

CAPÍTULO 5

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



<https://doi.org/10.22533/at.ed.200112515045>

Data de aceite: 21/05/2025

Miller Andrés Barraza Rico

Ingeniero Ambiental y Sanitario.
Valledupar, Colombia

Karina Paola Torres Cervera

PhD en Ciencias de la Educación,
Docente Universidad Popular del Cesar
0000-0003-2646-2871

Andry Salgado Restrepo

MSc en Gestión Ambiental, Docente
Universidad Popular del Cesar
<https://orcid.org/0009-0005-2380-2801>

Tatiana Echavarría

Esp Energías Renovables. Docente
Universidad Popular del Cesar
<https://orcid/0009-0001-2345-0026>

RESUMEN: Este estudio evalúa la variabilidad climática en el Complejo Cenagoso de la Zapatosa (CCZ) mediante Simulación de Monte Carlo y modelos SARIMA, con el objetivo de proyectar cambios en precipitación y temperatura entre 2022 y 2040, con base en una metodología cuantitativa y estocástica. Los resultados, obtenidos a partir del análisis de 13 estaciones climáticas y meteorológicas, indican una disminución anual del 1,40%

en precipitaciones y un aumento de 0,96°C en temperatura. Estas tendencias suponen riesgos críticos para la sostenibilidad hídrica, la biodiversidad y la seguridad alimentaria regional. Se concluye que es urgente implementar medidas de adaptación, como gestión eficiente de recursos hídricos y diversificación de cultivos, para mitigar los impactos del cambio climático en el CCZ.

PALABRAS CLAVE: variabilidad climática; Simulación de Monte Carlo; modelos SARIMA; Complejo Cenagoso de la Zapatosa; adaptación al cambio climático.

ASSESSMENT OF CLIMATE VARIABILITY BASED ON PRECIPITATION AND TEMPERATURE DATA USING THE MONTE CARLO SIMULATION METHOD FOR THE ZAPATOSA WETLAND COMPLEX

ABSTRACT: This study assesses climate variability in the Zapatosa Marsh Complex (CCZ) using Monte Carlo Simulation and SARIMA models, with the objective of projecting changes in precipitation and temperature between 2022 and 2040, based on a quantitative and stochastic methodology. The results, obtained from the analysis of 13 climatic and meteorological stations, indicate

an annual decrease of 1.40% in precipitation and an increase of 0.96°C in temperature. These trends pose critical risks to water sustainability, biodiversity, and regional food security. The study concludes that urgent adaptation measures, such as efficient water resource management and crop diversification, are necessary to mitigate the impacts of climate change in the CCZ.

KEYWORDS: climate variability; Monte Carlo Simulation; SARIMA models; Zapata Marsh Complex; climate change adaptation.

INTRODUCCIÓN

El Complejo Cenagoso de la Zapata (CCZ) es el mayor sistema humedales de agua dulce continental de Colombia, con entre 30 000 y 40 000 ha en verano y hasta 70 000 ha en época de lluvias (Minambiente, 2018). Este complejo incluye alrededor de 1900 ciénagas interconectadas entre sí mediante caños, y por ello ha sido declarado Distrito Regional de Manejo Integrado (DRMI) y reconocido como sitio RAMSAR. Además, alberga una riqueza insólita de ecosistemas desde bosques de galería hasta pastizales inundables que sostienen innumerables especies, muchas de ellas endémicas o en peligro, y juegan un papel clave en la regulación climática local y el ciclo hidrológico regional.

Este alberga una notable biodiversidad: 807 especies de plantas vasculares (15 endémicas como *As-trocaryum malybo* y *Clavija latifolia*) y 368 plantas útiles para medicina, construcción y artesanías. En fauna, destacan 39 mamíferos como el mico nocturno (*Aotus griseimembra*) y el jaguar (*Panthera onca*, VU), 208 aves incluyendo el endémico chavarrí (*Chauna chavaria*), y 51 reptiles como el cocodrilo (*Crocodylus acutus*, EN). Entre los 25 anfibios resalta la ranita venenosa (*Dendrobates truncatus*, en-démica), y los 45 peces con especies críticas como el bocachico (*Prochilodus magdalena*). Este ecosistema, vital para la pesca y tradiciones locales.

Los municipios de Curumaní, Chiriguaná, Chimichagua y Tamalameque, en el Cesar, junto con El Banco, en Magdalena, dependen directamente de sus aguas para actividades productivas como la pesca y, por supuesto, para el abastecimiento doméstico. Asimismo, proporciona servicios ecosistémicos esenciales como la provisión de agua, regulación de crecidas y retención de sedimentos, que son la columna vertebral del bienestar rural en esta región.

A pesar de su relevancia ecológica y social, existe una limitada disponibilidad de estudios cuantitativos que caractericen la variabilidad climática de los ecosistemas estratégicos en Colombia, como lo es el CCZ, particularmente con enfoques metodológicos robustos que integren modelos estocásticos y simulaciones a largo plazo. Investigaciones recientes han enfatizado la necesidad de avanzar hacia análisis localizados en humedales tropicales que contemplen el impacto del cambio climático sobre las variables meteorológicas claves (Fatichi et al., 2016; IPCC, 2014), subrayando la urgencia de generar información de base que oriente decisiones de adaptación y mitigación en contextos altamente vulnerables.

