



*Implementación de pronósticos meteorológicos a partir de Modelos Arima y
Redes Neuronales en la provincia de Chimborazo*

*Implementation of meteorological forecasts from Arima Models and Neural
Networks in the province of Chimborazo*

*Implementação de previsões meteorológicas de modelos Arima e redes neurais na
província de Chimborazo*

Lilián Verónica Mata-Criollo ^I
livemc11@hotmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-4638-6119>

Jessica Alexandra Marcatoma-Tixi ^{II}
jessica.marcatoma@unach.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0001-9531-3234>

Héctor Salomón Mullo-Guaminga ^{III}
hmullo@epoch.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0001-8448-4652>

Ximena Alexandra Quintana-López ^{IV}
ximena.quintana@unach.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0002-0177-1144>

Correspondencia: livemc11@hotmail.com

Ciencias Técnicas y Aplicadas
Artículo de Investigación

***Recibido:** 23 de septiembre de 2022 ***Aceptado:** 18 de octubre de 2022 ***Publicado:** 22 de noviembre de 2022

- I. Ingeniera en Gerencia de Sistemas, Ministerio de Educación, Universidad Nacional de Chimborazo; Riobamba, Ecuador.
- II. Máster en Estadística Aplicada, Universidad Nacional de Chimborazo, Riobamba, Ecuador.
- III. Doctor en Estadística Matemática y Aplicada, Universidad Nacional de Chimborazo, Riobamba, Ecuador.
- IV. Dottore di Ricerca in Information and Communication Engineering For Pervasive Intelligent Environments, Universidad Nacional de Chimborazo, Riobamba, Ecuador.

Resumen

Debido a la alta productividad y competencia económica del país, la agricultura es muy importante en la provincia de Chimborazo. Como uno de los sectores agrícolas más productivos, necesita tecnologías que ayuden a mejorar continuamente los procesos. Los cambios climáticos adversos pueden afectar la productividad, por lo que es importante comprender estos posibles cambios en las variables climáticas, como la temperatura, la humedad y la presión atmosférica. El objetivo fue obtener un modelo de pronósticos idóneo que pudiera predecir los cambios climáticos para el correcto desarrollo de la producción agrícola en zonas rurales. Los pronósticos se realizaron utilizando la base de datos de las estaciones meteorológicas monitoreadas por el GEAA. Se obtuvieron tres pronósticos, uno usando un modelo ARIMA, uno usando una red neuronal de Jordan y uno usando una red neuronal de Elman y estos se compararon con los valores reales. Los resultados muestran que los valores significativos de certeza fueron más evidentes en las redes neuronales especialmente la de Elman.

Palabras clave: Pronóstico; Clima; Temperatura, Humedad; Presión Atmosférica.

Abstract

Due to the high productivity and economic competition of the country, agriculture is very important in the province of Chimborazo. As one of the most productive agricultural sectors, you need technologies that help to continuously improve processes. Adverse weather changes can affect productivity, so it is important to understand these possible changes in weather variables such as temperature, humidity, and atmospheric pressure. The objective was to obtain a suitable forecast model that could predict climate changes for the correct development of agricultural production in rural areas. The forecasts were made using the database of the meteorological stations monitored by the GEAA. Three forecasts, one using an ARIMA model, one using a Jordan neural network, and one using an Elman neural network, were obtained and compared with the actual values. The results show that the significant values of certainty were more evident in the neural networks, especially the Elman one.

Keywords: Forecast; Climate; Temperature, Humidity; Atmospheric pressure.

Resumo

Devido à alta produtividade e competição econômica do país, a agricultura é muito importante na província de Chimborazo. Como um dos setores agrícolas mais produtivos, você precisa de tecnologias que ajudem a melhorar continuamente os processos. Mudanças climáticas adversas podem afetar a produtividade, por isso é importante entender essas possíveis mudanças nas variáveis climáticas, como temperatura, umidade e pressão atmosférica. O objetivo era obter um modelo de previsão adequado que pudesse prever as mudanças climáticas para o correto desenvolvimento da produção agrícola nas áreas rurais. As previsões foram feitas usando o banco de dados das estações meteorológicas monitoradas pelo GEAA. Três previsões, uma usando um modelo ARIMA, uma usando uma rede neural de Jordan e uma usando uma rede neural de Elman, foram obtidas e comparadas com os valores reais. Os resultados mostram que os valores significativos de certeza foram mais evidentes nas redes neurais, principalmente na de Elman.

Palavras-chave: Previsão; Clima; Temperatura, Umidade; Pressão atmosférica.

Introducción

Desde épocas remotas, la humanidad, se encuentra interesada en conocer los cambios constantes de las condiciones climáticas, sobre todo los relacionados con fenómenos atmosféricos como lluvias, sequías, calor y frío, los cuales influyen directamente en actividades como la caza y la siembra de cultivos (Cáceres León, 2017) los resultados de las acciones descritas coadyuban al desarrollo de los colectivos en su mayoría rurales a satisfacer necesidades alimentarias y económicas; sin embargo en los últimos años se observa un deterioro constante de la agricultura debido a los cambios intempestivos del clima, la producción en las zonas rurales ha decrecido significativamente a consecuencia de las grandes pérdidas de los productores, con ello la economía sufre una afectación fuerte que desencadena uno de los fenómenos sociales más grandes del mundo como es la migración.

