor (2024) con la herramienta Google Colab con Python mediante datos obtenidos de la plataforma DHIME del IDEAM (2024).

Figura 113. Simulaciones Vs Datos Históricos para la estación POPONTE [25020690]



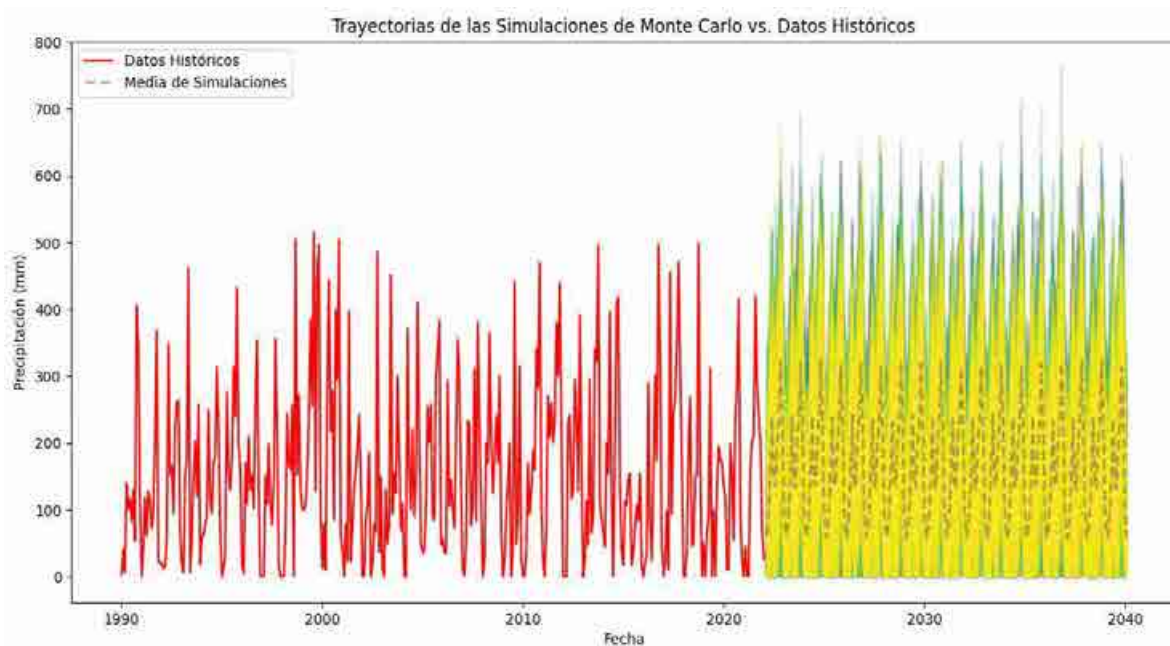
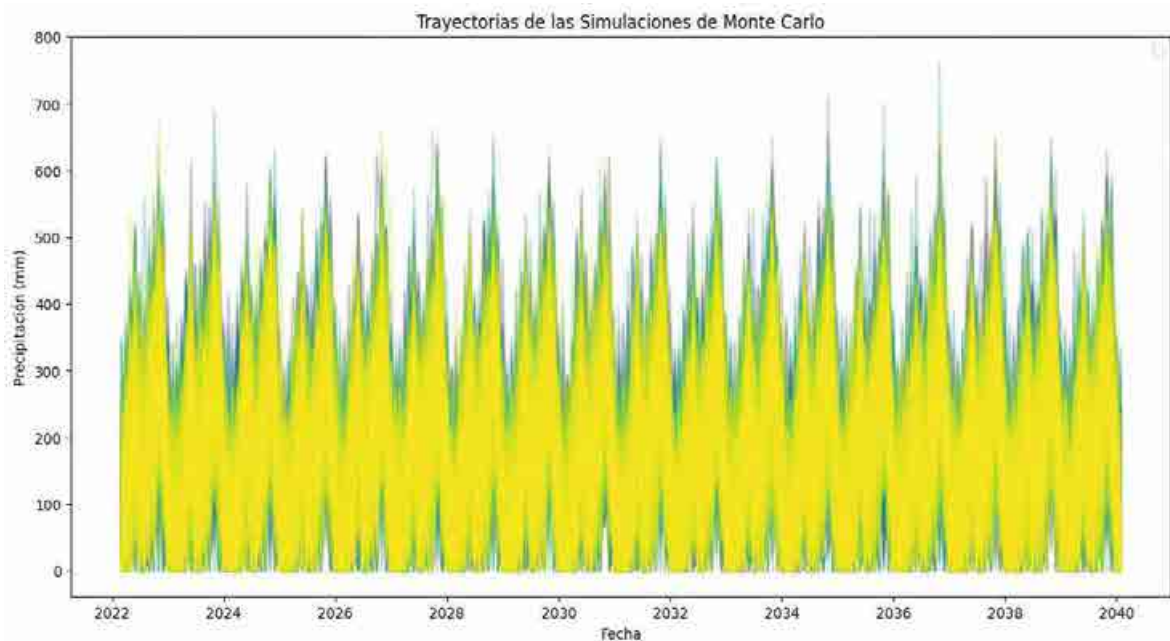
Nota: Elaborado por el Autor (2024) con la herramienta Google Colab con Python mediante datos obtenidos de la plataforma DHIME del IDEAM (2024).

Figura 114. Simulaciones Vs Datos Históricos para la estación PRIMAVERA LA [25020920]



Nota: Elaborado por el Autor (2024) con la herramienta Google Colab con Python mediante datos obtenidos de la plataforma DHIME del IDEAM (2024).

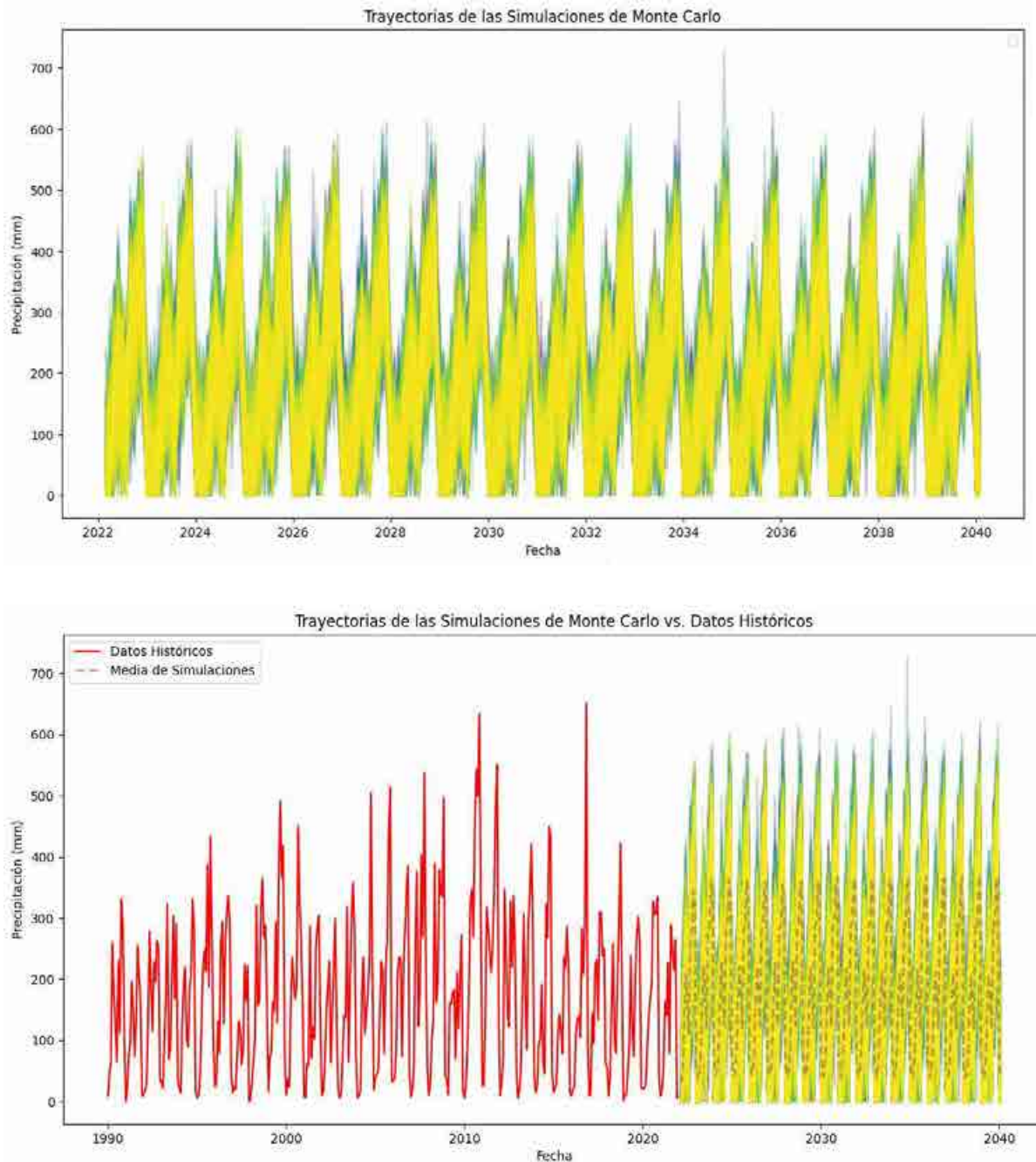
Figura 115. Simulaciones Vs Datos Históricos para la estación ZAPATOZA [25020660]



Nota: Elaborado por el Autor (2024) con la herramienta Google Colab con Python mediante datos obtenidos de la plataforma DHIME del IDEAM (2024).