En coherencia a lo anterior, el riesgo por el cambio climático y sus impactos han generado efectos en las regiones y ecosistemas más vulnerables, entre los que se destaca el CCZ, por lo tanto, este proyecto suma relevancia por poder ser un marco para la protección del sistema natural que no solo alberga una amplia variedad de especies, sino que también contribuye significativamente al equilibrio ambiental y al bienestar de las comunidades locales. constituye uno de los humedales más extensos y biodiversos del Caribe, siendo fundamental para las comunidades locales por su aporte en recursos esenciales como el agua, los alimentos y otros medios de subsistencia. Sin embargo, el aumento en las temperaturas y las modificaciones en los patrones de precipitación han puesto en riesgo la estructura y funcionamiento de este complejo sistema ecológico.

Las proyecciones regionales indican que, en el CCZ, se prevé un incremento en la temperatura acompañado de una disminución en las precipitaciones, lo cual podría afectar de manera significativa la disponibilidad de agua, la productividad agrícola y la biodiversidad. Estudios previos han evidenciado la alta vulnerabilidad de los humedales ante la variabilidad climática, resaltando la necesidad de contar con herramientas analíticas robustas que permitan prever escenarios futuros y, de esta forma, apoyar la toma de decisiones en la gestión de recursos hídricos y la adaptación a los cambios ambientales.

La motivación principal de esta investigación reside en la urgente necesidad de generar información precisa y localizada sobre la variabilidad climática en el CCZ, con especial énfasis en las variables de precipitación y temperatura. Aunque en Colombia existen estudios relacionados con el cambio climático, pocos se han enfocado específicamente en los humedales tropicales y aún menos han empleado metodologías avanzadas, como la Simulación de Monte Carlo y los modelos de la Familia ARIMA, para proyectar escenarios futuros en esta región. En este contexto, el presente estudio se propone llenar ese vacío, ofreciendo un análisis detallado y proyecciones que sirvan como base para el diseño de estrategias de mitigación y adaptación.

Este trabajo se centra en tres aspectos fundamentales: primero, la recolección y análisis de datos climáticos históricos (1990–2022) de las estaciones meteorológicas de la región, complementados con información de temperatura obtenida de Google Earth Engine (GEE); segundo, la proyección de escenarios futuros de variabilidad climática (2022–2040) mediante modelos estocásticos de la familia ARIMA, junto con simulaciones de Monte Carlo, la evaluación de los impactos potenciales de estos cambios en áreas clave como la seguridad alimentaria, los recursos hídricos, la biodiversidad y los servicios ecosistémicos, conforme a los lineamientos de la Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático (TCNCC) y los Indicadores del NDC Colombia.

El objetivo de este artículo es proporcionar una evaluación exhaustiva de los posibles escenarios de cambio climático en el CCZ, identificando los riesgos más significativos y proponiendo estrategias para mitigar los impactos previstos. Con ello se busca no solo contribuir al conocimiento científico sobre la variabilidad climática en humedales, sino también ofrecer un marco replicable que facilite la planificación de políticas de adaptación en otros ecosistemas tropicales sujetos a desafíos similares.

MATERIALES Y METODO

Enfoque y Diseño de la Investigación

La investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo (Hernández, 2018) y adoptó un diseño analítico-explicativo. El objetivo principal fue comprender las relaciones entre las variables de precipitación y temperatura en el Complejo Cenagoso de la Zapatosa (CCZ), evaluando tanto los patrones históricos como las proyecciones futuras mediante modelos estocásticos. Se controlaron posibles factores confusores y se cuantificaron asociaciones estadísticas entre las variables.

Población, Muestra y Recolección de Datos

La población de estudio comprendió las estaciones meteorológicas ubicadas en los municipios de Chimichagua, Tamalameque, Curumaní, Chiriguaná y El Banco. La selección de las estaciones meteorológicas se realizó mediante un muestreo no probabilístico dirigido, basado en criterios técnicos de confiabilidad, continuidad histórica y cobertura espacial representativa del área de influencia del CCZ. Se priorizaron aquellas estaciones que contaban con al menos veinte años de datos continuos y validados, siguiendo la calificación y nivel de aprobación establecidos por el IDEAM a través de su plataforma DHIME, siendo una decisión que permitió garantizar la calidad de las series temporales utilizadas en la modelación, minimizando la incertidumbre asociada a vacíos o inconsistencias en los registros, además, procurando una distribución espacial heterogénea que abarcara diferentes municipios estratégicos en los departamentos de Cesar y Magdalena, con el fin de capturar las particularidades climáticas locales dentro del sistema hidrológico del CCZ. Por otra parte, en el caso de los datos de temperatura, se emplearon registros del dataset ERA5-LAND ajustados a las coordenadas de las estaciones seleccionadas, lo que permitió una comparación coherente entre las variables meteorológicas.