A nivel mundial, países como Estados Unidos, Canadá y Gran Bretaña utilizan sistemas de monitoreo de alerta temprana para actividades que van desde la prevención de desastres naturales hasta la determinación del comportamiento financiero y económico en la bolsa mercantil; allí, las estaciones meteorológicas son muy importantes porque su infraestructura está diseñada para captar datos referentes a la velocidad, dirección de viento, radiación solar, horas de frío,

precipitación, humedad relativa, evapotranspiración, presión atmosférica, entre otros, la información consolidada permite generar modelos predictivos que ayudan a los grupos de agricultores a comprender la fenología de los cultivos, las plagas y enfermedades que amenazan el buen ciclo de vida del mismo, los cultivadores cuentan con herramientas cuantitativas y cualitativas para "decidir" el tiempo de siembra y cosecha (Sepúlveda Casadiego, 2020); si bien es cierto estas actividades en gobiernos que no han dado la importancia necesaria a los cambios climáticos pueden resultar un desgaste de presupuesto gubernamental porque consideran un gasto innecesario que puede ser monitoreado con un criterio empírico, pero países como Argentina conscientes de su importancia apoyan investigaciones ligadas con el cambio climático y la urgente necesidad de aumentar la producción de alimentos debido al aumento de la población mundial, es así como los administradores de esta nación diseñaron un prototipo de sistema que permite a los cultivos utilizar la tecnología disponible de redes de sensores remotos con el menor consumo energético y la capacidad de operar en condiciones adversas, las variables ambientales meteorológicas y fisiológicas son monitoreadas y analizadas para tomar decisiones que mejoren la productividad de los cultivos (Odiard, 2020); en Cuba un estudio analiza los principales fenómenos meteorológicos peligrosos susceptibles que afectan las provincias de La Habana, Artemisa y Mayabe tras localizar extremos de precipitación, viento y temperatura; con base en los hallazgos los protocolos de operación de alarmas están diseñados para predecir tormentas locales severas, vientos fuertes, inundaciones costeras, ciclones tropicales, fuertes lluvias, niebla y temperaturas extremas con la finalidad de salvaguardar la vida humana y vegetal (Hernández Capote, González Ramírez, & González Jardines, 2021).

Así como existen países que han invertido en estos temas, se cuenta también con la otra cara de la moneda, Perú un país azotado por sequías sufre pérdidas de cosechas, muertes de ganado, plagas y enfermedades; problemas que afectan a los pequeños productores agrícolas y a los habitantes urbanos, por el desconocimiento de futuras sequías y efectos del cambio climático (Avenidaño Chagua, 2021); Chile por su parte, es muy sensible a las heladas lo que genera pérdidas a los productores de cultivos de papa, cifras elevadas de dinero se perdieron hasta que un estudio planteó la implementación de sistemas de monitoreo y alerta temprana de heladas con dos componentes principales, el primero destinado al análisis de datos de las estaciones meteorológicas automáticas cuya función principal es pronosticar temperaturas mínimas en la región, el segundo sistema es una herramienta de apoyo que permite al agricultor recibir

información oportuna y tomar decisiones de control para mitigar los daños ocasionados por la ocurrencia de heladas, los resultados podrían difundirse a través de mensajes de texto (SMS) de teléfonos móviles y correo electrónico (Bravo H, Guzman M, & Travisani R, 2021).

En el Ecuador las condiciones climáticas impactan los sistemas naturales y sociales, los cambios repentinos, se han convertido en un problema para los gobiernos en el sector privado y la sociedad civil, un estudio durante los últimos 30 años sobre la adaptación de los sistemas naturales y humanos a los fenómenos climáticos donde las metodologías y técnicas para la percepción de cambio de las variables climáticas, enfoques y estrategias arrojaron que Ecuador durante el período 2011-2021 no se adaptó a los cambios en especial la región Sierra, los principales hallazgos evidencian que los ecuatorianos perciben aumento, disminución y comportamiento modificado en los patrones naturales en las variables meteorológicas de precipitación, temperatura, y vientos, para reducir los impactos sobre los sistemas naturales la población ecuatoriana ejecuta estrategias de adaptación en territorio bajo diferentes enfoques, principalmente en comunidades humanas y ecosistemas (Jimenez , 2022); en el cantón San Pedro de Huaca existe una finca experimental con una estación meteorológica que recolecta datos relacionados con el clima, como la precipitación pluvial, donde se realiza un análisis mínimo de datos históricos, utilizados en series temporales lo cual sirve de ayuda a diversos agricultores con el afán de evitar pérdidas de los cultivos (Montenegro Argoti , 2021).

En el contexto local, la Dirección Agropecuaria del Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca (MAGAP) de la provincia de Chimborazo encargados de monitorear 142.360 hectáreas de cultivos y pastos presentaron acciones a corto plazo para mitigar los daños causados por heladas y sequías a pastos, papas y maíz dentro de los cantones más grandes de la provincia Riobamba, Guano y Colta (Ministerio de Agricultura y Ganadería Ecuador, 2018). Sin embargo, la necesidad urgente de encontrar nuevas estrategias que permitan predecir las condiciones climáticas que se ajusten a los patrones diferenciados, apoyan a estudios de predicción meteorológica que disminuyan el riesgo de pérdida en las siembras de cultivos y en etapas de cosecha (Bustamante Calderón, 2017).