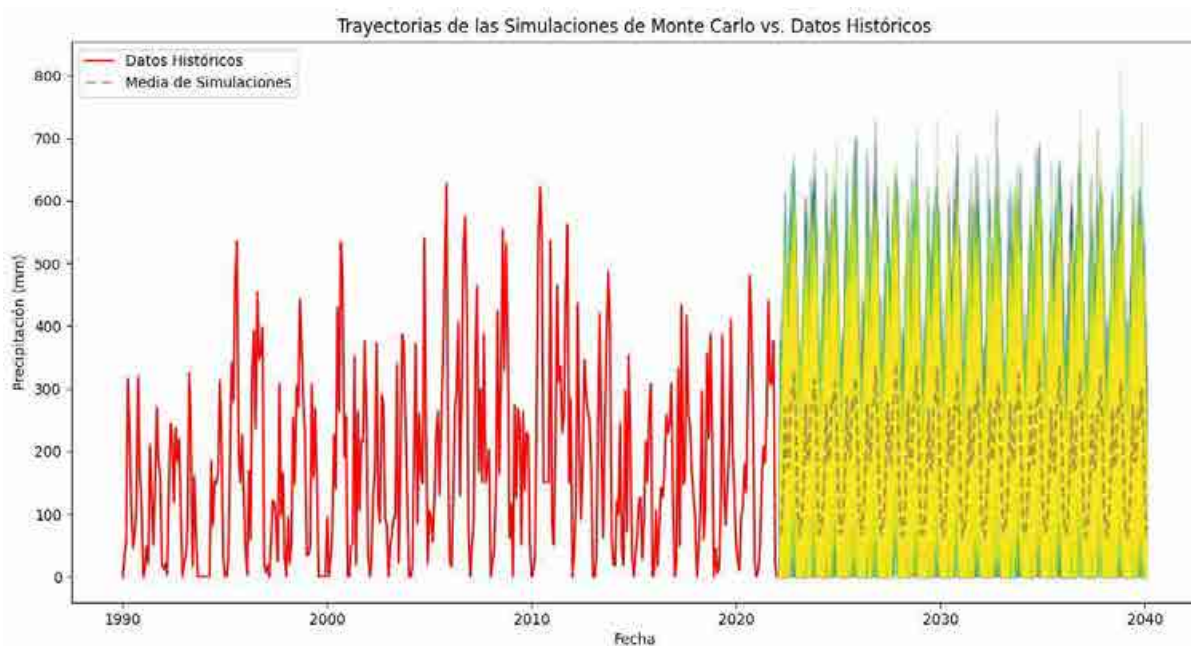
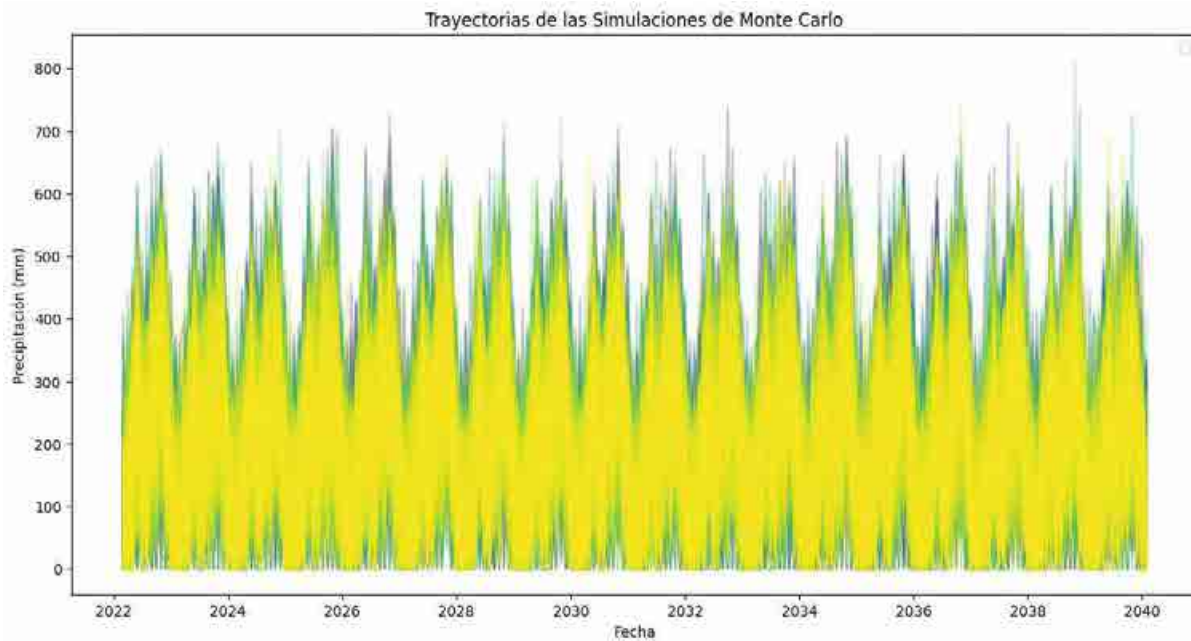
***Estaciones para el Municipio de El Banco Magdalena***

Figura 116. Simulaciones Vs Datos Históricos para la estación AEROPUERTO LAS FLORES [25025090]



Nota: Elaborado por el Autor (2024) con la herramienta Google Colab con Python mediante datos obtenidos de la plataforma DHIME del IDEAM (2024).

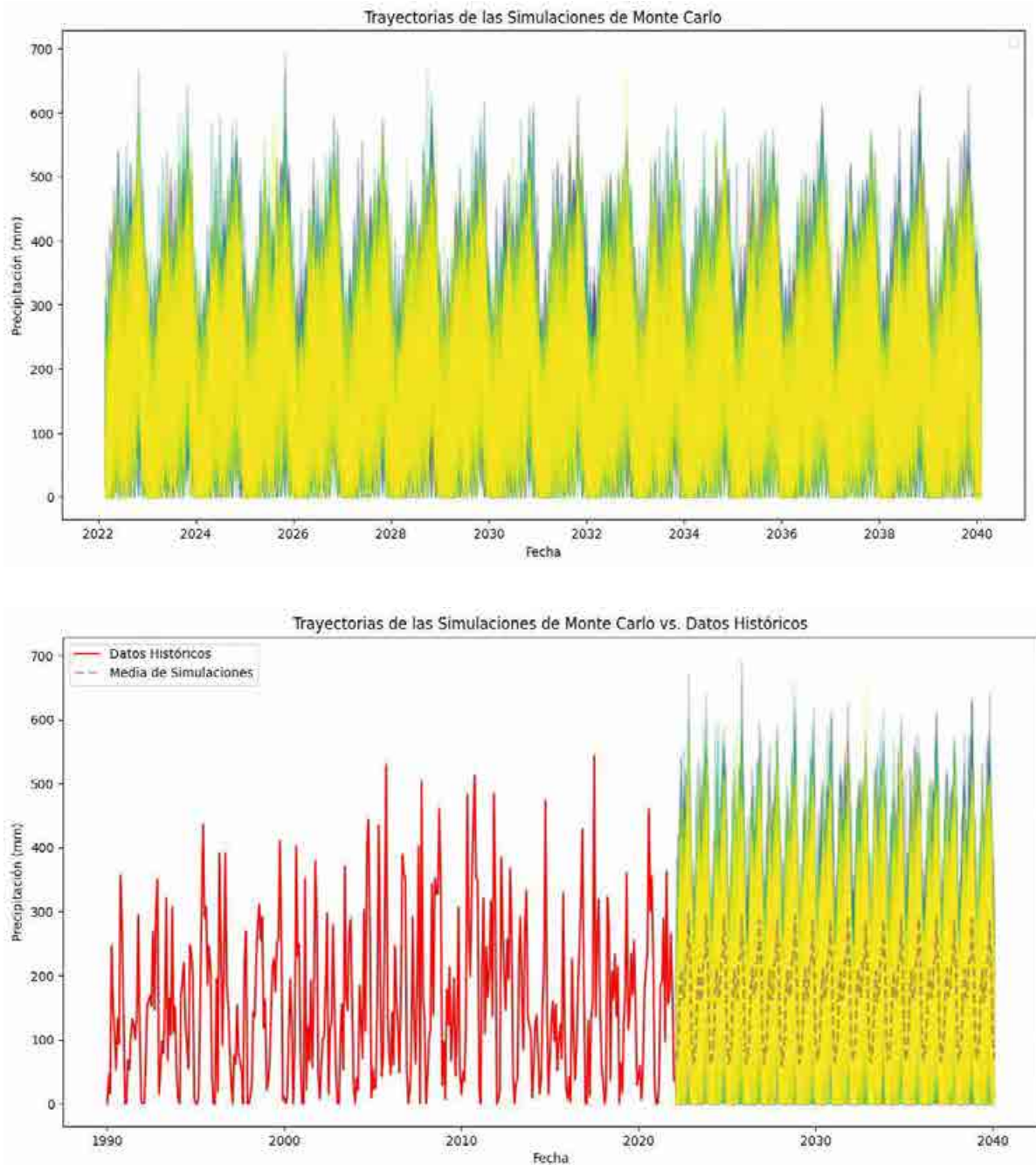
Figura 117. Simulaciones Vs Datos Históricos para la estación LOS NEGRITOS [25021200]



Nota: Elaborado por el Autor (2024) con la herramienta Google Colab con Python mediante datos obtenidos de la plataforma DHIME del IDEAM (2024).

***Estación Para el Municipio de Tamalameque Cesar***

Figura 118. Simulaciones Vs Datos Históricos para la estación TAMALAMEQUE [25020090]

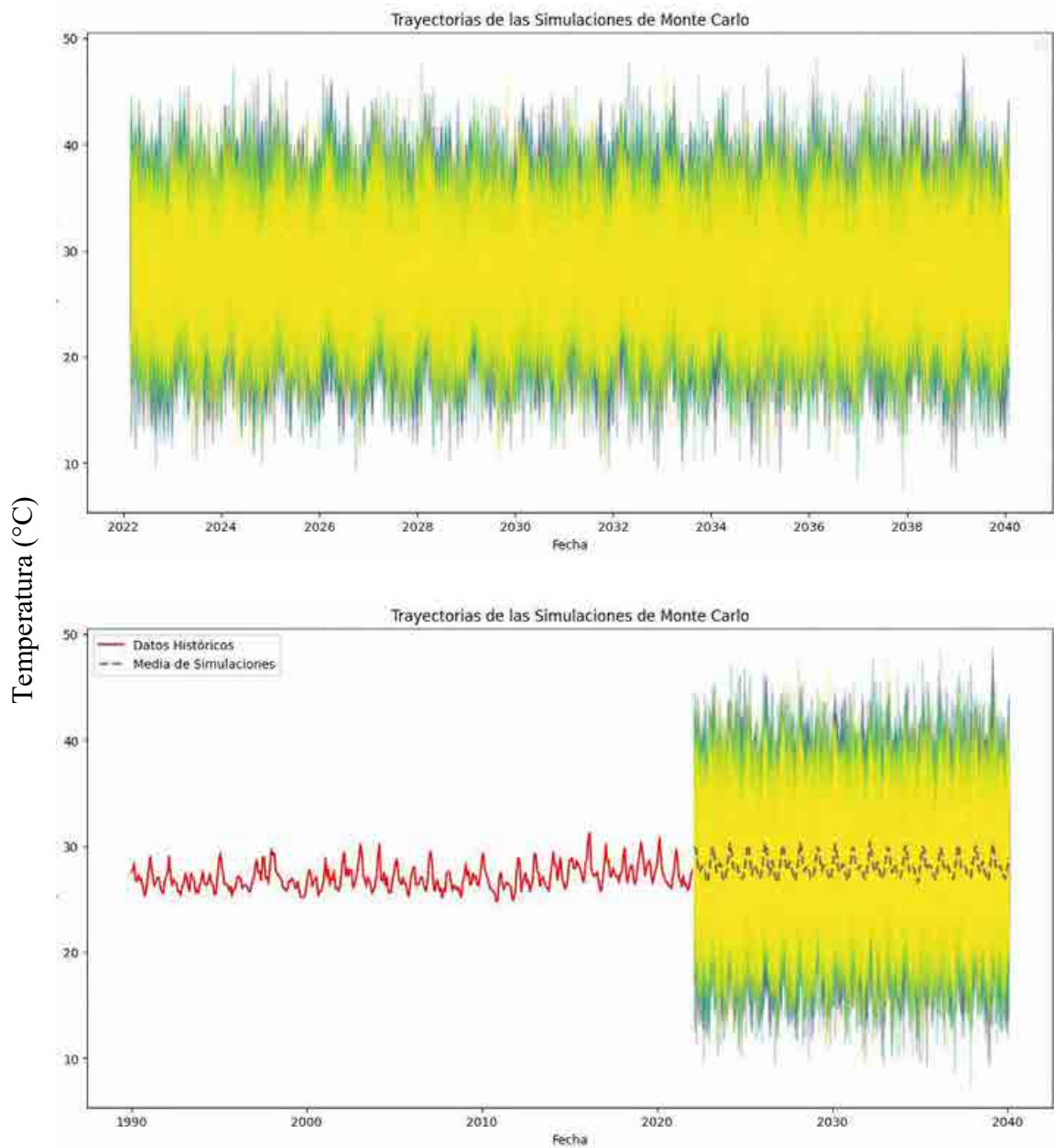


Nota: Elaborado por el Autor (2024) con la herramienta Google Colab con Python mediante datos obtenidos de la plataforma DHIME del IDEAM (2024).