Estaciones	Latitud	Longitud
CHIMICHAGUA [25021240]	9.260083333	-73.80986111
EL CANAL [25020240]	9.410472222	-73.89041667
SALOA [25020270]	9.193166667	-73.73130556
HACIENDA EL TERROR [25020650]	8.938777778	-73.56022222
CURUMANI [25020250]	9.197194444	-73.54194444
PRIMAVERA LA [25020920]	9.216666667	-73.41666667
ZAPATOZA [25020660]	9.00975	-73.75402778
POPONTE [25020690]	9.423277778	-73.41094444
CHIRIGUANA [25025250]	9.361027778	-73.59338889
RINCONHONDO [25020260]	9.397027778	-73.48802778

AEROPUERTO LAS FLORES [25025090]	9.046333333	-73.970833333
LOS NEGRITOS [25021200]	9.026666667	-74.079444444
TAMALAMEQUE [25020090]	8.860388889	-73.815444444

Tabla 1. Estaciones meteorológicas de estudio en Complejo Cenagoso de la Zapatosa.

Los datos mensuales (1990–2022) se descargaron en formato CSV desde la plataforma DHIME del IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales) y se complementaron con registros de ERA5-LAND. Los datos fueron procesados y analizados utilizando PYTHON (versión 3.x) y sus librerías: PANDAS, NUMPY y MATPLOTLIB. Para el análisis geoespacial se empleó ARC GIS PRO (ESRI, Inc., Redlands, California, USA).

Análisis Estadístico y Preprocesamiento

Se realizó un análisis exploratorio de los datos para:

- **Identificar vacíos y valores atípicos:** Se aplicaron técnicas de resumen estadístico y se graficaron series temporales.
- **Imputar datos faltantes:** Se utilizó el método IDW (Inverse Distance Weighted), basándose en la proximidad espacial entre estaciones.
- **Verificar la consistencia de los datos:** Se aplicó el test de Levene para evaluar la homogeneidad de las varianzas entre las series originales y las imputadas.

Además, se realizaron pruebas de normalidad y se evaluó la dependencia serial mediante correlogramas, de forma que se garantizaran los supuestos necesarios para el posterior modelado.

Implementación de los Modelos ARIMA

- Ajuste del Modelo SARIMA

Para la modelación de series temporales se implementó el modelo SARIMA (Seasonal ARIMA) en PYTHON mediante la librería STATSMODELS. Los pasos seguidos fueron:

- Importación de la librería:

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

Ajuste del modelo

Se configuró el modelo para la serie de interés mediante la siguiente expresión.

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

Optimización de parámetros

Se realizó un grid search (búsqueda por grilla) variando los parámetros (p, d, q) y (P, D, Q) para seleccionar el modelo que minimizara el Criterio de Información de Akaike (AIC), definido como:

$$AIC = 2k - 2\ln(L) \quad (1)$$

donde k es el número de parámetros y L la función de verosimilitud máxima.

Validación del modelo

La serie se dividió en dos subconjuntos: 80% para entrenamiento y 20% para prueba. Tras ajustar el modelo con el conjunto de entrenamiento, se realizó una predicción para el conjunto de prueba. La precisión se evaluó mediante la inspección visual (gráficos comparativos) y el cálculo del Error.

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i| \quad (2)$$

Ejecución de la Simulación de Monte Carlo

Con el modelo SARIMA ajustado se procedió a la simulación de Monte Carlo para proyectar múltiples trayectorias futuras de la serie temporal:

- **Ajuste del Modelo SARIMA:** Se aplicó el modelo a los datos históricos y se verificó su ajuste mediante la prueba de Ljung-Box (Ljung & Box, 1978), esperando un p-valor > 0.05 para indicar ruido blanco.
- **Configuración de la simulación:** Se establecieron 1000 simulaciones y un horizonte de predicción de 216 meses (18 años), generándose las fechas correspondientes.
- **Obtención del pronóstico:** El modelo generó múltiples trayectorias, cuyos resultados se almacenaron en un DataFrame con una columna de fechas y 1000 columnas adicionales, cada una representando un escenario futuro.
- **Generación de Escenarios:** Se utilizó el método forecast de SARIMAX para generar pronósticos, añadiendo perturbaciones aleatorias basadas en los residuos.

Clustering y Cálculo de Probabilidades

Una vez obtenidas las trayectorias de la simulación, se procedió a identificar los escenarios más comunes mediante un análisis de clusterización utilizando el algoritmo K-means implementado en la librería SCIKIT-LEARN.

Algoritmo K-means

El proceso se desarrolló de la siguiente manera:

Selección inicial de k centroides al azar.

- Asignación de cada escenario al centroide más cercano.
- Actualización de los centroides mediante el cálculo del promedio de las posiciones de los datos asignados.
- Repetición del proceso hasta la convergencia (sin cambios en centroides ni asignaciones).

La función objetivo del algoritmo se definió mediante la siguiente ecuación:

$$J = \sum_{j=1}^K \sum_{x_i \in C_j} \|x_i - \mu_j\|^2 \quad (3)$$

Donde:

- x_i es un punto de datos en el clúster C_k
- μ_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 μ_j
- K es el número de clústeres.

Para determinar el número óptimo de clústeres se empleó el método del codo, que consiste en graficar el número de grupos frente a la distancia promedio de los datos al centro de su grupo.