Con tales antecedentes el estudio tiene como propósito implementar modelos de pronósticos meteorológicos en la provincia de Chimborazo mediante la elección de una metodología acertada luego de comparar los resultados arrojados por los modelos autorregresivos de promedios

móviles ARIMA y las redes neuronales, los resultados permitirán a los organismos de turno y a los agricultores tomar decisiones estratégicas para la producción de diferentes cultivos.

Materiales y métodos

Tipo de Investigación

La investigación según el tipo de variable fue cuantitativa, debido a la manipulación de características como temperatura ($^{\circ}\text{C}$), humedad (g/m^3) y presión atmosférica (hPa); según la profundidad en el objeto de estudio fue descriptivo en base a la caracterización y modelamiento de las variables climáticas; con relación al diseño, se cataloga como un estudio no experimental, puesto que no existió manipulación de información y los datos se mantuvieron en su contexto natural; y en función al tiempo se consideró transversal, el período de estudio estuvo comprendido entre el año 2014-2022.

Población y muestra

Población

El colectivo de estudio fue representado por 295780 puntos correspondiente a cada hora datos recolectados en los distintos ordenadores de las estaciones meteorológicas monitoreadas por el Grupo de Energías Alternativas de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Muestra

La investigación no calculó una muestra ya que se respetó el método de muestreo utilizado por el Grupo de Energías Alternativas y Ambiente de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo quienes mencionaron que el extracto de información analizado responde a un muestreo no probabilístico, de reportes provenientes de las estaciones meteorológicas de Alao, Tunshi, Matus y Multitud durante el período 2014-2022.

VARIABLES DE ESTUDIO

La investigación utilizó como variables ambientales a la temperatura cuya definición corresponde a la magnitud física que indica la energía interna del medio ambiente en general, medida en grados centígrados ($^{\circ}\text{C}$); la humedad indica la cantidad de vapor de agua presente en el aire, medida en gramo por cada metro cúbico (g/m^3) y la presión atmosférica cuya definición dice que

es la fuerza que ejerce la columna de aire de la atmósfera sobre la superficie terrestre en un punto determinado, su unidad de medida es Hectopascales (hPa).

Técnicas e instrumentos de investigación

La técnica utilizada fue la observación de los reportes emitidos por el GEAA emitidos desde el 2014 al 2022 y el instrumento de recolección fue la Bitácora sintetizada en una hoja de cálculo por cada una de las estaciones meteorológicas asociadas al GEAA.

Modelo estadístico

En la fase inicial de análisis se aplicó un análisis exploratorio de datos que incluyó medidas de tendencia central, dispersión y gráficos con la finalidad de analizar la concentración y dispersión de los valores, seguido se utilizaron técnicas estadísticas para el cálculo de pronósticos como: Modelos ARIMA y Redes Neuronales, posterior a ello se utilizó el indicador de sensibilidad U de Theil para seleccionar cual fue la mejor técnica de construcción de pronósticos. El software de respaldo fue R versión 4.2.1.

Resultados

Figura 1: Estación Alao

AÑO	T (°C)	H (g/m³)	Pa(hPa)
2014	11,00	78,87	708,57
2015	11,16	79,30	708,76
2016	11,49	77,84	709,14
2017	10,93	79,65	708,85
2018	10,97	78,59	708,66
2019	11,24	79,55	708,97
2020	11,07	79,64	709,10
2021	10,86	78,24	708,81
2022	10,95	69,71	708,53

Fuente: GEAA, 2022

Realizado por: Autores

El promedio de Temperatura entre los años 2014 y 2022 monitoreada por la Estación de Alao fue de 11,07 °C y fueron los años 2015, 2016 y 2019 los tiempos que la provincia de Chimborazo reportó un clima cálido por el incremento de temperatura superiores a la promedio, los restantes tuvieron temperaturas inferiores y la mínima fue en el 2021 con un valor de 10,85°C; en cuanto a la humedad promedio registrada en el mismo periodo fue de 77,93 g/m³ y fue en el año 2021 que se reportó la humedad mínima con un valor de 69,71 g/m³ mientras que en los años 2015, 2017, 2019 y 2020 tuvieron humedades superiores la máxima fue en el año 2017 con un valor de 79,65 g/m³; en el caso de la Presión Atmosférica la provincia tuvo un promedio de 708,82 hPa y fueron los años 2016, 2020 que se reportó un aumento en la presión con valores 709,14 y 709,10 respectivamente.

Figura 2: Estación Tunshi

AÑO	T (°C)	H (g/m³)	Pa(hPa)
2014	13,16	80,04	738,40
2015	13,27	80,27	738,05
2016	13,61	80,45	737,97
2017	13,04	80,49	736,38
2018	12,68	81,77	730,33
2019	12,79	81,52	731,55
2020	8,60	81,64	668,93
2021	13,17	83,49	738,02
2022	13,38	84,85	737,70

Fuente: GEAA, 2022

Realizado por: Autores

Entre los años 2014 y 2022 los datos monitoreados por la Estación Tunshi fueron Temperatura promedio de 12,63 °C y en los años restantes la provincia de Chimborazo reportó un clima cálido, mientras que en el año 2020 tuvo temperaturas inferiores y la mínima fue con un valor de 8,60°C; en cuanto a la humedad promedio registrada fue de 81,61 g/m³ en el año 2014 hubo una disminución de humedad con un valor de 80,04 g/m³ y fue en el año 2022 que se reportó humedad máxima con un valor de 84,85 g/m³; y para la Presión Atmosférica la provincia tuvo un

promedio de 728,59 hPa y fue en el año 2021 que se reportó una baja en la presión con el valor de 668,93 hPa y una máxima en el 2014 de 738.40 hPa.

