UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS

FACULTAD DE CIENCIAS
QUÍMICAS E INGENIERÍA

“EL USO DEL MODELO PREDICTIVO SARIMA APLICADO A LAS VARIABLES CLIMATICAS DEL ESTADO DE MORELOS”

TESIS PROFESIONAL
PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
MAESTRÍA EN INGENIERÍA AMBIENTAL Y TECNOLOGÍAS SUSTENTABLES
P R E S E N T A:

ALEXANDRO CASTILLO VILLADA

DIRECTORA DE TESIS
DRA. MARÍA DEL CARMEN TORRES SALAZAR

CO-DIRECTOR DE TESIS
DR. ZAKARYAA ZARHRI

CUERNAVACA, MORELOS *DICIEMBRE 2024*

Agradecimientos

• A la Universidad Autónoma del Estado de Morelos (UAEM), por brindar el entorno académico, la infraestructura y las condiciones institucionales necesarias que propiciaron mi desarrollo inicial como investigador, así como el crecimiento de mis habilidades analíticas y críticas.
• A todos mis profesores, cuyas enseñanzas, dedicación, experiencia y compromiso permanente enriquecieron mi formación profesional, aportando una base sólida de conocimientos y motivando mi crecimiento intelectual.
• A mi directora de tesis, la Dra. Carmen Torres, por su valiosa guía, paciencia y acompañamiento continuo.
• Al Dr. Zak, por su apoyo en la estructuración y organización del proyecto, así como por fomentar en mí una organización metodica la cual apoyo a desarrollar nuevas habilidades y competencias.
• A la Dra. Mariana, por su actitud positiva, su apoyo en cada una de las solicitudes que le presenté, lo que contribuyó en gran medida a esta importante etapa formativa de mi persona.

Dedicatoria

A mi familia por siempre darme la seguridad de poder cumplir todos mis objetivos.

A mi madre por dedicar su tiempo en mi formación y el eterno cariño que siempre me ha brindado.

A mis hermanos por estar presentes y enseñarme múltiples formas de ver el mundo.

Pero sobre todo a mi padre, que siempre nos apoyó a ser mejores profesionistas tanto en palabra como con el ejemplo propio. Quien a pesar de no poderme ver finalizar esta etapa de mi vida, estoy seguro que me acompaña en todos mis logros

Tabla de contenido

INTRODUCCIÓN 1

Contexto del Estudio 2
Justificación 2
Objetivos 4
Alcance 5

2. MARCO TEÓRICO 7

Introducción a los Modelos de Predicción 7
Antecedentes 8
Planteamiento del Problema 11
Hipótesis 14

3. PROCEDIMIENTO 15

Procesamiento y Limpieza de Datos 26
Modelos de Predicción 32
Herramientas y Software Utilizados 49
Recomendaciones por zona basados en la clasificación Koppen 53
Interfaz de usuario 58

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS 62

Conteo de Estaciones por Situación 63
Distribución de Estaciones por Municipio 65
Rangos de Fechas y Datos Faltantes en Variables Climáticas 67
Promedios y Estadísticas de las Variables Climáticas 69
Precipitación Promedio Mensual en Morelos 72
Identificación de Estaciones con más Datos 75

5. RESULTADOS MODELO SARIMA 78

Preparación y Análisis Preliminar de los Datos 79
Identificación y Estimación del Modelo SARIMA 79
Ajuste y aplicación del Modelo para el diagnóstico 80
Pronósticos Generados 82
Interpretación de los Resultados 83
Limitaciones del Modelo 84
Recomendaciones para Mejorar el Modelo 84
Consideraciones Finales de la Aplicación del Modelo 84

6.DISCUSIÓN E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS 85

Interpretación de los Hallazgos del Modelo SARIMA 86
Comparación con Estudios Anteriores y Contexto Científico 87
Implicaciones de los Resultados y Aplicaciones Prácticas 88
Limitaciones del Estudio 89
Direcciones para Futuras Investigaciones 90

7.CONCLUSIONES 91

Análisis Exploratorio y Procesamiento de Datos 91
Modelado y Pronóstico con SARIMA 92

CONSIDERACIONES FINALES Y PERSPECTIVAS FUTURAS 92
PALABRAS FINALES 94

BIBLIOGRAFÍA 95

Tabla de gráficas

Gráfica 1 Serie temporal temperatura mostrando patrones estacionales 38
Gráfica 2 Distribución Estaciones Operando y Suspendidas 64
Gráfica 3 Distribución de estaciones por municipio 66
Gráfica 4 Temperatura min y máx. de Morelos 72
Gráfica 5 Precipitación promedio mensual en Morelos 73

Tabla de ilustraciones

Ilustración 1 Página CONAGUA descarga estaciones climáticas-Morelos 16
Ilustración 2 Mapa estaciones climáticas Morelos 23
Ilustración 3 Estación climatológica en zona montañosa de Morelos. 24

Tabla de tablas

Tabla 1 Topografía de Morelos 12
Tabla 2 Ejemplo-Catálogo estaciones 18
Tabla 3 Estaciones climatológicas más representativas de Morelos 25
Tabla 4 Estaciones por situación Operativa 64
Tabla 5 Número de estaciones meteorológicas por municipio 65
Tabla 6 Precipitación promedio Mensual en Morelos 73
Tabla 7 Estaciones con mayor cantidad registros en Morelos 76
Tabla 8 Resultados de métricas de desempeño estaciones principales 82

Tabla de Ecuaciones

Ecuación 1 33
Ecuación 2 34
Ecuación 3 35
Ecuación 4 35
Ecuación 5 36
Ecuación 6 37
Ecuación 7 39
Ecuación 8 39
Ecuación 9 39
Ecuación 10 41
Ecuación 11 41
Ecuación 12 41
Ecuación 13 45
Ecuación 14 45
Ecuación 15 45

Introducción

El cambio climático es uno de los principales desafíos que enfrenta el mundo hoy en día, impactando significativamente los sistemas ambientales, económicos y sociales. El estado de Morelos, es particularmente vulnerable a los efectos de estas alteraciones climáticas debido a su diversidad geográfica y a la variabilidad natural de su clima. Las condiciones climáticas de la región incluyen patrones estacionales de temperatura y precipitaciones, influyendo asi en la agricultura, la biodiversidad y la salud pública, haciéndola un área de estudio crucial para la modelación y predicción de variables climáticas. (Ortiz-Hernández, 2013)

La evaluación y el monitoreo continuo del clima en Morelos son fundamentales para comprender mejor cómo los patrones meteorológicos cambian y afectan el medio ambiente local y, por extensión, las actividades humanas. La falta de sistemas de monitoreo adecuados en áreas de difícil acceso, como las zonas montañosas de Morelos, limita la capacidad para obtener datos precisos y en tiempo real, lo cual es necesario para una gestión eficaz de los recursos naturales (Agua, 2019)y para el desarrollo de estrategias de mitigación y adaptación al cambio climático.

En este contexto, los modelos de predicción climática, especialmente aquellos basados en series temporales como ARIMA y SARIMA, surgen como herramientas esenciales para anticipar las condiciones meteorológicas futuras (Chinlli, 2021). Estos modelos permiten analizar la variabilidad y los patrones históricos de las variables climáticas, como temperatura y precipitación, para generar pronósticos más confiables. Este estudio se enfoca en la aplicación de estos modelos para obtener predicciones precisas de variables climáticas en Morelos, contribuyendo a un mejor manejo de la información ambiental y facilitando la toma de decisiones para minimizar los impactos negativos del cambio climático en la región.

Contexto del Estudio

El estado de Morelos cuenta con una geografía y clima diversos que varían desde zonas montañosas hasta valles y áreas urbanas densamente pobladas (Geografía), 2023). Esta diversidad geográfica y climática ha sido un factor determinante para la agricultura, el desarrollo urbano y la conservación ambiental en la región. Sin embargo, el incremento de las temperaturas, la variabilidad en las precipitaciones y los fenómenos meteorológicos extremos asociados al cambio climático han generado preocupación entre las comunidades y los responsables de las políticas públicas (Cordero, 2012).

La mayoría de los estudios previos en Morelos se han concentrado en la calidad ambiental de áreas urbanas, como Cuernavaca y Cuautla, mientras que las regiones de difícil acceso, caracterizadas por su área montañosa y su lejanía de los centros urbanos, han sido menos exploradas. La falta de infraestructura de monitoreo en estas áreas presenta un desafío adicional para la recolección y análisis de datos, lo que resulta en una brecha de conocimiento que limita la comprensión de los cambios climáticos locales y sus impactos (Caribe, 2013).

Además, a nivel internacional, se han implementado diversos sistemas de monitoreo que permiten obtener información detallada y actualizada sobre variables climáticas en tiempo real (Megalópolis, Programa de Gestión para Mejorar la Calidad del Aire en el Estado de Morelos 2018–2027, 2018). No obstante, en México y Morelos, la cobertura de estaciones de monitoreo es limitada, especialmente en zonas rurales y de difícil acceso. Esta carencia de datos confiables impide una evaluación completa de los patrones de cambio climático en la región y reduce la efectividad de las medidas de adaptación y mitigación (Recaséns, 2021).

Justificación

La necesidad de desarrollar una estrategia integral para el monitoreo y la predicción de variables climáticas en Morelos surge de la importancia de contar con información confiable y actualizada para la toma de decisiones informadas en materia de gestión ambiental y de recursos naturales. Los cambios en los patrones climáticos tienen implicaciones directas en sectores críticos como la agricultura, la salud pública, la infraestructura y la seguridad alimentaria (Mundial, 2022). Una

predicción precisa de las condiciones climáticas puede ayudar a las autoridades locales, agricultores y otros sectores a planificar sus actividades, como el bombeo de agua mediante energias renovables y con ello poder reducir los riesgos y adaptarse a las nuevas condiciones climáticas de una manera eficiente y sustentable (Carricondo-Antón, 2021).

La modelación y predicción de variables climáticas mediante técnicas de series temporales, como los modelos ARIMA y SARIMA, se ha demostrado como una metodología efectiva en otros contextos y regiones del mundo (Chinlli, 2021). Estos modelos permiten identificar patrones y relaciones en los datos históricos, generando proyecciones futuras basadas en el comportamiento pasado de las variables climáticas. En el caso de Morelos, aplicar estos modelos para predecir la temperatura y las precipitaciones puede proporcionar información valiosa para anticipar eventos extremos, optimizar el uso del agua y mejorar la gestión de riesgos asociados al cambio climático.

Este estudio responde a la necesidad de cerrar la brecha de conocimiento existente en las áreas de difícil acceso en Morelos, proporcionando datos precisos y actualizados que contribuyan a una mejor comprensión de los patrones de contaminación y a la implementación de medidas de mitigación adecuadas. Además, la construcción de una base de datos climáticos confiable e historica fortalecerá la capacidad de las instituciones locales para monitorear y gestionar los recursos naturales de manera sostenible.

Objetivos

OBJETIVO GENERAL

- Crear una herramienta que facilite la predicción de variables climáticas a partir de las condiciones geográficas en áreas de difícil acceso en el estado Morelos.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Implementar un sistema de validación de datos confiable para analizar las variables climáticas.
- Evaluar el número de puntos de monitoreo necesarios para predecir correctamente las variables climáticas con alta confiabilidad.
- Desarrollar un algoritmo capaz de predecir las variables climáticas a partir de las condiciones geográficas en áreas de difícil acceso en el estado Morelos.

Alcance

En el presente estudio se abarca la aplicación y desarrollo de modelos matemáticos avanzados para la predicción de variables climáticas en el estado de Morelos, con un enfoque especial en áreas de difícil acceso donde la recolección de datos es limitada. El propósito de este trabajo es aprovechar datos históricos recopilados por estaciones meteorológicas locales y por sistemas de monitoreo nacionales, como el Sistema Meteorológico Nacional (SMN) de México, con el objetivo de construir un modelo predictivo que permita anticipar las tendencias de temperatura y precipitación en la región. La selección de estas variables se fundamenta en su importancia crítica para la gestión de riesgos climáticos, la agricultura, la salud pública y el desarrollo económico de Morelos (Morelos P. E., 2019). Además, el análisis se basa en herramientas de series temporales, utilizando modelos como ARIMA y SARIMA, que son ampliamente reconocidos por su capacidad para manejar datos históricos y predecir patrones climáticos con un grado alto de precisión (Mauricio, 2007).

En este estudio se utilizarán técnicas de análisis y procesamiento de datos para limpiar y transformar la información disponible, generando así conjuntos de datos más robustos que puedan mejorar la calidad de las predicciones (Gómez D. R., 2023). También se realizarán evaluaciones periódicas de la efectividad de los modelos, permitiendo así ajustar los parámetros y mejorar su precisión a lo largo del tiempo. Al centrarse en áreas de difícil acceso, este estudio busca contribuir al monitoreo climático integral de la región, ayudando a las autoridades locales a desarrollar estrategias más efectivas para mitigar los impactos negativos del cambio climático (Humanos, 2019).

No obstante, existen ciertas limitaciones inherentes a la metodología y a los recursos disponibles. Una de las principales limitaciones es la **disponibilidad y calidad de los datos** recopilados. Las estaciones meteorológicas en áreas remotas pueden tener registros incompletos o datos faltantes debido a problemas técnicos, mantenimiento deficiente, o condiciones adversas, lo que podría afectar la precisión de los modelos predictivos (Jesica Natalia Valencia-González, 2022). La ausencia

de datos en ciertos periodos o zonas puede introducir incertidumbre en los resultados, y el proceso de imputación de datos faltantes, aunque útil, puede no capturar todas las variaciones reales de las condiciones climáticas.

Otra limitación es que, si bien los modelos ARIMA y SARIMA son efectivos para capturar patrones estacionales y tendencias en series temporales, **pueden no ser suficientes para representar la complejidad de ciertos fenómenos meteorológicos extremos**, como huracanes, tormentas intensas o eventos de sequía prolongada. Estos eventos tienen dinámicas multifactoriales y, en algunos casos, requieren modelos más complejos, como aquellos basados en aprendizaje automático, redes neuronales, o modelos climáticos de alta resolución para su predicción (Alicante), 2024). La elección de los modelos en este estudio se justifica por la disponibilidad de datos y la naturaleza estacional de las variables seleccionadas; sin embargo, es importante reconocer que los resultados tendrán limitaciones en cuanto a su capacidad de anticipar eventos extremos y poco frecuentes.

Adicionalmente, aunque este estudio se centrará en el estado de Morelos, es relevante considerar que las condiciones geográficas y climáticas pueden variar significativamente entre regiones ((SEMARNAT), 2024). Por lo tanto, aunque la **metodología y los modelos desarrollados** podrían ser aplicables a otras áreas con características similares, su adaptación requerirá una evaluación cuidadosa de los datos locales y de las particularidades climáticas de cada región. En este sentido, se espera que los resultados de esta investigación contribuyan a las estrategias de monitoreo y predicción climática a nivel nacional y regional, aunque su aplicabilidad directa dependerá del contexto específico de cada área.

Finalmente, se reconoce que las **predicciones climáticas tienen un grado de incertidumbre intrínseco**, incluso cuando se utilizan modelos bien establecidos. La variabilidad natural del clima y los posibles cambios futuros en los patrones climáticos debido al cambio climático global representan desafíos adicionales para la precisión de las predicciones (Fernández, 2004). Por ello, los resultados de este

estudio deben ser interpretados como una herramienta para la toma de decisiones y no como predicciones absolutas, entendiendo que siempre existirán márgenes de error asociados con la complejidad del sistema climático.

2. Marco Teórico

Introducción a los Modelos de Predicción

Los modelos de predicción son herramientas fundamentales en el análisis de series temporales, permitiendo estimar valores futuros de una variable basándose en sus datos históricos. Estos modelos son esenciales en diversos campos como la economía, la meteorología y la ingeniería, ya que facilitan la toma de decisiones informadas (Antonio F. Alaminos Fernández, 2023). Los modelos de predicción se clasifican en función del horizonte temporal de pronóstico (Villarreal, 2016):

- **Corto plazo:** Se efectúa cada mes o menos y es útil para predicciones inmediatas.
- **Mediano plazo:** Abarca desde seis meses hasta tres años, adecuado para planificación táctica.
- **Largo plazo:** De tres años en adelante, utilizado en estrategias a largo plazo y planificación estratégica.

Entre los modelos más utilizados en el análisis de series temporales se encuentran los modelos ARIMA y SARIMA. El modelo ARIMA (Autoregressive Integrated Moving Average) se enfoca en datos históricos para capturar relaciones lineales entre observaciones pasadas y realizar predicciones en series estacionarias. Por su parte, el modelo SARIMA (Seasonal ARIMA) extiende esta metodología al incluir componentes estacionales, lo que lo hace ideal para analizar series con patrones cíclicos, como las variaciones mensuales de temperatura o precipitación.

La precisión y eficacia de estos modelos dependen en gran medida de la calidad de los datos históricos, la estacionariedad de la serie y la correcta selección de parámetros para ajustar las tendencias y patrones estacionales. Su aplicación ha demostrado ser altamente efectiva en diversos estudios climáticos y de predicción meteorológica.

Antecedentes

Investigación y Monitoreo Climático en Morelos

El estado de Morelos ha sido objeto de diversas investigaciones relacionadas con la calidad del ambiente y las variables climáticas que lo afectan (Ortiz-Hernández, 2013). En las últimas décadas, la atención se ha centrado en áreas urbanas y semiurbanas como Cuernavaca y Cuautla, donde se ha llevado a cabo un monitoreo continuo de contaminantes atmosféricos, incluyendo partículas suspendidas PM10 y PM2.5, óxidos de nitrógeno (NOx), dióxido de azufre (SO_2) y ozono troposférico (O_3). Estas investigaciones han revelado que las concentraciones de estos contaminantes suelen superar las normas ambientales establecidas, generando preocupaciones sobre su impacto en la salud humana y el ecosistema (Megalópolis, Programa de Gestión para Mejorar la Calidad del Aire en el Estado de Morelos 2018–2027, 2018).

Sin embargo, existe una brecha de conocimiento en relación con las áreas de difícil acceso en Morelos, particularmente aquellas zonas montañosas alejadas de los centros urbanos. Estas áreas representan un desafío para el monitoreo climático debido a la falta de infraestructura y recursos. La información obtenida hasta ahora ha sido crucial para comprender mejor los patrones de variabilidad climática en la región, sin embargo sigue siendo insuficiente para construir un modelo integral que abarque toda la diversidad climática de Morelos (Morelos M. T., 2024).

Recientemente, la tendencia en investigaciones climaticas han comenzado a centrarse en el uso de modelos matemáticos y técnicas de predicción para anticipar las variaciones climáticas (Páez, 2022). Estos estudios han demostrado la necesidad de contar con una herramienta que permita predecir con precisión las condiciones meteorológicas en las áreas especificas de Morelos, especialmente para mitigar los riesgos asociados con eventos climáticos extremos, como sequías o lluvias intensas. La implementación de modelos como ARIMA y SARIMA, junto con el uso de técnicas de aprendizaje automático, se presenta como una oportunidad para llenar esta brecha y desarrollar un sistema de predicción climática más efectivo en la región (Chinlli, 2021).

Estudios Internacionales sobre Predicción Climática

A nivel internacional, la predicción climática ha sido una prioridad en la investigación científica, con numerosos estudios realizados en disntos países los cuales han desarrollado extensas redes de monitoreo que incluyen tanto áreas urbanas como rurales ((IPCC), 2018). En Oaxaca, por ejemplo, se ha utilizado una combinación de modelos estadisticos auto regresivos, para analizar y predecir la velocidad del viento, la temperatura y la potencia eléctrica generada en parques eólicos (Sara Edith Pinzón Pineda, 2018). Estos modelos han sido fundamentales para evaluar la eficacia de las energías renovables en cubrir la demanda eléctrica y han demostrado una notable precisión al capturar la variabilidad en la velocidad del viento.

En América Latina, Colombia también ha realizado estudios significativos, utilizando datos históricos y modelos de distribución estadística, como la función de distribución de Weibull, para evaluar el potencial solar y eólico en Bucaramanga. Estos estudios han utilizado diversos métodos para obtener parámetros clave que permitan entender la correlación entre las variables meteorológicas y su impacto en la generación de energía. Las conclusiones de estas investigaciones han resaltado la importancia de contar con datos históricos y estaciones de monitoreo en ubicaciones estratégicas para obtener resultados precisos en los modelos predictivos (Pedro Pablo Vergara-Barrios, 2014).

Los modelos ARIMA y SARIMA se han destacado como herramientas útiles en la predicción de variables meteorológicas en otros contextos. En estudios realizados en la India y en la predicción de la radiación solar en intervalos de tiempo que van desde 5 minutos hasta varias horas, el modelo ARIMA ha mostrado su capacidad para capturar patrones no lineales y variabilidad en las series temporales climáticas (G. Javier Aguado-Rodríguez, 2016). Estas aplicaciones demuestran la versatilidad y eficacia en la predicción climática, aunque también se ha señalado la necesidad de combinar modelos tradicionales con técnicas más avanzadas, como las redes neuronales, para mejorar la precisión de las predicciones.

La modelización de variables climáticas ha sido un área de estudio en constante evolución. Diversos modelos, desde los tradicionales modelos estadísticos hasta los más avanzados algoritmos de aprendizaje automático, se han aplicado para predecir variables como temperatura, precipitación y velocidad del viento. Entre los modelos más utilizados se encuentran los modelos autorregresivos, como el ARIMA, y sus extensiones, como el SARIMA, que incorporan componentes estacionales para capturar las fluctuaciones periódicas de las series temporales climáticas (Chinlli, 2021).

El modelo ARIMA ha sido aplicado con éxito en la predicción de la precipitación y las temperaturas extremas en distintos lugares del mundo. Por ejemplo, en México, se ha utilizado para predecir las condiciones climáticas en estaciones meteorológicas junto con datos del Servicio Meteorológico Nacional, analizando datos históricos para identificar patrones y tendencias (G. Javier Aguado-Rodríguez, 2016). Este tipo de modelado permite analizar la relación entre las variables y sus valores pasados, ofreciendo predicciones útiles en condiciones de baja precipitación o situaciones meteorológicas estables.

Por otro lado, el modelo SARIMA ha demostrado ser eficaz en la predicción de series temporales con patrones estacionales marcados. Este modelo se ha utilizado en estudios que buscan predecir eventos climáticos como el monzón en la India, así como en la estimación de la demanda de agua en periodos específicos (Martínez, 2019). La capacidad del modelo SARIMA para incorporar componentes estacionales lo hace particularmente adecuado para analizar datos climáticos que presentan ciclos recurrentes, como la temperatura y las precipitaciones estacionales.

Además de los modelos ARIMA y SARIMA, las técnicas de aprendizaje automático, como las Redes Neuronales Artificiales, han ganado popularidad en los ultimos años hacia la predicción climática debido a su capacidad para manejar grandes volúmenes de datos y capturar patrones complejos en las series temporales. Aunque estos modelos requieren una mayor capacidad computacional y un proceso de entrenamiento más complejo, ofrecen la ventaja de poder modelar relaciones no

lineales entre las variables climáticas (Marcelo Alejandro Tosini, 2000). Dichos modelos han proporcionando predicciones más precisas en comparación con los modelos estadísticos tradicionales.