Cálculo de Probabilidades por Clúster

Se utilizó la función Counter() de SCIKIT-LEARN para obtener la frecuencia de simulaciones en cada clúster y se calculó la probabilidad relativa según

$$P(C_k) = \frac{N_k}{N} \times 100\% \quad (4)$$

Donde:

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

Cálculo de Variaciones en Precipitación y Temperatura

Para cuantificar el cambio entre el periodo proyectado y el histórico se aplicaron las siguientes fórmulas:

- Cálculo Variación Precipitación

$$V = \frac{P_S - P_H}{P_H} \times 100 \quad (5)$$

- Cálculo Variación Temperatura

$$V = P_S - P_H \quad (6)$$

Donde:

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

Representación Geoespacial

Los resultados se realizó una visualización geoespacial con ArcGIS Pro (versión 3.0, Esri Inc., Redlands, CA, USA), generando mapas de precipitación y temperatura para los periodos histórico y proyectado (2022-2040) con las herramientas de Geo-procesos integradas en software. Estos mapas permitieron identificar áreas con mayores cambios en el CCZ.

RESULTADOS

Se analizó la variabilidad climática en el Complejo Cenagoso de la Zapatosa (CCZ) mediante la recopilación y análisis de datos históricos de precipitación y temperatura. Se utilizaron registros de 13 estaciones meteorológicas correspondientes al periodo 1990–2022 para la precipitación, y datos de temperatura obtenidos de Google Earth Engine (GEE).

En la fase inicial se realizó un análisis exploratorio en el que se aplicaron métodos de interpolación e imputación para completar datos faltantes y corregir valores atípicos. Por ejemplo, la estación CHIMICHAGUA (código 25021240) presentó una media mensual de 167.76 mm, mientras que se registró un máximo de 659.4 mm. Asimismo, se identificó un valor extremo en la estación HACIENDA EL TERROR (1585 mm en agosto de 2021), el cual fue tratado mediante la técnica de Interpolación de Distancias Ponderadas (IDW). La consistencia de los datos imputados se verificó mediante el test de Levene (p -valor = 0.995). Adicionalmente, se validaron los datos de temperatura de GEE comparándolos con los registros del IDEAM, encontrándose una correlación significativa en la estación AEROPUERTO LAS FLORES ($r = 0.76$).

Posteriormente, se implementaron modelos SARIMA para la proyección de las variables climáticas. La selección de los modelos se realizó en función del Criterio de Información de Akaike (AIC) y se ejecutaron simulaciones de Monte Carlo para obtener múltiples trayectorias futuras en cada estación. Los escenarios proyectados se agruparon mediante técnicas de clusterización, identificándose aquellos de mayor probabilidad (véase Figuras 1 y 2).

Los impactos de los cambios proyectados se evaluaron con base en los indicadores de la Tercera Comunicación Nacional del Cambio Climático (TCNCC) y el NDC de Colombia. En términos de seguridad alimentaria, la disminución en precipitaciones y el aumento en temperatura afectarán la disponibilidad de agua para riego, reduciendo la producción agrícola en municipios del CCZ. Los indicadores de amenaza de la TCNCC mostraron una reducción en áreas con precipitaciones suficientes para cultivos como plátano y Yuca, y un aumento en el estrés térmico de los cultivos.

Respecto a los recursos hídricos, la disminución proyectada en precipitación y el aumento en temperatura incrementarán la demanda hídrica y reducirán la disponibilidad de agua superficial. Los ecosistemas acuáticos y terrestres también se verán afectados, con una reducción en la cobertura vegetal natural que impactará la biodiversidad y los servicios ecosistémicos, como la regulación climática y la protección contra la erosión.

A partir de la comparación entre los mapas históricos (1990–2022) figura 3, y las proyecciones (2022–2040) Figura 4, se observan dos tendencias principales:

Disminución de la precipitación:

- En el período histórico (1990–2022), los valores máximos de precipitación se concentraron principalmente en la zona suroccidental del Complejo Cenago-so de la Zapatosa (CCZ), con rangos que llegaban hasta aproximadamente 163–167 mm mensuales.
- En la proyección (2022–2040), se aprecia un descenso en esos valores máximos (en torno a 158–162 mm), y el área con precipitaciones más bajas se amplía, evidenciando un patrón de menor precipitación en todo el CCZ.
- Zonas que antes registraban valores intermedios de precipitación muestran ahora rangos ligeramente inferiores, lo que indica una tendencia generalizada a la disminución en la mayoría de las estaciones y subregiones.

Aumento de la temperatura:

- En el período histórico, las temperaturas oscilaban aproximadamente entre 26.0 °C y 27.3 °C, con los valores más altos ubicados también hacia la región suroccidental.
- En la proyección, el rango se desplaza hacia valores más altos (aproximadamente entre 27.1 °C y 28.5 °C), lo que sugiere un calentamiento sostenido en todo el CCZ.
- Se mantiene la misma zona con temperaturas más elevadas (suroeste), aunque con un incremento más pronunciado, superando los 28 °C en las áreas de mayor calor proyectado.