Figura 3: Estación Matus

AÑO	T (°C)	H (g/m³)	Pa(hPa)
2014	11,97	93,35	742,09
2015	12,75	88,81	742,20
2016	13,00	87,32	742,49
2017	12,59	88,30	742,19
2018	12,55	88,54	742,03
2019	12,45	90,28	742,23
2020	12,76	88,31	742,46
2021	12,60	90,11	741,57
2022	12,66	90,40	738,91

Fuente: GEAA, 2022

Realizado por: Autores

El monitoreo de la Estación Matus entre los años 2014 y 2022 reportó una Temperatura promedio de 12,59 °C y en la mayoría de los años la provincia de Chimborazo reportó un clima cálido, los restantes tuvieron temperaturas inferiores y la mínima fue en el 2014 con un valor de 11,97°C y una máxima en el 2016 de 13°C; la humedad promedio registrada fue de 89,49 g/m³ y en el año 2016 se reportó una humedad mínima de 69,71 g/m³ mientras que en el resto de los años tuvieron humedades superiores la máxima fue en el año 2014 con un valor de 93,35g/m³; la provincia en cuanto a la Presión Atmosférica reportó un promedio de 741,80 hPa fue en el año 2022 que tuvo una presión mínima de 738,91 hPa y en los años restantes se reportó un aumento mínimo en la presión.

Figura 4: Estación Multitud

AÑO	T (°C)	H (g/m³)	Pa(hPa)
2014	15,04	90,85	795,82
2015	14,25	88,27	795,67

2016	15,76	90,19	796,29
2017	15,03	91,27	796,11
2018	15,17	88,45	795,99
2019	15,15	86,55	796,07
2020	15,10	93,83	796,20
2021	14,98	52,03	796,28
2022	15,02	0,00	796,27

Fuente: GEAA, 2022

Realizado por: Autores

Entre los años 2014 y 2022 los datos monitoreados de la Estación Multitud reportaron el promedio de Temperatura con una valor de 15,05°C y en los años 2015 y 2021 tuvieron temperaturas inferiores siendo la mínima en el 2015 con un valor de 14,25°C considerando que en la mayoría del tiempo la provincia de Chimborazo mantiene un clima generalmente cálido; el promedio de humedad fue de 75,72 g/m³ llegando a un valor de cero en el año 2022 y en el año 2020 se reporta una máxima humedad con un valor de 93,83 g/m³; los datos sobre Presión Atmosférica reportaron un promedio de 796,08 hPa y fueron en los años 2016, 2017, 2019, 2020, 2021, y 2022 que la presión atmosférica permaneció constante determinándose una pequeña variación, mientras que la mínima fue el año 2015 con un valor de 795,67 hPa.

Luego de ejecutar el análisis exploratorio de datos se ajustaron modelos ARIMA cuyo uso es frecuente en series temporales de características semejantes a las encontradas en las variables climatológicas de la investigación, es importante mencionar que los modelos pueden presentar dos tipos de dependencia inter temporal, la primera denominada patrón de tendencia que evalúa la relación lineal entre observaciones sucesivas y la segunda conocida como patrón estacional que analiza la relación lineal entre observaciones de intervalos consecutivos de tiempo, con la finalidad de identificar el patrón de ajuste de las variables climatológicas se construyeron gráficas de series de tiempo para las variables de Temperatura, Humedad y Presión atmosférica (ver Gráfico 1 a 3), en estos se observó que en general no existe un patrón de tendencia y tampoco es claro el patrón estacional, adicional, la variable Presión Atmosférica de la estación Tunshi no resultó ser estacionaria.