## Anexos Simulaciones para la Variable de Temperatura

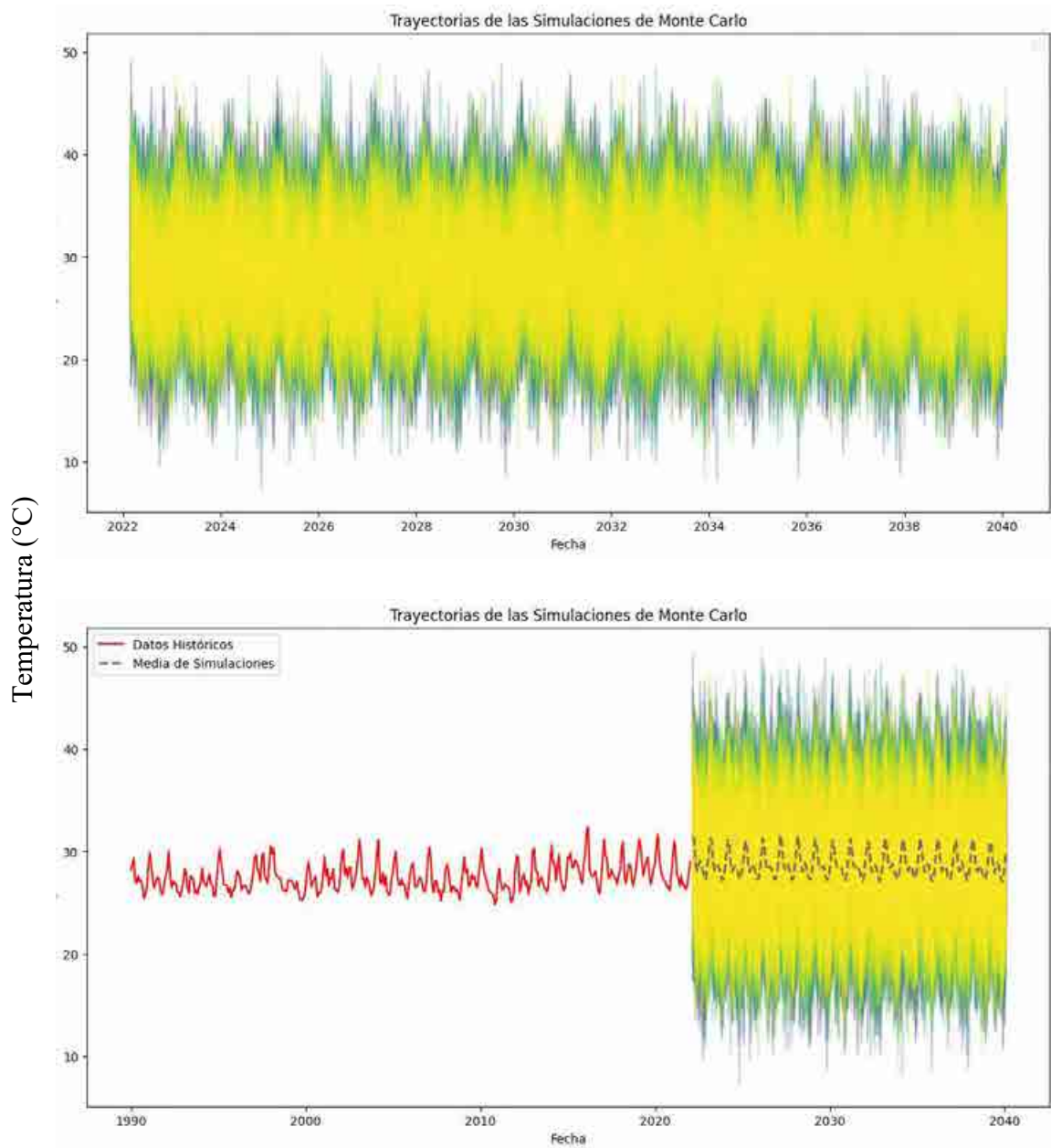
### *Estaciones Para el Municipio de Chimichagua Cesar*

Figura 119. Simulaciones Vs Datos Históricos para la estación CHIMICHAGUA [25021240]



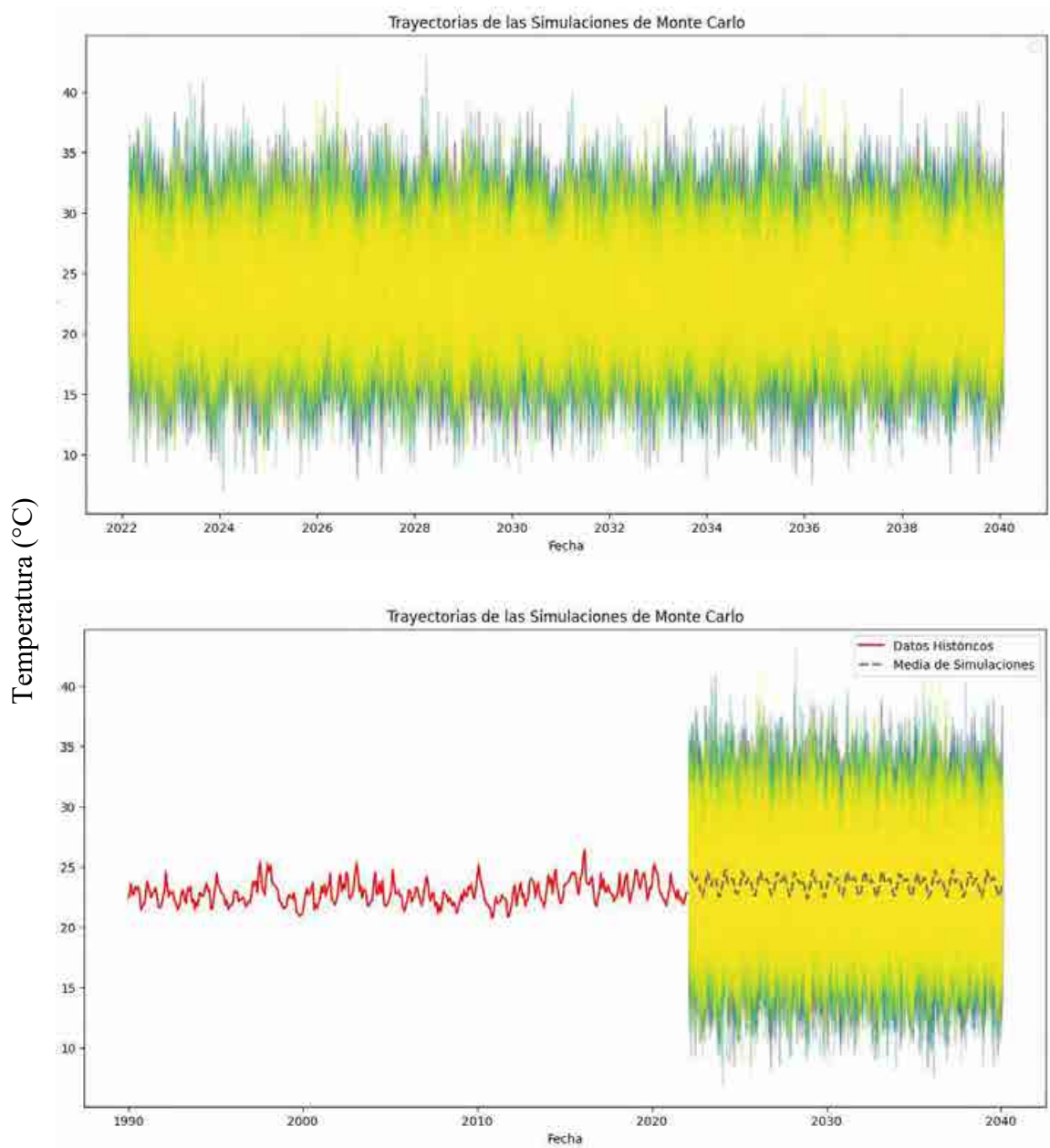
Nota: Elaborado por el Autor (2024) con la herramienta Google Colab con Python mediante datos obtenidos de la plataforma DHIME del IDEAM (2024).

Figura 120. Simulaciones Vs Datos Históricos para la estación EL CANAL [25020240]



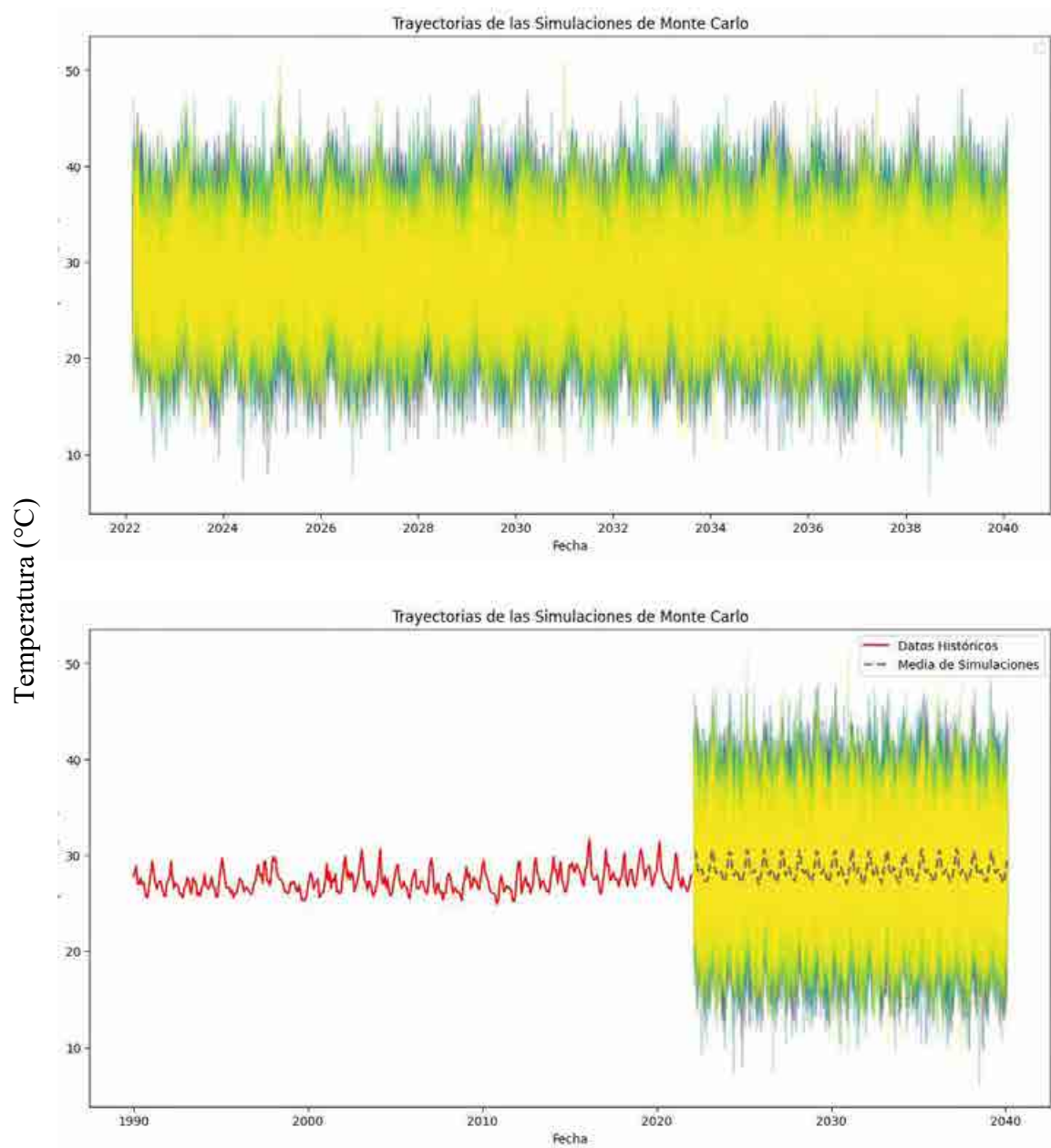
Nota: Elaborado por el Autor (2024) con la herramienta Google Colab con Python mediante datos obtenidos de la plataforma DHIME del IDEAM (2024).