En conjunto, estos mapas confirman la tendencia de un clima más seco y cálido en el CCZ para las próximas décadas. Las reducciones en la precipitación, unidas al aumento en la temperatura, podrían generar efectos significativos sobre la disponibilidad de agua, la agricultura y la integridad de los ecosistemas del humedal.

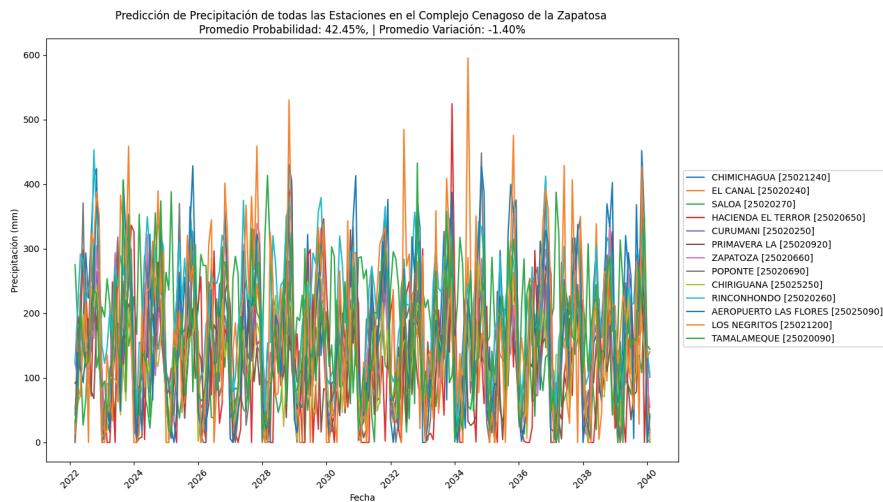


Figura 1. Proyecciones de precipitación en el Complejo Cenagoso de la Zapatosa 2022-20240

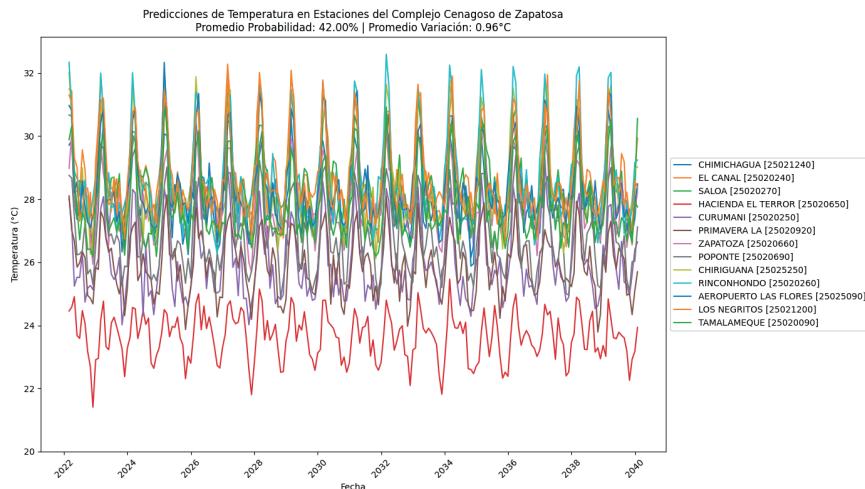
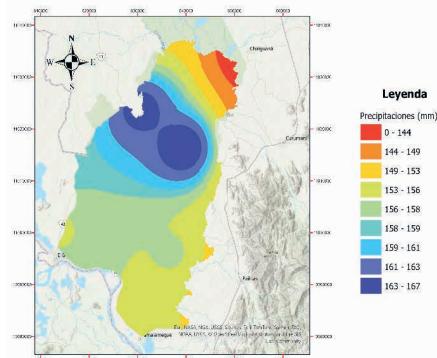


Figura 2. Proyecciones de Temperaturas en el Complejo Cenagoso de la Zapatosa 2022-2040

El análisis espacial se efectuó mediante la elaboración de mapas de precipitación y temperatura utilizando ArcGIS Pro, lo que permitió identificar la distribución espacial de ambas variables en el CCZ (véase Figuras 3 y 4).

Precipitación Periodo 1990-2022



Precipitación Periodo 2022-2040

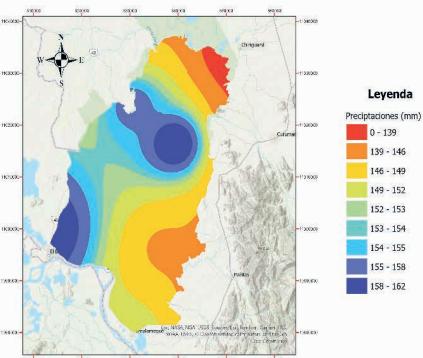
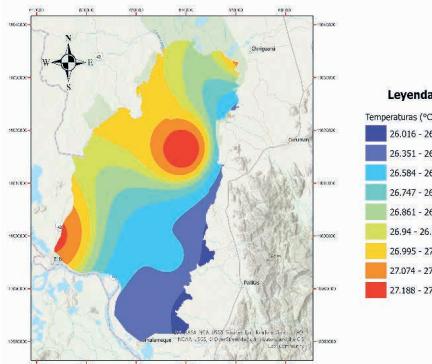