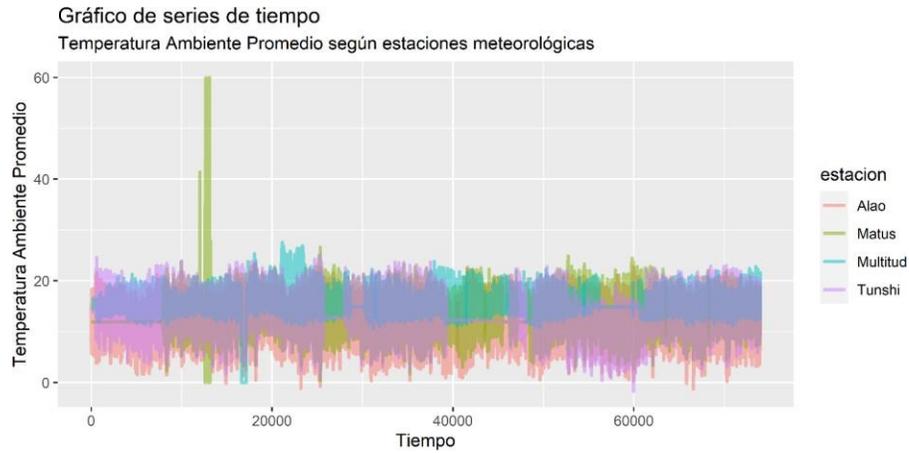


Figura 5

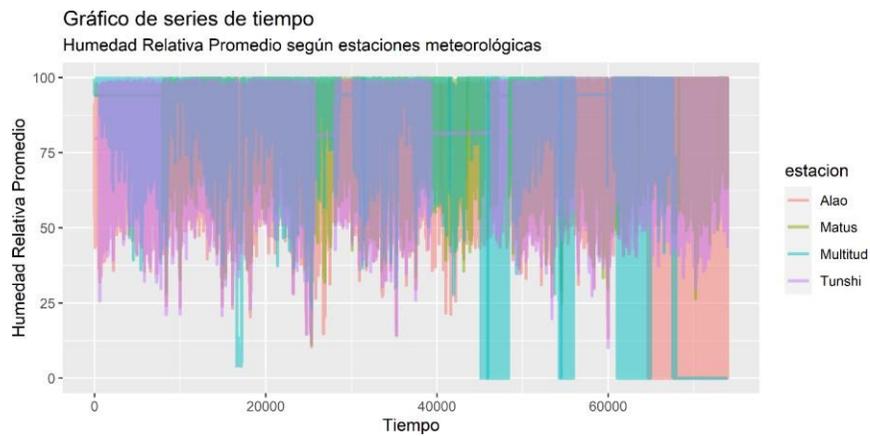


Figura 6

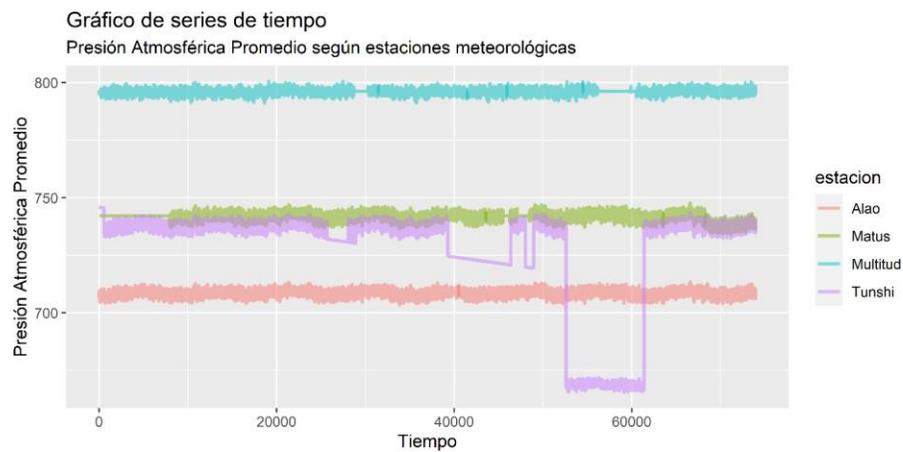


Figura 7

Lo observado en las gráficas se contrastó con pruebas de hipótesis de Dickey Fuller aplicadas en las 12 series de tiempo (Tabla 5), adicional se realizó una diferenciación para la serie de tiempo de Presión Atmosférica proveniente de la estación Tunshi y se consiguió la estacionariedad.

Figura 8: Valores de probabilidad del contraste de Dickey Fuller.

Estación	Temperatura	Humedad	Presión atmosférica
Alao	0.00	0.00	0.00
Matus	0.00	0.00	0.00
Multitud	0.00	0.00	0.00
Tunshi	0.00	0.00	0.00

Fuente: GEAA, 2022

Realizado por: Autores

Al contar con series de tiempo estacionarias, se utilizó la metodología Box Jenkins para identificar los mejores modelos ARIMA (Tabla 6), así también el indicador MAD destacó que los errores promedio de pronóstico para las variables Temperatura, Humedad y Presión Atmosférica fueron pequeñas en comparación a la longitud de cada variable, el indicador MSE por su parte evidenció que las desviaciones fueron las más pequeñas de todos los modelos, estos valores permitirán realizar una comparación con las redes neuronales.

Figura 9: Modelos ARIMA por estación y variable climatológica

Estación	Variable	Modelo	MAD	MSE
Alao	T	ARIMA(4,0,1)(2,1,0)[24]	0.62	0.73
	Hum	ARIMA(5,0,0)(2,1,0)[24]	5.19	118.13
	P.a.	ARIMA(5,0,2)(2,1,0)[24]	0.15	0.04
Matus	T	ARIMA(3,0,5)(2,1,0)[24]	0.54	1.07
	Hum	ARIMA(5,0,0)(2,1,0)[24]	2.22	13.73
	P.a.	ARIMA(5,0,1)(2,1,0)[24]	0.13	0.04
Multitud	T	ARIMA(5,0,0)(2,1,0)[24]	0.38	0.37
	Hum	ARIMA(5,1,2)(0,0,2)[24]	3.00	71.85
	P.a.	ARIMA(5,0,0)(2,1,0)[24]	0.12	0.03

	T	ARIMA(2,0,3)(2,1,0)[24]	0.48	0.54
Tunshi	Hum	ARIMA(1,0,0)(2,1,0)[24]	2.67	18.84
	P.a.	ARIMA(1,0,3)(2,1,0)[24]	0.14	0.25

Fuente: GEAA, 2022

Realizado por: Autores

En la fase de validación de los supuestos de los modelos ARIMA se evaluó el cumplimiento de estacionariedad, independencia y normalidad; los resultados se presentan en la Tabla 7. El supuesto de independencia y normalidad no se cumplió en ninguno de los modelos, sin embargo, los valores de probabilidad hallados indicaron la presencia de estacionariedad, ante los hallazgos se recomienda cuidado durante la construcción de pronósticos y se sugiere para el análisis de las series de tiempo el uso de la metodología Bootstrap ya que esta no asume supuestos sobre las series.