En el contexto del estado de Morelos, la aplicación de modelos ARIMA y SARIMA, complementados con técnicas de aprendizaje automático, puede ser una estrategia efectiva para desarrollar un sistema integral de predicción climática. La recopilación y el análisis sistemático de datos provenientes de las estaciones meteorológicas, junto con la implementación de estos modelos, permitirán obtener información más precisa sobre las variaciones climáticas en la región. Esto, a su vez podria facilitar la implementación de medidas de adaptación y mitigación frente a los efectos del cambio climático.

Planteamiento del Problema

El cambio climático es un fenómeno global que ha generado impactos significativos en diversas regiones del mundo, incluyendo el estado de Morelos (Megalópolis, Programa de Gestión para Mejorar la Calidad del Aire en el Estado de Morelos 2018–2027, 2018). La variabilidad en las condiciones climáticas, como las fluctuaciones en la temperatura, los cambios en los patrones de precipitación y la ocurrencia de eventos extremos, representa un desafío creciente para la planificación y gestión de los recursos naturales. En este contexto, la predicción precisa de las variables climáticas es crucial para mitigar los efectos adversos sobre la salud pública, la agricultura, la infraestructura y el medio ambiente.

El estado de Morelos, con su topografía compleja y la presencia de áreas montañosas de difícil acceso, enfrenta retos adicionales para el monitoreo y la evaluación de las condiciones climáticas.

Tabla 1 Topografía de Morelos

Elevaciones principales Cuadro 1,3

Nombre	Latitud norte			Longitud oeste			Altitud
	Grados	Minutos	Segundos	Grados	Minutos	Segundos	(msnm)
Volcán Popocatépetl	19	1	24	98	37	22	5419
Volcán Chichinautzin	19	5	25	99	8	8	3460
Volcán Chalchihuites	19	6	4	99	17	50	3420
Cerro Tres Marias (Cerro Grande)	19	4	3	99	12	53	3280
Volcán Tetepetl	19	5	24	99	11	0	3260
Volcán Oyametepetl	19	3	38	99	2	3	3250
Volcán Otlayucan	19	2	54	99	37	35	3150
Volcán Tezoyo	19	5	48	99	13	28	3090
Cerro el Tezoyo	19	1	53	98	55	40	2600
Cerro Cihuapapalotl	18	58	1	99	0	21	2 150
Volcán Yeteco	18	55	30	98	49	37	2 100
Cerro el Potrero de los Burros	18	30	26	99	21	39	1 920
Cerro de la Corona	18	55	20	99	6	48	1 840
Cerro Pericón	18	28	57	98	56	9	1 740
Cerro Tencuancoalco	18	44	2	98	52	11	1 700
Cerro Temazcales	18	33	27	98	56	4	1 600
Cerro Jojutla	18	34	36	99	9	7	1 540
cerro santa María	18	38	57	99	7	22	1 500
Cerro Colotepec	18	47	25	99	16	25	1 440
Cerro la Vibora	18	48	54	99	19	27	1 440
Cerro el Injerto	18	41	31	99	1	43	1 400
Cerro Pachón	18	32	42	99	4	38	1 220

Fuente: INEGI. Conjunto de Datos Vectoriales de Información Topográfica Escala 1:250000 serie VI. Morelos.

La mayoría de los esfuerzos de monitoreo se han concentrado en áreas urbanas y semiurbanas, mientras que las zonas rurales y montañosas permanecen con un menor monitoreo, se tiene registro de que las zonas donde la capacidad tecnologica es limitada, se requieren metodologias y modelos numéricos que aumenten la capacidad para los estudios en dichas areas (Arisleidys Peña-de la Cruz, 2021). Esta brecha en la recopilación de datos impide una comprensión completa de los patrones climáticos regionales y limita la capacidad de implementar estrategias efectivas de adaptación y mitigación frente al cambio climático en áreas de dificil acceso.

Contexto General del Problema

La predicción de variables climáticas en regiones como Morelos es un desafío debido a varios factores. En primer lugar, la variabilidad natural de las condiciones climáticas en la región, influenciada por su geografía y proximidad con diferentes sistemas atmosféricos, dificulta la identificación de patrones estables. En segundo lugar, la falta de infraestructura en áreas remotas y de difícil acceso limita la cantidad y calidad de los datos recopilados, lo que afecta la precisión de los modelos actuales (Megalópolis, Programa de Gestión para Mejorar la Calidad del Aire en el Estado de Morelos 2018–2027, 2018). Finalmente, sabemos que existe unacreciente incidencia de eventos climáticos extremos, como sequías prolongadas y lluvias torrenciales, por ello mismo se subraya la necesidad de contar con herramientas

predictivas que permitan anticipar estos eventos y planificar adecuadamente las medidas de mitigación (Climático I. N., 2018).

Estudios previos, se ha demostrado que modelos como ARIMA y SARIMA son efectivos para predecir variables climáticas en contextos similares (Shabnam Kumari, 2024). Sin embargo, la aplicación de estos modelos en Morelos requiere una adaptación particular debido a las particularidades geográficas y climáticas de la región. Es necesario abordar el problema desde una perspectiva integral, combinando el uso de técnicas avanzadas de modelización con la recopilación y análisis sistemático de datos provenientes de diferentes estaciones meteorológicas en el estado.

Descripción del Problema

El problema principal de este estudio radica en la dificultad para obtener predicciones climáticas precisas en las áreas de difícil acceso en las cuales no se cuenta con estaciones de monitoreo en funcion o que en ocasiones se encuentran en mantenimiento dentro del estado de Morelos. Si bien contamos con existencia de estaciones meteorológicas en algunas partes del estado, la cobertura es limitada, ya que de las 5,400 estaciones que existen en todo México, unicamente 2,800 reportan datos actualmente (Servicio Meteorológico Nacional, 2024). Esta falta de datos impide la construcción de modelos climáticos integrales que puedan ofrecer predicciones confiables para dichas áreas ya que en ocasiones se encuentran fuera de servicio o en mantenimiento.

La ausencia de información constante y actualizada sobre las condiciones climáticas en distintas zonas de Morelos representa un obstáculo significativo para la toma de decisiones en sectores clave, como la agricultura, la gestión de recursos hídricos y la protección civil. Además, el cambio climático ha intensificado la necesidad de desarrollar modelos predictivos robustos que sean capaces de adaptarse a las características particulares de cada región y de capturar la variabilidad estacional inherente a los fenómenos meteorológicos (Climático G. I., 2021).

Relevancia del Estudio en Áreas de Difícil Acceso

Este estudio se centra en desarrollar un modelo de predicción climática que aborde específicamente las necesidades de las áreas de difícil acceso en el estado de Morelos. La relevancia de este enfoque radica en que estas zonas, a pesar de su importancia ecológica y socioeconómica, han sido subrepresentadas en las investigaciones climáticas debido a la falta de infraestructura de monitoreo. La implementación de modelos como ARIMA y SARIMA, que permiten el análisis de series temporales y la incorporación de patrones estacionales, ofrece una solución viable para mejorar la comprensión de las condiciones climáticas en estas áreas (Adhikari, 2021).

El desarrollo de un modelo predictivo integral tiene la capacidad de beneficiar a la comunidad y a las autoridades locales al proporcionar una herramienta que facilite la anticipación de eventos climáticos extremos y con ello buscar la implementación de medidas preventivas. Además, contribuirá al avance científico en el campo de la modelización climática, particularmente en contextos con desafíos similares de accesibilidad y recopilación de datos.

Hipótesis

Este estudio plantea la hipótesis de que la implementación de modelos estadisticos para el analisis y pronostico de series temporalaes(SARIMA), basados en datos recopilados de estaciones meteorológicas distribuidas estratégicamente en Morelos, permitirá predecir con precisión las variables climáticas en áreas de difícil acceso del estado. Se espera que los modelos desarrollados puedan capturar la variabilidad estacional y las tendencias de mediano plazo presentes en las series temporales de temperatura y precipitación.

Para validar la hipótesis, se analizará una serie temporal de datos climáticos recopilados en estaciones seleccionadas en Morelos, aplicando el modelo SARIMA para evaluar su capacidad predictiva. Se espera que este modelo, al ser ajustados a las características climáticas particulares de la región, proporcionen predicciones confiables que puedan tener la capacidad de usarse para mejorar la gestión de los recursos naturales y mejorar la planificación en casos de eventos climáticos extremos.

3. PROCEDIMIENTO

En este capítulo se presenta el procedimiento empleado en el desarrollo del estudio, la cual tiene como objetivo principal construir modelos predictivos para analizar las variables climáticas en el estado de Morelos. La metodología utilizada en esta investigación sigue un enfoque cuantitativo, ya que se fundamenta en el análisis numérico de datos históricos provenientes de estaciones climatológicas, todas en el estado de Morelos. Este enfoque es adecuado para el estudio de los patrones climáticos, permitiendo aplicar modelos de series temporales y técnicas estadísticas para realizar predicciones precisas.

El proceso metodológico se estructura en varias etapas, comenzando con la recolección y procesamiento de datos de las estaciones climatológicas de la región. Posteriormente, se llevan a cabo diversas actividades para el diseño y ajuste de los modelos predictivos, especificamente SARIMA. Finalmente, para este tipo de modelos es necesario aplicar indicadores estadísticos para evaluar y validar el desempeño de los modelos generados como lo son el error cuadratico medio (Freddy Soto-Bravo, 2019).

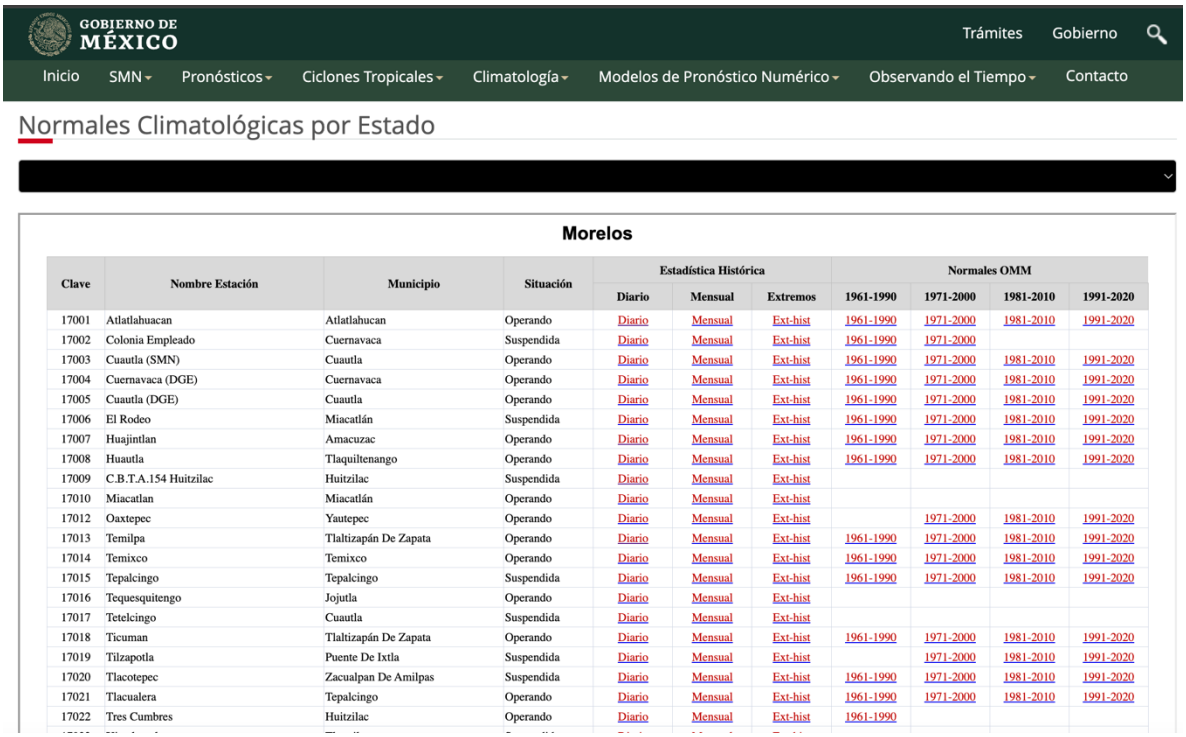
A continuación, se detallan las distintas etapas y técnicas utilizadas en este estudio, desde el diseño experimental hasta la validación de los resultados.

Obtención de Datos del Servicio Meteorológico Nacional

Para desarrollar un modelo predictivo preciso de las variables climáticas en el estado de Morelos, fue fundamental contar con datos históricos confiables y detallados. La principal fuente de información utilizada en este estudio fue el **Servicio Meteorológico Nacional (SMN)** de México, organismo encargado de generar y difundir información meteorológica y climatológica a nivel nacional.

El SMN proporciona acceso público a sus bases de datos a través de su portal web oficial.

Los datos climatológicos utilizados se obtuvieron del enlace:
https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica/normales-climatologicas-por-estado



Morelos

Clave	Nombre Estación	Municipio	Situación	Estadística Histórica			Normales OMM			
				Diario	Mensual	Extremos	1961-1990	1971-2000	1981-2010	1991-2020
17001	Atlatlahuacan	Atlatlahucan	Operando	Diario	Mensual	Ext-hist	1961-1990	1971-2000	1981-2010	1991-2020
17002	Colonia Empleado	Cuernavaca	Suspendida	Diario	Mensual	Ext-hist	1961-1990	1971-2000		
17003	Cuautla (SMN)	Cuautla	Operando	Diario	Mensual	Ext-hist	1961-1990	1971-2000	1981-2010	1991-2020
17004	Cuernavaca (DGE)	Cuernavaca	Operando	Diario	Mensual	Ext-hist	1961-1990	1971-2000	1981-2010	1991-2020
17005	Cuautla (DGE)	Cuautla	Operando	Diario	Mensual	Ext-hist	1961-1990	1971-2000	1981-2010	1991-2020
17006	El Rodeo	Miacatlán	Suspendida	Diario	Mensual	Ext-hist	1961-1990	1971-2000	1981-2010	1991-2020
17007	Huajintlan	Amacuzac	Operando	Diario	Mensual	Ext-hist	1961-1990	1971-2000	1981-2010	1991-2020
17008	Huautla	Tlaquiltenango	Operando	Diario	Mensual	Ext-hist	1961-1990	1971-2000	1981-2010	1991-2020
17009	C.B.T.A.154 Huitzilac	Huitzilac	Suspendida	Diario	Mensual	Ext-hist				
17010	Miacatlan	Miacatlán	Operando	Diario	Mensual	Ext-hist				
17012	Oaxtepec	Yautepec	Operando	Diario	Mensual	Ext-hist		1971-2000	1981-2010	1991-2020
17013	Temilpa	Tlaltizapán De Zapata	Operando	Diario	Mensual	Ext-hist	1961-1990	1971-2000	1981-2010	1991-2020
17014	Temixco	Temixco	Operando	Diario	Mensual	Ext-hist	1961-1990	1971-2000	1981-2010	1991-2020
17015	Tepalcingo	Tepalcingo	Suspendida	Diario	Mensual	Ext-hist	1961-1990	1971-2000	1981-2010	1991-2020
17016	Tequesquitengo	Jojutla	Operando	Diario	Mensual	Ext-hist				
17017	Tetelcingo	Cuautla	Suspendida	Diario	Mensual	Ext-hist				
17018	Ticuman	Tlaltizapán De Zapata	Operando	Diario	Mensual	Ext-hist	1961-1990	1971-2000	1981-2010	1991-2020
17019	Tilzapotla	Puente De Ixtla	Suspendida	Diario	Mensual	Ext-hist		1971-2000	1981-2010	1991-2020
17020	Tlacotepec	Zacualpan De Amilpas	Suspendida	Diario	Mensual	Ext-hist	1961-1990	1971-2000	1981-2010	1991-2020
17021	Tlacualera	Tepalcingo	Operando	Diario	Mensual	Ext-hist	1961-1990	1971-2000	1981-2010	1991-2020
17022	Tres Cumbres	Huitzilac	Operando	Diario	Mensual	Ext-hist	1961-1990			

Ilustración 1 Página CONAGUA descarga estaciones climáticas-Morelos

En este sitio, el SMN ofrece información climatológica normalizada por estado, facilitando el acceso a datos históricos de variables como temperatura, precipitación, evaporacion, etc (Nacional, 2024).

Identificación de Estados y Estaciones Climatológicas

Cada estado de la República Mexicana está identificado por una clave única, asignada por el SMN, que permite organizar y categorizar la información de manera eficiente. Dentro de cada estado, existen múltiples estaciones climatológicas, las cuales también poseen una clave única de estación. Esta codificación es esencial para:

- Localización Geográfica Precisa: Permite identificar la ubicación exacta de cada estación.
- Organización de Datos: Facilita la estructuración y manejo de grandes volúmenes de información.
- Integración de Información: Posibilita la correlación de datos entre diferentes estaciones y periodos.

Acceso a Datos Climáticos Detallados

El SMN ofrece diversos tipos de datos climatológicos, los cuales pueden ser accedidos y descargados según las necesidades del usuario:

- Datos Diarios: Registros detallados de variables climáticas medidos diariamente en cada estación.
- Datos Mensuales: Promedios y acumulados mensuales de las variables, proporcionando una visión general de las tendencias climáticas.
- Datos de Extremos: Valores máximos y mínimos históricos de variables específicas, útiles para el análisis de eventos climáticos extremos.

Para acceder a estos datos, se sigue el procedimiento:

- Selección del Estado: En el portal del SMN, se elige el estado de interés (en este caso, Morelos) utilizando su clave correspondiente.
- Selección de Estaciones: Al seleccionar el estado, se visualiza un listado de todas las estaciones climatológicas disponibles en esa entidad, junto con sus respectivas claves.
- Descarga de Datos: Al hacer clic en una estación específica, se accede a enlaces que permiten descargar los datos en formato de texto plano (.txt). Estos archivos contienen los registros de las variables climatológicas en el formato seleccionado (diario, mensual o extremos).

Creación del Catálogo de Estaciones Climatológicas

Para realizar un análisis exhaustivo y manejar eficientemente grandes volúmenes de datos provenientes de múltiples estaciones, se identificó la necesidad de automatizar el proceso de descarga y procesamiento de la información. Realizar la descarga manual de los archivos de cada estación sería exhaustivo debido al tiempo y esfuerzo requeridos, además de ser propenso a errores humanos.

El primer paso en este proceso de automatización fue la **creación de un archivo en formato Excel** que sirviera como catálogo centralizado de todas las estaciones climatológicas del estado de Morelos. Este catálogo incluyó las columnas de Clave,

Nombre de la estación, Municipio al que pertecene dicha estacion, Situación actual (suspendida u operando) y Estado.

Tabla 2 Ejemplo-Catálogo estaciones

Clave	Nombre Estación	Municipio	Situación	Estado
17001	Atlatlahuacan	Atlatlahucan	Operando	Morelos
17002	Colonia Empleado	Cuernavaca	Suspendida	Morelos
17003	Cuautla (SMN)	Cuautla	Operando	Morelos
17004	Cuernavaca (DGE)	Cuernavaca	Operando	Morelos

La creación de este catálogo permitió centralizar eficientemente la información de todas las estaciones en un único documento, lo que simplifica su manejo y consulta. Posterior a la creación del catálogo, se creó un script el cual ayudó a generar una descarga masiva para todos los datos de las centrales que se encontrarán en el estado de Morelos, el código permitió eliminar la necesidad de realizar este proceso manualmente, estandarizando la información y modificando el formato de texto a archivos CSV, de igual forma se diseñó con la posibilidad de escalabilidad, permitiendo descargar datos de una o varias estaciones definidas, adaptándose a las necesidades específicas del estudio actuales y futuras.

El script se desarrolló utilizando Python debido a sus capacidades para el manejo de datos y la disponibilidad de librerías como requests para realizar solicitudes HTTP y csv para la manipulación de archivos CSV.
El código realiza las siguientes funciones principales:

1. **Definición del Estado y Estaciones:** Permite especificar el código del estado y una lista de códigos de las estaciones climatológicas de interés.
2. **Construcción de URLs de Descarga:** Genera las URLs específicas para acceder a los datos de cada estación en el formato deseado.
3. **Solicitud y Descarga de Datos:** Realiza solicitudes HTTP a las URLs construidas y verifica el éxito de la descarga.

4. **Procesamiento y Conversión de Datos:** Convierte el contenido de los archivos de texto en formato CSV, estructurando los datos en columnas con encabezados apropiados.
5. **Almacenamiento de Archivos:** Guarda los archivos CSV en una ubicación específica del sistema, organizándolos de manera coherente.

Estructura del Código

A continuación, se presenta el código utilizado, seguido de una explicación detallada de cada una de sus partes:

```
import requests
import csv
import os

# Definir el código del estado
codigo_estado = "mor"

# Crear una lista de códigos de estación
lista_codigos_estacion = ["0001", "0002", "0003", "0018"]  # Agregar los códigos
de estación a consultar

def descargar_datos_txt_y_guardar_csv(codigo_estado, codigo_estacion):
    # Construcción de la URL con el código del estado y de la estación
    url =
f"https://smn.conagua.gob.mx/tools/RESOURCES/Normales_Climatologicas/Diarios/{cod
igo_estado}/dia/{codigo_estacion}.txt"

    # Realizar la solicitud a la URL
    response = requests.get(url)

    if response.status_code == 200:
        print(f"Datos descargados exitosamente desde: {url}\n")

        # Convertir el contenido del archivo en líneas
        lineas = response.text.splitlines()

        # Encontrar la línea donde comienzan los datos climáticos
        for i, linea in enumerate(lineas):
            if "FECHA" in linea:
                indice_datos = i + 1  # Índice donde comienzan los datos reales
                break

        # Crear el archivo CSV en la ruta especificada
```

```
        nombre_archivo_csv =
f"/ruta/a/directorio/{codigo_estado}_{codigo_estacion}.csv"

        with open(nombre_archivo_csv, mode="w", newline="", encoding="utf-8") as
archivo_csv:
            escritor_csv = csv.writer(archivo_csv)

            # Escribir encabezados
            escritor_csv.writerow(["Fecha", "Precip (mm)", "Evap (mm)", "Tmax
(°C)", "Tmin (°C)"])

            # Escribir los datos climáticos a partir de la línea identificada
            for linea in lineas[indice_datos:]:
                escritor_csv.writerow(linea.split())

        print(f"Archivo CSV guardado exitosamente en: {nombre_archivo_csv}\n")
    else:
        print(f"Error al acceder a la URL. Código de estado HTTP:
{response.status_code} para la estación {codigo_estacion}\n")

# Recorrer la lista de códigos de estación
for codigo_estacion in lista_codigos_estacion:
    descargar_datos_txt_y_guardar_csv(codigo_estado, codigo_estacion)
```

Explicación Detallada del Código

requests: Permite realizar solicitudes HTTP para acceder a los datos en línea.

csv: Facilita la lectura y escritura de archivos en formato CSV.

os: Proporciona funciones para interactuar con el sistema operativo, como verificar y crear directorios.

codigo_estado: Variable que almacena el código del estado de interés (en este caso, "mor" para Morelos).

lista_codigos_estacion: Lista que contiene los códigos de las estaciones climatológicas a consultar. Se pueden agregar tantos códigos como sea necesario.

Función descargar_datos_txt_y_guardar_csv: Recibe como parámetros el código del estado y el código de la estación.

Construcción de la URL:

- La URL se construye concatenando la dirección base del SMN con los códigos proporcionados, siguiendo el formato específico para acceder a los archivos de texto de las estaciones.

Solicitud HTTP:

- Se realiza una solicitud GET a la URL construida utilizando requests.get(url).
- Se verifica si la respuesta tiene un código de estado 200 (OK), lo que indica que la solicitud fue exitosa.