Figura 3. Mapa de Precipitaciones periodo 1990-2022 y 2022-2040

Temperaturas Periodo 1990-2022



Temperaturas Periodo 2022-2040

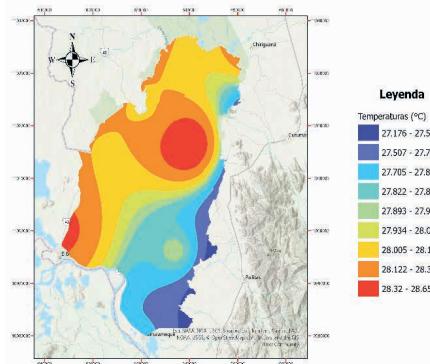


Figura 4. Mapas de Temperaturas periodo 1990-2022 y 2022-2040

Las proyecciones a largo plazo indicaron que, para el período 2022–2040, la precipitación disminuyó en promedio un 1.40% anual y la temperatura aumentó en total 0.96 °C, con un incremento anual promedio de 0.052 °C. Además, se utilizaron los indicadores de la TCNCC y el NDC Colombia para evaluar el impacto de estos cambios en la disponibilidad hídrica y la producción agrícola en el CCZ.

Los Municipios de Chimichagua, Tamalameque, Curumaní, Chiriguaná y El Banco en base al documento *síntesis para la declaratoria del Complejo Cenagoso de la Zapata como área protegida* (Convenio Interadministrativo No. 205 2017) de la Universidad del Magdalena, CORPAMAG y CORPOCESAR. Son actores clave que participan en el marco de la declaratoria del DRMI, una estrategia regional coordinada por CORPOCESAR, CORPAMAG y el Ministerio de Ambiente. Este enfoque colectivo integra acciones que abordan los desafíos mencionados:

Déficit hídrico y cambio climático

Los municipios apoyan las acciones prioritarias del DRMI, como la recuperación de la capacidad hídrica del CCZ (eliminación de taponamientos en caños y diques ilegales) para garantizar el almacenamiento de agua en épocas lluviosas y su disponibilidad en sequías. Se promueven buenas prácticas agrícolas y pecuarias para reducir la demanda excesiva de agua y la contaminación, pero no se detallan programas municipales específicos. El DRMI incluye estrategias de restauración ecológica para humedales y bosques, ecosistemas críticos para la regulación térmica e hídrica.

Gestión del riesgo de desastres

Los municipios, en el marco del DRMI, priorizan la mitigación de inundaciones (78.27% del área tiene amenaza media-alta) mediante la conservación de la función natural del CCZ como regulador hidrológico. Se propone el manejo de incendios forestales en playones, vinculado a la prohibición de quemas no controladas, aunque no se mencionan protocolos municipales específicos.

Cambio climático

Los municipios se alinean con el POMCA del Río Bajo Cesar y el Plan de Manejo Ambiental de la Ciénaga (2012-2015), que incluyen medidas para mitigar el cambio climático, como la protección de áreas de conservación. El DRMI propone acciones de adaptación climática, como la restauración de ecosistemas para amortiguar los impactos del aumento de temperatura proyectado (hasta +2.7°C para 2100) y la variabilidad de lluvias.

DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos confirman, que, en términos cuantitativos, la hipótesis inicial de que el CCZ experimenta una creciente variabilidad climática con implicaciones en la disponibilidad de recursos hídricos y en la productividad agrícola. La proyección de una disminución anual del 1.40% en la precipitación y el incremento 0.053 °C media anual en la temperatura, se orientan a sugerir un aumento en el estrés hídrico y térmico, lo que podría impactar la estabilidad de los ecosistemas y las actividades productivas en la región.

Los resultados obtenidos en este estudio sobre la variabilidad climática en el Complejo Cenagoso de la Zapatosa (CCZ), utilizando simulaciones de Monte Carlo y modelos SARIMA, revelan cambios significativos en las condiciones climáticas de la región que requieren ser considerados al analizar los efectos del cambio climático. En particular, las proyecciones muestran una reducción de la precipitación anual del 1.40% y un aumento de 0.96°C en la temperatura media entre 2022 y 2040, lo cual podría tener consecuencias serias sobre los recursos hídricos y la biodiversidad de la zona.

Respecto a las precipitaciones, los resultados sugieren una disminución del 1.40% anual. Esta tendencia coincide con otros estudios previos, como el de Buitrago (2023), quien reportó una reducción del caudal medio anual en la subcuenca alta del río Iquira de entre 37% y 54%, dependiendo de los escenarios climáticos considerados. Similarmente, en este estudio se observa cómo la disminución de las precipitaciones podría afectar la capacidad del CCZ para regular los flujos hídricos, al igual que Rodríguez & Salazar (2023) encontraron en su análisis sobre Chile, donde la disminución de las precipitaciones generó efectos adversos en los recursos hídricos y la agricultura durante el fenómeno de La Niña.