Figura 10: Valores de probabilidad de los supuestos en modelos ARIMA

Estación	Variable	Modelo	Estacionari	Independen	Normalida
			edad (Dickey- Fuller)	cia (Box- Ljung)	d (Jarque Bera)
Alao	T	ARIMA(4,0,1)(2,1,0)[24]	0.01	0.00	0.00
	Hum	ARIMA(5,0,0)(2,1,0)[24]	0.01	0.00	0.00
	P.a.	ARIMA(5,0,2)(2,1,0)[24]	0.01	0.00	0.00
Matus	T	ARIMA(3,0,5)(2,1,0)[24]	0.01	0.00	0.00
	Hum	ARIMA(5,0,0)(2,1,0)[24]	0.01	0.00	0.00
	P.a.	ARIMA(5,0,1)(2,1,0)[24]	0.01	0.00	0.00
Multitud	T	ARIMA(5,0,0)(2,1,0)[24]	0.01	0.00	0.00
	Hum	ARIMA(5,1,2)(0,0,2)[24]	0.01	0.00	0.00
	P.a.	ARIMA(5,0,0)(2,1,0)[24]	0.01	0.00	0.00
Tunshi	T	ARIMA(2,0,3)(2,1,0)[24]	0.01	0.00	0.00
	Hum	ARIMA(1,0,0)(2,1,0)[24]	0.01	0.00	0.00
	P.a.	ARIMA(1,0,3)(2,1,0)[24]	0.01	0.00	0.00

Fuente: GEAA, 2022

Realizado por: Autores

Seguido se presenta resultados correspondientes de las redes neuronales como alternativa al no cumplimiento de los supuestos en los modelos ARIMA. Las redes neuronales recurrentes (RNN) fueron los modelos utilizados para el estudio de las series temporales cuyo paso inicial fue la transformación de datos a través de la ecuación logística $y = (x - x_{min}) / (x_{max} - x_{min})$, en la fase siguiente se entrenó una red de Jordan y Elman con el 70% de la serie. La periodicidad de la información fue diaria (24 horas). La red de Elman trabajó con dos capas ocultas, la primera con dos neuronas y la segunda con tres neuronas, en el caso de la red de Jordan trabajó con 4 capas ocultas. El aprendizaje de las dos redes fue de 0.069 con un máximo de 5000 iteraciones, el procedimiento se replicó en las estaciones meteorológicas estudiadas con sus respectivas variables. La Tabla 8 presenta las medidas de adecuación de los pronósticos provenientes de las redes neuronales.

Figura 11: Medidas de adecuación de las redes de Jordan y Elman

Estación	Variable	Jordan		Elman	
		MAD	MSE	MAD	MSE
Alao	T	1.06	1.86	0.63	0.78
	Hum	11.05	412.72	8.59	401.63
	P.a.	0.5	0.39	0.24	0.1
Matus	T	0.69	0.83	0.65	0.83
	Hum	5.16	45.39	3.02	19.72
	P.a.	0.41	0.25	0.32	0.16
Multitud	T	0.75	0.84	0.37	0.31
	Hum	32.69	2604.33	6.03	178.6
	P.a.	0.25	0.1	0.18	0.06
Tunshi	T	0.69	0.7	0.42	0.33
	Hum	39.04	3777.7	5.53	175.18
	P.a.	0.29	0.14	0.21	0.08

Fuente: GEAA, 2022

Realizado por: Autores

Con relación al modelo de Jordan los mejores ajustes de las variables climatológicas por estación fueron:

- Temperatura (T): Tunshi
- Humedad (Hum): Matus
- Presión Atmosférica (P.a.): Multitud
- Por otro lado, en relación con Elman los mejores modelos destacados fueron
- Temperatura (T): Multitud
- Humedad (Hum): Matus
- Presión Atmosférica (P.a.): Multitud

Las gráficas 4 y 5 muestran la evolución del error de la red de acuerdo con el número de iteraciones de Jordan y Elman, en ellas se apreció que el error converge a cero rápidamente lo que permite la construcción adecuada de pronósticos. Por otra parte, las gráficas 6 y 7 de los valores reales de las series temporales y los valores pronosticados en función del tiempo representan un buen ajuste en Jordan y Elman a pesar de lo hallado la información almacenada en Tabla 4 indicó que el modelo de Elman tuvo mayor precisión que Jordan en todas las variables climatológicas.