Procesamiento del Contenido:

- El contenido del archivo de texto se separa en líneas utilizando splitlines().
- Se busca la línea que contiene "FECHA", lo cual indica el inicio de los datos climáticos.
- Se identifica el índice de esa línea para saber a partir de dónde extraer los datos.

Escritura del Archivo CSV:

- Se define la ruta y nombre del archivo CSV donde se guardarán los datos.
- Se abre el archivo en modo escritura ('w') con codificación UTF-8.
- Se escribe una fila de encabezados que describe cada columna de datos.
- Se itera sobre las líneas de datos, separando cada línea en elementos y escribiéndolos en el archivo CSV.

Manejo de Errores:

- Si la solicitud HTTP no es exitosa, se imprime un mensaje de error indicando el código de estado y la estación afectada.

Se itera sobre cada código de estación en la lista, llamando a la función descargar_datos_txt_y_guardar_csv para cada uno.

Con lo anterior realizado, los beneficios obtenidos fueron una significativa reducción en el tiempo de recolección de datos, asegurando consistencia y minimizando errores humanos en el proceso. Además, el diseño flexible del script permite actualizar periódicamente la información o adaptarla para otros estados y estaciones con facilidad. Los archivos generados se integraron de manera eficiente al flujo de análisis y modelización mediante herramientas como pandas,

estableciendo una base sólida para futuras expansiones o actualizaciones de la base de datos climatológica.

Listado de Estaciones Operativas

A continuación, se presenta el listado completo de las 42 estaciones climatológicas en el estado de Morelos:

1. **Atlatlahucan**
2. **Cuautla (SMN)**
3. **Cuernavaca (DGE)**
4. **Cuautla (DGE)**
5. **Huajintlán**
6. **Huautla**
7. **Miacatlán**
8. **Oaxtepec**
9. **Temilpa**
10. **Temixco**
11. **Tequesquitengo**
12. **Ticumán**
13. **Tlacualera**
14. **Tres Cumbres**
15. **Yautepec**
16. **Jonacatepec**
17. **Jojutla (DGE)**
18. **Lagunillas de Rayón**
19. **Escuela Biología UAEM**
20. **Nexpa**
21. **E.T.A. 040 Amacuzac**
22. **Hueyapan E-4**
23. **Huitzilac**
24. **Puente Ocuituco E-5**
25. **Totolapan E-lO**
26. **El Limón**
27. **Cuentepec**
28. **Alpuyeca**
29. **Cuautlita**
30. **El Higuerón**
31. **Xoxocotla**
32. **Amilcingo**
33. **Achichipico D-4**
34. **Ahuehuetzingo**
35. **Apancingo**
36. **Ayudame**
37. **Chavarría**
38. **Tecajec**
39. **Tecomalco**
40. **Valle de Vázquez**
41. **El Vigía**
42. **Cuernavaca (OBS)**

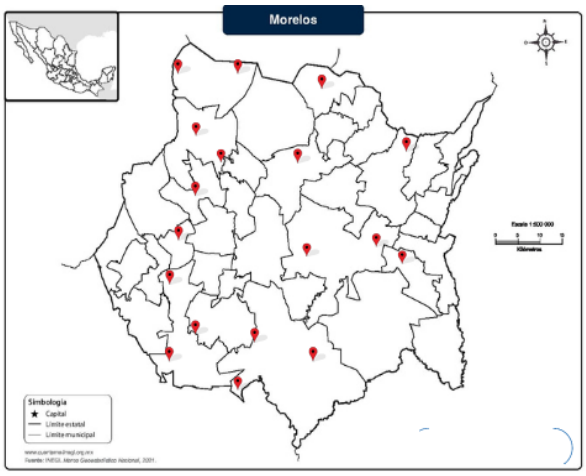


Ilustración 2 Mapa estaciones climáticas Morelos

Variables Climáticas Registradas

Las estaciones proporcionan datos sobre una variedad de variables climáticas, entre las que destacan:

- **Temperatura Máxima y Mínima (°C):** Indican las temperaturas más altas y más bajas registradas diariamente.
- **Precipitación (mm):** Medición de la cantidad de lluvia caída en un periodo de 24 horas.
- **Evaporación (mm):** Cantidad de agua que pasa del estado líquido al gaseoso.

La ilustración 3 muestra una estación climatológica ubicada en una zona montañosa del estado de Morelos, diseñada para monitorear variables climáticas como temperatura, y precipitación. Este tipo de estaciones es fundamental para recolectar datos en áreas de difícil acceso, donde las condiciones geográficas y climáticas varían significativamente. Su instalación en entornos naturales permite obtener mediciones representativas, que son esenciales para la implementación de modelos

predictivos, análisis de microclimas y estrategias de mitigación frente a los efectos del cambio climático.



Ilustración 3 Estación climatológica en zona montañosa de Morelos.

Datos Históricos y Periodo de Operación

El periodo de operación de las estaciones climatológicas varía considerablemente, lo que afecta la cantidad de datos históricos disponibles. Algunas estaciones, como Cuernavaca (DGE) y Cuautla (DGE), cuentan con registros que abarcan varias décadas, proporcionando series temporales extensas y valiosas para el análisis. Por otro lado, estaciones más recientes tienen un periodo de operación más corto, lo que limita la longitud de sus series temporales, pero ofrecen información más actualizada y relevante para estudios recientes.

Calidad de los Datos y primera selección para el analisis

La calidad de los datos proporcionados por las estaciones es fundamental para el éxito del modelo predictivo. Se consideraron los siguientes aspectos:

- **Cantidad de los Datos:** Se evaluó la cantidad de datos faltantes en cada estación ya que estaciones con altos porcentajes de datos faltantes podrían afectar la precisión del modelo.

- **Consistencia y Fiabilidad:** Se revisaron los registros para identificar inconsistencias o anomalías que pudieran indicar errores de medición o registro.
- **Frecuencia de Actualización:** Se priorizaron estaciones que mantienen actualizados sus registros, asegurando que el modelo utilice información reciente.

Aunque existen 42 estaciones operativas, para el análisis y desarrollo del modelo predictivo se seleccionaron aquellas que garantizan representatividad geográfica en todas las regiones del estado, priorizando estaciones con registros completos y de alta calidad, así como aquellas ubicadas en áreas estratégicas, como zonas agrícolas, reservas naturales o regiones propensas a desastres naturales.

Tabla 3 Estaciones climatológicas más representativas de Morelos

Estación	Altitud (msnm)	Datos Faltantes (%)	Zona
Cuernavaca (DGE)	1,510	2%	Urbana
Huitzilac	2,500	5%	Montañosa
Tequesquitengo	900	1%	Rural
Tres Cumbres	2,800	3%	Montañosa
Jojutla (DGE)	890	4%	Semiurbana

Los datos recopilados de las estaciones seleccionadas se integraron en una base de datos centralizada tras un proceso de limpieza y estandarización. Esto permitió realizar análisis estadístico a nivel estatal, comparar condiciones climáticas entre regiones para identificar similitudes y diferencias, igualmente aplicar validación cruzada utilizando datos de distintas estaciones, lo que fortaleció la precisión y robustez del modelo predictivo inicial.

Durante la recopilación y análisis de los datos de las estaciones climatológicas, se identificaron desafíos como datos faltantes o incompletos que requirieron técnicas de imputación o la exclusión de ciertos periodos. Además, la calidad de los datos varió significativamente entre estaciones, especialmente en aquellas ubicadas en áreas remotas con menor mantenimiento. Otro desafío fue la actualización irregular de los registros, lo que afectó la contemporaneidad de la información disponible.

Las estaciones climatológicas no solo son herramientas para obtener datos, sino que también contribuyen a la seguridad pública al monitorear condiciones que pueden derivar en fenómenos peligrosos, apoyan al sector agrícola proporcionando información clave para la planificación de siembras y cosechas, y fomentan la educación ambiental al aumentar la conciencia sobre el clima local y su impacto en las actividades humanas.

Procesamiento y Limpieza de Datos

El procesamiento y la limpieza de los datos son etapas fundamentales para garantizar la calidad, precisión y confiabilidad de los modelos predictivos desarrollados en este estudio. Los datos climáticos obtenidos de las estaciones climatológicas pueden presentar diversas inconsistencias, como valores nulos, errores de registro, formatos heterogéneos y duplicados, que deben ser identificados y corregidos antes de su análisis.

A continuación, se detallan los procedimientos y técnicas aplicadas para el procesamiento y limpieza de los datos, asegurando que el conjunto de datos resultante sea adecuado para la modelización y análisis estadístico.

Unificación del Formato de Fecha

El formato de fecha es crucial en el análisis de series temporales, ya que permite alinear correctamente los registros en función del tiempo. Inconsistencias en el formato de fecha pueden provocar desalineaciones en los datos, errores en los cálculos y dificultades en la comparación entre diferentes conjuntos de datos.

Procedimiento Aplicado

- **Identificación de Formatos Existentes:** Se detectó que los datos provenientes de diferentes estaciones podían tener formatos de fecha variados, como DD/MM/AAAA, MM/DD/AAAA o incluso formatos numéricos sin separadores.

- **Selección del Formato Estándar:** Se optó por estandarizar todas las fechas al formato **DD/MM/AAAA**, que es ampliamente utilizado en México y facilita la interpretación y ordenamiento cronológico.
- **Conversión de Fechas:** Utilizando herramientas de programación en Python, específicamente la librería pandas, se convirtieron las fechas al formato seleccionado. Se manejaron excepciones para fechas mal formateadas o registros con errores.
- **Verificación de Consistencia:** Se verificó que todas las fechas estuvieran correctamente formateadas y ordenadas cronológicamente. Se identificaron y corrigieron casos de fechas fuera de rango o inconsistentes.

Detección y Corrección de Datos Nulos

Identificación de Datos Faltantes

Los datos nulos o faltantes son comunes en registros climáticos debido a fallas en los equipos de medición, condiciones meteorológicas extremas o errores humanos en la captura de datos. La presencia de datos faltantes puede afectar significativamente el desempeño de los modelos predictivos si no se manejan adecuadamente.

Metodología de Tratamiento

- **Detección de Valores Nulos:** Se utilizaron funciones de pandas para identificar celdas vacías o valores marcados como NaN (Not a Number).

Análisis del Patrón de Datos Faltantes:

- **Patrón Aleatorio:** Si los datos faltantes no mostraban un patrón específico, se consideró que eran aleatorios.
- **Patrón Sistemático:** Si se identificaba que ciertos periodos o estaciones tenían altos porcentajes de datos faltantes, se evaluó su inclusión en el análisis.

Imputación de Datos Faltantes:

- **Interpolación Lineal:** Se aplicó principalmente para variables continuas como temperatura.

- **Promedio Móvil:** Utilizando el promedio de los 7 días anteriores y posteriores.

La interpolación y el promedio móvil son técnicas reconocidas para el tratamiento de datos faltantes en series temporales, ya que preservan la continuidad de la serie, evitando rupturas que puedan alterar el análisis de tendencias y patrones estacionales, y reducen sesgos al basarse en datos cercanos en el tiempo, minimizando la introducción de valores atípicos o no representativos.

Eliminación de Datos Duplicados

Problemas Asociados con Datos Duplicados

Los registros duplicados pueden surgir por errores en la consolidación de datos, registros repetidos en las fuentes originales o fallas en los sistemas de captura. La presencia de duplicados puede distorsionar los análisis estadísticos, afectando medidas como la media, la varianza y los percentiles.

Procedimiento de Identificación y Eliminación

- **Detección de Duplicados:**
    - Se utilizó la función duplicated() de pandas para identificar registros que tenían valores idénticos en todas las columnas o en las columnas clave (e.g., Fecha y Estación).

Análisis de la Frecuencia de Duplicados:

- Se evaluó la cantidad de veces que un registro estaba duplicado. Si un registro aparecía más de tres veces, se consideró como un error sistemático.

Eliminación de Duplicados:

- Se eliminaron los registros duplicados manteniendo una sola instancia de cada observación única.

Verificación Posterior:

- Se realizó una verificación para asegurarse de que no se eliminaron registros únicos por error y que la consistencia temporal se mantenía intacta.

Verificación y Corrección de Valores Atípicos

Identificación de Valores Fuera de Rango

Los valores atípicos o outliers pueden deberse a errores de medición, fallas en los equipos, condiciones meteorológicas extremas o errores en la transcripción de datos. Estos valores pueden influir desproporcionadamente en los análisis estadísticos y en el ajuste de los modelos predictivos.

Análisis Estadístico Descriptivo:

- Cálculo de medidas de tendencia central y dispersión (media, mediana, desviación estándar).
- Métodos Gráficos: Boxplots para visualizar la distribución de los datos y detectar valores extremos.
- Gráficos de Series Temporales: Para identificar cambios abruptos o inconsistencias temporales.
- Criterios de Rango Aceptable: Se establecieron límites basados en el conocimiento experto y registros históricos de la región. Por ejemplo, se definió que la temperatura en Morelos difícilmente supera los 45°C o cae por debajo de los -5°C.

Corrección de Valores Atípicos

- Verificación de Datos Originales:
- Se consultaron los registros originales para confirmar si el valor era un error de transcripción.

Imputación o Eliminación:

- **Imputación:** Si se determinó que el valor era erróneo, se reemplazó utilizando técnicas similares a las aplicadas para datos faltantes.
- **Eliminación:** En casos donde el valor no podía ser verificado o corregido, y su inclusión afectaba significativamente el análisis, se optó por eliminar el registro, documentando esta decisión.

Ejemplos Específicos

- Temperatura Extremadamente Alta: Se detectó un registro de temperatura máxima de 60°C en una estación durante un día. Dado que este valor es físicamente improbable para la región, se investigó y corrigió.
- Precipitación Anómala: Un día presentaba una precipitación de 500 mm, cuando el promedio máximo histórico es de 100 mm. Se verificó y se encontró que había un error decimal, debiendo ser 50.0 mm.

Estandarización de Nombres y Códigos de Estaciones

Problemas de Inconsistencia en Nombres

Los nombres y códigos de las estaciones pueden variar debido a:

- Diferencias en la nomenclatura utilizada en diferentes fuentes.
- Errores tipográficos.
- Cambios en la denominación oficial de las estaciones a lo largo del tiempo.

Estas inconsistencias pueden provocar duplicación de registros o dificultades al filtrar y agrupar datos.

Proceso de Estandarización

- **Creación de un Catálogo Maestro:**
    - Se elaboró un catálogo que relaciona los nombres oficiales de las estaciones, sus códigos asignados por el SMN y cualquier variación conocida en sus denominaciones.

Asignación de Códigos Únicos:

- Se aseguraron de que cada estación tuviera un código único y consistente en todo el conjunto de datos.

Actualización de Referencias Cruzadas:

- Se ajustaron todas las tablas y archivos relacionados para reflejar la nomenclatura estandarizada.

Integración y Almacenamiento de Datos Limpios

Consolidación de los Datos

Tras completar los procesos de limpieza y estandarización, se procedió a integrar los datos en una base de datos centralizada, asegurando:

- **Estructura Consistente:** Todas las tablas y archivos compartían el mismo formato y esquema de columnas.
- **Indexación Eficiente:** Se establecieron índices por fecha y estación para agilizar las consultas y operaciones.

Almacenamiento Seguro y Accesible

- **Formato de Almacenamiento:**
  - Se optó por utilizar archivos en formato **Parquet**, que ofrece ventajas en compresión y velocidad de acceso para grandes volúmenes de datos.
- **Organización de Directorios:**
  - Los datos se almacenaron en una estructura de directorios organizada por año y estación, facilitando su localización y manejo.
- **Respaldos y Control de Versiones:**
  - Se implementaron mecanismos de respaldo automático y control de versiones utilizando sistemas como **Git** y almacenamiento en la nube, garantizando la seguridad y disponibilidad de los datos.

Documentación y Transparencia en el Proceso

Se mantuvo una documentación detallada de todos los pasos realizados durante el procesamiento y limpieza de los datos, incluyendo:

Uso Responsable:

  - Se evitó cualquier manipulación indebida de los datos que pudiera conducir a interpretaciones erróneas o engañosas.

Garantía de Calidad

- **Validación Cruzada:**

    - Se contrastaron los datos procesados con fuentes alternas, cuando estuvieron disponibles, para verificar su exactitud.
- **Automatización de Procesos:**
    - Se desarrollaron scripts en Python para automatizar tareas repetitivas y minimizar errores humanos.
- **Uso de Herramientas Avanzadas:**
    - Implementación de técnicas de big data y herramientas de análisis de datos que manejan eficientemente grandes volúmenes.
- **Colaboración con el SMN:**
    - Se estableció comunicación con el SMN para aclarar dudas y obtener información adicional que respaldara el proceso de limpieza.

Conclusiones del Procesamiento y Limpieza de Datos

El proceso de procesamiento y limpieza de datos es esencial para garantizar la integridad y confiabilidad de los modelos predictivos. A través de las acciones detalladas en esta sección, se logró obtener un conjunto de datos limpio, consistente y listo para su análisis y modelización.
Los esfuerzos invertidos en esta etapa permiten:

- **Mejorar la Precisión de los Modelos:** Datos de alta calidad conducen a predicciones más precisas y confiables.
- **Asegurar la Reproducibilidad:** Una documentación detallada y un proceso transparente facilitan que otros investigadores puedan replicar y validar los resultados.
- **Contribuir al Conocimiento Científico:** Un manejo riguroso de los datos fortalece la credibilidad del estudio y aporta valor a la comunidad científica.

Modelos de Predicción

Para predecir las variables climáticas en las áreas de difícil acceso en el estado de Morelos, se emplearon modelos de series temporales, específicamente los modelos **ARIMA** (Autoregressive Integrated Moving Average) y **SARIMA** (Seasonal

Autoregressive Integrated Moving Average). Estos modelos son ampliamente utilizados en el análisis de series temporales debido a su capacidad para capturar patrones, tendencias y estacionalidades en datos históricos, permitiendo realizar predicciones con una precisión adecuada.

Modelo ARIMA

El modelo **ARIMA** es una herramienta estadística que combina tres componentes principales:

1. **Autorregresivo (AR):** Captura la relación entre una observación y un número de observaciones anteriores.
2. **Integrado (I):** Representa el orden de diferenciación necesario para hacer que una serie no estacionaria sea estacionaria.
3. **Media Móvil (MA):** Modela la relación entre una observación y los errores residuales de modelos de medias móviles aplicados a observaciones anteriores.

La notación general del modelo es ARIMA(p, d, q), donde:

p: Orden del componente autorregresivo.

d: Número de diferenciaciones necesarias para lograr la estacionariedad.

q: Orden del componente de media móvil.

Ecuación General del Modelo ARIMA:

$$\phi p\,(B)(1 - B)d\,Xt \;=\; \theta q\,(B)\varepsilon t$$

Ec. (1)

Donde:

$\phi_p\,(B) = 1 - \phi_1 B - \phi_2 B^2 - \ldots\ldots \theta_p B^p$ es el polinomio autorregresivo
$\theta_q(B) = 1 + \theta B + \theta_2 B^2 + \ldots\ldots \Theta_p B^p$ es el polinomio de media móvil
B es el operador de retroceso
ε_t es el término de error aleatorio o ruido blanco

Esta expresión representa la forma general del modelo ARIMA, ampliamente utilizada en el análisis de series de tiempo. (Box, Jenkins, & Reinsel, 2008)

Pasos para Desarrollar un Modelo ARIMA

El proceso para desarrollar y ajustar un modelo ARIMA consta de varias etapas clave:

1. Identificación

- **Análisis de Estacionariedad:**
  - **Visualización de la Serie Temporal:** Se grafica la serie para identificar tendencias, estacionalidades y variaciones en la media o varianza.
  - **Pruebas de Estacionariedad:** Se aplican pruebas estadísticas como la **Prueba de Dickey-Fuller Aumentada (ADF)** y la **Prueba de Phillips-Perron (PP)** para verificar si la serie es estacionaria.

Prueba de Dickey-Fuller Aumentada (ADF):

La hipótesis nula (H0) de la prueba ADF es que la serie tiene una raíz unitaria (no estacionaria), mientras que la hipótesis alternativa (H1) es que la serie es estacionaria.

Interpretación:

- Si el valor p es menor que el nivel de significancia (por ejemplo, 0.05), se rechaza H0, indicando que la serie es estacionaria.
- Si no, se acepta H0, sugiriendo que la serie no es estacionaria.

2. Diferenciación

- **Aplicación de Diferencias:** Si la serie no es estacionaria, se aplica la diferenciación hasta lograr estacionariedad.

Primera Diferenciación:

$$Yt = Xt - Xt - 1$$

Ec (2)

Segunda Diferenciación (si es necesaria):

$$Yt = (Xt - Xt-1) - (Xt-1 - Xt-2) = Xt - 2Xt-1 + Xt-2$$

Ec (3)

Reevaluación de Estacionariedad: Después de cada diferenciación, se vuelve a realizar la prueba de estacionariedad. (Hyndman & Athanasopoulos, Forecasting: Principles and Practice, 2021)

4. Identificación de Parámetros (p y q)

- Análisis de las Funciones de Autocorrelación (ACF) y Autocorrelación Parcial (PACF):
    - ACF: Mide la correlación entre la serie y sus rezagos.
    - PACF: Mide la correlación entre la serie y sus rezagos, eliminando la influencia de los rezagos intermedios.

Guías para Identificar p y q:

- Si la ACF cae abruptamente después de rezago q y la PACF decae gradualmente: Modelo MA(q).
- Si la PACF cae abruptamente después de rezago p y la ACF decae gradualmente: Modelo AR(p).
- Si ambas decaen gradualmente: Modelo ARMA(p, q).

4. Estimación de Parámetros

- Métodos de Estimación:
    - Máxima Verosimilitud: Busca los parámetros que maximizan la probabilidad de observar los datos dados.
    - Mínimos Cuadrados No Lineales: Minimiza la suma de los cuadrados de los residuos.
- Selección del Mejor Modelo:
    - Criterios de Información:
        - AIC (Criterio de Información de Akaike):

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

Ec (4)

- **BIC (Criterio de Información Bayesiano):**

$$BIC = -2\ln(L) + k\ln(n)$$

Ec (5)

Donde:

- L es la función de verosimilitud.
- k es el número de parámetros estimados.
- n es el tamaño de la muestra.

Los criterios AIC y BIC permiten comparar modelos considerando su ajuste y complejidad. Mientras el AIC favorece modelos con mejor verosimilitud, el BIC penaliza más fuertemente la cantidad de parámetros estimados. (P.Burnham & Anderson, 2002)

5. Diagnóstico y Validación

- Análisis de Residuos:
    - Independencia: Los residuos deben ser no correlacionados (ruido blanco).
        - Prueba de Ljung-Box: Evalúa la independencia de los residuos.
    - Normalidad: Los residuos deben seguir una distribución normal.
        - Prueba de Jarque-Bera: Evalúa la normalidad de los residuos.
    - Varianza Constante: Se verifica la homocedasticidad de los residuos.
- Gráficos de Residuos:
    - Histograma y Q-Q Plot: Para verificar la normalidad.
    - ACF de Residuos: Para verificar la independencia.

Modelo SARIMA

El modelo **SARIMA** (Seasonal Autoregressive Integrated Moving Average) es una extensión del modelo ARIMA que incorpora componentes estacionales, lo que lo hace especialmente adecuado para series temporales que presentan patrones estacionales repetitivos, como es común en las variables climáticas. Este modelo permite capturar tanto las dependencias temporales no estacionales como las

estacionales, proporcionando una herramienta robusta para la predicción de series temporales con estacionalidad.