En cuanto al aumento de la temperatura, los resultados muestran un incremento proyectado de 0.96°C. Este hallazgo es consistente con los registros de Leal & Portes (2020), quienes también documentaron un aumento considerable en la temperatura en varias zonas de Colombia. En su investigación, observaron un incremento de 3.37°C en la temperatura promedio en un período de 20 años, lo cual refleja el efecto acumulativo del cambio climático sobre los ecosistemas y las actividades humanas. En el contexto del CCZ, el aumento de la temperatura podría poner en riesgo la agricultura local y aumentar el estrés térmico de los cultivos que dependen de un clima más estable, como los de plátano y Yuca.

El uso de la simulación de Monte Carlo en este estudio permitió capturar la incertidumbre inherente a las proyecciones climáticas, proporcionando una variedad de posibles escenarios futuros. Esto es particularmente relevante porque, como Ramos (2014) demuestra en su estudio sobre el Perú, las simulaciones estocásticas ofrecen una representación más realista de los escenarios climáticos futuros, al permitirnos explorar las diferentes trayectorias posibles bajo distintas condiciones. Este enfoque permite tomar decisiones más informadas en contextos donde las proyecciones climáticas son inciertas.

El análisis de clústeres también permitió identificar las zonas del CCZ con mayor probabilidad de experimentar disminuciones en las precipitaciones y aumentos en las temperaturas. Este patrón es similar al encontrado por Alvarino & Ocampo (2015) en su estudio sobre el comportamiento climático en Girardot, donde las áreas más cálidas experimentaron un aumento más pronunciado en la temperatura, lo que destaca la importancia de considerar las características locales al hacer proyecciones climáticas.

En cuanto a los impactos sobre los recursos hídricos y la biodiversidad, los resultados de este estudio refuerzan las preocupaciones sobre la disponibilidad de agua en la región. La reducción de las precipitaciones y el aumento de la temperatura afectarán directamente la cantidad de agua disponible para la agricultura, lo que podría poner en riesgo la seguridad alimentaria en el CCZ. La Tercera Comunicación Nacional del Cambio Climático (TCNCC, 2020) ya había advertido sobre la creciente amenaza para los recursos hídricos en Colombia, especialmente en áreas como el CCZ, que dependen de los humedales para regular los flujos hídricos.

Además, los impactos sobre la biodiversidad local son inminentes. La disminución de las precipitaciones y el aumento de la temperatura podrían alterar los ecosistemas acuáticos y terrestres, reduciendo la cobertura vegetal y afectando la fauna local. Este fenómeno ha sido documentado en varios estudios, como el de Rodríguez & Salazar (2023), quienes también observaron cómo eventos climáticos extremos, como La Niña, pueden modificar la vegetación y los ecosistemas acuáticos, y cómo esto afecta a las especies que dependen de estos hábitats.

En cuanto a los mapas históricos (1990-2022) y las proyecciones (2022-2040), se observó que las zonas con mayores precipitaciones, localizadas en el suroeste del CCZ, serán las más afectadas, con una disminución generalizada en los valores máximos de precipitación. Este patrón se alinea con las observaciones realizadas por Ramos (2014) en la costa norte del Perú y Leal & Portes (2020) en Colombia, quienes también reportaron una disminución en las precipitaciones máximas en sus respectivos estudios. Este comportamiento podría aumentar la vulnerabilidad de las comunidades locales, que dependen de estos ecosistemas para su subsistencia.

Se puede decir de manera resumida que los resultados obtenidos en este estudio destacan la urgente necesidad de adoptar medidas de adaptación al cambio climático en la región. La planificación estratégica para la gestión de los recursos hídricos y la protección de los ecosistemas debe ser una prioridad, como lo sugieren los estudios previos de Rodríguez & Salazar (2023) y el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2020), que abogan por la implementación de políticas de adaptación que ayuden a mitigar los efectos del cambio climático. Este estudio confirma que la región está en riesgo y que se debe actuar rápidamente para mitigar los efectos de la variabilidad climática y garantizar la resiliencia de las comunidades que dependen del CCZ.

CONCLUSIONES

Esta investigación sobre la variabilidad climática en el Complejo Cenagoso de la Zapatosa (CCZ) ha evidenciado que el cambio climático tendrá efectos significativos en los patrones de precipitación y temperatura de la región. Mediante la aplicación de técnicas como la Simulación de Monte Carlo y los modelos SARIMA, se proyectó una disminución promedio del 1.40% anual en las precipitaciones y un incremento de 0.96°C en la temperatura hasta 2040. Estos resultados señalan un impacto acumulativo que comprometerá la disponibilidad de recursos hídricos, la estabilidad de los ecosistemas y la seguridad alimentaria de las comunidades locales dependientes de actividades como la agricultura y la pesca.

Los hallazgos resaltan la urgencia de implementar estrategias de adaptación en la gestión de los recursos naturales del CCZ. La reducción proyectada en las precipitaciones y el aumento de las temperaturas podrían alterar los ciclos hidrológicos, incrementando la

vulnerabilidad de la región a sequías más frecuentes y prolongadas. Esta situación demanda medidas concretas, como la optimización de la infraestructura hídrica, la promoción de tecnologías de riego eficientes y la diversificación de cultivos resistentes a condiciones de sequía y estrés térmico. Asimismo, la limitada capacidad adaptativa de las comunidades locales, evidenciada por indicadores de preparación insuficiente, subraya la necesidad de invertir en capacitación y tecnologías sostenibles para fortalecer su resiliencia frente a los cambios climáticos.