Figura 121. Simulaciones Vs Datos Históricos para la estación HACIENDA EL TERROR [25020650]



Nota: Elaborado por el Autor (2024) con la herramienta Google Colab con Python mediante datos obtenidos de la plataforma DHIME del IDEAM (2024).

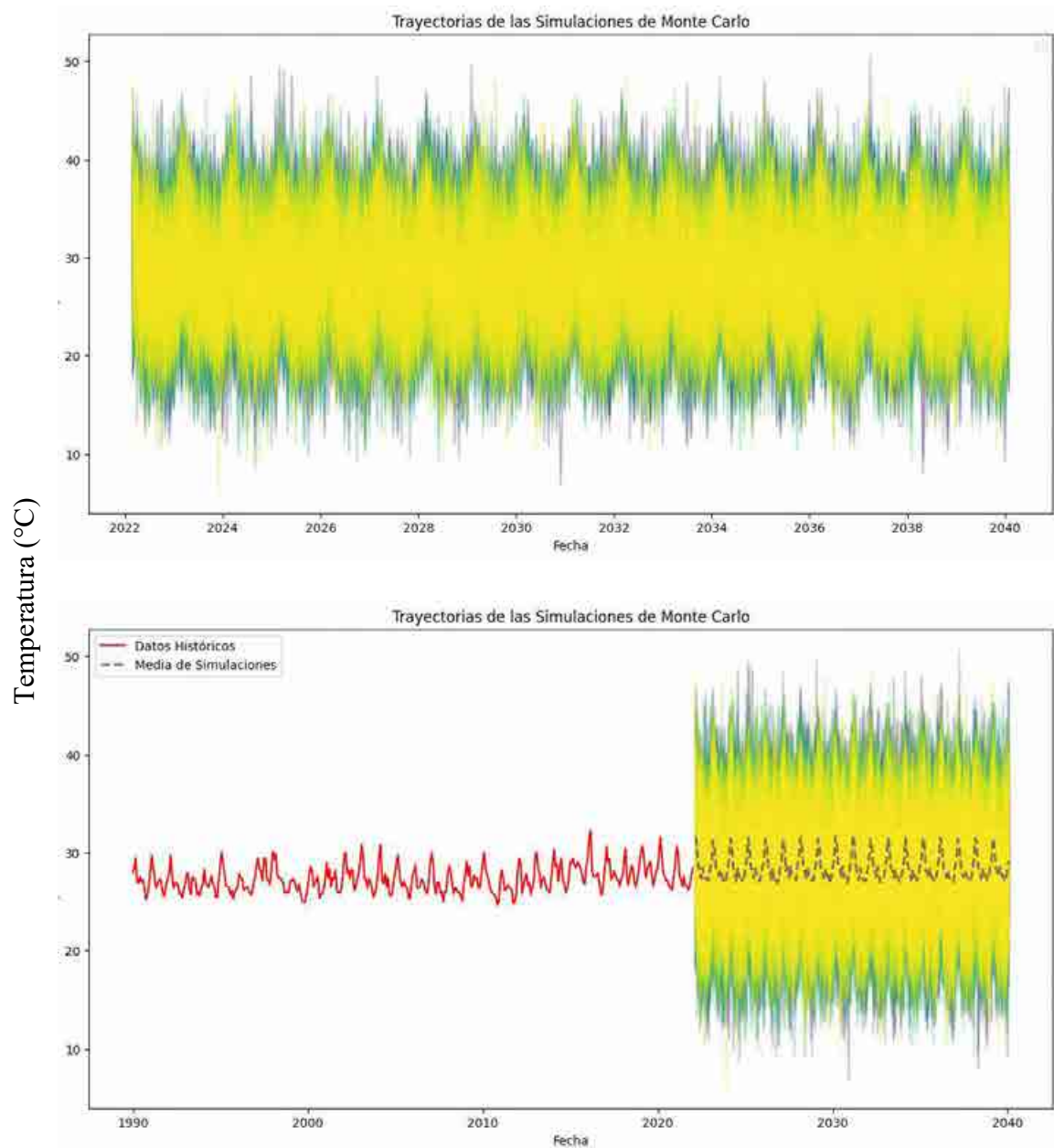
Figura 122. Simulaciones Vs Datos Históricos para la estación SALOA [25020270]



Nota: Elaborado por el Autor (2024) con la herramienta Google Colab con Python mediante datos obtenidos de la plataforma DHIME del IDEAM (2024).

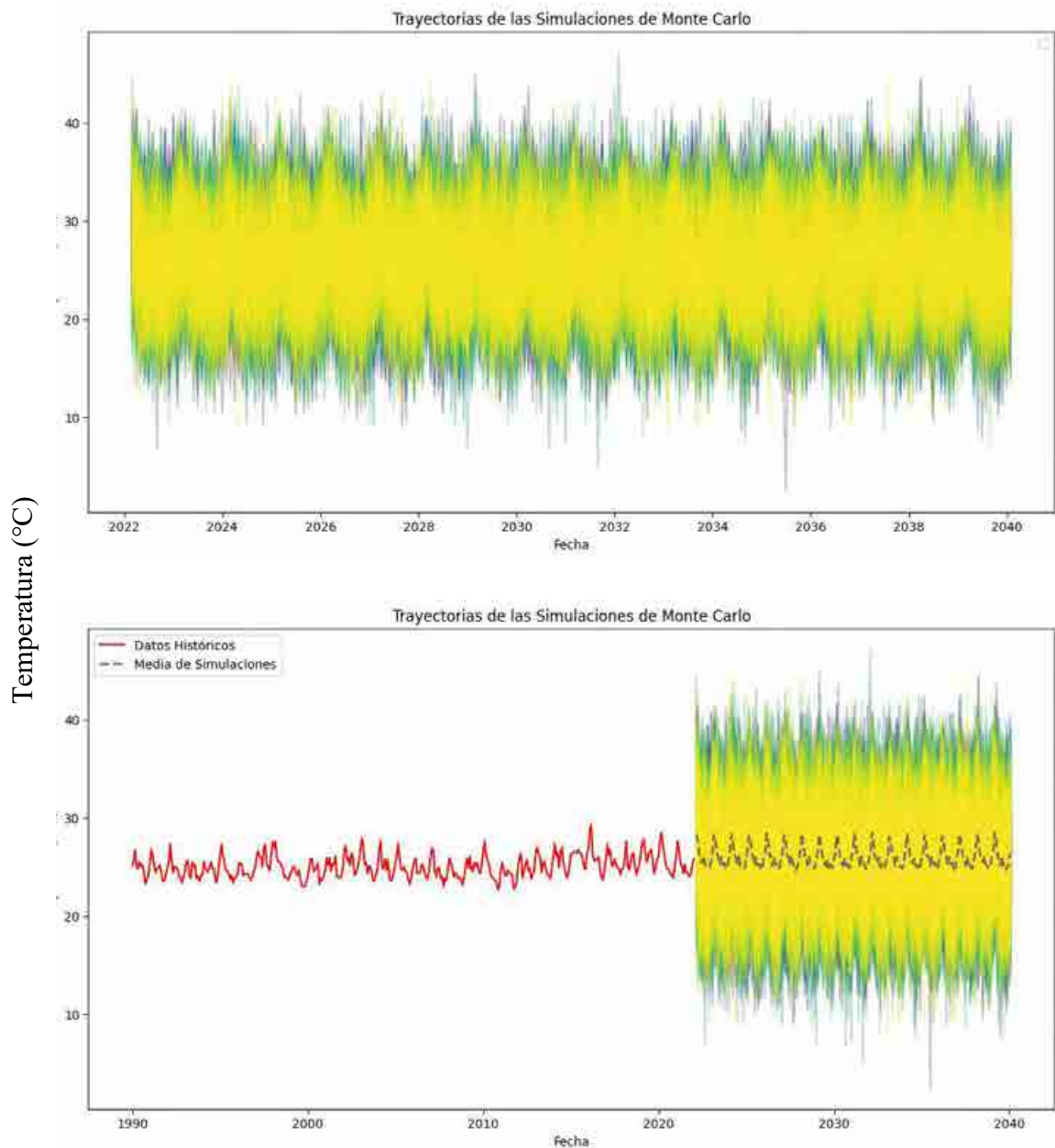
***Estaciones para el Municipio de Chiriguana.***

Figura 123. Simulaciones Vs Datos Históricos para la estación CHIRIGUANA [25025250]



Nota: Elaborado por el Autor (2024) con la herramienta Google Colab con Python mediante datos obtenidos de la plataforma DHIME del IDEAM (2024).

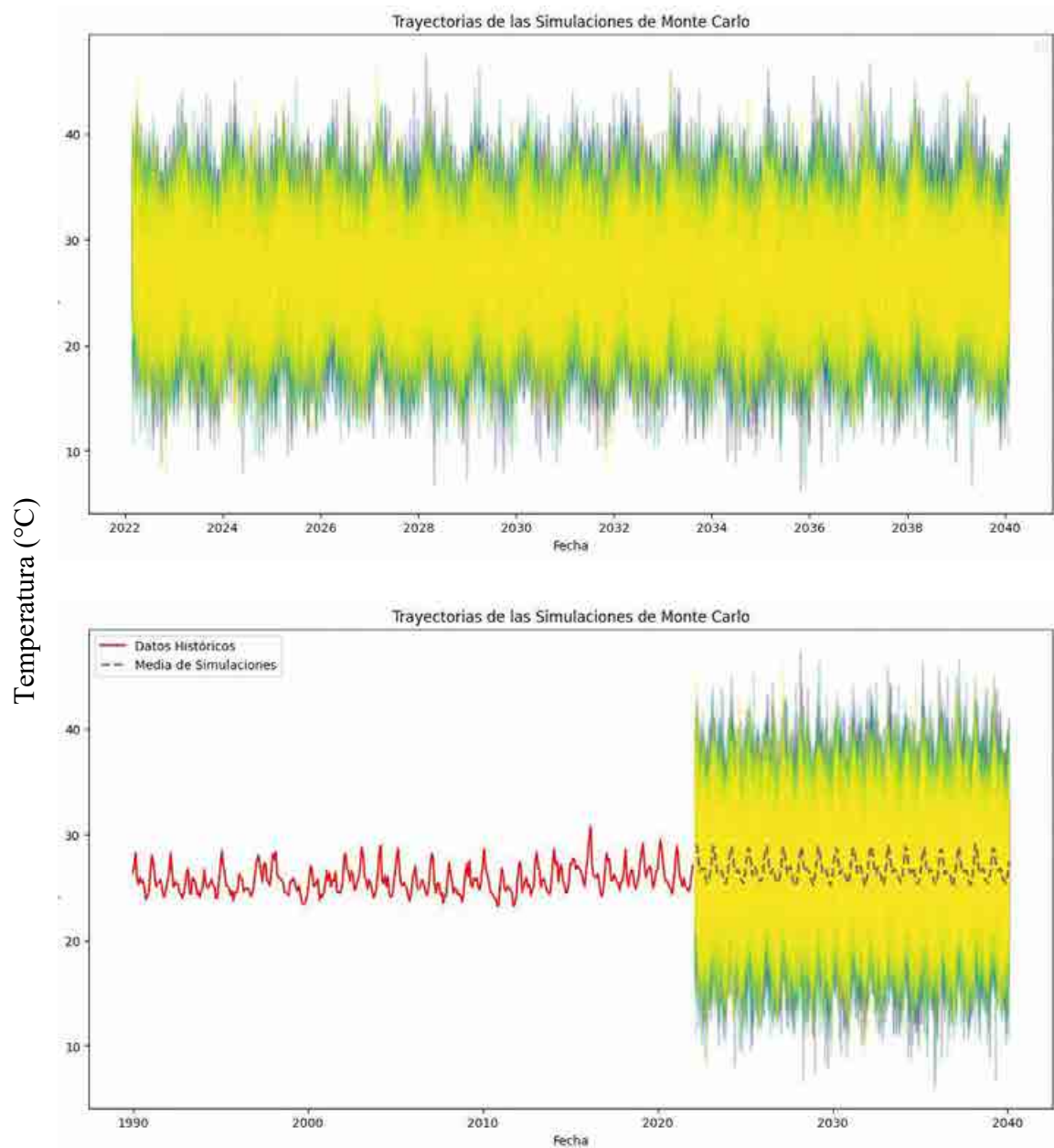
Figura 124. Simulaciones Vs Datos Históricos para la estación RINCONHONDO [25020260]



Nota: Elaborado por el Autor (2024) con la herramienta Google Colab con Python mediante datos obtenidos de la plataforma DHIME del IDEAM (2024).