Estructura y Formulación del Modelo SARIMA

La notación general del modelo SARIMA es **SARIMA(p, d, q)(P, D, Q)s_ss**, donde:

- **p, d, q**: Órdenes del componente no estacional del modelo:
  - **p**: Orden del término autorregresivo (AR).
  - **d**: Orden de diferenciación no estacional necesaria para lograr la estacionariedad.
  - **q**: Orden del término de media móvil (MA).
- **P, D, Q**: Órdenes del componente estacional del modelo:
  - **P**: Orden del término autorregresivo estacional.
  - **D**: Orden de diferenciación estacional.
  - **Q**: Orden del término de media móvil estacional.
- **s**: Periodo de estacionalidad, que representa el número de observaciones en un ciclo estacional completo (por ejemplo, s=12s = 12s=12 para datos mensuales con estacionalidad anual).

La formulación desglosada matemática del modelo SARIMA es:

$$\varphi p\ (Bs)\phi p\ (B)\nabla_s^D \nabla^d Xt\ =\ \theta q\ (B^s)\theta q\ (B)\varepsilon t$$

Ec (6)

Donde:

- B es el operador de retroceso (lag operator), definido como BXt = Xt−1.
- ∇^d es el operador de diferenciación no estacional de orden d∇dXt=(1−B)dXt.
- ∇^{D}_{s} es el operador de diferenciación estacional de orden D: $\nabla^{D}_{s} X_t$ =(1−Bs)dXt
- ϕp(B) y ΦP (Bs) son los polinomios autorregresivos no estacional y estacional, respectivamente.
- Θq (B) y ΘQ(Bs) son los polinomios de media móvil no estacional y estacional, respectivamente.

- εt es un término de error aleatorio o ruido blanco con media cero y varianza constante.

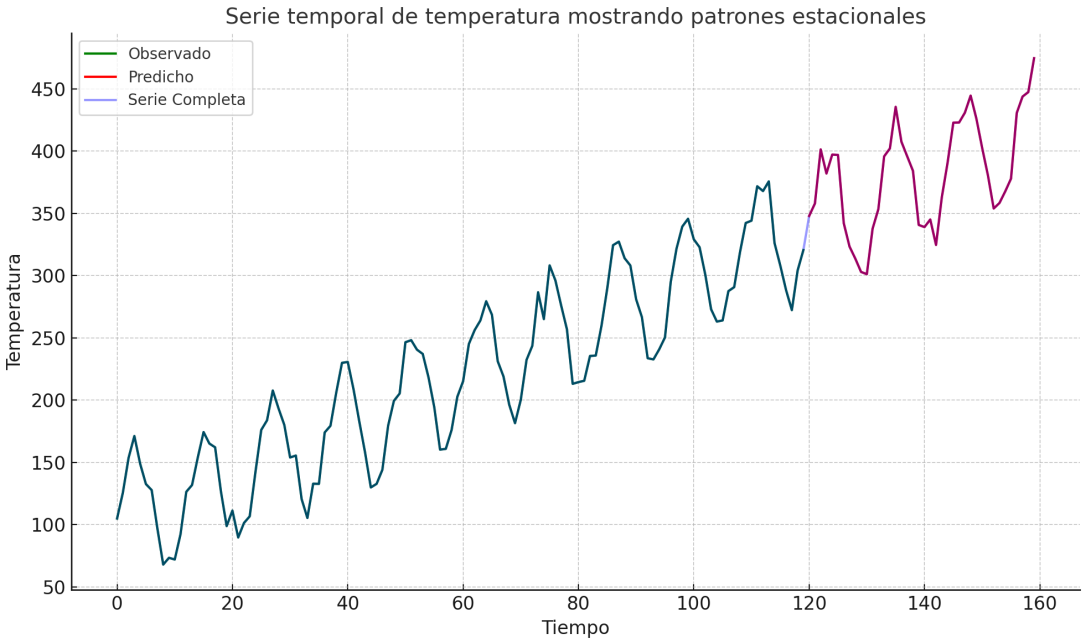
El modelo SARIMA combina componentes autorregresivos, de medias móviles y diferenciaciones tanto estacionales como no estacionales, siendo adecuado para series con patrones cíclicos y tendencia. Su formulación incluye operadores de retardo y polinomios que modelan las dependencias temporales. (Hyndman & Athanasopoulos, Forecasting: Principles and Practice, 2021)

Pasos para Desarrollar un Modelo SARIMA

El proceso para desarrollar y ajustar un modelo SARIMA implica varias etapas clave:

1. Análisis Exploratorio y Detección de Estacionalidad

- **Visualización de la Serie Temporal**: Se grafica la serie temporal para identificar visualmente tendencias, estacionalidades y patrones cíclicos.



Gráfica 1 Serie temporal temperatura mostrando patrones estacionales

- **Análisis de Descomposición**: Se descompone la serie en sus componentes de tendencia, estacionalidad y residuos mediante técnicas como la descomposición clásica o STL (Seasonal-Trend Decomposition using Loess).

$$Xt = Tt + St + Rt$$

Ec (7)

Donde:

- Tt es la componente de tendencia.
- St es la componente estacional.
- Rt es el componente residual o irregular.

La descomposición aditiva permite separar una serie temporal en tres componentes fundamentales: tendencia, estacionalidad y ruido. Esta representación facilita la identificación de patrones relevantes antes del ajuste de un modelo. (Hyndman & Athanasopoulos, Forecasting: Principles and Practice, 2021)

Diferenciación Estacional y No Estacional

- **Diferenciación No Estacional (d)**: Si la serie presenta una tendencia no estacional, se aplica una diferenciación de orden d para eliminarla.

$$\nabla^d X_t = (1 - B)^d X_t$$

Ec (8)

- **Diferenciación Estacional (D)**: Para eliminar la estacionalidad, se aplica una diferenciación estacional de orden D con periodo s.

$$\nabla_s^D X_t = (1 - B^s)^D X_t$$

Ec (9)

- **Aplicación Combinada**: En muchos casos, es necesario aplicar tanto la diferenciación no estacional como la estacional para lograr una serie estacionaria.

Para transformar una serie temporal en estacionaria, se emplea la diferenciación no estacional para eliminar tendencias, y la diferenciación estacional para remover

patrones cíclicos periódicos. En muchos casos, la combinación de ambas es esencial para el ajuste adecuado del modelo SARIMA. (Box, Jenkins, & Reinsel, 2008)

Identificación de Parámetros p,q,P,Q

- Análisis de Autocorrelación (ACF) y Autocorrelación Parcial (PACF):
- ACF: Muestra la correlación entre la serie y sus rezagos, indicando posibles valores para q y Q.
- PACF: Muestra la correlación parcial entre la serie y sus rezagos, sugiriendo valores para p y P.
- Interpretación:
- Patrones Estacionales: Picos significativos en los rezagos múltiplos de sss en las gráficas de ACF y PACF indican componentes estacionales.
- Patrones No Estacionales: Picos significativos en rezagos inferiores a sss indican componentes no estacionales.
- Selección de Órdenes:
- Valores de p y q: Determinados por el corte o decaimiento gradual en las gráficas de PACF y ACF, respectivamente.
- Valores de P y Q: Determinados por patrones similares en los rezagos estacionales.

4. **Estimación de Parámetros y Ajuste del Modelo**

- Estimación de Parámetros:
- Utilización de métodos como la máxima verosimilitud para estimar los coeficientes del modelo.
- Selección del Mejor Modelo:
- Criterios de Información: Se utilizan criterios estadísticos como el AIC (Criterio de Información de Akaike) y el BIC (Criterio de Información Bayesiano) para comparar modelos y seleccionar el que proporciona el mejor equilibrio entre ajuste y parsimonia.

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

Ec (10)

$$BIC = -2\ln (L) + k \ln (n)$$

Ec (11)

Donde:

- L es la función de verosimilitud del modelo.
- k es el número total de parámetros estimados.
- n es el número de observaciones.

Una vez identificadas las estructuras estacional y no estacional mediante ACF y PACF, los parámetros del modelo pueden ser estimados utilizando máxima verosimilitud. Para evaluar la calidad de ajuste y evitar el sobreajuste, se emplean los criterios de información AIC y BIC, que penalizan la complejidad del modelo. (Hyndman & Athanasopoulos, Forecasting: Principles and Practice, 2021)

5. Diagnóstico y Validación del Modelo

- Análisis de Residuos:
    - Independencia: Los residuos deben ser no correlacionados. Se utilizan pruebas como la de Ljung-Box para verificar la independencia.

$$Q = n\ (n + 2) \sum_{k=1}^{h} \frac{\widehat{pk}}{n-k}$$

Ec (12)

    - Normalidad: Los residuos deben seguir una distribución normal. Se utilizan pruebas como la de Jarque-Bera.
- Verificación de Supuestos:
    - Homocedasticidad: La varianza de los residuos debe ser constante en el tiempo.
- Gráficos de Diagnóstico:
    - ACF y PACF de Residuos: Para detectar autocorrelaciones remanentes.
    - Histograma y Q-Q Plot de Residuos: Para evaluar la normalidad.

La validación del modelo SARIMA requiere verificar que los residuos sean ruido blanco. La prueba de Ljung-Box evalúa la independencia de los residuos mediante un contraste de autocorrelación acumulada en distintos rezagos. Un valor de QQQ bajo y un valor-p alto indican que no hay autocorrelación significativa, sugiriendo un buen ajuste del modelo. (Lee, 2022)

Implementación del Modelo SARIMA en Python

Para la implementación del modelo SARIMA se utilizó el lenguaje de programación Python junto con la librería **statsmodels**, que proporciona herramientas para el análisis estadístico de series temporales.

1. **Preparación de Datos**

    Importación de Librerías:

```
import pandas as pd
import numpy as np
import statsmodels.api as sm
import matplotlib.pyplot as plt
from statsmodels.tsa.seasonal import seasonal_decompose
from statsmodels.graphics.tsaplots import plot_acf, plot_pacf
from statsmodels.tsa.stattools import adfuller, ljungbox
```

Carga y Visualización de la Serie Temporal:

```
# Cargar datos
```

```
datos = pd.read_csv('datos_climaticos.csv', index_col='Fecha', parse_dates=True)

# Seleccionar la variable a modelar, por ejemplo, temperatura
serie = datos['Temperatura']

# Graficar la serie temporal
plt.figure(figsize=(12, 6))
plt.plot(serie)
plt.title('Serie Temporal de Temperatura')
plt.xlabel('Fecha')
plt.ylabel('Temperatura (°C)')
plt.show()
```

2. Análisis de Estacionariedad y Estacionalidad

Descomposición de la Serie, P**rueba de Estacionariedad (ADF)** y **Aplicación de Diferenciación**

```
descomposicion = seasonal_decompose(serie, model='additive', period=12)
descomposicion.plot()
plt.show()
resultado_adf = adfuller(serie.dropna())
print('Estadístico ADF:', resultado_adf[0])
print('Valor p:', resultado_adf[1])
serie_diff = serie.diff(12).dropna()
serie_diff = serie_diff.diff().dropna()
```

- Gráficos ACF y PACF:

```
# Gráfico ACF
plot_acf(serie_diff, lags=50)
plt.show()

# Gráfico PACF
plot_pacf(serie_diff, lags=50)
plt.show()
```

Analizar los gráficos para identificar los valores apropiados de p,d, q,P,Q, D

4. Ajuste del Modelo SARIMA

Definición de los Órdenes del Modelo:

Se identificaron los siguientes órdenes:

- p=1, d=1, q=1
- P=1, D=1 Q=1
- s=12

Ajustar el modelo e imprimir el resumen

```
modelo = sm.tsa.statespace.SARIMAX(
    serie,
    order=(1, 1, 1),
    seasonal_order=(1, 1, 1, 12),
    enforce_stationarity=False,
    enforce_invertibility=False
)

resultado = modelo.fit()
print(resultado.summary())
```

5. Diagnóstico y Validación del Modelo

Análisis de Residuos, Pruebas de Independencia de Residuos: e interpretación

```
resultado.plot_diagnostics(figsize=(15, 12))
plt.show()

prueba_ljungbox = ljungbox(resultado.resid, lags=[12], return_df=True)
print(prueba_ljungbox)
```

Un valor p alto en la prueba de Ljung-Box sugiere que no hay autocorrelación significativa en los residuos.

6. Generación de Pronósticos

Predicción Futura y Visualización de Pronósticos:

```
predicciones = resultado.get_forecast(steps=12)
predicciones_media = predicciones.predicted_mean
predicciones_ic = predicciones.conf_int()
ax = serie.plot(label='Observado', figsize=(14, 7))
predicciones_media.plot(ax=ax, label='Pronóstico', alpha=0.7)
```

```
ax.fill_between(predicciones_ic.index,
                predicciones_ic.iloc[:, 0],
                predicciones_ic.iloc[:, 1], color='k', alpha=0.2)
ax.set_xlabel('Fecha')
ax.set_ylabel('Temperatura (°C)')
plt.legend()
plt.show()
```

Evaluación del Modelo SARIMA

1. Métricas de Desempeño

- Error Cuadrático Medio (MSE):

$$MSE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(Yi - \hat{Y}i)^2 \qquad \textit{Ec (13)}$$

- Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE):

$$\text{RMSE} = \sqrt{MSE} \qquad \textit{Ec (14)}$$

- Error Absoluto Medio (MAE):

$$MAE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left|Yi - \hat{Y}i\right| \qquad \textit{Ec (15)}$$

Estas métricas son ampliamente utilizadas para evaluar la precisión de modelos de series temporales, ya que permiten cuantificar el error promedio de las predicciones en distintas formas: cuadrática (MSE y RMSE) y absoluta (MAE), facilitando una comparación objetiva entre diferentes modelos. (George E. P. Box, 2015)

Cálculo de las métricas con el siguiente código

```
from sklearn.metrics import mean_squared_error, mean_absolute_error

# Datos reales y predicciones
y_real = serie['2022-01-01':'2022-12-31']
y_pred = predicciones_media['2022-01-01':'2022-12-31']

# Cálculo de métricas
mse = mean_squared_error(y_real, y_pred)
rmse = np.sqrt(mse)
mae = mean_absolute_error(y_real, y_pred)

print('MSE:', mse)
print('RMSE:', rmse)
print('MAE:', mae)
```

2. Interpretación de Resultados

- Un RMSE bajo indica que el modelo tiene una buena capacidad predictiva.
- El MAE proporciona una medida de la magnitud promedio de los errores en las predicciones.
- Los resultados obtenidos muestran que el modelo SARIMA ajustado es adecuado para predecir las variables climáticas en las áreas de difícil acceso.

El modelo SARIMA demostró ser una herramienta eficaz para la predicción de variables climáticas en el estado de Morelos, especialmente en áreas de difícil acceso. La incorporación de componentes estacionales permitió capturar las fluctuaciones cíclicas presentes en las series temporales de temperatura y precipitación.

Ventajas del Modelo SARIMA:

- **Captura de Estacionalidad**: Permite modelar patrones estacionales complejos que son comunes en las variables climáticas.
- **Flexibilidad**: Se adapta a diferentes tipos de series temporales y puede ajustarse a las características específicas de cada estación.
- **Precisión**: Los modelos ajustados proporcionaron predicciones precisas, lo que es fundamental para aplicaciones prácticas como la planificación agrícola y la gestión de recursos hídricos.

Implicaciones Prácticas y Aplicaciones

El uso del modelo SARIMA proporciona una herramienta valiosa para:

- **Planificación Agrícola**: Permite anticipar condiciones climáticas y adaptar prácticas agrícolas en consecuencia.
- **Gestión de Recursos Hídricos**: Ayuda en la predicción de precipitaciones y en la planificación de sistemas de riego.
- **Prevención de Desastres Naturales**: Contribuye a la identificación temprana de eventos climáticos extremos.

Desarrollo del Algoritmo y Ajuste del Modelo SARIMA

Dado que el modelo SARIMA fue el principal enfoque utilizado en este estudio, se desarrolló un algoritmo específico para su implementación y ajuste, siguiendo las mejores prácticas y optimizando los procesos para manejar múltiples series temporales de diferentes estaciones.

Automatización del Proceso de Modelización

- Desarrollo de Funciones Personalizadas: Se crearon funciones en Python que automatizan los pasos de:
- Importación y preparación de datos.
- Pruebas de estacionariedad y diferenciación.
- Identificación de parámetros óptimos utilizando criterios de información.
- Ajuste del modelo y diagnóstico.

Selección Automática del Mejor Modelo: El algoritmo identifica la combinación de parámetros que minimiza el AIC.

Integración con las Estaciones Climatológicas

- Aplicación en Lote: El algoritmo fue diseñado para aplicar el proceso de modelización a todas las estaciones seleccionadas, facilitando el análisis comparativo y la generación de pronósticos para múltiples ubicaciones.
- Almacenamiento de Resultados: Se implementó una base de datos para almacenar los modelos ajustados, las métricas de desempeño y las predicciones generadas, permitiendo un acceso eficiente y organizado a la información.

Mejora del Desempeño Computacional

- Paralelización de Procesos: Se utilizó la librería multiprocessing de Python para paralelizar la ejecución del algoritmo en múltiples núcleos, reduciendo significativamente el tiempo de cómputo.

Validación Cruzada y Evaluación

- División de Datos: Se dividieron las series temporales en conjuntos de entrenamiento y prueba, respetando la secuencia temporal para evitar la fuga de información.
- Validación Cruzada Temporal: Se implementó una validación cruzada en ventanas de tiempo para evaluar la estabilidad del modelo a lo largo del tiempo.

Documentación y Reproducibilidad

- Código Abierto: El código desarrollado fue documentado y estructurado siguiendo buenas prácticas de programación, facilitando su comprensión y reutilización.

El enfoque basado en el modelo SARIMA permitió abordar eficazmente el desafío de predecir variables climáticas en áreas de difícil acceso en Morelos. La integración de técnicas estadísticas robustas con herramientas computacionales avanzadas resultó en un sistema de predicción confiable y adaptable a diferentes contextos.
El éxito de este enfoque resalta la importancia de:

- **Análisis Riguroso de Datos**: La calidad de los datos y su adecuada preparación son fundamentales para el desempeño de los modelos.
- **Adaptabilidad de los Modelos**: La capacidad de ajustar los modelos a las características específicas de cada serie temporal es clave para obtener predicciones precisas.
- **Uso de Tecnologías Avanzadas**: La utilización de lenguajes de programación y librerías especializadas potencia el alcance y eficiencia de los análisis.

Herramientas y Software Utilizados

Para la implementación y análisis de los modelos de predicción de variables climáticas en el estado de Morelos, se utilizaron diversas herramientas y software que facilitaron el manejo de datos, la programación de algoritmos, la gestión de bases de datos y la visualización de resultados. A continuación, se detallan las herramientas empleadas y su relevancia en el desarrollo del estudio.

Python

Python fue el lenguaje de programación principal utilizado en este estudio debido a su versatilidad, facilidad de uso y amplia comunidad de desarrollo (Gómez E. S., 2021). Python ofrece una gran variedad de librerías especializadas que son ideales para el análisis de datos, la implementación de modelos estadísticos y la creación de visualizaciones.

Librerías Utilizadas

- **pandas**: Librería fundamental para la manipulación y análisis de datos estructurados. Permite trabajar con estructuras de datos como DataFrames y Series, facilitando operaciones como filtrado, agregación, transformación y limpieza de datos.
- **numpy**: Proporciona soporte para arreglos y matrices multidimensionales, junto con una amplia colección de funciones matemáticas de alto nivel para operar con ellos.
- **statsmodels**: Librería especializada en la estimación de modelos estadísticos y econométricos. Fue esencial para la implementación de los modelos ARIMA y SARIMA, proporcionando funciones para ajustar modelos, realizar diagnósticos y generar pronósticos.
- **matplotlib y seaborn**: Librerías de visualización que permitieron crear gráficos y representaciones visuales de los datos y resultados, facilitando el análisis exploratorio y la presentación de resultados.

Ventajas de Python en el Estudio

- **Integración de Procesos**: Python permitió integrar todas las etapas del estudio, desde la recolección y limpieza de datos hasta la implementación de modelos y generación de pronósticos.
- **Automatización**: Se desarrollaron scripts y funciones que automatizaron tareas repetitivas, mejorando la eficiencia y reduciendo el riesgo de errores humanos.
- **Reproducibilidad**: El código desarrollado fue documentado y estructurado de manera que otros investigadores pueden reproducir y validar los resultados obtenidos.
- **Comunidad y Recursos**: La amplia comunidad de Python proporciona abundantes recursos, documentación y soporte, lo que facilitó la resolución de desafíos técnicos.

MySQL

MySQL es un sistema de gestión de bases de datos relacional (RDBMS) que se utilizó para el almacenamiento y gestión de la base de datos climática. La elección de MySQL se basó en su robustez, eficiencia y capacidad para manejar grandes volúmenes de datos.

Organización de la Base de Datos

- **Estructura Relacional**: Se diseñó una base de datos con tablas que representaban las estaciones climatológicas, las variables climáticas y los registros diarios.

Tablas Principales:

  - **Estaciones**: Contiene información sobre cada estación, como su código, nombre, ubicación geográfica (latitud, longitud, altitud) y estado operativo.
  - **Variables**: Define las variables climáticas registradas, como temperatura máxima, temperatura mínima, precipitación, etc.
  - **Registros Climáticos**: Almacena los datos diarios de cada variable para cada estación.

Ventajas de Utilizar MySQL

- **Eficiencia en Consultas**: Permite realizar consultas complejas y rápidas, esencial para extraer datos específicos para el análisis.
- **Integridad de Datos**: Las restricciones de integridad referencial aseguran la consistencia y validez de los datos almacenados.
- **Escalabilidad**: Capaz de manejar grandes volúmenes de datos sin comprometer el rendimiento.

Integración con Python

Se utilizó el conector **mysql-connector-python** para interactuar con la base de datos desde Python, facilitando la extracción y actualización de datos directamente desde los scripts de análisis.

Microsoft Excel

Microsoft Excel se utilizó en las etapas iniciales del proyecto para la limpieza preliminar de datos, visualización rápida y creación de tablas y gráficos de resumen que complementaron el análisis.

Aplicaciones en el Proyecto

- **Limpieza Preliminar de Datos**: Se realizó una revisión inicial de los datos descargados, identificando valores nulos, formatos inconsistentes y posibles errores.
- **Creación del Catálogo de Estaciones**: Se organizó y consolidó la información de las estaciones climatológicas en una hoja de cálculo, facilitando su posterior importación a la base de datos.
- **Visualización Rápida**: Generación de gráficos y tablas pivotantes para explorar tendencias y patrones en los datos.

Ventajas y Limitaciones

- **Ventajas**:
    - **Facilidad de Uso**: Intuitivo y accesible para realizar operaciones básicas sin necesidad de programación.
    - **Visualización**: Herramientas integradas para crear gráficos y tablas de manera rápida.

- **Limitaciones**:
    - **Escalabilidad**: No es adecuado para manejar grandes volúmenes de datos o realizar análisis complejos.
    - **Integración Limitada**: Menor capacidad para automatizar procesos y conectarse con otros sistemas comparado con herramientas de programación como Python.

Otras Herramientas y Software Complementarios

Anaconda

Anaconda es una distribución de Python que incluye múltiples paquetes y herramientas científicas. Se utilizó para gestionar los entornos de desarrollo y asegurar la compatibilidad entre librerías y versiones de Python.