Además de la caracterización climática, se sabe que el Complejo Cenagos de la Zapatosa (CCZ) está conformado por aproximadamente 1,900 ciénagas, albergando 202 especies de aves, de las cuales 34 son migratorias. Entre estas se registró la presencia de especies de importancia para la conservación, como la guacharaca caribeña (*Ortalis garrula*) y el chavarrí (*Chauna chavaria*), clasificada en estado vulnerable a nivel nacional. De igual modo, se detectaron especies amenazadas como la mabuya (*Mabuya mabouya*) y el bichichi (*Saguinus oedipus*), ambas catalogadas en peligro crítico, así como el tapeti (*Sylvilagus brasiliensis*), en peligro.

Este estudio tiene implicaciones relevantes tanto a nivel local como en el ámbito del conocimiento científico. En el contexto del CCZ, los resultados destacan la ausencia de un marco robusto de gestión ambiental como un factor crítico que podría conducir a la degradación de los servicios ecosistémicos, afectando la biodiversidad y actividades económicas como el ecoturismo y la pesca. A nivel más amplio, la investigación aporta al entendimiento de los impactos del cambio climático en humedales tropicales, ofreciendo un modelo replicable para evaluar y planificar la adaptación en ecosistemas similares. Esto refuerza la importancia de integrar proyecciones climáticas en la planificación ambiental de regiones vulnerables.

En cuanto a las medidas de adaptación y mitigación, se destaca la necesidad de evaluar costos y posibles barreras de implementación, teniendo en cuenta las estrategias vigentes de la autoridad ambiental y los planes nacionales. Una estimación más detallada de los recursos financieros y la factibilidad de las medidas propuestas contribuiría a la adopción de políticas públicas más efectivas y realistas. De esta forma, la información presentada en el artículo podría articularse mejor con los planes de ordenamiento territorial y las iniciativas de gestión ambiental a diferentes escalas.

Sin embargo, los resultados no deben interpretarse más allá de lo que permiten los datos. Aunque las proyecciones son robustas, su precisión podría mejorarse con modelos climáticos regionales de mayor resolución y datos adicionales sobre el impacto en especies específicas. Para trabajos futuros, se recomienda profundizar en el análisis de los efectos de la variabilidad climática en la biodiversidad del CCZ, así como evaluar la efectividad de las estrategias de adaptación propuestas, como la diversificación agrícola y la restauración de áreas degradadas.

En definitiva, este estudio pone de manifiesto la necesidad de actuar de manera proactiva frente a los desafíos climáticos en el CCZ. La colaboración entre autoridades locales, comunidades y organizaciones no gubernamentales será clave para garantizar la sostenibilidad del complejo mediante la protección de sus ecosistemas y el fortalecimiento de la capacidad adaptativa. Estas acciones no solo preservarán los recursos naturales de la región, sino que también asegurarán el bienestar de las poblaciones que dependen de ellos.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco profundamente el apoyo y la colaboración de Karina Paola Torres Cervera, por su infinita sabiduría, su mentoría fue principal éxito para esta investigación, y también a Paul Klement, quien su amistad y hermandad con su conocimiento forjan más allá que el profesionalismo. Asimismo, extiendo mi gratitud a la Universidad Popular del Cesar por proporcionar el respaldo académico y los recursos necesarios para llevar a cabo este estudio.

REFERENCIAS

- Alvarino Gaitán, 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.
- Box, G. E., Jenkins, G. M., Reinsel, G. C., & Ljung, G. M. (2015). *Time series analysis: forecasting and control*. John Wiley & Sons.
- 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.
- 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)*.
- Hernández S., R., & Mendoza T., C. (2018). *Metodología de la Investigación: Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta*. Ciudad de México D.F.: McGraw Hill.
- 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.
- 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>.

García, M., & Pérez, J. (2018). Efecto de la temperatura y precipitación sobre la agricultura en la cuenca Coata-Puno, Perú. *Revista de Clima y Agricultura*, 15(2), 45–60.

Rodríguez Lara, N., & 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.

Complejo Cenagoso de Zapatosa | Servicio de Información sobre Sitios Ramsar. (2020). *Ramsar.org*. <https://rsis.ramsar.org/es/ris/2521?language=es>

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>

Bruce, P., Bruce, A., Gedeck, P. (2020). *Practical Statistics for Data Scientists: 50+ Essential Concepts Using R and Python*. United States: O'Reilly Media.

Cryer, J. D., & Chan, K. S. (2008). *Time series analysis with applications in R*. Springer Science & Business Media.

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.

Hanke, J. E., & Wichern, D. W. (2009). *Pronósticos en los negocios*. Pearson Educación.

HubSpot. (2024). ¿Qué es Python para que sirve? | Claudio Frisoli. Hubspot.es. <https://blog.hubspot.es/website/author/claudio-frisoli>

IBM. (¿Qué es la simulación Montecarlo?). (2021). ¿Qué es la simulación Montecarlo? | IBM

O'Sullivan, D., & Unwin, D. J. (2010). *Geographic information analysis*. John Wiley & Sons.

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.

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.

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.

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.