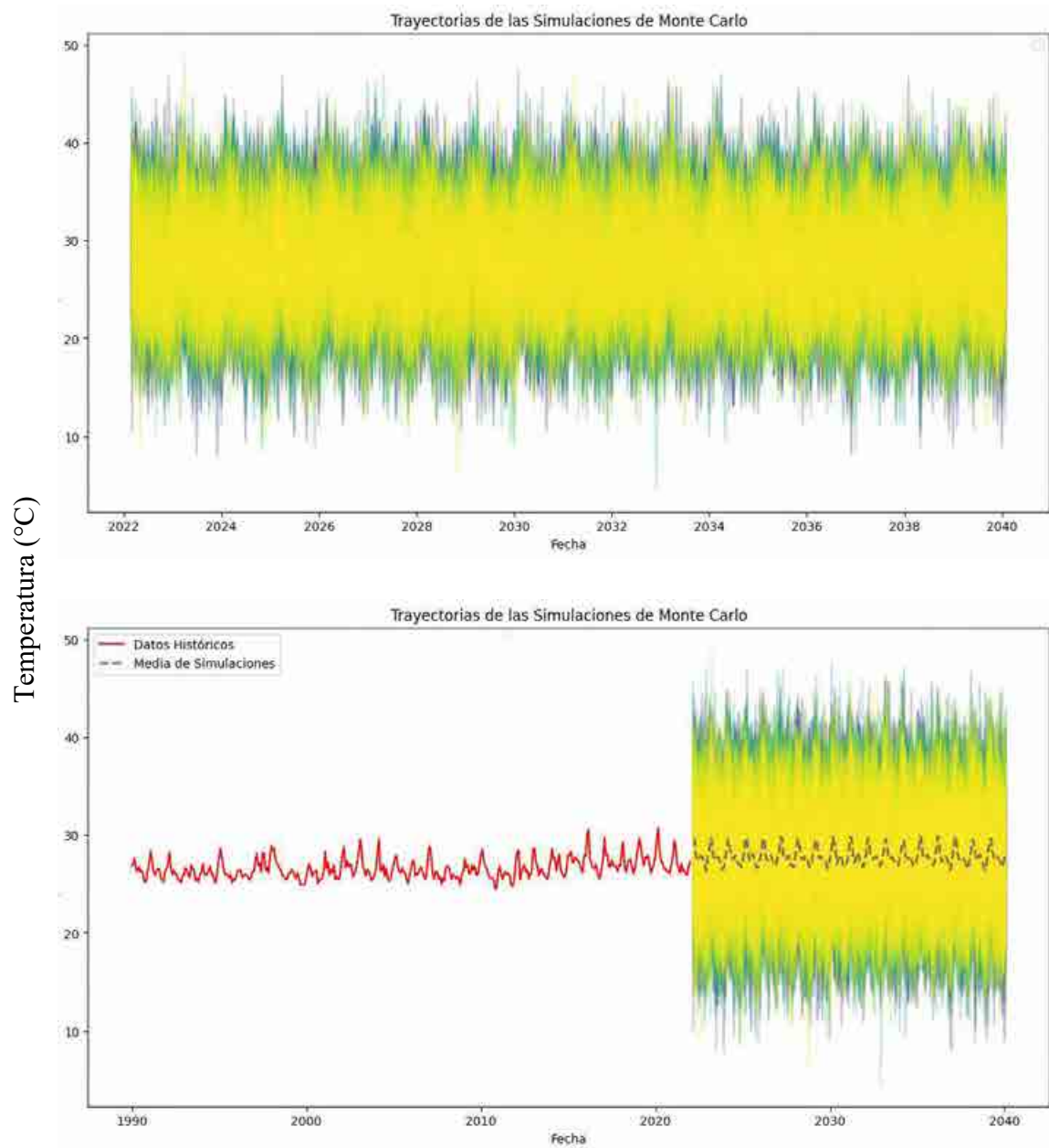
***Estaciones para el Municipio de Curumani***

Figura 125. Simulaciones Vs Datos Históricos para la estación CURUMANI [25020250]



Nota: Elaborado por el Autor (2024) con la herramienta Google Colab con Python mediante datos obtenidos de la plataforma DHIME del IDEAM (2024).

Figura 126. Simulaciones Vs Datos Históricos para la estación POPONTE [25020690]



Nota: Elaborado por el Autor (2024) con la herramienta Google Colab con Python mediante datos obtenidos de la plataforma DHIME del IDEAM (2024).

Figura 127. Simulaciones Vs Datos Históricos para la estación PRIMAVERA LA [25020920]

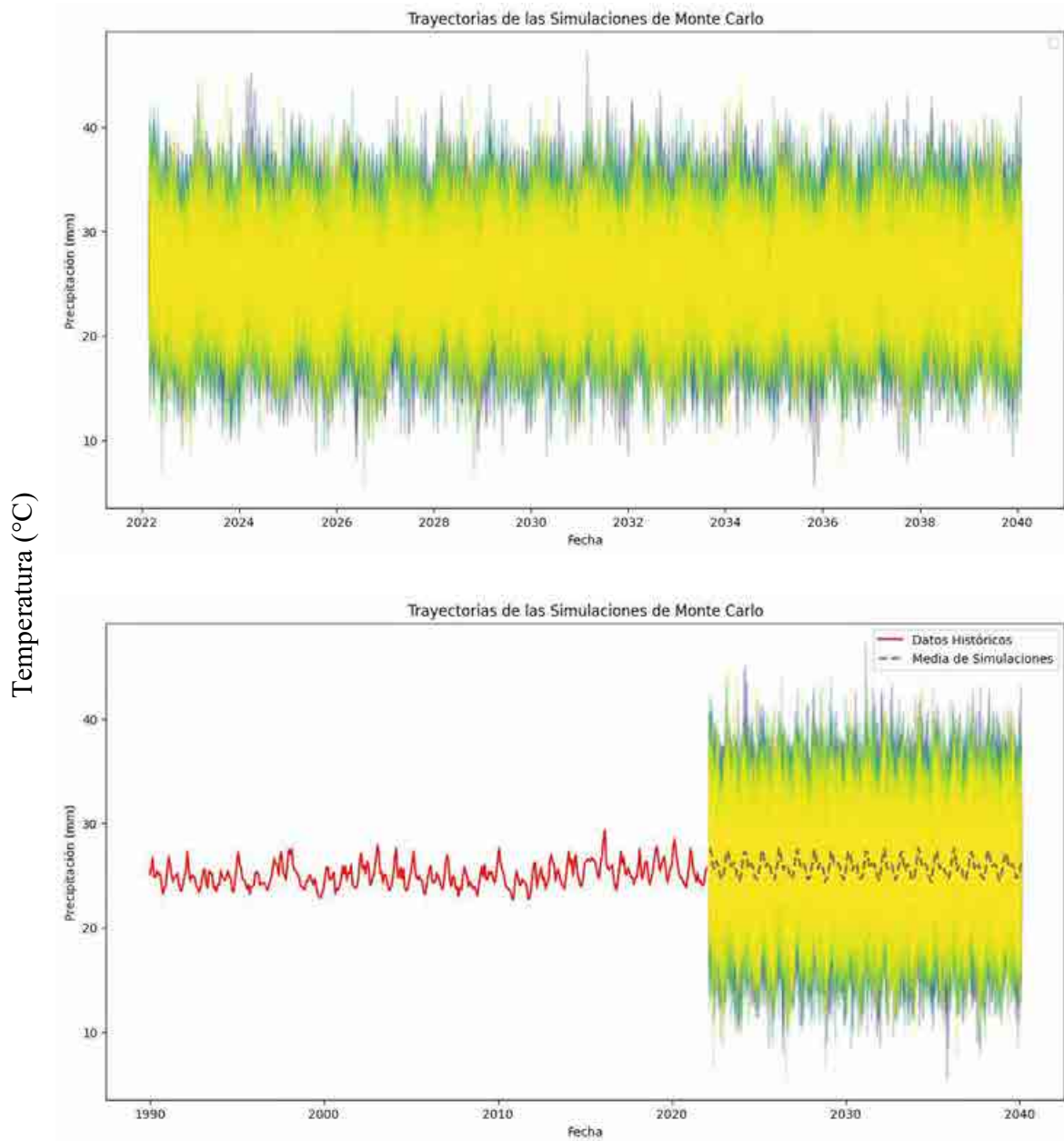
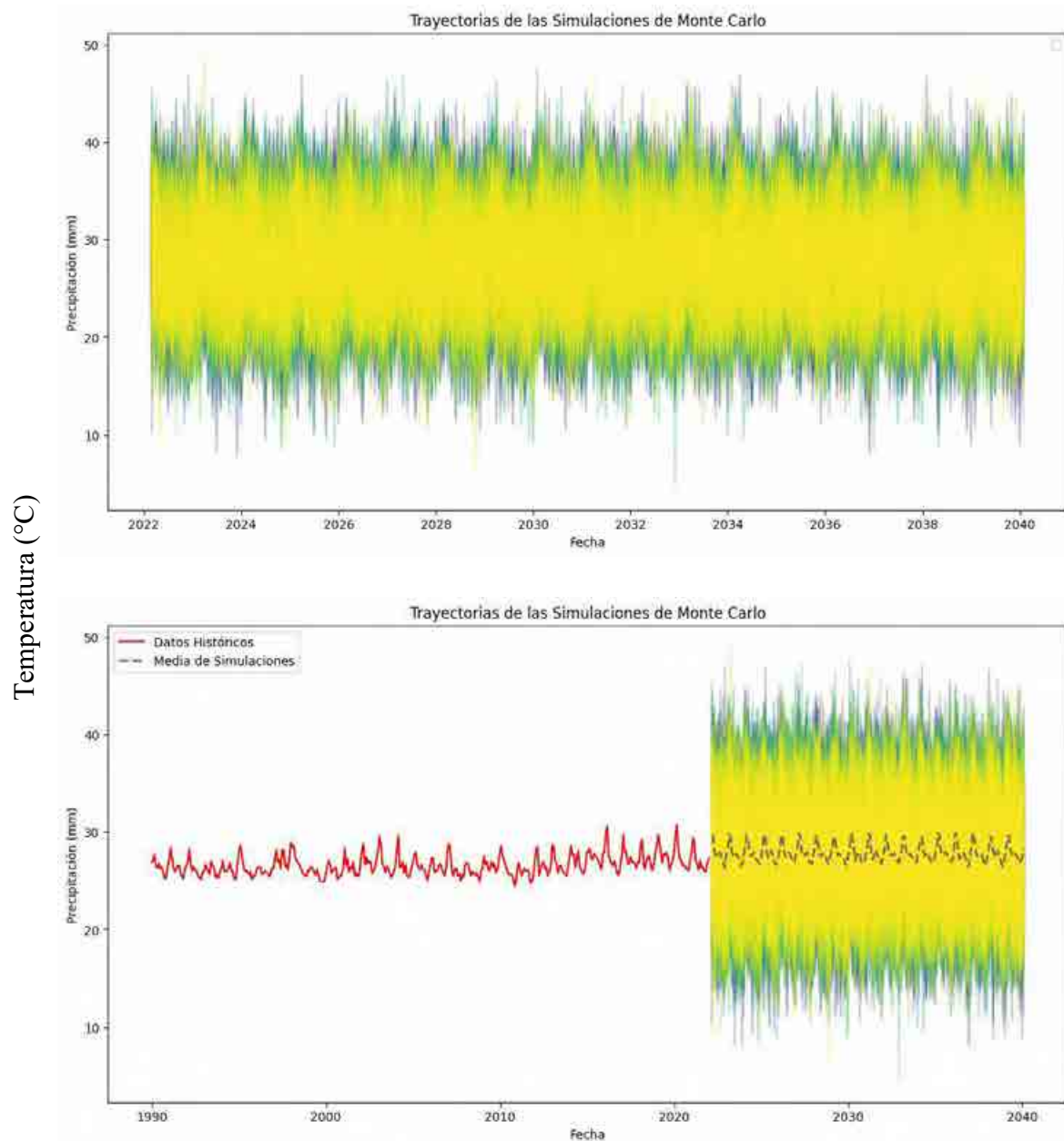
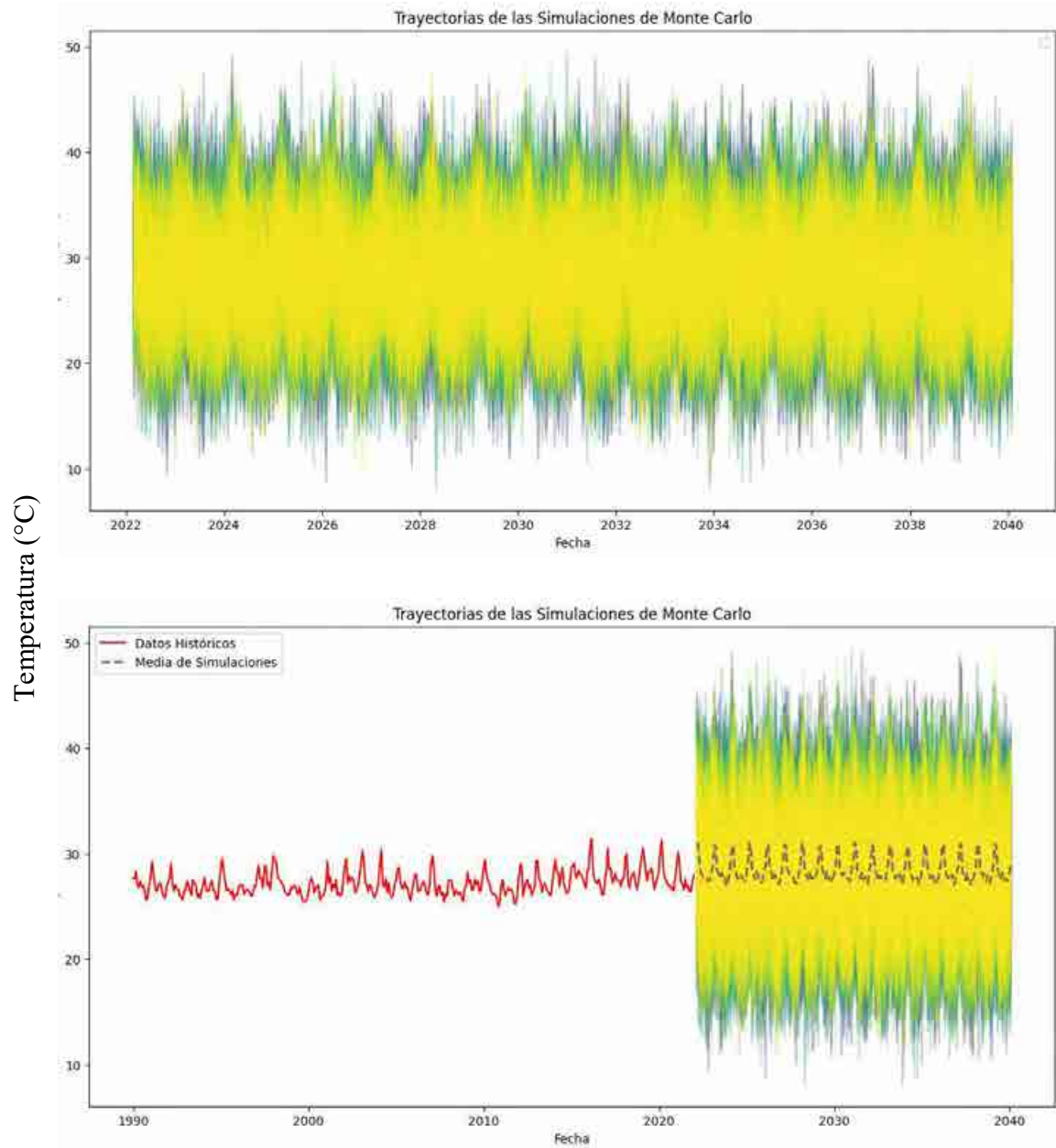