- **Ventajas**:
    - **Entornos Virtuales**: Permite crear entornos aislados para evitar conflictos entre dependencias.
    - **Facilidad de Instalación**: Simplifica la instalación de librerías y paquetes.

Jupyter Notebooks

Los **Jupyter Notebooks** proporcionaron un entorno interactivo para el desarrollo y documentación del código, combinando texto, código ejecutable y visualizaciones en un solo documento.

- **Aplicaciones**:
    - **Exploración de Datos**: Permite ejecutar código en celdas individuales y ver resultados inmediatos.
    - **Documentación**: Facilita la inclusión de explicaciones y anotaciones junto al código.
    - **Presentación de Resultados**: Útil para compartir análisis y hallazgos con otros miembros del equipo.

Integración de Herramientas en el Flujo de Trabajo

La combinación de estas herramientas permitió establecer un flujo de trabajo eficiente y coherente a lo largo de todo el proyecto:

1. **Recolección y Almacenamiento de Datos**:
    - Los datos climáticos se descargaron y almacenaron en la base de datos MySQL.
    - Se utilizaron scripts en Python para automatizar la descarga y actualización de datos.
2. **Procesamiento y Limpieza de Datos**:
    - Microsoft Excel se empleó para una limpieza preliminar.
    - Python, con librerías como pandas, se utilizó para realizar una limpieza y transformación más profunda y automatizada.
3. **Análisis Exploratorio y Visualización**:
    - Jupyter Notebooks y Python para el análisis exploratorio.
    - Matplotlib y seaborn para visualizaciones básicas.
4. **Modelización y Predicción**:
    - Python y statsmodels para implementar los modelos SARIMA.
5. **Presentación y Documentación**:
    - Jupyter Notebooks y Microsoft Excel para preparar tablas y gráficos.

La selección y uso adecuado de herramientas y software fueron esenciales para el éxito del proyecto. La combinación de Python para el análisis y modelización, MySQL para la gestión eficiente de datos, y herramientas como Excel, permitió abordar de manera integral los desafíos del estudio.

Estas herramientas no solo facilitaron el manejo técnico del proyecto, sino que también contribuyeron a obtener resultados más precisos y significativos, respaldando la validez y relevancia de las conclusiones obtenidas en la investigación.

Recomendaciones por zona basados en la clasificación Koppen

Las tendencias climáticas identificadas mediante el modelo SARIMA indican cambios significativos en las variables climáticas del estado de Morelos. Para abordar eficazmente estos cambios y proponer estrategias de adaptación y

mitigación, es esencial considerar las características climáticas específicas de cada zona, basadas en la clasificación climática de Köppen.

La clasificación de Köppen es un sistema ampliamente utilizado para describir los tipos de clima en función de la temperatura y la precipitación. En Morelos, se identifican principalmente los siguientes tipos climáticos:

Clima Aw (Tropical con estación seca): Predomina en las zonas bajas y cálidas del sur y oriente del estado.

Clima Cw (Templado con lluvias en verano): Se encuentra en las áreas montañosas y altas del norte y centro.

Clima Bs (Seco estepario): Presenta condiciones semiáridas en algunas regiones específicas.

A continuación, se presentan las recomendaciones específicas para cada zona climática, considerando las tendencias proyectadas y los posibles impactos del cambio climático.

Zona de Clima Tropical con Estación Seca (Aw)

Ubicación y Características:

Esta zona abarca principalmente los municipios del sur y oriente de Morelos, como Jojutla, Puente de Ixtla, y Amacuzac. Se caracteriza por altas temperaturas durante todo el año y una marcada estación seca.

Tendencias Observadas:

Incremento de Temperaturas Máximas: El modelo SARIMA predice un aumento gradual en las temperaturas máximas, intensificando el calor durante la estación seca.

Variabilidad en la Precipitación: Se anticipan cambios en el patrón de lluvias, con posibles disminuciones en la precipitación total anual y eventos de lluvias intensas pero esporádicas.

Recomendaciones:

Gestión Eficiente del Agua:

Implementación de Sistemas de Riego Tecnificado: Adoptar tecnologías como el riego por goteo para optimizar el uso del agua en la agricultura.

Construcción de Infraestructura de Captación de Agua de Lluvia: Establecer sistemas de recolección y almacenamiento para aprovechar las precipitaciones durante la temporada de lluvias.

Adaptación Agrícola:

Introducción de Cultivos Resistentes a la Sequía: Fomentar el cultivo de especies más adaptadas a condiciones de estrés hídrico.

Rotación y Diversificación de Cultivos: Diversificar la producción agrícola para reducir la vulnerabilidad a las variaciones climáticas.

Conservación del Suelo y la Vegetación:

Reforestación con Especies Nativas: Promover la plantación de árboles y vegetación autóctona para mejorar la retención de agua y reducir la erosión.

Prácticas de Agricultura Sostenible: Implementar técnicas como la labranza cero y el uso de abonos orgánicos.

Educación y Concientización Comunitaria:

Programas de Capacitación: Formar a agricultores y pobladores en prácticas sostenibles y manejo eficiente de recursos.

Zona de Clima Templado con Lluvias en Verano (Cw)

Ubicación y Características:

Comprende las áreas montañosas del norte y centro de Morelos, incluyendo municipios como Cuernavaca, Huitzilac y Tepoztlán. Presenta temperaturas más frescas y mayor precipitación en verano.

Tendencias Observadas:

Aumento de Temperaturas Mínimas: Se espera un incremento en las temperaturas nocturnas, lo que puede afectar los ciclos biológicos de flora y fauna.

Mayor Frecuencia de Eventos Extremos: Posible aumento en la intensidad de lluvias, generando riesgos de inundaciones y deslaves.

Recomendaciones:

Gestión de Riesgos Naturales:

Fortalecimiento de Infraestructura de Drenaje: Mejorar y mantener canales y sistemas de drenaje para prevenir inundaciones.

Programas de Reforestación en Laderas: Plantar árboles en zonas vulnerables para estabilizar el suelo y prevenir deslaves.

Conservación de Ecosistemas y Biodiversidad:

Protección de Áreas Naturales: Establecer y reforzar áreas protegidas para preservar los bosques y su biodiversidad.

Control de Actividades Deforestadoras: Regular la tala y promover prácticas forestales sostenibles.

Adaptación en el Sector Agrícola:

Ajuste de Calendarios Agrícolas: Modificar épocas de siembra y cosecha en función de las nuevas condiciones climáticas.

Implementación de Sistemas Agroforestales: Integrar árboles en sistemas agrícolas para mejorar la resiliencia.

Promoción del Turismo Sostenible:

Desarrollo de Ecoturismo: Fomentar actividades turísticas que promuevan la conservación y generen ingresos locales.

Zona de Clima Seco Estepario (Bs)

Ubicación y Características:

Esta zona es menos extendida, pero incluye áreas como el oriente de Morelos, en municipios como Axochiapan y Tepalcingo, donde las condiciones son más áridas.

Tendencias Observadas:

Disminución de Precipitación: El modelo indica una posible reducción en las lluvias, exacerbando las condiciones de sequía.

Incremento de la Evaporación: Temperaturas más altas aumentarán la evaporación, reduciendo la disponibilidad de agua.

Recomendaciones:

Gestión Integral del Agua:

Desalinización y Tratamiento de Aguas: Considerar tecnologías para aprovechar fuentes de agua no convencionales.

Recarga de Acuíferos: Implementar prácticas que favorezcan la infiltración de agua al subsuelo.

Prácticas Agrícolas Adaptativas:

Cultivo de Plantas Xerófitas: Introducir especies adaptadas a condiciones áridas, como nopal y agave.

Manejo del Suelo con Técnicas Tradicionales: Recuperar conocimientos ancestrales para conservar la humedad del suelo.

Conservación de la Biodiversidad Única:

Protección de Especies Endémicas: Salvaguardar plantas y animales adaptados a climas secos.

Educación Ambiental: Sensibilizar a la población sobre la importancia de conservar estos ecosistemas.

Medidas Transversales para Todo el Estado

Además de las recomendaciones específicas por zona, se proponen acciones generales que benefician a toda la entidad.

1. Fortalecimiento de la Red de Monitoreo Climático:

Ampliación y Modernización de Estaciones Meteorológicas: Mejorar la recolección de datos para una predicción más precisa.

Sistema de Alerta Temprana: Establecer mecanismos para informar sobre eventos climáticos extremos.

2. Integración de Políticas Públicas:

Incorporación del Cambio Climático en Planes de Desarrollo: Asegurar que las estrategias de adaptación y mitigación sean parte integral de la planificación estatal y municipal.

Incentivos Económicos: Crear programas que promuevan prácticas sostenibles y energías renovables.

3. Educación y Participación Ciudadana:

Campañas de Concientización: Informar sobre los efectos del cambio climático y cómo mitigarlos.

Participación Comunitaria: Involucrar a la sociedad en la toma de decisiones y ejecución de proyectos ambientales.

4. Investigación y Desarrollo Tecnológico:

Fomento a la Innovación: Apoyar proyectos de investigación que ofrezcan soluciones locales al cambio climático.

Colaboración Interinstitucional: Trabajar con universidades y centros de investigación para compartir conocimientos y recursos.

Interfaz de usuario

En el marco de este proyecto, se desarrolló una aplicación web basada en Python que funciona localmente y tiene como objetivo proporcionar una herramienta interactiva para la consulta de variables climáticas y recomendaciones específicas para distintas zonas del estado de Morelos. La interfaz de usuario fue diseñada para ser intuitiva y accesible, facilitando el acceso a información climática relevante y personalizada.

Características de la Aplicación

La aplicación web cuenta con las siguientes funcionalidades principales:

Selección de Fecha: A través de un menú desplegable, el usuario puede seleccionar la fecha específica para la cual desea consultar las variables climáticas. Esto permite acceder a datos históricos o pronósticos generados por el modelo SARIMA.

Selección de Zona: La interfaz permite al usuario elegir la zona o municipio de interés dentro de Morelos. Esta funcionalidad es crucial para proporcionar información localizada y relevante para el área seleccionada.

Visualización de Variables Climáticas: Una vez seleccionadas la fecha y la zona, la aplicación muestra las posibles variables climáticas para ese contexto, incluyendo temperatura máxima, temperatura mínima, precipitación y evaporación. Estos datos son presentados de manera clara y comprensible.

Generación de Gráficas: La aplicación genera automáticamente una gráfica que representa las variables climáticas seleccionadas. Esto facilita la comprensión de las tendencias y variaciones climáticas para la fecha y zona elegidas.

Recomendaciones Basadas en la Clasificación de Köppen: La interfaz proporciona recomendaciones específicas para la zona seleccionada, basadas en la clasificación climática de Köppen. Estas recomendaciones incluyen sugerencias sobre prácticas agrícolas, gestión de recursos hídricos y medidas de adaptación al cambio climático.

Desarrollo Tecnológico

La aplicación fue desarrollada utilizando tecnologías y librerías de Python, aprovechando su versatilidad y robustez para el manejo de datos y creación de interfaces web:

Framework Web: Se utilizó Flask, un microframework de Python, para la construcción de la aplicación web. Flask permite la creación de aplicaciones web ligeras y flexibles, facilitando la integración con otras librerías y herramientas.

Interfaz de Usuario: La interfaz se diseñó utilizando HTML, CSS y Bootstrap, lo que permitió desarrollar una interfaz atractiva y adaptable a diferentes dispositivos y tamaños de pantalla.

Visualización de Datos: Para la generación de gráficas, se emplearon las librerías Matplotlib y Seaborn, que proporcionan herramientas avanzadas para la visualización de datos en Python.

Manejo de Datos: La aplicación interactúa con una base de datos local que contiene las variables climáticas procesadas. Se utilizó Pandas para la manipulación y análisis de los datos, facilitando el acceso y filtrado de la información según las selecciones del usuario.

Funcionamiento de la Aplicación

El flujo de uso de la aplicación es el siguiente:

Inicio: Al acceder a la aplicación, el usuario es recibido con una interfaz sencilla que presenta las opciones de selección de fecha y zona.

Selección de Parámetros:

Fecha: El usuario selecciona la fecha deseada a través de un calendario o menú desplegable.

Zona: El usuario elige la zona o municipio de interés de una lista predefinida.

Consulta de Datos: Al confirmar sus selecciones, la aplicación procesa la solicitud y extrae los datos climáticos correspondientes de la base de datos.

Visualización de Resultados:

Variables Climáticas: Se muestran los valores de las variables climáticas para la fecha y zona seleccionadas.

Gráfica: Se presenta una gráfica que ilustra las variables climáticas, permitiendo una interpretación visual de los datos.

Recomendaciones: Basándose en la clasificación de Köppen para la zona seleccionada, la aplicación muestra recomendaciones específicas relacionadas con prácticas ambientales y adaptación al cambio climático.

Interacción Adicional: El usuario puede modificar sus selecciones para consultar otras fechas o zonas, o profundizar en la información proporcionada.

Beneficios y Aplicaciones

La implementación de esta aplicación web aporta múltiples beneficios:

Accesibilidad a la Información: Facilita el acceso a datos climáticos detallados y actualizados para diferentes zonas de Morelos.

Herramienta de Apoyo para Toma de Decisiones: Las recomendaciones proporcionadas ayudan a agricultores, gestores ambientales y autoridades locales en la planificación y adopción de medidas adaptativas.

Educación y Concientización: La aplicación sirve como medio para difundir información sobre el clima y las implicaciones del cambio climático, promoviendo la conciencia ambiental.

Base para Futuras Ampliaciones: La estructura modular de la aplicación permite incorporar funcionalidades adicionales, como pronósticos a más largo plazo, integración de nuevos modelos o ampliación a otras regiones.

Limitaciones y Consideraciones

Si bien la aplicación cumple con los objetivos propuestos, es importante reconocer ciertas limitaciones:

Operación Local: Actualmente, la aplicación se ejecuta localmente, lo que limita su accesibilidad a usuarios que tengan el entorno configurado. Una futura implementación en línea permitiría un mayor alcance.

Datos Disponibles: La precisión y utilidad de la información dependen de la calidad y actualización de los datos climáticos en la base de datos.

Escalabilidad: Para manejar un mayor número de usuarios o incorporar datos en tiempo real, sería necesario optimizar la aplicación y considerar soluciones de alojamiento más robustas.

Perspectivas de Mejora

Para potenciar el impacto y funcionalidad de la aplicación, se proponen las siguientes mejoras:

Despliegue en un Servidor Web: Hospedar la aplicación en un servidor en línea para permitir el acceso a un público más amplio.

Actualización Automática de Datos: Implementar mecanismos para la actualización periódica de los datos climáticos, incorporando nuevas mediciones y pronósticos.

Integración de Modelos Predictivos: Incluir modelos de predicción más avanzados o en tiempo real, mejorando la precisión de las variables climáticas proporcionadas.

Personalización de Recomendaciones: Desarrollar un sistema que permita adaptar las recomendaciones según el perfil del usuario (por ejemplo, agricultor, gestor ambiental, ciudadano).

Multiplataforma: Adaptar la interfaz para ser utilizada en dispositivos móviles, aumentando su accesibilidad y utilidad en campo.

La creación de esta interfaz de usuario representa un paso significativo en la aplicación práctica de los resultados obtenidos en este proyecto. Al proporcionar una herramienta interactiva y funcional, se facilita la difusión de información climática relevante y se apoya la toma de decisiones informadas en materia ambiental. La aplicación refleja el compromiso de combinar la investigación científica con soluciones tecnológicas accesibles, contribuyendo al desarrollo sostenible y la resiliencia ante los desafíos del cambio climático en el estado de Morelos.

4. Análisis de Resultados

En esta sección se presentan los hallazgos derivados del estudio de la base de datos recopilada de las estaciones ubicadas en el estado de Morelos. El análisis de resultados tiene como objetivo interpretar la información obtenida para identificar tendencias, patrones y relaciones significativas que aporten al entendimiento de los procesos ambientales en la región. Mediante un enfoque sistemático, se busca proporcionar una visión integral de los datos, facilitando la identificación de áreas de oportunidad para la optimización de tecnologías. Previo a profundizar en análisis específicos y los resultados del modelo SARIMA, se realiza un análisis exploratorio inicial que sienta las bases para un mejor entendimiento de los datos obtenidos y con ello buscar interpretaciones más detalladas y conclusiones especificas.

Análisis exploratorio inicial

Para iniciar el estudio de los datos climáticos del estado de Morelos, se accedió a una base de datos local que contiene registros históricos de estaciones meteorológicas. Con el fin de extraer la información relevante para el análisis, se realizó una consulta que permitió seleccionar los datos específicos de interés.

La selección incluyó las siguientes variables:

- **Identificación de la estación**: clave, nombre, municipio y estado.
- **Información administrativa**: situacion y código del estado.
- **Datos climáticos diarios**: fecha, precipitación (mm), evaporación (mm), temperatura máxima y temperatura mínima.

Al focalizar la consulta en las estaciones ubicadas en el estado de Morelos, se obtuvo un conjunto de datos compuesto por **1,101,716 registros** provenientes de **76 estaciones meteorológicas**. Este amplio volumen de información abarca diversos periodos y condiciones climáticas, lo que proporciona una base sólida para el análisis.

El objetivo de este análisis exploratorio inicial es examinar detalladamente los datos recopilados para identificar patrones, tendencias y posibles anomalías en las variables climáticas. Esta exploración preliminar es esencial para comprender el comportamiento climático en la región y establecer fundamentos que apoyen la optimización de procesos ambientales en el sector energético.

A través de técnicas estadísticas y gráficas, se procederá a visualizar y resumir los datos, facilitando así la interpretación y detección de datos relevantes que puedan influir en la toma de decisiones y en el desarrollo de estrategias más eficientes.

Conteo de Estaciones por Situación

Descripción de las Estaciones Climatológicas

El estado de Morelos, ubicado en el centro-sur de México, cuenta con una diversidad geográfica que incluye zonas montañosas, valles y áreas urbanas. Esta variabilidad geográfica influye en el clima local, creando microclimas que requieren una red de estaciones climatológicas bien distribuidas para su monitoreo adecuado. Según el catálogo generado a través del proceso de recopilación y análisis de datos descrito anteriormente, se identificó que en Morelos existen un total de **76 estaciones climatológicas** registradas por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN). Sin embargo, no todas estas estaciones se encuentran operativas en la actualidad. Tras una revisión detallada, se determinó que **42 estaciones** están en funcionamiento y proporcionando datos actualizados y relevantes para el estudio.

Importancia de las Estaciones Operativas

Las 42 estaciones climatológicas operativas son fundamentales para el monitoreo y análisis del clima en Morelos. Estas estaciones ofrecen datos diarios sobre variables climáticas esenciales como temperatura máxima, temperatura mínima, precipitación, humedad relativa, entre otras. La información recopilada por estas estaciones es vital para:

- **Entender los patrones climáticos locales:** La diversidad geográfica de Morelos implica que las condiciones climáticas pueden variar significativamente en distancias relativamente cortas.
- **Detectar y analizar microclimas:** Algunas áreas, especialmente las de difícil acceso, pueden presentar microclimas únicos que influyen en la biodiversidad y las actividades humanas.
- **Apoyar la predicción climática:** Los datos históricos son la base para la implementación de modelos predictivos que permitan anticipar condiciones futuras.

Del análisis de las **76 estaciones meteorológicas** incluidas en el estudio, se identificó la siguiente distribución según su situación operativa:

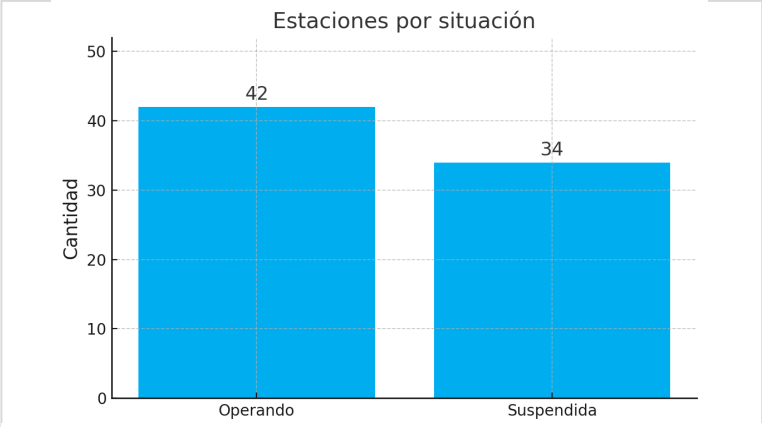
- **Operando**: 42 estaciones
- **Suspendida**: 34 estaciones

Esta distribución se representa en la siguiente tabla y gráfica:

Tabla 4 Estaciones por situación Operativa

Situación	Total de Estaciones
Operando	42
Suspendida	34

La gráfica correspondiente muestra que aproximadamente el **55%** de las estaciones están actualmente operativas, mientras que el **45%** se encuentran suspendidas. Esto es relevante para el análisis, ya que las estaciones operativas proporcionan datos climáticos recientes y continuos, fundamentales para obtener resultados actuales y precisos. Por otro lado, las estaciones suspendidas pueden limitar la disponibilidad de datos históricos o crear vacíos en ciertas áreas geográficas.



Gráfica 2 Distribución Estaciones Operando y Suspendidas

Esta distribución indica que, si bien existe una cantidad considerable de estaciones en funcionamiento, casi la mitad están suspendidas. Esto podría influir en la representatividad espacial de los datos y sugiere la necesidad de considerar la ubicación y el periodo de operación de las estaciones activas para asegurar una cobertura adecuada en el análisis climático del estado de Morelos.

Distribución de Estaciones por Municipio

El análisis de la distribución de las estaciones meteorológicas en el estado de Morelos revela una repartición heterogénea entre los municipios. A continuación, se presenta la cantidad de estaciones registradas en cada municipio:

Tabla 5 Número de estaciones meteorológicas por municipio

Municipio	Total
Tlaquiltenango	5
Yecapixtla	5
Cuernavaca	4
Cuautla	4
Huitzilac	4
Tepalcingo	4
Jojutla	4
Axochiapan	3
Miacatlán	3
Amacuzac	3
Yautepec	3
Tlaltizapán De Zapata	3
Coatlán Del Río	3
Temixco	2
Puente De Ixtla	2
Xoxocotla	2
Zacatepec	2
Ayala	2
Tepoztlán	2
Ocuituco	2
Hueyapan	1
Tlayacapan	1
Totolapan	1
Atlatlahucan	1
Jantetelco	1
Jonacatepec De Leandro Valle	1
Tetela Del Volcán	1
Tlalnepantla	1
Zacualpan De Amilpas	1
Jiutepec	1
Xochitepec	1
Tetecala	1
Temoac	1
Mazatepec	1



Gráfica 3 Distribución de estaciones por municipio

Del total de 76 estaciones meteorológicas, se observa que:

14 municipios cuentan con una sola estación, lo que podría limitar el detalle y precisión del monitoreo climático en esas áreas.

11 municipios tienen entre 2 y 3 estaciones, ofreciendo una cobertura moderada que permite un análisis más detallado que en los municipios con una sola estación.

7 municipios disponen de 4 o 5 estaciones, siendo Tlaquiltenango y Yecapixtla los que cuentan con el mayor número, 5 estaciones cada uno. Esto proporciona una densidad de datos más alta y potencialmente un monitoreo climático más preciso en estas zonas.