Realizado por: Autores

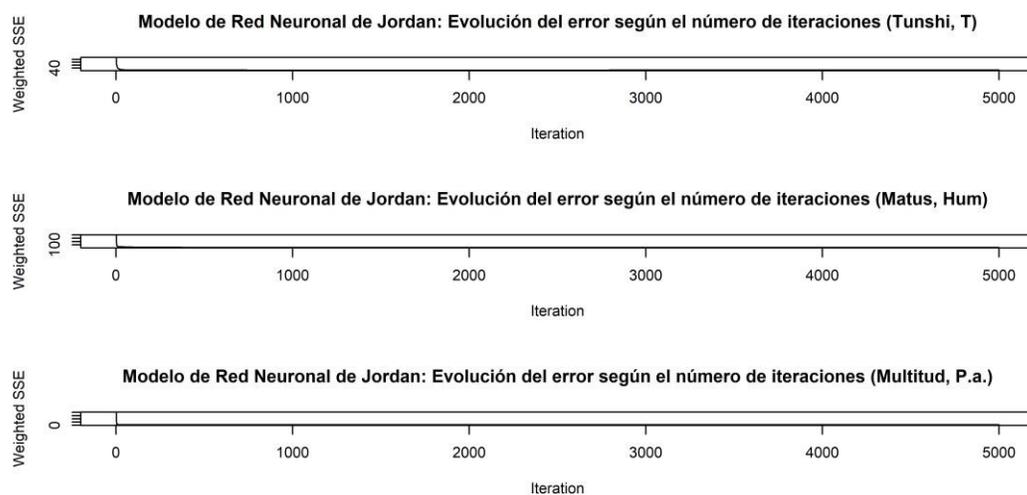


Figura 12: Modelos idóneos de la red neuronal de Jordan

Realizado por: Autores

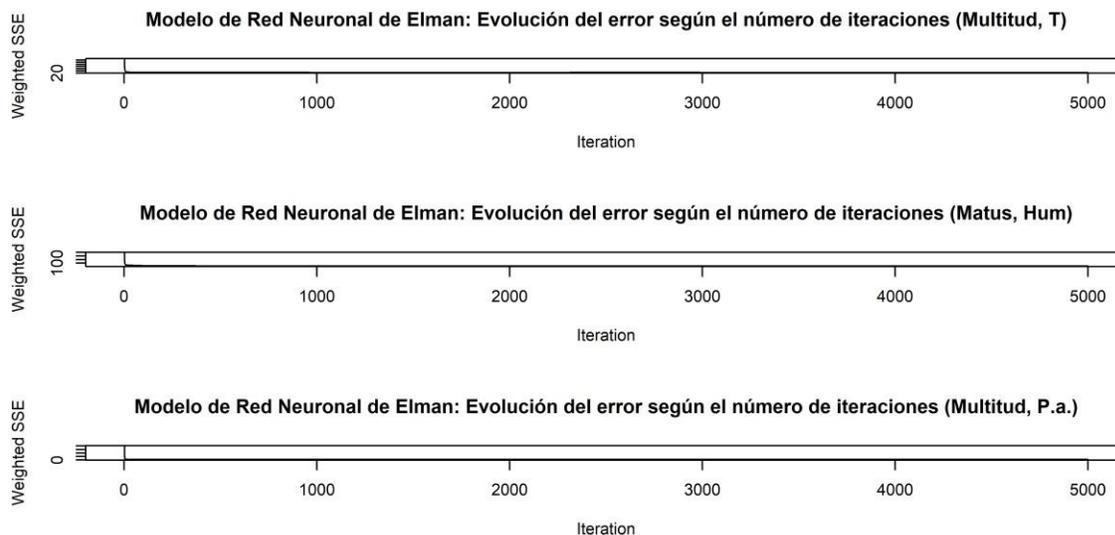


Figura 13: Modelos idóneos de la red neuronal de Elman

Se comparó los resultados de los últimos cuatro días (96 pronósticos resultantes de los modelos ARIMA y Redes Neuronales) mediante el uso del coeficiente U Theil que permite determinar la precisión del pronóstico (a medida que el valor del coeficiente se acerca a cero, la presión aumenta) se observó que los valores significativos de certeza fueron más evidentes en las redes neuronales En este sentido la Tabla 9 destacó que el método de Red Neuronal fue la técnica más precisa de pronóstico.

Figura 14: Indicador U Theil

Estación	Variable	ARIMA	Red Neuronal Elman
Alao	T	0.11	0.04
	Hum	0.40	0.04
	P.a.	0.00	0.04
Matus	T	0.07	0.05
	Hum	0.07	0.05
	P.a.	0.00	0.03
Multitud	T	0.07	0.04
	Hum	0.02	0.03
	P.a.	0.00	0.05

	T	0.07	0.04
Tunshi	Hum	0.07	0.03
	P.a.	0.01	0.04

Fuente: GEAA, 2022

Realizado por: Autores

Discusión

El detalle de resultados evidencia una consistencia con investigaciones contemporáneas cuyo primer acercamiento visibiliza un significativo grupo de datos faltantes, la investigación reportó un 7,63% de datos faltantes y apenas se superpone en 0,25% a los hallazgos reportados por (Pilco & Acurio, 2019). La caracterización de las variables climatológicas evidencia simetría en las distribuciones de las variables al igual que los reportes del análisis exploratorio desarrollado por (Serrano Vincenti, Zuleta, Moscoso, Jácome, & Palacios, 2018).

Con relación al modelo significativo para la construcción de pronósticos de variables climatológicas como la presión atmosférica, temperatura, humedad, se eligió a las redes neuronales como resultado de la aplicación del coeficiente U Theil, el hallazgo es consistente con los reportes de (Pilco & Acurio, 2019) y Capito (2021).