Figura 128. Simulaciones Vs Datos Históricos para la estación ZAPATOZA [25020660]



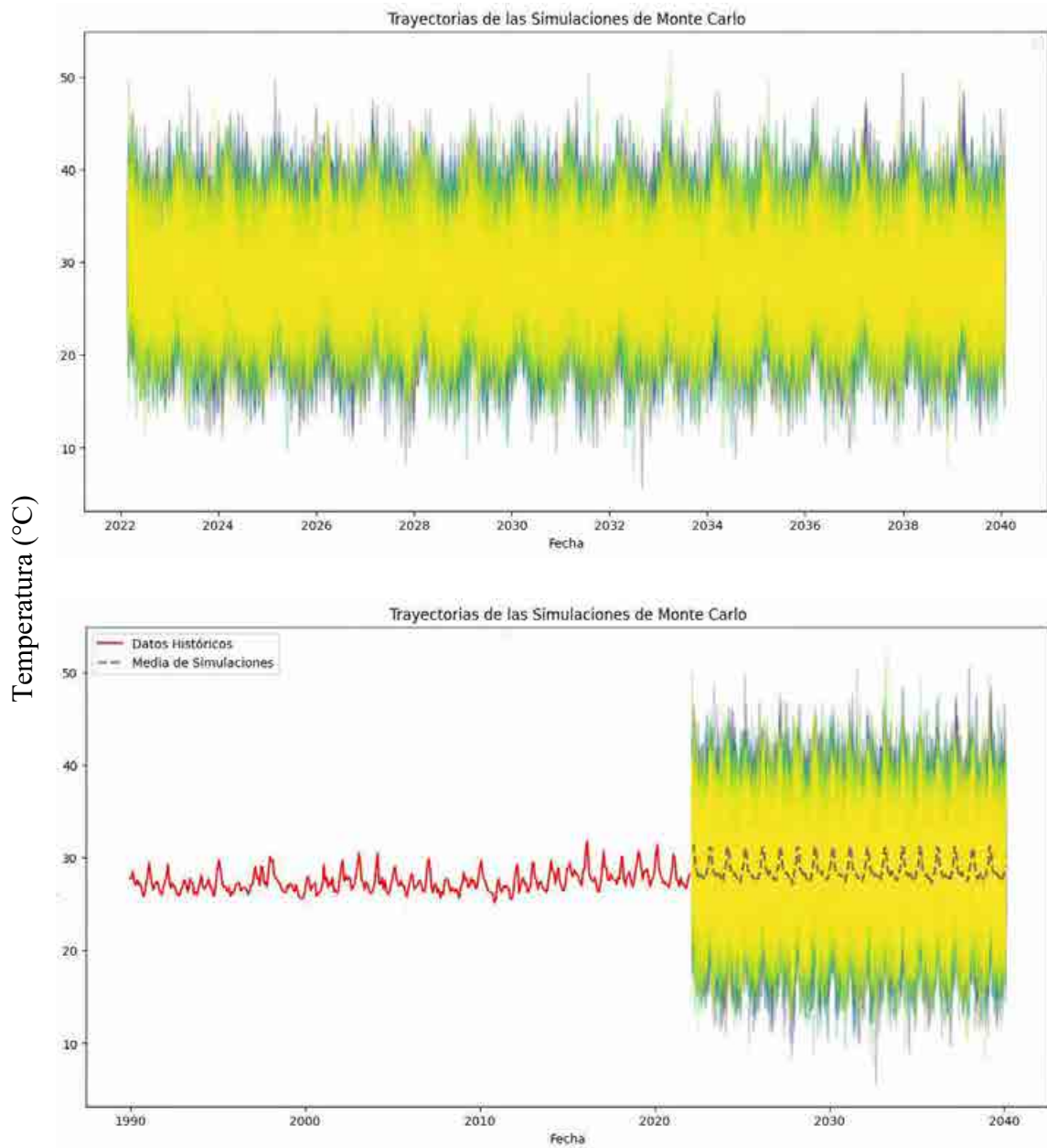
***Estaciones para el Municipio del El Banco Magdalena***

Figura 129. Simulaciones Vs Datos Históricos para la estación AEROPUERTO LAS FLORES [25025090]



Nota: Elaborado por el Autor (2024) con la herramienta Google Colab con Python mediante datos obtenidos de la plataforma DHIME del IDEAM (2024).

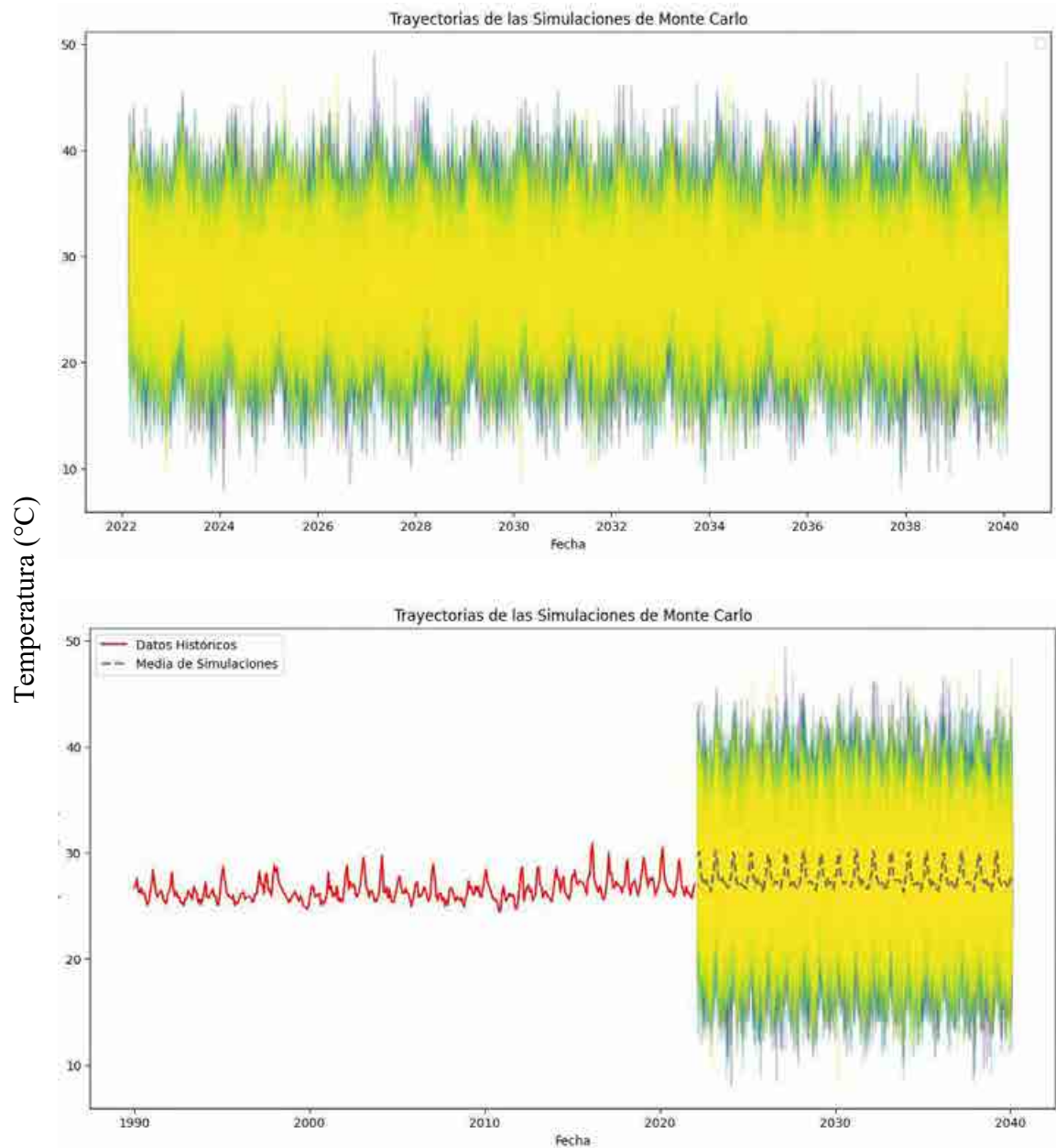
Figura 130. Simulaciones Vs Datos Históricos para la estación LOS NEGRITOS [25021200]