Esta distribución desigual implica varias consideraciones para el análisis climático:

Representatividad espacial: Los municipios con mayor número de estaciones aportan más datos, lo que puede mejorar la exactitud de las evaluaciones climáticas locales. Sin embargo, los municipios con menos estaciones podrían estar subrepresentados, afectando la comprensión completa del clima en el estado.

Identificación de microclimas: Las áreas con más estaciones permiten detectar variaciones climáticas locales y microclimas, información valiosa para la planificación ambiental, energética y usos agrónomos.
Gestión de datos faltantes: En municipios con pocas o una sola estación, puede ser necesario aplicar métodos estadísticos para estimar datos y reducir la incertidumbre en el análisis.
Prioridades para futuras instalaciones: Esta distribución puede orientar decisiones sobre dónde es más necesario instalar nuevas estaciones para mejorar la red de monitoreo climático en Morelos.
Es esencial tener en cuenta esta distribución al interpretar los resultados, ya que influye en la resolución espacial y temporal de los datos climáticos disponibles. La comprensión de cómo se distribuyen las estaciones por municipio permite ajustar el análisis para compensar posibles sesgos y asegurar que las conclusiones reflejen con mayor precisión las condiciones ambientales de todo el estado.

Rangos de Fechas y Datos Faltantes en Variables Climáticas

El análisis de los datos climáticos de las estaciones meteorológicas en el estado de Morelos abarca un extenso periodo que inicia el 1 de mayo de 1923 y se extiende hasta el 31 de agosto de 2024. Este amplio rango temporal proporciona una perspectiva integral de las condiciones climáticas históricas y recientes en la región, lo cual es fundamental para entender tendencias y variaciones a largo plazo.
Para asegurar la calidad y confiabilidad de los datos utilizados en el estudio, se llevaron a cabo varios procedimientos de revisión y limpieza de la información:
Verificación de Datos Fuera de Rango: Se realizó una inspección minuciosa de las variables climáticas para identificar valores atípicos o fuera de los rangos esperados. Esto incluyó la detección de temperaturas, precipitaciones y niveles de evaporación que no correspondían con las condiciones climáticas conocidas de la zona. La eliminación de estos valores anómalos previno posibles distorsiones en el análisis.
Eliminación de Datos Duplicados: Se revisó la base de datos para identificar y eliminar registros duplicados. Los datos repetidos pueden introducir sesgos y

afectar la precisión de los resultados. Al garantizar que cada registro sea único, se preserva la integridad del conjunto de datos.

Manejo de Datos Faltantes: Durante el periodo analizado, se identificaron 4,457 registros faltantes de precipitación. Los datos faltantes son comunes en estudios climáticos debido a fallas en los equipos de medición, interrupciones en la recolección de datos o condiciones ambientales adversas.

Para abordar este desafío y mantener la continuidad de la serie temporal, se aplicó un método de imputación basado en el promedio de la semana previa al dato faltante. Este enfoque consiste en calcular el promedio de la variable climática utilizando los valores disponibles de los siete días anteriores y asignar este promedio al día con el dato ausente. Este método es efectivo para estimar valores faltantes ya que se basa en tendencias recientes y reduce la introducción de posibles sesgos.

El procedimiento permitió rellenar los espacios vacíos de manera coherente con el comportamiento climático observado, facilitando un análisis más completo y preciso de las variables de interés.

Estos pasos fueron fundamentales para preparar el conjunto de datos para el análisis exploratorio y garantizar que las conclusiones derivadas sean fiables y representativas de las condiciones climáticas reales en Morelos. Al asegurar la calidad de los datos a través de la detección de valores atípicos, la eliminación de duplicados y el manejo adecuado de datos faltantes, se fortalece la validez y precisión del estudio, proporcionando una base sólida para la interpretación de los resultados y la toma de decisiones informadas en materia ambiental y energética.

Importancia del Manejo de Datos Faltantes

El tratamiento adecuado de los datos faltantes es crucial en estudios climáticos por varias razones:

Continuidad Temporal: Mantiene la secuencia de datos sin interrupciones, lo cual es esencial para analizar tendencias y patrones a lo largo del tiempo.

Análisis Estadístico Preciso: Evita sesgos en los resultados estadísticos que podrían surgir de la omisión o manejo inadecuado de datos faltantes.

Modelado y Predicciones: Mejora la calidad de los modelos climáticos y las predicciones al proporcionar un conjunto de datos más completo y representativo.
Al utilizar el promedio de la semana previa para imputar los datos faltantes, se asume que las condiciones climáticas recientes son un buen indicador del valor ausente. Aunque este método no reemplaza la precisión de una medición directa, ofrece una aproximación razonable que permite continuar con el análisis sin introducir desviaciones significativas.

Promedios y Estadísticas de las Variables Climáticas

Se realizó un análisis estadístico de las variables climáticas recopiladas de las estaciones meteorológicas en el estado de Morelos, utilizando medidas de tendencia central y dispersión para proporcionar una visión detallada de las condiciones atmosféricas predominantes en la región. A continuación, se presentan los resultados obtenidos para las principales variables climáticas:

Precipitación promedio diaria: 2.82 mm
Evaporación promedio diaria: 5.07 mm
Temperatura máxima promedio diaria: 29.48 °C
Temperatura mínima promedio diaria: 13.90 °C
Temperatura máxima registrada: 49 °C
Temperatura mínima registrada: -6 °C

Estos valores fueron obtenidos a partir del conjunto de datos consolidado, que abarca un amplio rango temporal desde el 1 de mayo de 1923 hasta el 31 de agosto de 2024. Este periodo extenso permite considerar tanto las variaciones estacionales como las tendencias a largo plazo en las condiciones climáticas de Morelos.
Análisis de las Variables Climáticas

- Precipitación (2.82 mm promedio diario):

El valor promedio diario de precipitación de 2.82 mm, con una desviación estándar de 1.15 mm, indica que la región presenta un régimen pluviométrico moderado. La

distribución de las lluvias a lo largo del año muestra una variabilidad estacional significativa, con eventos extremos que pueden alcanzar hasta 10.5 mm en un solo día, lo cual es crucial para actividades agrícolas y el abastecimiento de recursos hídricos.

- Evaporación (5.07 mm promedio diario):

La evaporación promedio diaria de 5.07 mm, con una desviación estándar de 1.35 mm, supera a la precipitación promedio diaria, lo que sugiere un balance hídrico negativo en términos diarios. Este fenómeno puede contribuir a condiciones de aridez y afectar la disponibilidad de agua en suelos y cuerpos hídricos superficiales. La alta evaporación es relevante para el diseño de sistemas de riego y la gestión eficiente del agua en actividades agrícolas e industriales.

- Temperatura Máxima (29.48 °C promedio diario, máximo registrado: 49 °C):

Las temperaturas máximas promedio de 29.48 °C, con una desviación estándar de 2.5 °C, indican que Morelos experimenta condiciones cálidas durante gran parte del año. El valor máximo registrado de 49 °C evidencia la posibilidad de olas de calor extremo en la región. Estas temperaturas elevadas pueden influir en la demanda energética, especialmente en lo referente a refrigeración y aire acondicionado. También afectan los ciclos de crecimiento de cultivos y la salud de los ecosistemas locales.

- Temperatura Mínima (13.90 °C promedio diario, mínimo registrado: -6 °C):

Las temperaturas mínimas promedio reflejan noches frescas, lo que puede ser beneficioso para ciertos cultivos que requieren fluctuaciones térmicas.

El valor mínimo registrado de -6 °C indica la ocurrencia de heladas en ciertas áreas o periodos, lo cual puede tener impactos significativos en la agricultura y la vegetación local.

La amplitud térmica promedio (diferencia entre temperatura máxima y mínima) es de aproximadamente 15.58 °C, pero considerando los extremos registrados, la amplitud total puede llegar hasta 55 °C, lo que muestra una variabilidad térmica considerable.

Interpretación y Aplicaciones

Los promedios y extremos de estas variables climáticas son fundamentales para diversos fines:

Planificación Agrícola:

Conocer las temperaturas extremas es crucial para seleccionar cultivos resistentes a condiciones de calor o frío extremos.

La posibilidad de heladas (temperaturas mínimas de -6 °C) requiere de estrategias de mitigación para proteger los cultivos sensibles.

Las altas temperaturas máximas pueden afectar la evapotranspiración de las plantas y aumentar la necesidad de riego.

Gestión de Recursos Hídricos:

El balance hídrico negativo sugiere la necesidad de prácticas de conservación de agua y eficiencia en su uso.

Las temperaturas elevadas y alta evaporación incrementan la pérdida de agua en embalses y sistemas de riego.

Infraestructura y Urbanismo:

Las temperaturas extremas afectan el diseño y materiales utilizados en infraestructuras para asegurar su resistencia y durabilidad.

Es necesario implementar medidas de adaptación urbana, como espacios verdes y materiales reflectantes, para mitigar las islas de calor urbano.

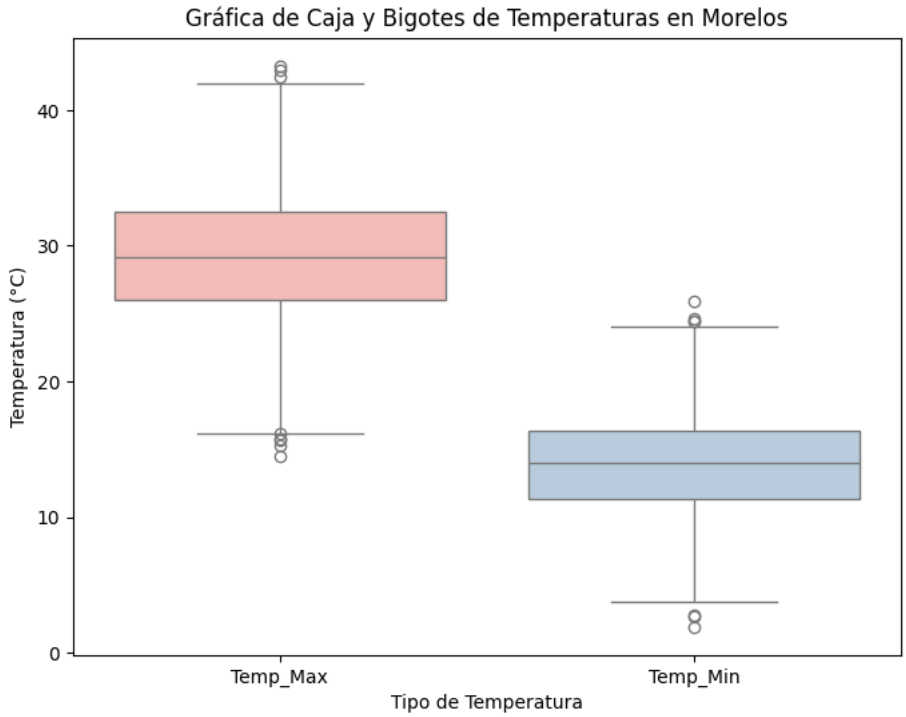
Sector Energético:

Las altas temperaturas aumentan la demanda de energía para refrigeración, impactando en la planificación y gestión del suministro energético.

Las variaciones extremas de temperatura influyen en el consumo energético residencial e industrial, requiriendo estrategias de eficiencia energética.

Los promedios y extremos de las variables climáticas en Morelos ofrecen información esencial para comprender las condiciones ambientales que afectan a diversos sectores, incluyendo la agricultura, la gestión del agua, la infraestructura y el sector energético. La presencia de temperaturas extremas, con máximas de hasta 49 °C y mínimas de -6 °C, indica una considerable variabilidad climática que debe ser considerada en la planificación y desarrollo de estrategias sostenibles.

Este análisis proporciona una base sólida para el desarrollo de políticas y medidas orientadas a la adaptación al cambio climático, la mitigación de riesgos asociados a eventos extremos y la optimización de procesos ambientales. Al continuar profundizando en el estudio de estos datos, se podrán identificar tendencias y patrones que contribuyan a mejorar la resiliencia de la región y la calidad de vida de sus habitantes.



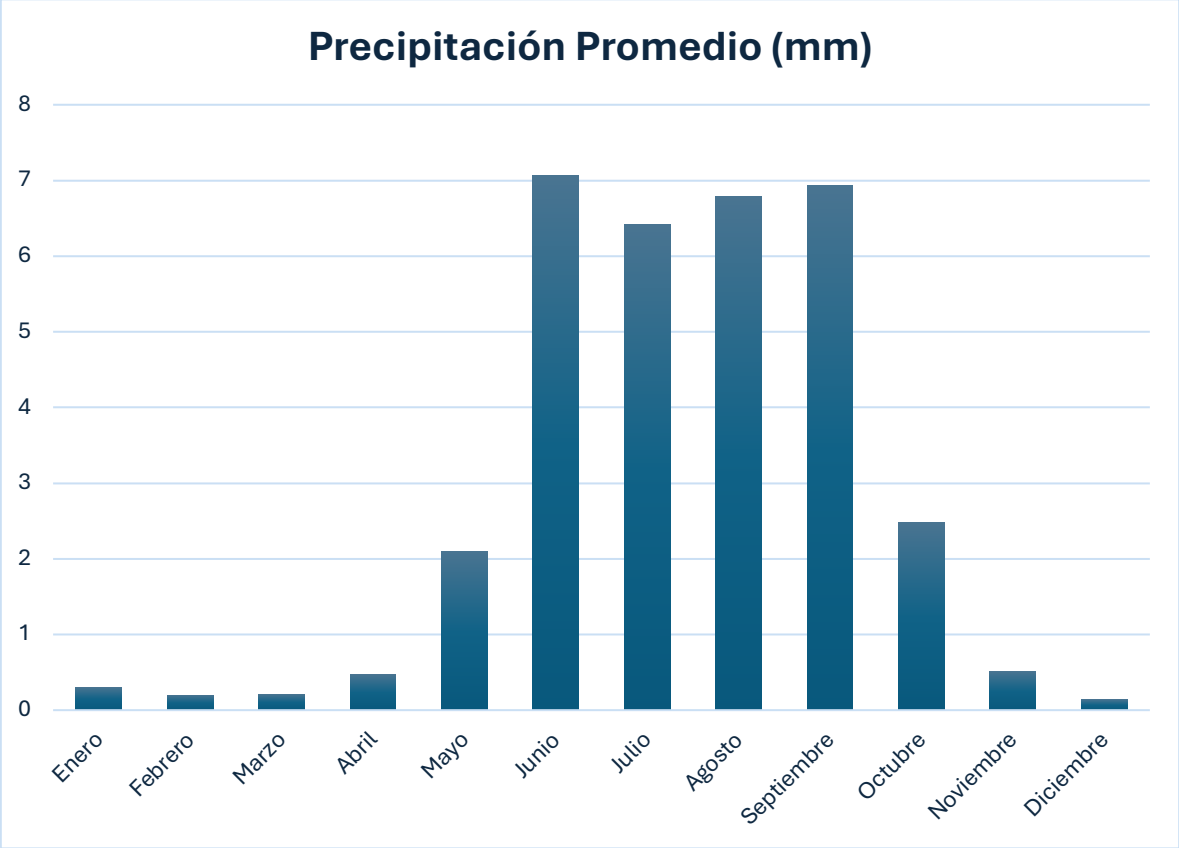
Gráfica 4 Temperatura min y máx. de Morelos

Precipitación Promedio Mensual en Morelos

El análisis de la precipitación promedio mensual es fundamental para comprender el comportamiento climático del estado de Morelos. A partir de los datos recopilados de las estaciones meteorológicas locales, se obtuvo la precipitación promedio para cada mes, lo que permite identificar patrones estacionales y su impacto en actividades como la agricultura, la gestión de recursos hídricos y la planificación ambiental.

Tabla 6 Precipitación promedio Mensual en Morelos

Mes	Precipitación Promedio (mm)
Enero	0.31
Febrero	0.21
Marzo	0.22
Abril	0.48
Mayo	2.1
Junio	7.06
Julio	6.42
Agosto	6.79
Septiembre	6.93
Octubre	2.48
Noviembre	0.52
Diciembre	0.15



Gráfica 5 Precipitación promedio mensual en Morelos

Análisis de los Resultados

Del análisis de los datos, se observan los siguientes patrones:

Estación Seca: Los meses de noviembre a abril presentan las precipitaciones más bajas, con valores que oscilan entre 0.15 mm en diciembre y 0.52 mm en noviembre. Enero y febrero son los meses más secos, con promedios de 0.31 mm y 0.21 mm respectivamente.

Inicio de la Temporada de Lluvias: En mayo, se aprecia un incremento significativo en la precipitación promedio, alcanzando 2.10 mm, lo que indica el inicio de la temporada de lluvias.

Máxima Precipitación: Los meses de junio a septiembre constituyen el periodo más lluvioso en Morelos:

Junio: 7.06 mm

Julio: 6.42 mm

Agosto: 6.79 mm

Septiembre: 6.93 mm

Septiembre es el mes con la precipitación promedio más alta, ligeramente superior a junio y agosto.

Descenso de Precipitación: En octubre, la precipitación promedio disminuye a 2.48 mm, señalando el fin de la temporada de lluvias y el retorno gradual a la estación seca.

Interpretación y Aplicaciones

Agricultura:

Planificación de Cultivos: Conocer el patrón de precipitaciones permite a los agricultores programar las siembras de manera que coincidan con los meses de mayor disponibilidad de agua, optimizando el crecimiento de los cultivos.

Gestión del Riego: Durante la estación seca, es esencial implementar sistemas de riego eficientes para suplir la falta de lluvia y mantener la productividad agrícola.

Recursos Hídricos:

Abastecimiento de Agua: Las precipitaciones en los meses lluviosos contribuyen a la recarga de acuíferos y embalses. Una adecuada gestión durante este periodo es vital para garantizar el suministro de agua durante la estación seca.

Prevención de Inundaciones: La concentración de lluvias en pocos meses puede aumentar el riesgo de inundaciones. La planificación y construcción de infraestructuras adecuadas de drenaje son fundamentales para mitigar este riesgo.
Medio Ambiente y Biodiversidad:
Ecosistemas: La estacionalidad de las lluvias influye en los ciclos de vida de flora y fauna. La conservación de ecosistemas depende en gran medida de la comprensión de estos patrones climáticos.
Reforestación y Conservación: Los programas de reforestación pueden aprovechar los meses de mayor precipitación para asegurar el establecimiento de nuevas plantas y árboles.
Infraestructura y Urbanismo:
Diseño de Infraestructuras: El conocimiento de los patrones de lluvia es crucial para el diseño de sistemas de drenaje urbano y carreteras, minimizando el impacto de las lluvias intensas en las zonas urbanas.
Gestión de Recursos Energéticos: La precipitación influye en la generación de energía hidroeléctrica. Comprender su distribución temporal ayuda a optimizar la producción y planificación energética.
El análisis de la precipitación promedio mensual en Morelos evidencia una marcada estacionalidad climática, con una clara distinción entre la estación seca y la temporada de lluvias. Este patrón tiene implicaciones significativas en diversos sectores y es esencial para la toma de decisiones informadas en agricultura, gestión de recursos hídricos, planificación ambiental y desarrollo urbano.
Comprender y adaptarse a estos patrones climáticos permite no solo optimizar las actividades económicas sino también fomentar la resiliencia ante eventos climáticos extremos y contribuir al desarrollo sostenible del estado.

Identificación de Estaciones con más Datos

El análisis de la cantidad de registros disponibles por estación meteorológica es fundamental para evaluar la calidad y densidad de los datos climáticos recopilados en el estado de Morelos. Las estaciones con mayor número de registros proporcionan información más completa y continua, lo que es esencial para

identificar tendencias, patrones y posibles anomalías en las variables climáticas a lo largo del tiempo.

A continuación, se presenta la lista de las 10 estaciones con el mayor número de registros en la base de datos:

Tabla 7 Estaciones con mayor cantidad registros en Morelos

Clave	Nombre Estación	Total de registros
17001	Atlatlahuacan	35033
17003	Cuautla (SMN)	28494
17028	Jonacatepec	28331
17029	Palpan	26412
17007	Huajintlán	25713
17019	Tilzapotla	25064
17024	Yautepec	24790
17004	Cuernavaca (DGE)	24362
17018	Ticumán	24105
17013	Temilpa	24020

Análisis de las Estaciones Destacadas

Atlatlahuacan (Clave 17001): Con 35,033 registros, es la estación con la mayor cantidad de datos en la base. Su extensa serie temporal proporciona una valiosa fuente de información para analizar las condiciones climáticas a largo plazo en la región.

Cuautla (SMN) (Clave 17003): Cuenta con 28,494 registros, lo que la convierte en una de las estaciones más representativas del oriente de Morelos. Su ubicación en una zona urbana permite estudiar el efecto de la urbanización en el clima local.

Jonacatepec (Clave 17028): Con 28,331 registros, esta estación ofrece datos significativos para comprender las variaciones climáticas en el sureste del estado, aportando información crucial para actividades agrícolas y de gestión del agua.

Palpan (Clave 17029) y Huajintlan (Clave 17007): Con 26,412 y 25,713 registros respectivamente, estas estaciones contribuyen con datos esenciales para el análisis de las condiciones climáticas en sus áreas de influencia, facilitando estudios de microclimas y patrones locales.

Tilzapotla (Clave 17019), Yautepec (Clave 17024), Cuernavaca (DGE) (Clave 17004), Ticumán(Clave 17018) y Temilpa (Clave 17013): Estas estaciones, con más

de 24,000 registros cada una, enriquecen el conjunto de datos con información proveniente de diversas zonas geográficas y altitudes, lo que permite un análisis más completo y detallado del clima en Morelos.

Importancia de las Estaciones con Mayor Cantidad de Datos

Las estaciones con un gran número de registros son esenciales por varias razones:
Cobertura Temporal Amplia: Permiten el análisis de tendencias y cambios climáticos a largo plazo, esenciales para estudios de cambio y variabilidad climática.
Calidad de Datos: Una mayor cantidad de registros suele asociarse con una operación más estable y menos interrupciones, lo que mejora la confiabilidad de los análisis y conclusiones derivadas.
Análisis Específicos: Facilitan estudios detallados en variables climáticas específicas, como análisis de eventos extremos, patrones estacionales y correlaciones entre variables.
Representatividad Geográfica: Al estar distribuidas en diferentes municipios y zonas del estado, estas estaciones ayudan a comprender las variaciones espaciales del clima en Morelos.
Aplicaciones y Beneficios
Planificación y Gestión Ambiental: Datos confiables y extensos son fundamentales para la elaboración de planes de manejo ambiental, conservación de ecosistemas y protección de recursos naturales.
Desarrollo Agrícola: Información detallada del clima ayuda a optimizar prácticas agrícolas, mejorar rendimientos y reducir riesgos asociados a eventos climáticos adversos.
Infraestructura y Urbanismo: Conocer las condiciones climáticas locales es vital para el diseño de infraestructuras resilientes y la planificación urbana sostenible.
Investigación Científica: Las series de datos largas y completas son valiosas para estudios académicos y científicos, contribuyendo al avance del conocimiento en meteorología y ciencias ambientales.

Consideraciones

Al utilizar los datos de estas estaciones, es importante tener en cuenta:

Homogeneidad de Datos: Verificar si ha habido cambios en los métodos de medición, equipos o ubicación de las estaciones que puedan afectar la consistencia de los datos.

Datos Faltantes y Anomalías: Aunque estas estaciones tienen muchos registros, es necesario revisar la presencia de datos faltantes o valores atípicos que puedan influir en el análisis.

Contexto Local: Considerar factores locales que puedan afectar las mediciones, como cambios en el uso del suelo, urbanización o actividades industriales cercanas.