La posibilidad de anticiparse a los reportes de las variables climatológicas es importante gracias a la relación de estas con los planes de desarrollo de los colectivos en su mayoría agropecuarios como el caso de la provincia de Chimborazo y los analizados por (Gaitan, 2016) quien plantea para el municipio de Cundinamarca la presentación de proyectos incluyentes que abarquen el tema de variabilidad climática enfocado a los sectores económico social y político, a la par este tipo de propuestas contribuyen a la identificación de las causas de variabilidad climática con la posibilidad de anticiparse a un plan de manejo de posibles fenómenos naturales.

Por otro lado, entre las limitaciones de la investigación se destaca la imposibilidad de detección de valores faltantes, es decir, contar con una idea clara del motivo de los datos ausentes por lo que se sugiere un estudio profundo de las causas en cada una de las estaciones meteorológicas dirigidas por el Grupo de Energía Alternativa y Ambiente.

Conclusiones

La creación de modelos de alta fidelidad se considera importante porque los cambios climáticos extremos pueden originar problemas en la producción agrícola y causar daños permanentes en condiciones extremas. Se consideraron las variables temperatura, la humedad y presión atmosférica, de los datos analizados para el período 2014-2022 y obtenidos a partir de cada una de las estaciones meteorológica asociadas al GEAA, se analizaron las series temporales y su posible correlación con el rendimiento en la agricultura; de los resultados obtenidos en el trabajo, se puede observar que las variables climáticas en general tienen una tendencia creciente en la provincia de Chimborazo, los mejores ajustes de las variables climatológicas por estación fueron pronosticados por el modelo de Elman porque tuvo mayor precisión que Jordan en todas las variables climatológicas, el error cuadrático medio indica que el modelo ARIMA por su parte evidenció que las desviaciones fueron las más pequeñas de todos los modelos.

Referencias

1. Avendaño Chagua, V. H. (2021). Pronóstico de sequías meteorológicas en función de los elementos climáticos utilizando el modelo Arima en la cuenca del río Ramis. Tesis. Puno, Perú: Universidad Nacional del Altiplano de Puno.
2. Bravo H, R., Guzman M, M., & Travisani R, M. (Mayo de 2021). Herramientas para el monitoreo de heladas en la Región de Magallanes. Informativo. Chile: Instituto de Investigaciones Agropecuarias.
3. Bustamante Calderón, D. (2017). Escenario de cambio climático a nivel de subcuencas hidrográficas para el año 2050 de la provincia de Chimborazo-Ecuador. La Granja:Revista de Ciencias de la Vida, 13.
4. Cáceres León, R. H. (2017). Meteorología aplicada a la seguridad de las operaciones aéreas (Vol. 12). Bogotá, Colombia: Ciencia y Poder Aéreo.
5. Gaitan, Y. (2016). Análisis de las variables climatológicas temperatura, humedad relativa, precipitación, evaporación, brillo solar, radiación, velocidad y dirección del viento, medidas por la estación meteorológica “Argelia” entre los años 1993 – 2013 para verificar la var. Universidad de Cundinamarca, 65-70.

6. Hernández Capote, J. F., González Ramírez, C. M., & González Jardines, P. (2021). Protocolo de alerta de fenómenos meteorológicos peligrosos que afectan la agricultura en las provincias de La Habana, Artemisa y Mayabeque. *Revista Cubana de Meteorología*, 1, 1.
7. Jimenez , T. A. (2022). Adaptación de sistemas naturales y sociales al cambio climático en el Ecuador: una revisión. *latindex*, 18.
8. Ministerio de Agricultura y Ganadería Ecuador. (Mayo de 2018). Ministerio de Agricultura y Ganadería. Obtenido de Ministerio de Agricultura y Ganadería: <https://www.agricultura.gob.ec/chimborazo-silos-semillas-seguros-recibiran-agricultores-afectados-por-sequia-y-heladas/>
9. Montenegro Argoti , C. F. (2021). Minería de datos para series temporales y su aplicación en las precipitaciones pluviales en la Finca Experimental San Francisco de Huaca. Tesis. Tulcan, Ecuador: Universidad Politécnica Estatal del Carchi.
10. Odiard, C. A. (2020). Sistema de información de apoyo a las decisiones en la agricultura de precisión basado en redes de sensores remotos y herramientas de sistemas de información geográfica (SIG). Tesis. Mendoza, Argentina: Universidad Siglo 21.
11. Pilco, V., & Acurio, W. (2019). Técnicas estadísticas para la modelación y predicción de la temperatura y velocidad de viento en la provincia de Chimborazo. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.
12. Sepúlveda Casadiego, Y. A. (2020). Importancia de las estaciones meteorológicas para la toma de decisiones en la agricultura. *Universidad Nacional Abierta y a Distancia*, 13. doi:10.13140/RG.2.2.33323.46886
13. Serrano Vincenti, S., Zuleta, D., Moscoso, V., Jácome, P., & Palacios. (2018). Análisis estadístico de datos metereológicos mensuales y diarios para la determinación de variabilidad climática y cambio climático en el distrito metropolitano de Quito. *Revista Ciencias de la vida*.
14. Wright, J. (2014). Correlación entre algunos parámetros climáticos y la hora del día en Heredia, Costa Rica. *Uniciencia*.

© 2022 por los autores. Este artículo es de acceso abierto y distribuido según los términos y condiciones de la licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).