Nota: Elaborado por el Autor (2024) con la herramienta Google Colab con Python mediante datos obtenidos de la plataforma DHIME del IDEAM (2024).

***Estación para el Municipio de Tamalameque Cesar***

Figura 131. Simulaciones Vs Datos Históricos para la estación TAMALAMEQUE [25020090]



Nota: Elaborado por el Autor (2024) con la herramienta Google Colab con Python mediante datos obtenidos de la plataforma DHIME del IDEAM (2024).

## Anexos Capturas de Pantalla de Obtención de Datos, Interpolación IDW e Implementación del Modelo

Figura 132. Obtención de Datos de Precipitación

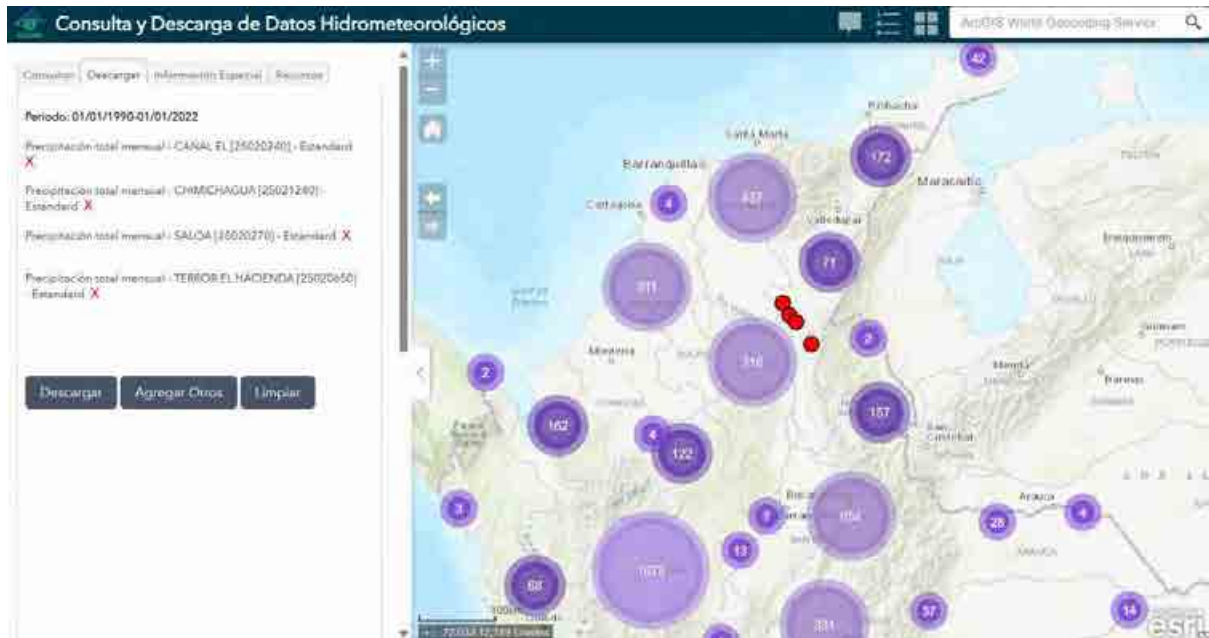
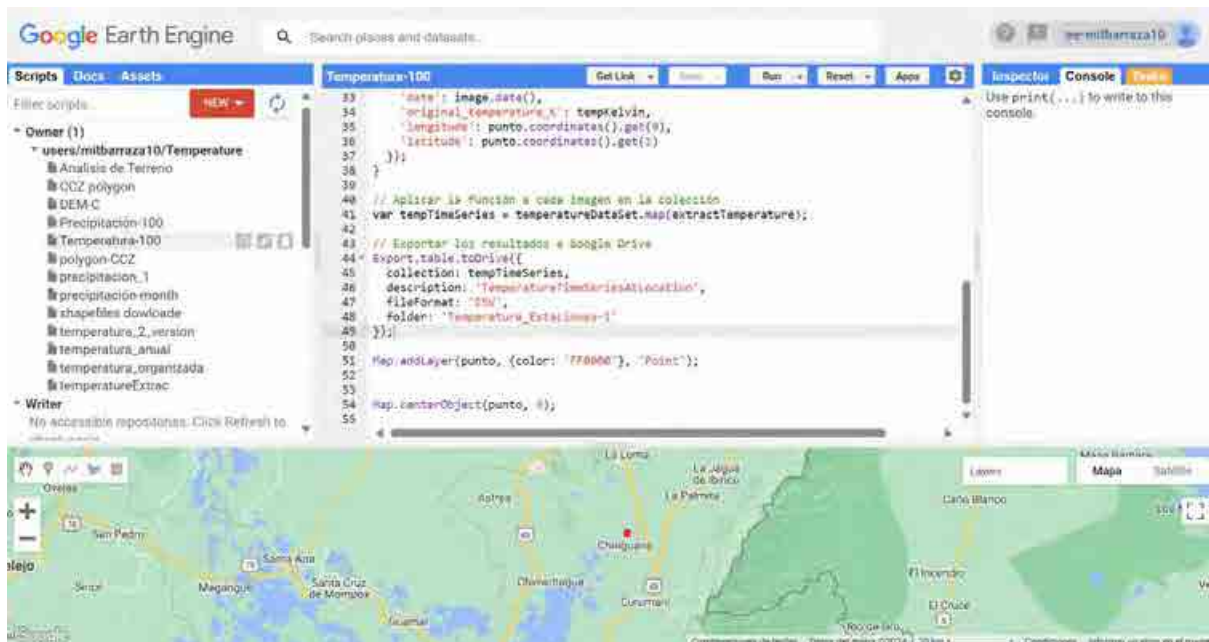


Figura 133. Obtención de datos de Temperatura



Nota: Elaborado por el Autor (2024) con la herramienta Google Colab con Python mediante datos obtenidos de la plataforma DHIME del IDEAM (2024).

Figura 134. Código Python de Implementación del Modelo

21/10/24, 3:11 p.m.

Copia de Montecarlos\_temperaturas.ipynb - Colab

```
import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt
import seaborn as sns
import numpy as np
import statsmodels.api as sm
import itertools
from joblib import Parallel, delayed
from statsmodels.graphics.tsaplots import plot_acf, plot_pacf
from statsmodels.tsa.stattools import adfuller
from statsmodels.stats.diagnostic import acorr_ljungbox
from statsmodels.tsa.arima.model import ARIMA
from statsmodels.tsa.seasonal import seasonal_decompose
from statsmodels.graphics.tsaplots import plot_acf
from scipy.stats import norm
from scipy.stats import gamma
import warnings
from sklearn.cluster import KMeans
from sklearn.metrics import silhouette_score
warnings.filterwarnings("ignore")

df = pd.read_csv('chmichagua.csv')

datos = df[['Fecha', 'Valor']]

Comienza a programar o generar con IA.

datos['Fecha'] = pd.to_datetime(datos['Fecha'])
datos.set_index('Fecha', inplace=True)

df_filtrado = df[df['Fecha'] > '2010-01-01']

datos.head()


```

Fecha	Valor
1990-01-01	27.537179
1990-02-01	27.724259
1990-03-01	28.366988
1990-04-01	26.746489
1990-05-01	28.701225

```

datos['Valor'].mean()

26.504153771050415

plt.figure(figsize = (8,4))
datos['Valor'].plot(color = 'red')
plt.title('Serie de Tiempo Estación CHIMICHAGUA [25021240]')
plt.ylabel('Valor Precipitación (mm)')
plt.show()

```



### ▼ Ajuste de Modelo

```
# 1. Ajuste del modelo SARIMA
modelo = sm.tsa.SARIMAX(datos['Valor'], order=(2,0,2), seasonal_order=(1,1,0,12))
results = modelo.fit()

residuos = results.resid
```

<https://colab.research.google.com/drive/1Q0qP9j-62s-L0usizR6uQHa-Z6kG5X6P#scrollTo=1SDvKoG34qTV&printMode=true>

3/9

21/10/24, 3:11 p.m.

Copia de Montecarlos\_temperaturas.ipynb - Colab

### ▼ Prueba de Ljung-Box

```
ljung_box_test = acorr_ljungbox(residuos, lags=[10], return_df=True)

# Resultados del test
print(ljung_box_test)
```

	lb_stat	lb_pvalue
10	1297.037855	1.667134e-272

### ▼ Determinar el número óptimo de clústeres:

```
inercia = []
K_range = range(2, 11) # Probar K de 2 a 10

for K in K_range:
    kmeans = KMeans(n_clusters=K, random_state=42)
    kmeans.fit(simulaciones_transpuestas)
    inercia.append(kmeans.inertia_)

# Graficar la inercia vs K
plt.figure(figsize=(8,4))
plt.plot(K_range, inercia, marker='o')
plt.title('Método del Codo para Determinar K')
plt.xlabel('Número de Clústeres K')
plt.ylabel('Inercia')
plt.show()
```

### ▼ Aplicar K-means con el número seleccionado de clústeres:

```
K = 4
kmeans = KMeans(n_clusters=K, random_state=42)
kmeans.fit(simulaciones_transpuestas)

# Obtener las etiquetas de clúster para cada simulación
labels = kmeans.labels_
```

### ▼ Calcular la Probabilidad de Cada Grupo de Escenarios

```
from collections import Counter

contador_clústeres = Counter(labels)
total_simulaciones = len(labels)

probabilidades = {}
for clúster, conteo in contador_clústeres.items():
    probabilidades[clúster] = conteo / total_simulaciones * 100 # Porcentaje

print("Probabilidades de cada clúster:")
for clúster, prob in probabilidades.items():
    print(f"Clúster {clúster}: {prob:.2f}%")
```

✓ Visualización de los Escenarios Más Representativos y sus Probabilidades

<https://colab.research.google.com/drive/1Q0qP9j-62s-L0usizR6uQHa-Z6kG5X6P#scrollTo=1SDvKoG34qTV&printMode=true>

6/9

21/10/24, 3:11 p.m.