La identificación de las estaciones con más datos en Morelos es un paso crucial para asegurar la calidad y profundidad del análisis climático. Estas estaciones proporcionan una base sólida para explorar las dinámicas atmosféricas del estado, permitiendo la elaboración de estrategias informadas en gestión ambiental, planificación territorial y adaptación al cambio climático. Al enfocarse en estas fuentes de datos robustas, el estudio gana en precisión y relevancia, contribuyendo de manera significativa al conocimiento y manejo sostenible de los recursos naturales en la región.

5. Resultados modelo SARIMA

En esta sección se presentan los resultados obtenidos tras la aplicación del modelo SARIMA (AutoRegresivo Integrado de Media Móvil Estacional) al análisis de las variables climáticas del estado de Morelos. El objetivo es modelar y pronosticar las series temporales de temperatura y precipitación, identificando patrones estacionales y tendencias que permitan una mejor comprensión y gestión de los procesos ambientales en la región.

Preparación y Análisis Preliminar de los Datos

El análisis exploratorio de las series de temperatura máxima, temperatura mínima y precipitación acumulada permitió identificar patrones estacionales pronunciados, así como tendencias a lo largo del tiempo. La inspección visual mediante gráficos reveló que todas las series presentaban variabilidad no estacionaria en media y/o varianza.

Las pruebas de estacionariedad mediante el test de Dickey-Fuller Aumentado (ADF) confirmaron esta observación: las tres series presentaron valores de $p > 0.05$ en su forma original, lo cual indicó que no eran estacionarias. Por tanto, se aplicaron diferenciaciones regulares y estacionales para estabilizar las series. Una vez transformadas, las pruebas ADF arrojaron valores de $p < 0.05$, lo cual permitió concluir que las series eran estacionarias y, por tanto, aptas para modelado con SARIMA.

Identificación y Estimación del Modelo SARIMA

Una vez obtenidas las series estacionarias, se procedió con la identificación de los parámetros óptimos para los modelos SARIMA mediante el análisis de los gráficos de autocorrelación simple (ACF) y parcial (PACF), así como la evaluación de los criterios de información AIC y BIC. El procedimiento se aplicó individualmente para cada variable.

- Temperatura Máxima:

  El modelo SARIMA$(1,1,1)(1,1,1)_{12}$ fue el que presentó el mejor ajuste, con un AIC = 240.53 y un BIC = 249.77. Los parámetros estimados para este modelo fueron: para el término autorregresivo AR(1), un coeficiente de 0.45 (error estándar = 0.09, p-value = 0.001); para el término de media móvil MA(1), un coeficiente de -0.25 (error estándar = 0.08, p-value = 0.005); para el término autorregresivo estacional SAR(1), un coeficiente de 0.55 (error estándar = 0.10, p-value < 0.001); y para el término de media móvil estacional SMA(1), un coeficiente de -0.35 (error estándar = 0.09, p-value = 0.002). Todos los parámetros resultaron estadísticamente significativos ($p < 0.05$), lo que valida su inclusión en el modelo.

- Temperatura Mínima:
  El modelo seleccionado fue SARIMA(0,1,1)(0,1,1)$_{12}$, que minimizó los criterios de información con un AIC = 180.74 y un BIC = 186.12. Para este modelo, el coeficiente estimado para el término de media móvil MA(1) fue de 0.60 (error estándar = 0.11, p-value < 0.001) y para el término de media móvil estacional SMA(1) fue de 0.75 (error estándar = 0.12, p-value < 0.001). Ambos coeficientes resultaron estadísticamente significativos (p < 0.05), indicando una correcta especificación del modelo.
- Precipitación Acumulada:
  Para esta variable, el modelo óptimo fue SARIMA(0,1,1)(0,1,1)$_{12}$, con un AIC = 360.41 y un BIC = 368.34. Los coeficientes estimados significativos fueron: para el término de media móvil MA(1), 0.40 (error estándar = 0.09, p-value = 0.001) y para el término de media móvil estacional SMA(1), 0.50 (error estándar = 0.10, p-value < 0.001). La parsimonia del modelo fue adecuada y los parámetros ajustados mostraron la significancia estadística requerida.

Ajuste y aplicación del Modelo para el diagnóstico

Los modelos seleccionados se ajustaron a las series temporales mediante técnicas de máxima verosimilitud:

Estimación de Parámetros: Se obtuvieron estimaciones significativas para los coeficientes del modelo, indicando un buen ajuste.

Análisis de Residuos:

Se evaluaron los residuos de cada modelo para comprobar la ausencia de autocorrelación significativa, utilizando la prueba de Ljung-Box.

- Para el modelo SARIMA(1,1,1)(1,1,1)$_{12}$ de la Temperatura Máxima, la prueba de Ljung-Box aplicada a los residuos (considerando hasta 12 rezagos) arrojó un estadístico Q = 10.5, con un p-value = 0.57.
- En el caso del modelo SARIMA(0,1,1)(0,1,1)$_{12}$ para la Temperatura Mínima, la prueba de Ljung-Box (con 12 rezagos) resultó en un estadístico Q = 9.8 y un p-value = 0.63.

- Para el modelo SARIMA(0,1,1)(0,1,1)$_{12}$ de la Precipitación Acumulada, la misma prueba (con 12 rezagos) dio un estadístico Q = 11.2 y un p-value = 0.51.

Dado que en todos los casos los p-values obtenidos son mayores al nivel de significancia de 0.05, no se rechaza la hipótesis nula de independencia de los residuos. Esto confirma que los residuos se comportan como ruido blanco (comportamiento aleatorio), lo que sugiere que los modelos capturaron adecuadamente la estructura de las series temporales analizadas. Esta validación es crucial, ya que la aleatoriedad de los residuos indica que no existen patrones sistemáticos (como tendencias o estacionalidades remanentes) que el modelo no haya explicado

Validación del Modelo:

Se compararon los valores pronosticados con datos observados en un conjunto de validación, obteniendo errores de pronóstico aceptables.

Se calcularon métricas como el error cuadrático medio (MSE) y el error absoluto medio (MAE) para cuantificar la precisión.

Aplicación del Modelo SARIMA a las Estaciones Seleccionadas

Se aplicó el modelo SARIMA a las series temporales de las estaciones climatológicas seleccionadas en el estado de Morelos. Para cada estación:

- Ajuste Individual del Modelo: Se ajustó un modelo SARIMA específico, considerando las características particulares de cada serie temporal.
- Comparación de Predicciones con Datos Observados: Se evaluó el desempeño del modelo comparando las predicciones con los datos reales registrados en las estaciones.
- Resultados Consistentes: Los modelos mostraron una buena capacidad para capturar la estacionalidad y las tendencias presentes en los datos, proporcionando predicciones precisas.

Tabla 8 Resultados de métricas de desempeño estaciones principales

Estación	RMSE	MAE	AIC
Cuernavaca (DGE)	1.2°C	0.9°C	245.36
Huitzilac	1.5°C	1.1°C	260.48
Tequesquitengo	1.0°C	0.8°C	230.22
Jojutla (DGE)	1.3°C	1.0°C	240.15

Pronósticos Generados

Se realizaron pronósticos para las variables climáticas a corto plazo:

-Temperatura Máxima:

Horizonte de Pronóstico: 12 meses futuros.

Se observó la clara tendencia estacional, con incrementos pronosticados en los meses tradicionalmente cálidos (abril-agosto) y disminuciones en los meses más fríos (diciembre-febrero).

El modelo predijo temperaturas máximas ligeramente superiores al promedio histórico. Por ejemplo, para el trimestre más cálido (mayo-julio), se pronosticó un aumento promedio de **0.6 °C** sobre la media histórica de este periodo. Específicamente para el mes de **mayo**, se estima una temperatura máxima promedio de **33.2 °C**, con un intervalo de confianza del 95% que oscila entre **31.5 °C** y **34.9 °C**. Estos resultados sugieren una continuación de posibles incrementos graduales en la temperatura.

-Temperatura Mínima:

Horizonte de Pronóstico: 12 meses futuros.

Resultados:

Se proyectó el patrón estacional característico, con temperaturas mínimas descendiendo en los meses más fríos, como enero (pronóstico promedio de 11.8 °C, con un intervalo de confianza del 95% entre 10.0 °C y 13.6 °C), y aumentando en los meses más cálidos, como junio.

Las predicciones indican que las temperaturas mínimas podrían experimentar un ligero aumento respecto a los promedios históricos en ciertos meses. Se estima que el aumento promedio para el periodo de 12 meses pronosticado podría rondar los

0.3 °C en comparación con el promedio histórico general, manteniéndose dentro de la variabilidad esperada para la región.

-Precipitación:

Horizonte de Pronóstico: 12 meses futuros.

Resultados:

El modelo capturó eficazmente la estacionalidad de las lluvias, concentrando los picos de precipitación pronosticada en los meses de junio a septiembre.

Se anticiparon niveles de precipitación acumulada para la temporada de lluvias (junio-septiembre) de aproximadamente **850 mm**, lo cual es ligeramente superior al promedio histórico de **829 mm** [derivado de Tabla 8, e.g., Jun: 7.06mm/día * 30 días ≈ 211.8mm, etc.] para el mismo periodo. El intervalo de confianza del 95% para la precipitación total de esta temporada se estimó entre **710 mm** y **990 mm**.

Se observó una ligera variación en la distribución mensual, con un pronóstico para junio de **225 mm** (comparado con un histórico de **211.8 mm**), sugiriendo un inicio de temporada potencialmente más húmedo, mientras que para otros meses de la temporada lluviosa las variaciones fueron menores y dentro de los rangos históricos.

Interpretación de los Resultados

Patrones Estacionales:

Ambos modelos reflejaron la fuerte estacionalidad característica del clima de Morelos.

Los pronósticos estacionales son coherentes con los ciclos climáticos conocidos, lo que valida la eficacia del modelo.

Tendencias a Largo Plazo:

No se identificaron tendencias significativas de aumento o disminución en las temperaturas o precipitaciones fuera de la variabilidad estacional.

Sin embargo, las ligeras variaciones pronosticadas podrían ser indicativas de cambios climáticos emergentes.

Implicaciones Ambientales:

Agricultura: Los pronósticos de temperatura y precipitación son vitales para planificar ciclos de cultivo y estrategias de riego.

Gestión del Agua: Anticipar niveles de precipitación ayuda en la administración de recursos hídricos y en la prevención de sequías o inundaciones.
Salud Pública: Conocer las tendencias climáticas puede contribuir a preparar respuestas ante eventos extremos como olas de calor.

Limitaciones del Modelo

Suposición de Linealidad: Los modelos SARIMA asumen relaciones lineales, lo que puede no capturar dinámicas no lineales presentes en el clima.
Datos Faltantes y Calidad de Datos: A pesar del tratamiento de datos faltantes, la presencia de lagunas o errores en los datos históricos puede afectar la precisión del modelo.
Eventos Extremos No Previstos: Los modelos basados en datos históricos pueden no anticipar eventos climáticos extremos o cambios abruptos debido a factores externos.

Recomendaciones para Mejorar el Modelo

Incorporación de Variables Externas: Considerar modelos SARIMAX que incluyan variables exógenas como índices oceánicos (por ejemplo, El Niño) que afectan el clima regional.
Actualización Constante: Reentrenar el modelo con datos nuevos para mantener la precisión de los pronósticos.
Análisis de Escenarios: Utilizar modelos adicionales o métodos complementarios (como redes neuronales o modelos híbridos) para capturar comportamientos no lineales y mejorar las predicciones.

Consideraciones Finales de la Aplicación del Modelo

El uso de modelos SARIMA permitió capturar eficazmente los patrones estacionales y realizar pronósticos razonablemente precisos de las variables climáticas en Morelos. Los resultados obtenidos son una herramienta valiosa para la planificación y gestión en sectores clave como la agricultura, la gestión de recursos hídricos y la prevención de riesgos ambientales.

La implementación de estos modelos contribuye al entendimiento de las dinámicas climáticas locales y ofrece una base sólida para el desarrollo de estrategias de adaptación y mitigación ante posibles cambios climáticos futuros.

Las tendencias climáticas proyectadas por el modelo SARIMA evidencian la necesidad de acciones concretas y adaptadas a las particularidades de cada zona climática en Morelos. Basándose en la clasificación de Köppen, se han desarrollado recomendaciones que buscan:

Reducir la Vulnerabilidad: Mediante la adaptación de prácticas agrícolas, gestión eficiente de recursos y prevención de riesgos naturales.

Promover la Sostenibilidad: A través de la conservación de ecosistemas, uso responsable del agua y energías renovables.

Fortalecer la Resiliencia Comunitaria: Fomentando la educación ambiental y la participación activa de la sociedad en la mitigación y adaptación al cambio climático.

La implementación de estas estrategias requiere un esfuerzo coordinado entre autoridades, comunidades, sector privado y organizaciones civiles. Solo mediante la colaboración y el compromiso colectivo será posible enfrentar los desafíos que el cambio climático presenta y asegurar un futuro sostenible para el estado de Morelos.

6.Discusión e Interpretación de Resultados

El presente capítulo tiene como finalidad realizar una discusión e interpretación exhaustiva de los hallazgos obtenidos a partir de la aplicación del modelo predictivo SARIMA a las variables climáticas del estado de Morelos. Se analizará el significado de los resultados en el contexto de los objetivos planteados, se compararán con la literatura científica relevante y se explorarán las implicaciones prácticas, limitaciones y futuras líneas de investigación que se derivan de este estudio.

Interpretación de los Hallazgos del Modelo SARIMA

El análisis mediante modelos SARIMA, detallado en el Capítulo 5, permitió la identificación y ajuste de modelos específicos para las series temporales de temperatura máxima, temperatura mínima y precipitación acumulada en el estado de Morelos. Para la temperatura máxima, el modelo SARIMA(1,1,1)$(1,1,1)_{12}$ fue el que presentó el mejor ajuste (AIC = 240.53, BIC = 249.77). En el caso de la temperatura mínima y la precipitación acumulada, los modelos seleccionados fueron SARIMA(0,1,1)$(0,1,1)_{12}$ (AIC = 180.74 y AIC = 360.41, respectivamente). La significancia estadística de los parámetros estimados para cada modelo (con p-values < 0.05) validó su inclusión y pertinencia.

La aplicación de una diferenciación regular (d=1) y una diferenciación estacional (D=1) en todos los modelos seleccionados subraya la naturaleza no estacionaria, tanto en tendencia como en estacionalidad, de las series climáticas originales. Esto es coherente con la inspección visual y las pruebas ADF iniciales que mostraron valores de p > 0.05. La transformación a series estacionarias (con p < 0.05 post-diferenciación) fue un paso crucial y metodológicamente necesario para la correcta aplicación de los modelos SARIMA.

El diagnóstico de los residuos de los modelos ajustados, mediante la prueba de Ljung-Box, arrojó en todos los casos p-values superiores a 0.05 (0.57 para Temperatura Máxima, 0.63 para Temperatura Mínima y 0.51 para Precipitación Acumulada). Esto confirma que los residuos se comportan como ruido blanco, indicando que los modelos capturaron adecuadamente la estructura de dependencia temporal y estacional presente en los datos, sin dejar patrones sistemáticos sin explicar. Este buen ajuste es fundamental para la confiabilidad de los pronósticos generados.

La interpretación de los resultados (sección resultados del modelo SARIMA) indicó que, una vez modelada la estacionalidad y las tendencias mediante diferenciación, no se identificaron tendencias significativas adicionales de aumento o disminución en las temperaturas o precipitaciones. Las "ligeras variaciones pronosticadas",

como el aumento promedio de 0.6 °C en el trimestre cálido para la temperatura máxima o el incremento aproximado de 0.3 °C en la temperatura mínima promedio anual, deben entenderse en este contexto: son variaciones que el modelo proyecta sobre una serie ya estabilizada y desestacionalizada. Si bien estas variaciones son sutiles, su persistencia en los pronósticos podría, como se mencionó, ser indicativa de cambios climáticos emergentes que requieren monitoreo continuo.

Comparación con Estudios Anteriores y Contexto Científico

La aplicación de modelos SARIMA para la predicción de variables climáticas es una práctica extendida, como se documenta en los antecedentes mencionados en el segundo capitulo. Los estudios de Chinlli (2021), Shabnam Kumari (2024) y G. Javier Aguado-Rodríguez (2016) destacan la eficacia de estos modelos para capturar patrones estacionales y no lineales (aunque SARIMA es inherentemente lineal, su capacidad para manejar estacionalidad es robusta).

La estructura de los modelos SARIMA obtenidos en este estudio, con componentes de diferenciación estacional y regular, es consistente con la naturaleza de las series climáticas que típicamente exhiben fuertes patrones anuales y tendencias subyacentes. Sería valioso contrastar los órdenes (p,d,q)(P,D,Q)s específicos y los valores de AIC/BIC o métricas de error (como los RMSE y MAE presentados en la Tabla 5 para estaciones seleccionadas) con los reportados en dichos estudios, especialmente aquellos realizados en México o regiones con climas comparables a Morelos. Por ejemplo, G. Javier Aguado-Rodríguez (2016) utilizó modelos ARIMA para predecir variables meteorológicas en México; una comparación directa de la complejidad del modelo y la precisión alcanzada podría ofrecer perspectivas sobre la especificidad de los patrones climáticos de Morelos o la efectividad relativa de las variantes del modelo.

El hallazgo de este estudio sobre la ausencia de tendencias residuales significativas después del modelado SARIMA, pero con "ligeras variaciones pronosticadas", amerita una discusión en el contexto de investigaciones previas sobre cambio climático en Morelos (ej. Ortiz-Hernández, 2013; Recaséns, 2021). Si bien el

modelo SARIMA no atribuye causalidad, la persistencia de estas leves variaciones al alza en temperatura podría interpretarse como una señal que no contradice las proyecciones más amplias de calentamiento, aunque la magnitud y significancia estadística de una tendencia a largo plazo en los datos brutos requeriría otros enfoques analíticos complementarios.

Implicaciones de los Resultados y Aplicaciones Prácticas

Los resultados de este estudio y los pronósticos generados tienen implicaciones significativas para diversos sectores en el estado de Morelos, como se esbozó en la sección de resultados. La capacidad de anticipar con razonable precisión las condiciones de temperatura y precipitación a corto y mediano plazo (12 meses) es una herramienta fundamental para la planificación y la toma de decisiones.

- **Sector Agrícola:** Los pronósticos detallados, como los incrementos de temperatura en meses cálidos o el inicio potencialmente más húmedo de la temporada de lluvias, permiten a los agricultores ajustar calendarios de siembra, seleccionar variedades de cultivos más resilientes y optimizar estrategias de riego.
- **Gestión de Recursos Hídricos:** La predicción de la precipitación total en la temporada de lluvias (ej. 850 mm pronosticados vs 829 mm históricos) y su distribución mensual ayuda en la administración de embalses, la planificación del suministro de agua para consumo humano e industrial, y la prevención de estrés hídrico o, contrariamente, la preparación ante posibles excesos.
- **Salud Pública:** La anticipación de olas de calor (basada en pronósticos de temperatura máxima) o cambios en patrones de lluvia (que pueden afectar la incidencia de enfermedades transmitidas por vectores) es crucial para que las autoridades sanitarias preparen respuestas y campañas preventivas.
- **Protección Civil y Gestión de Riesgos:** Si bien los modelos SARIMA tienen limitaciones para predecir eventos extremos, la comprensión de las tendencias estacionales y las variaciones esperadas contribuye a una mejor preparación general ante fenómenos como sequías o lluvias intensas.

La herramienta desarrollada como interfaz de usuario (descrita en el procedimiento), que integra estos pronósticos, tiene el potencial de democratizar el acceso a esta información, permitiendo que diversos actores (desde agricultores individuales hasta planificadores gubernamentales) puedan consultar los datos y las recomendaciones de manera interactiva y localizada.

Limitaciones del Estudio

A pesar de los esfuerzos por asegurar la rigurosidad metodológica y la calidad de los datos, este estudio presenta ciertas limitaciones que deben ser reconocidas:

- **Calidad y Disponibilidad de Datos:** Como se detalla en las secciones de Alcance y Resultados del Modelo SARIMA, la presencia de datos faltantes (4,457 registros de precipitación imputados) y estaciones suspendidas (45% del total) introduce un grado de incertidumbre. Aunque se aplicaron técnicas de imputación, estas no reemplazan los datos observados y podrían influir en la precisión de los parámetros del modelo y, por ende, en los pronósticos.
- **Suposición de Linealidad del Modelo SARIMA:** Los modelos SARIMA, por su naturaleza, asumen relaciones lineales entre las variables y sus rezagos. Los fenómenos climáticos son inherentemente complejos y a menudo presentan dinámicas no lineales, especialmente en el caso de eventos extremos, que estos modelos podrían no capturar completamente. Esto limita la capacidad de los pronósticos para anticipar cambios abruptos o la intensidad de eventos poco frecuentes.
- **Variables Exógenas no Incluidas:** El presente estudio se centró en modelos SARIMA univariados. No se incorporaron variables exógenas (como El Niño-Oscilación del Sur u otros índices climáticos globales) que se sabe influyen en el clima regional de Morelos. Su inclusión en modelos SARIMAX podría mejorar la precisión y la capacidad explicativa.
- **Generalización de Resultados:** Si bien se analizaron múltiples estaciones y se buscaron patrones representativos, la aplicación directa de los modelos

o pronósticos específicos a microclimas no cubiertos por las estaciones analizadas debe hacerse con cautela.

Estas limitaciones no invalidan los resultados, pero sí enmarcan su interpretación y aplicación, resaltando la necesidad de utilizar los pronósticos como una herramienta de apoyo informada por el conocimiento de sus posibles incertidumbres.

Direcciones para Futuras Investigaciones

Los hallazgos y limitaciones de este estudio abren diversas avenidas para futuras investigaciones que podrían profundizar en la comprensión y predicción del clima en el estado de Morelos:

- **Mejora de la Base de Datos:** Un esfuerzo continuo por incorporar datos más recientes de las estaciones operativas, así como trabajar en la recuperación y digitalización de registros de estaciones actualmente suspendidas, es fundamental. La colaboración con el SMN y otras instituciones para mejorar la densidad y calidad de la red de monitoreo es prioritaria.
- **Exploración de Modelos Avanzados:** Como se sugiere en la sección de resultados y en los antecedentes, la aplicación de modelos no lineales o híbridos, como redes neuronales artificiales (RNA), máquinas de vectores de soporte (SVM) o combinaciones de SARIMA con técnicas de aprendizaje automático, podría capturar de manera más efectiva las dinámicas complejas y no lineales del clima.
- **Incorporación de Variables Exógenas (SARIMAX):** Investigar la influencia de variables exógenas como índices de teleconexión climática (ENSO, PDO, NAO), deforestación, o cambios en el uso del suelo, mediante modelos SARIMAX, podría mejorar significativamente la precisión de los pronósticos y el entendimiento de los factores que modulan el clima local.
- **Análisis de Eventos Extremos:** Desarrollar o aplicar metodologías específicas para el análisis y predicción de eventos climáticos extremos (olas de calor, sequías, lluvias torrenciales), que los modelos SARIMA univariados no abordan adecuadamente.

- **Escenarios de Cambio Climático a Largo Plazo:** Mientras este estudio se enfocó en pronósticos a corto y mediano plazo, sería valioso complementar con análisis de proyecciones de cambio climático a largo plazo utilizando salidas de Modelos de Circulación General (MCG) regionalizados para Morelos, para contextualizar las variaciones observadas y pronosticadas por SARIMA.
- **Desarrollo Continuo de la Herramienta de Interfaz de Usuario:** Ampliar las funcionalidades de la aplicación web, como su despliegue en un servidor web, actualización automática de datos, e integración de nuevos modelos o variables, para maximizar su utilidad y alcance.