Copia de Montecarlos\_temperaturas.ipynb - Colab

```
# Crear un DataFrame para las trayectorias representativas
trayectorias_representativas = pd.DataFrame(index=fechas_futuras)

for clúster in range(K):
    # Seleccionar simulaciones en el clúster actual
    indices_clúster = np.where(labels == clúster)[0]
    simulaciones_clúster = simulaciones_transpuestas[indices_clúster]
    # Calcular la media
    media_clúster = simulaciones_clúster.mean(axis=0)
    trayectorias_representativas[f'Clúster {clúster}'] = media_clúster

# Graficar las trayectorias representativas
plt.figure(figsize=(14,7))

for clúster in range(K):
    plt.plot(fechas_futuras, trayectorias_representativas[f'Clúster {clúster}'], label=f'Clúster {clúster} -\nProb:{{probabilidades[clúster]

plt.title('Trayectorias de Escenarios más Críticos Temperatura vs. Datos Histórico')
plt.xlabel('Fecha')
plt.ylabel('Temperatura (°C)')
plt.legend(loc='center left', bbox_to_anchor=(1, 0.5)) # Coloca la leyenda fuera del gráfico
plt.show()

plt.figure(figsize=(14,7))

# Crear un DataFrame para las trayectorias representativas
trayectorias_representativas = pd.DataFrame(index=fechas_futuras)

for clúster in range(K):
    # Seleccionar simulaciones en el clúster actual
    indices_clúster = np.where(labels == clúster)[0]
    simulaciones_clúster = simulaciones_transpuestas[indices_clúster]
    # Calcular la media del clúster
    media_clúster = simulaciones_clúster.mean(axis=0)
    trayectorias_representativas[f'Clúster {clúster}'] = media_clúster

    # Calcular la variación promedio (absoluta o relativa) entre datos históricos y media del clúster
    # Truncamos datos históricos para que coincidan en el rango de fechas de las simulaciones futuras
    datos_historicos_truncados = datos['Valor'].iloc[-len(fechas_futuras):]

    # Calcular la variación como el porcentaje de diferencia respecto a los datos históricos
    variacion_promedio = ((media_clúster - datos_historicos_truncados.values).mean())

    # Graficar las trayectorias representativas de cada clúster en el mismo gráfico
    plt.plot(fechas_futuras, trayectorias_representativas[f'Clúster {clúster}'], label=f'Clúster {clúster} -\nProb:{{probabilidades[clúster]

# Añadir títulos y etiquetas comunes
plt.title('Trayectorias de Escenarios más Críticos Temperatura vs. Datos Histórico')
plt.xlabel('Fecha')
plt.ylabel('Temperatura (°C)')
plt.legend(loc='center left', bbox_to_anchor=(1, 0.5)) # Coloca la leyenda fuera del gráfico

# Mostrar el gráfico

trayectorias_representativas.to_csv('trayectorias_criticas.csv')

cluster = trayectorias_representativas['Clúster 2']

cluster.mean()
```



Figura 135. Código Implementación IDW

21/10/24, 3:24 p.m.

IDW-METHOD-Copy1.ipynb - Colab

```

import pandas as pd
import numpy as np
from scipy.spatial import distance
from math import radians
from sklearn.metrics.pairwise import haversine_distances

hTerror = pd.read_csv('HterrorImp_na.csv')
serieCanal = pd.read_csv('sinAtipicoCanal.csv')
serieChimichagua = pd.read_csv('SinAtipicoChimichagua.csv')
serieSaloa = pd.read_csv('sinAtipicoSaloa.csv')

def distancia(lat1, lon1, lat2, lon2):
    # Convertir de grados a radianes
    lat1, lon1, lat2, lon2 = map(radians, [lat1, lon1, lat2, lon2])
    # Calcular la distancia usando haversine_distances
    result = haversine_distances([[lat1, lon1], [lat2, lon2]])[0, 1]
    r = 6371 # Radio de la Tierra en kilómetros
    return result * r

def calcular_peso(distancia, p):
    if distancia == 0:
        return np.inf
    return 1 / (distancia ** p)

def imputar(df4, estaciones, p):
    df4_imputado = df4.copy()
    lat4, lon4 = df4['Latitud'].iloc[0], df4['Longitud'].iloc[0]
    distancias = []
    pesos = []

    for df in estaciones:
        df.loc[:, 'Fecha'] = pd.to_datetime(df['Fecha']) # Convertir la columna 'Fecha' utilizando .loc para evitar SettingWithCopyWarning
        latX, lonX = df['Latitud'].iloc[0], df['Longitud'].iloc[0]
        dist = distancia(lat4, lon4, latX, lonX)
        distancias.append(dist)
        pesos.append(calcular_peso(dist, p))

    df4_imputado.loc[:, 'Fecha'] = pd.to_datetime(df4_imputado['Fecha'])

    for i in range(len(df4_imputado)):
        if pd.isna(df4_imputado.iloc[i]['Valor']):
            fecha = df4_imputado.iloc[i]['Fecha']
            valores = []
            for df, peso_actual in zip(estaciones, pesos):
                pX = df[df["Fecha"] == fecha]["Valor"].values[0] if not df[df["Fecha"] == fecha].empty else np.nan
                valores.append(pX)

            valores_validos = [v for v in valores if not np.isnan(v)]
            pesos_validos = [w for v, w in zip(valores, pesos) if not np.isnan(v)]

            if valores_validos:
                p4 = sum(v * w for v, w in zip(valores_validos, pesos_validos)) / sum(pesos_validos)
                df4_imputado.at[i, 'Valor'] = p4 # Usar .at para asignar valores directamente

    return df4_imputado

HterrorCompleto = imputar(hTerror, [serieCanal, serieSaloa, serieChimichagua], p=2)

HterrorCompleto[(HterrorCompleto['Fecha'] >= '2003-04-01') & (HterrorCompleto['Fecha'] <= '2006-12-01')]

HterrorCompleto.to_csv('HterrorImp.csv')

Comienza a programar o generar con IA.

```



Figura 136. Código para Proyección Poblacional en el CCZ.

28/10/24, 1:00 p.m.

Población.ipynb - Colab

```
import numpy as np
import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt
from sklearn.metrics import r2_score

# Datos de la población por año
data = {
    'Año': [1985, 1993, 2005, 2018],
    'Poblacion': [142618, 150017, 145530, 165790]
}

df_tamalameque = pd.DataFrame(data)

# Definir los datos de los años y la población
years = np.array(df_tamalameque['Año'])
population = np.array(df_tamalameque['Poblacion'])

# Ajuste lineal
slope_lin, intercept_lin = np.polyfit(years, population, 1)
population_pred_lin = slope_lin * years + intercept_lin
r2_lin = r2_score(population, population_pred_lin)

# Ajuste polinómico de grado 2
coeffs_poly = np.polyfit(years, population, 2)
population_pred_poly = np.polyval(coeffs_poly, years)
r2_poly = r2_score(population, population_pred_poly)

# Ajuste exponencial (log-transformación)
log_population = np.log(population)
coeffs_exp = np.polyfit(years, log_population, 1)
population_pred_exp = np.exp(coeffs_exp[0] * years + coeffs_exp[1])
r2_exp = r2_score(population, population_pred_exp)

#Comparar los R^2
best_fit = max([(r2_lin, "Lineal"), (r2_poly, "Polinómico de grado 2"), (r2_exp, "Exponencial")], key=lambda x: x[0])
best_fit_method = best_fit[1]
print(f"El mejor método de ajuste es: {best_fit_method}")

↔ El mejor método de ajuste es: Polinómico de grado 2

# Graficar los modelos ajustados
plt.figure(figsize=(10, 6))
plt.scatter(years, population, color='black', label='Datos observados')
plt.plot(years, population_pred_lin, label=f'Lineal (R² = {r2_lin:.4f})', linestyle='--', color='blue')
plt.plot(years, population_pred_poly, label=f'Polinómico (R² = {r2_poly:.4f})', linestyle='-.', color='green')
plt.plot(years, population_pred_exp, label=f'Exponencial (R² = {r2_exp:.4f})', linestyle=':', color='red')

# Añadir detalles al gráfico
plt.title(f"Ajuste de Modelos para Proyección Poblacional - Mejor método: {best_fit_method}")
plt.xlabel("Año")
plt.ylabel("Población")
plt.legend()
plt.grid(True)
plt.tight_layout()

# Mostrar el gráfico
plt.show()
```

<https://colab.research.google.com/drive/1rv5VNn6zQZNnQAPG9mY01fYcfow8mz2K#scrollTo=mv7-K9yNgTYL&printMode=true>

1/4

Figura 137. Creación de Mapas de Precipitaciones Y Temperaturas

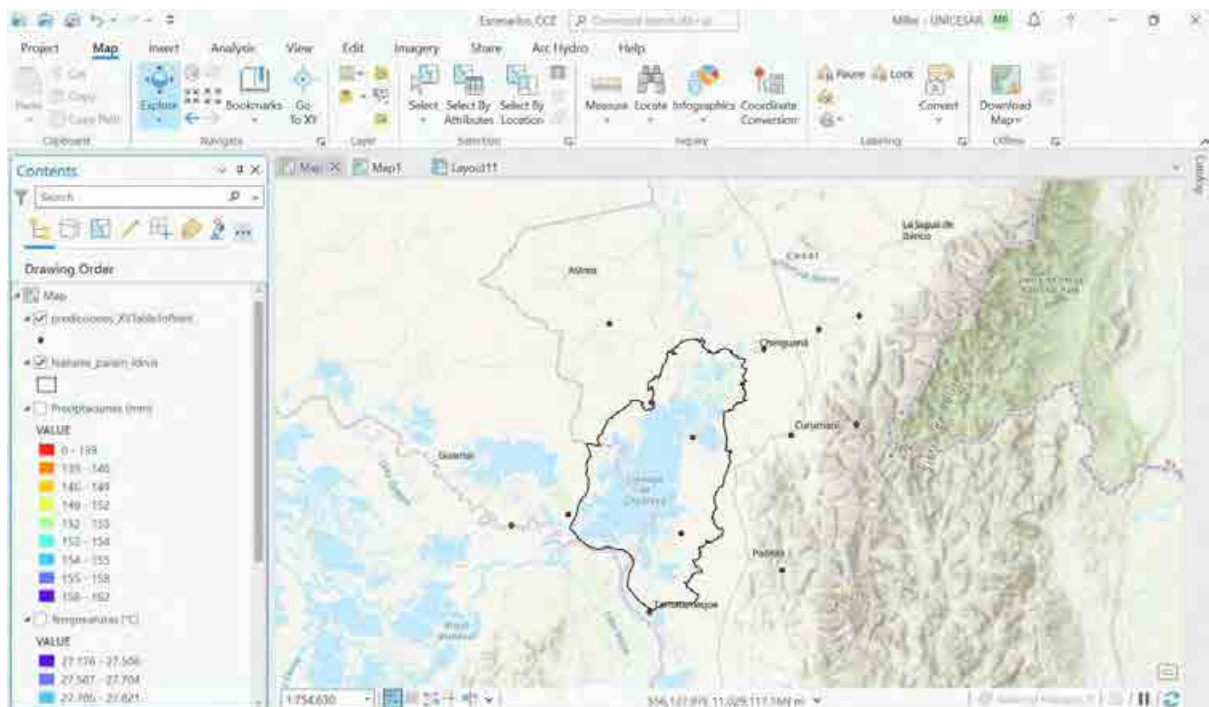


Figura 138. Certificado de Competencia Cursada de Python.



Figura 139. Certificado de competencia cursada de la librería de Python Scikitlearn esencial en este trabajo