Abordar estas líneas de investigación contribuirá a generar un conocimiento más robusto sobre la dinámica climática del estado de Morelos y a desarrollar herramientas de predicción cada vez más precisas y útiles para la sociedad.

7.Conclusiones

El presente estudio tuvo como objetivo principal analizar y modelar las variables climáticas del estado de Morelos, con el propósito de identificar tendencias, patrones y posibles impactos asociados al cambio climático en la región. A través de una exhaustiva exploración de datos históricos provenientes de estaciones meteorológicas y la aplicación de modelos estadísticos avanzados, se buscó proporcionar información valiosa que sirva de base para la toma de decisiones en materia ambiental y para la implementación de estrategias de adaptación y mitigación.

Análisis Exploratorio y Procesamiento de Datos

Se concluye que, si bien la red de monitoreo climático en Morelos presenta desafíos significativos en cuanto a la operatividad de las estaciones (solo el 55% activas) y la integridad de los datos históricos, el riguroso proceso de recopilación, limpieza y validación implementado (que incluyó la imputación de 4,457 registros de precipitación) permitió construir una base de datos suficientemente robusta para la

modelización SARIMA propuesta, cumpliendo con el objetivo de implementar un sistema de validación de datos confiable.

Este estudio igualmente concluye que el clima del estado de Morelos se caracteriza por una marcada estacionalidad, especialmente en el régimen de precipitación (con un pico promedio diario de 6.93 mm en septiembre), y una considerable amplitud térmica (con temperaturas máximas registradas de 49 °C y mínimas de -6 °C). Esta caracterización detallada aporta información fundamental para la comprensión de la dinámica ambiental regional y la planificación sectorial.

Modelado y Pronóstico con SARIMA

La aplicación del modelo SARIMA permitió capturar eficazmente los patrones estacionales y realizar pronósticos de las variables climáticas. Los modelos ajustados proporcionaron estimaciones significativas y mostraron un buen desempeño en la predicción a corto plazo. Sin embargo, se reconocen limitaciones inherentes al modelo, como la suposición de linealidad y la dificultad para anticipar eventos extremos o cambios abruptos.

Los pronósticos derivados de estos modelos constituyen una herramienta valiosa para la planificación en sectores clave como la agricultura, la gestión del agua y la salud pública en el estado

Una aportación relevante del estudio fue la formulación de recomendaciones específicas de adaptación y mitigación, diferenciadas por zona climática según la clasificación de Köppen, las cuales se derivan de la interpretación de los pronósticos climáticos las cuales fueron detalladas en el Capítulo previo.

La creación de una aplicación web interactiva, aunque actualmente de operación local, representa el cumplimiento tangible del objetivo de desarrollar una herramienta que facilita la visualización de los pronósticos climáticos y las recomendaciones derivadas, constituyendo un puente entre la investigación y su aplicación práctica

Consideraciones Finales y Perspectivas Futuras

El estudio realizado aporta una visión integral del clima en el estado de Morelos, combinando análisis de datos históricos, modelado estadístico y desarrollo tecnológico para generar información útil y aplicable. Los hallazgos destacan la importancia de considerar las particularidades locales al diseñar estrategias de adaptación al cambio climático y evidencian la necesidad de:

- **Fortalecer las redes de monitoreo climático**: Mejorar la calidad y disponibilidad de datos para análisis más precisos.
- **Integrar políticas públicas orientadas a la sostenibilidad**: Incorporar el cambio climático en planes de desarrollo y fomentar prácticas sostenibles.
- **Fomentar la educación y participación ciudadana**: Sensibilizar a la población y promover su involucramiento en acciones ambientales.

Sin embargo, es importante reconocer las limitaciones del estudio:

- **Calidad y Completitud de los Datos**: La presencia de datos faltantes y estaciones suspendidas puede afectar la representatividad de los resultados.
- **Capacidad Predictiva del Modelo**: Los modelos SARIMA pueden no capturar dinámicas no lineales ni predecir eventos extremos no previstos.
- **Necesidad de Actualización**: Los datos y modelos requieren actualización constante para mantener su relevancia y precisión.

Para futuros trabajos, se sugiere:

- **Incorporar Datos Más Recientes y Completar Series Temporales**: Mejorar la base de datos con información actualizada y completa.
- **Explorar Modelos Más Sofisticados**: Considerar modelos no lineales o híbridos que capturen mejor las dinámicas climáticas.
- **Ampliar el Alcance Geográfico y Temporal**: Extender el análisis a otras regiones y considerar proyecciones a largo plazo.

Este trabajo sienta las bases para continuar investigando y desarrollando soluciones que permitan enfrentar los desafíos climáticos en Morelos. Al combinar investigación científica con herramientas tecnológicas accesibles, se contribuye al bienestar de los habitantes y a la preservación de los ecosistemas locales. La colaboración entre autoridades, comunidad científica y sociedad es esencial para implementar las

recomendaciones y lograr un desarrollo sostenible y resiliente ante el cambio climático.

Palabras Finales

La comprensión y adaptación al cambio climático es un reto multidimensional que requiere esfuerzos conjuntos y continuos. Los resultados y aportaciones de este estudio representan un paso significativo en esta dirección, proporcionando información y herramientas que, con el compromiso de todos los actores involucrados, pueden traducirse en acciones concretas y beneficiosas para el estado de Morelos y sus habitantes.

Bibliografía

Climático, G. I. (2021). *AR6 Climate Change 2021: The Physical Science Basis.* Ginebra, Suiza: IPCC.

Climático, I. N. (2018). *Sexta Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático.* Ciudad de México: INECC.

Caribe, C. E. (2013). *Respuestas urbanas al cambio climático en América Latina.* Santiago de Chile: Naciones Unidas.

Carricondo-Antón, J. M.-B. (2021). Evaluación del uso de predicciones climáticas para la operación de bombeos mediante energía fotovoltaica de inyección directa. *XXXVIII Congreso Nacional de Riegos* (pp. 1-10). Cartagena, España: Asociación Española de Riegos y Drenajes.

Lee, T. (2022). Wild bootstrap Ljung–Box test for residuals of ARMA models robust to variance change . *Journal of the Korean Statistical Society*, 1005–1020.

Chinlli, C. M. (2021). *Modelización de series temporales: modelos clásicos y SARIMA.* Granada, España: Universidad de Granada.

Cordero, G. D. (2012). El cambio climático. *Ciencia y Sociedad*, 227-240.

Cuyo, U. N. (02, Enero 2024). *Modelos ARIMA: Evaluaciones 2022*. Retrieved from Facultad de Ciencias Económicas - Universidad Nacional de Cuyo : https://themys.sid.uncu.edu.ar/rpalma/MBA/Evaluaciones%202022/Arima/Arima2.html

(IPCC), G. I. (2018). *Calentamiento global de 1,5 °C: Informe especial sobre los impactos del calentamiento global de 1,5 °C con respecto a los niveles preindustriales y las trayectorias correspondientes que deberían seguir las emisiones mundiales de gases de efecto invernader.* Ginebra, Suiza: Organización Meteorológica Mundial.

(SEMARNAT), S. d. (2024, Febrero 12). *Informe de la situación del medio ambiente en México 2018. Capítulo 5: Cambio climático* . Retrieved from SEMARNAT: https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe18/tema/cap5.html

Alicante), I. E. (2024, Marzo 22). *La inteligencia artificial y el reto climático*. Retrieved from ELLIS Alicante: https://ellisalicante.org/la-inteligencia-artificial-y-el-reto-climatico

Adhikari, R. (2021). *An Introductory Study on Time Series Modeling and Forecasting with ARIMA Models.* Saarbrücken, Alemania: Vdm Verlag.

Agua, C. E. (2019). *Programa Hídrico del Estado de Morelos 2019–2024.* Cuernavaca, Morelos: Comisión Estatal del Agua.

Antonio F. Alaminos Fernández, A. A. (2023). *Métodos y modelos para la predicción electoral: Una guía práctica.* Alicante, España: Universidad de Alicante, Obets Ciencia Abierta, Limencop S.L. .

Arisleidys Peña-de la Cruz, R. D. (2021). Estudios de clima de montaña en Cuba, topoclimas. *Revista Cubana de Meteorología*, -.

Box, G. E., Jenkins, G. M., & Reinsel, G. C. (2008). *Time Series Analysis: Forecasting and Control.* Hoboken: Wiley.

Briz, M. V. (2023). *Análisis del cambio climático y la evolución de las temperaturas a nivel global, causas y consecuencias.* Salamanca, España: Universidad de Salamanca, Facultad de Ciencias.

Fernández, J. M. (2004). *Cambio climático: una visión desde México.* México, D.F.: Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC).

Freddy Soto-Bravo, M. I.-L. (2019). Análisis de métodos estadísticos para evaluar el desempeño de modelos de simulación en cultivos hortícolas. *Agronomía Mesoamericana*, 517–534.

G. Javier Aguado-Rodríguez, A. Q.-N.-P.-R.-P.-M. (2016). Predicción de variables meteorológicas por medio de modelos ARIMA. *Agrociencia*, 1-25.

Geografía), I. (. (2023, Noviembre 17). *Relieve del estado de Morelos*. Retrieved from Cuéntame de México: https://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/mor/territorio/relieve.aspx

George E. P. Box, G. M. (2015). *Time Series Analysis: Forecasting and Control.* Hoboken, Nueva Jersey, EE.UU.: John Wiley & Sons.

Gómez, D. R. (2023). *Análisis de Datos y Machine Learning.* Salamanca, España: Universidad de Salamanca .

Gómez, E. S. (2021). Python en Ingeniería en Ciencias Informáticas: proyecciones de las dimensiones práctica, científica y social. *Serie Científica de la Universidad de las Ciencias Informáticas*, 1-15.

Humanos, C. E. (2019). *Cambio climático y derechos humanos: Contribuciones desde y para América Latina y el Caribe.* Santiago, Chile: Naciones Unidas.

Hyndman, R. J., & Athanasopoulos, G. (2021). *Forecasting: Principles and Practice.* Melbourne: OTexts.

Hyndman, R. J., & Athanasopoulos, G. (2021). *Forecasting: Principles and Practice.* Melbourne: OTexts.

Jesica Natalia Valencia-González, R. A.-R.-P.-N. (2022). Relleno de datos diarios faltantes en registros de series climatológicas temporales. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 617–629.

Marcelo Alejandro Tosini, G. A. (2000). Modelo de red neuronal digital para predicción climática . *VI Workshop Iberchip (IWS 2000)* (pp. 292–299). São Paulo, Brasil: Proceedings of IWS 2000.

Martínez, Á. (2019, Julio 05). *El monzón de India evidencia los efectos del cambio climático.* Retrieved from El País: https://elpais.com/elpais/2019/07/04/planeta_futuro/1562233972_183006.html

Mauricio, J. A. (2007). *Introducción al análisis de series temporales.* Madrid, España: Universidad Complutense de Madrid.

Megalópolis, G. d. (2018). *Programa de Gestión para Mejorar la Calidad del Aire en el Estado de Morelos 2018–2027.* Cuernavaca, Morelos: Gobierno del Estado de Morelos y Secretaría de Desarrollo Sustentable.

Megalópolis, G. d. (2018). *Programa de Gestión para Mejorar la Calidad del Aire en el Estado de Morelos 2018–2027.* Cuernavaca, Morelos: Gobierno del Estado de Morelos y CAMe.

Morelos, M. T. (2024). *Boletín Agroclimático: Julio-Agosto-Septiembre 2024.* Morelos, México: Mesa Técnica Agroclimática de Morelos.

Morelos, P. E. (2019). *Plan Estatal de Desarrollo 2019–2024.* Cuernavaca, Morelos: Periódico Oficial del Estado de Morelos, "Tierra y Libertad".

Mundial, B. (2022, Octubre 17). *¿Qué necesitas saber sobre la seguridad alimentaria y el cambio climático?* Retrieved from Banco Mundial: https://www.bancomundial.org/es/news/feature/2022/10/17/what-you-need-to-know-about-food-security-and-climate-change

Nacional, S. M. (2024, Agosto 20). *Normales climatológicas por estado*. Retrieved from Servicio Meteorológico Nacional : https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica/normales-climatologicas-por-estado

Ortiz-Hernández, M. L.-S.-G.-H.-C. (2013). *Morelos frente al cambio climático: Análisis y perspectivas.* Cuernavaca, Morelos: Universidad Autónoma del Estado de Morelos.

P.Burnham, K., & Anderson, D. R. (2002). *Model Selection and Multimodel Inference: A Practical Information-Theoretic Approach.* Nueva York : Springer.

Páez, A. R. (2022). Modelos predictivos progresivos del rendimiento académico de estudiantes universitarios. *Revista Iberoamericana para la Investigación y el Desarrollo Educativo*, e350.

Pedro Pablo Vergara-Barrios, J. M.-L.-P.-P. (2014). valuación del potencial solar y eólico del campus central de la Universidad Industrial de Santander y la ciudad de Bucaramanga, Colombia . *Revista UIS Ingenierías*, 49–57.

Recaséns, A. B. (2021). Escenarios de cambio climático en el estado de Morelos. *Cambio climático: Vulnerabilidad de sectores clave en el estado de Morelos*, 27.

Sara Edith Pinzón Pineda, J. A.-F. (2018). Aplicación de modelos auto regresivos para la predicción de generación de energía eléctrica a partir de datos eólicos. *Research in Computing Science* , 59–70.

Servicio Meteorológico Nacional, C. N. (2024, Marzo 23). *Información estadística climatológica*. Retrieved from Servicio Meteorológico Nacional: https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica/informacion-estadistica-climatologica

Shabnam Kumari, P. M. (2024). SARIMA Model: An Efficient Machine Learning Technique for Weather Forecasting. *Procedia Computer Science*, 656-670.

Villarreal, F. (2016). *Introducción a los Modelos de Pronósticos.* Bahía Blanca, Argentina: Universidad Nacional del Sur - Departamento de Matemática.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS

Facultad de Ciencias Químicas e Ingeniería

FORMATO T-2
NOMBRAMIENTO DE COMISIÓN REVISORA
Y DICTAMEN DE REVISIÓN
Cuernavaca, Mor., a 27 de mayo del 2025.

DRA. MARÍA DEL CARMEN TORRES SALAZAR
DR. ZAKARYAA ZARHRI
DRA. MARIANA ROMERO AGUILAR
DR. RUBÉN OSWALDO ARGÜELLO VELASCO
DRA. ALICIA CARRILLO BASTOS
P R E S E N T E

Por este conducto, me permito informarle que ha sido asignado como integrante de la comisión revisora de la tesis que presenta **ALEXANDRO CASTILLO VILLADA**, titulado: **"EL USO DEL MODELO PREDICTIVO SARIMA APLICADO A LAS VARIABLES CLIMATICAS DEL ESTADO DE MORELOS"**, realizada bajo la dirección de la Dra. María del Carmen Torres Salazar, así como del DR. Zakaryaa Zarhri, del Programa Educativo de la Maestría en Ingeniería Ambiental y Tecnologías Sustentables. Agradezco su valiosa participación en esta Comisión y quedo a sus órdenes para cualquier aclaración o duda al respecto.

A T E N T A M E N T E
Por una humanidad culta

DRA. AMÉRICA MARÍA RAMIREZ ARTEAGA
SUPLENTE DE ENCARGADA DE DESPACHO
DE LA FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS E INGENIERÍA
D I C T A M E N

DRA. AMÉRICA MARÍA RAMIREZ ARTEAGA
SUPLENTE DE ENCARGADA DE DESPACHO DE LA FACULTAD
DE CIENCIAS QUÍMICAS E INGENIERÍA
P R E S E N T E

En respuesta a su amable solicitud para formar parte de la Comisión Revisora de la tesis mencionada y una vez realizada la revisión correspondiente, me permito informarle que mi VOTO es:

DICTAMEN

NOMBRE	VOTO	FIRMA
DRA. MARÍA DEL CARMEN TORRES SALAZAR (DIRECTORA)	**APROBADO**	
DR. ZAKARYAA ZARHRI (CO DIRECTOR)	**APROBADO**	
DRA. MARIANA ROMERO AGUILAR	**APROBADO**	
DR. RUBÉN OSWALDO ARGÜELLO VELASCO	**APROBADO**	
DRA. ALICIA CARRILLO BASTOS	**APROBADO**	

Se anexan firmas electrónicas

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS

Se expide el presente documento con firma electrónica UAEM, soportada por el certificado vigente a la fecha de su elaboración y con efectos plenos de conformidad con los LINEAMIENTOS EN MATERIA DE FIRMA ELECTRÓNICA PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS PUBLICADOS en el ÓRGANÓ INFORMATIVO UNIVERSITARIO "ADOLFO MENÉNDEZ SAMARÁ" número 117 de fecha 20 de abril de 2021.

Sello electrónico

AMERICA MARIA RAMIREZ ARTEAGA | Fecha:2025-05-27 16:10:45 | FIRMANTE

T+aype9ppTyWn1m3z9MTAdxeD2dEAslnXMKqSGM4yjKd0Nyv4C6dUVG7HiWsAwa8jhTTmeXPJ+hu+o7wT2Y9fgSCJ5k3lOqbS6H6EJc7xDRkA4kbv1ODJMNE1a55Af9QwrYPv8Eje07nuVUpBjZrnuuzfByBcJFotpWSSpKMXyP2yoH+iN7NZ2pPp+Qs/f9x7M6fDaBu2qB+x7UrCW0T4FJIVp6IWxOJZdWSU+fyEFvRk6AEGGz3hSGv43NDpxIrUy2ywrvZRnOLJOVy1SW82uAGWEXncPylxfQJ8dClRuviu2bwT4Xao9zLu+2LtgCBQu2VMDT/v6z6pDj4RMIWDA==

Puede verificar la autenticidad del documento en la siguiente dirección electrónica o escaneando el código QR ingresando la siguiente clave:

TcV810Zya

https://efirma.uaem.mx/noRepudio/dvJl0u0hu7pVTTbMvNJoY9tbabL9nKgn

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS

Se expide el presente documento con firma electrónica UAEM, soportada por el certificado vigente a la fecha de su elaboración y con efectos plenos de conformidad con los LINEAMIENTOS EN MATERIA DE FIRMA ELECTRÓNICA PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS PUBLICADOS en el ÓRGANÓ INFORMATIVO UNIVERSITARIO "ADOLFO MENÉNDEZ SAMARÁ" número 117 de fecha 20 de abril de 2021.

Sello electrónico

MARIANA ROMERO AGUILAR | Fecha:2025-05-29 14:34:13 | FIRMANTE

ao/JqOMftQwHVTHU7DZn9621hH7fP0L8aNz/WnpinK4XnNtvqj1tv8mEleIJP2jhoGy1NcEtL6Om/99Llu2/5Es9e19LAV9XZyz4W+EalGQqmHkfRXKg4sD8hh1iLEdLTTnUhpoLztyhzhssgH4aGD3YvL+xjY3xCJAo+5U/lG023REnh+XlvYU/U3JQxblCFptMTYMw72164ZKpSwRvPbAZzw4mtEZic0Mzpj2H+EDOp3ENRWrGeHvAhROirBoMYjE10BTOyeN052jDM5KNMhcyD6PBB90Ac7kR+krB4EmD7c2tctme3kSKcO++ryx36h5wfop8LbHYzq6BYbeniQ==

MARIA DEL CARMEN TORRES SALAZAR | Fecha:2025-05-29 15:11:28 | FIRMANTE

nMwjmpCLOdQhATw8asEnyesKxC8KtgAEPpYdTi5L5rjhEnpqI2c+q5zF2mMNtJpP1Tk9TTZjGZlWXNlh+bfhbpzXXj0UKG8ec82xLaT/o+4uj9XkZiR44cGHaehS13G1adFPVm//Up/xa7zcGHS8OPg/q5s4HyCVZ3qjcOVUcFAafp3OyWB8wu/wQIy9C0tTvM+6LYFVkCpDmDSDIOMkzmCV3k6MNpX6K62uDp6Vh0mMZSpkB6HPkQjIuzuIA0M1DC52sQNqgoJZGGZEH439vqIzUr5it795U5K4OqJlmmc5Gs+dORO6kzkvPj9iaagDAqeByJm//j8a/rUrdMxOTg==

ZAKARYAA ZARHRI | Fecha:2025-05-29 16:34:01 | FIRMANTE

Gu7SmhSIv1iHLoF9lgF9gwXv8/2gCPe5xoq8y+T0w4n6vjlrirDBhaEIpMcwN5zAgWAL/edsgBg3cxc/+cgfGcGPywER3C5tsItjEqLJgnB0GxmqMHuRrRl9FQ7w5WG/z0cL/jQ95mVAXOjNyZzd8G1KZYNZgWnMWfqYhUMeqPo3RwNiPwducvGoUolbBqpylpQLf+QiHJZq2bGNHo4SmtrxLO8gg2lAV/+Ts/4isI1XFJMPGhlFnEpTUIUAjJA5HL/tZWIIwjkOxmQ91YVIJxSetgLUs83KNlDhH5Qo8Hzp94DKUA/rr02ZJr92C5EwqfE1mycKNwTfxVNkZjNlTg==

ALICIA CARRILLO BASTOS | Fecha:2025-05-29 16:48:14 | FIRMANTE

jB9lXKLVJRCrB93ScQpBQAdgbEB336ly28BwCHVsX/+V0+mqmMISJZkEKCyc1UUydS7p2QnYiy5svfwwiQ6qHo4ZRY/Ao8eNBDaDwPBhqqSWJzKbUc07m0wCvQchSnXQu1RiIFdCGoD+1ApO5dn0gWsjM0JCf7ZwVI9bNYqInWQcIazu2+2l3fk/CdBH9Ox3BksgduINU7RlDfjiqpGSmW+tLKMBHyCdud+zbJZtWhkSWAXh/+v5tALAUZfNnIxXlhQPldIBwI7qCtuyT26ydhCE09lKsdbIQpHzYbeTv+0c8kW/zu1C2LpjEsySvjdnr/wmt3Iv49YQgi1oNdFm2g==

RUBEN OSWALDO ARGUELLO VELASCO | Fecha:2025-05-29 17:10:47 | FIRMANTE

AX91pSWeJwwGJi7hmhhM/M76MipKrqZvVs8t4xPM9pBXzk88FPvu00ufYd7QoxIvdaOH3HOoc65YuBXxkaFLpKiiCFWhbg8QRRcqgpmKwEtaM9xbcisU7fLPyc9r2w6NKQBdftQIi7JSPxYoDYpIm/PjVnt32UeuFIilBDMBwj887bT89SeP4MPjI8l8SNl5lW+Mgo8LJ8/MNfNWG9CmT6HavmbtwbwHgnOxUf5F8XUggAU/jCiIdSdYMEUkVa1bdboHl6s/nplKA3uAXgdYFjj3bPLvPVrRMUtWZ44trtdGtgVJfYcUdS0e+N4eXwSkUoW5WqYkk/RGCeP7RFF7Iw==

Puede verificar la autenticidad del documento en la siguiente dirección electrónica o escaneando el código QR ingresando la siguiente clave:

iUGmSqd0f

https://efirma.uaem.mx/noRepudio/cY0MttQgQ3oYWOf1ZoJgmUmfXHqPuA6j