

Ciencia Latina
Internacional

Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, Ciudad de México, México.
ISSN 2707-2207 / ISSN 2707-2215 (en línea), enero-febrero 2024,
Volumen 8, Número 1.

https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v8i1

**RELLENO DE SERIES ANUALES DATOS
METEOROLOGICOS FALTANTES
EMPLEANDO EL ARREGLO DE
DIFERENCIAS FINITAS**

FILLING ANNUAL SERIES WITH MISSING
METEOROLOGICAL DATA USING THE FINITE
DIFFERENCE ARRANGEMENT

Víctor Rogelio Tirado Picado
Universidad Americana Managua, Nicaragua

DOI: https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v8i1.9544

Relleno de Series Anuales Datos Meteorológicos Faltantes Empleando el Arreglo de Diferencias Finitas

Victor Rogelio Tirado Picado¹victornica2001@yahoo.comvictor.tirado@uamv.edu.ni<https://orcid.org/0000-0002-7907-0006>

Dirección de Investigación y Exensión Universitaria
Universidad Americana (UAM)
Managua, Nicaragua

RESUMEN

El objetivo de la presente investigación, está basado en el uso de las diferencias finitas, como un modelo de arreglo de diferencias finitas pueden ser utilizados como modelo de estimación de factores climáticos en Nicaragua, en este caso, se usó la precipitación de la estación aeropuerto, estudiando el periodo 1958-2010, como única estación, para ello se analizó la teoría referida en el tema de diferencias finitas, posterior se diseño un algoritmo de matriz con arreglo de diferencia finitas, planteándose de esta manera una nueva metodología y herramienta útil para la estimación de los datos faltantes. El algoritmo desarrollado, dio como resultado una ecuación igual a $Y = 0.4198 * X + 42.774$ y correlación $R^2 = 0.7392$, se definieron criterios para la evaluación de la ecuación deducida. En este contexto la metodología se validó utilizando la estadística descriptiva de medidas de variabilidad, queda entonces seguir validando el modelo con otros factores de otras estaciones.

Palabras clave: diferencias finitas, estimación, modelos, datos faltantes, factores climáticos

¹ Autor principal.

Correspondencia: victornica2001@yahoo.com

Filling Annual Series With Missing Meteorological Data Using the Finite Difference Arrangement

ABSTRACT

The objective of this research is based on the use of finite differences, as a finite difference arrangement model that can be used as an estimation model of climatic factors in Nicaragua. In this case, the precipitation from the airport station was used. , studying the period 1958-2010, as the only season, for this the theory referred to in the topic of finite differences was analyzed, subsequently a matrix algorithm was designed with a finite difference arrangement, thus proposing a new methodology and useful tool for estimating missing data. The developed algorithm resulted in an equation equal to $Y=0.4198*X+42.774$ and correlation $R^2= 0.7392$. Criteria were defined for the evaluation of the derived equation. In this context, the methodology was validated using descriptive statistics of variability measurements; it is then necessary to continue validating the model with other factors from other stations.

Keywords: finite differences, estimation, models, missing data, climatic factors

*Artículo recibido 20 diciembre 2023
Aceptado para publicación: 26 enero 2024*

INTRODUCCIÓN

En Nicaragua, el Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales (INETER), específicamente la dirección de meteorología desde la década de los 80's, es la encargada responsable de operar y explorar la Red Nacional de Estaciones Meteorológicas, de acuerdo con (INETER, 2023), realiza la vigilancia meteorológica nacional, elabora y difunde de manera oficial el pronóstico del tiempo, las notas informativas, avisos y alertas. La dirección de meteorología según (INETER, 2023), también contribuye con la reducción del impacto de los fenómenos meteorológicos peligrosos que producen desastres, además que garantiza el servicio de información a la navegación aérea y marítima nacional e internacional, generando información meteorológica básica y elaborada para diferentes usuarios de la vida nacional e internacional.

En segundo lugar, recuperado de (OMM, 2023) describe que la Organización Meteorológica Mundial (OMM) es el portavoz autorizado del sistema de las Naciones Unidas en todo lo concerniente al estado y el comportamiento de la atmósfera terrestre, su interacción con la tierra y los océanos, el tiempo y el clima que genera, y la consiguiente distribución de los recursos hídricos. Para la (OMM, 2023) la estimación de datos faltantes dentro de una serie temporal de valores existe procedimientos estadísticos que permiten considerar propiedades físicas de una estación, lo que permite la obtención de valores realistas y coherentes con los fundamentos físicos de la misma (OMM, 2023).

Existen métodos estadísticos que fundamentan el relleno de series anuales de datos meteorológicos, por ejemplo el que describe (Carrera-Villacrés, y otros, 2016) de la regresión-correlación, o como lo describen en sus escritos (Monsalve Saenz, 1999) y (Aparicio Mijares, 1992) el de la razón normal, que permite calcular los valores faltantes con el uso de ecuaciones matemáticas en función de datos promedios de dos estaciones de referencia. Otros métodos descritos por (Alfaro & Soley, 2008) son la técnica multivariada de componentes principales recuperado de (Tabony, 1983), y la utilidad en las situaciones, son técnicas estadísticas-matemáticas para el relleno de datos.

Bajo ese contexto, el objetivo principal de la presente investigación, es desarrollar un modelo para el relleno de series anuales de datos meteorológicos faltantes empleando el arreglo de diferencias finitas, para ello se pretende analizar los diversos postulados relacionados al tema de diferencias finitas, posteriormente a partir de la teoría, es diseñar un algoritmo de matriz con arreglo de diferencias finitas

utilizando la base de datos de precipitación de la estación aeropuerto de Managua, Nicaragua para la estimación de datos faltantes, finalmente, plantear una nueva metodología y herramienta que sea útil para la estimación de datos faltantes.

METODOLOGÍA

El presente trabajo de investigación fue diseñado bajo el planteamiento del enfoque cuantitativo, puesto que este es el mejor que se adapta a las características y necesidades de la investigación.

El enfoque cuantitativo utilizó recolección y el análisis de datos para contestar pregunta de investigación y contestar la pregunta general establecida previamente, y se traduce en

“lo secuencial y probatorio. Cada etapa precede a la siguiente y no podemos “brincar” o eludir pasos.

El orden es riguroso, aunque desde luego, podemos redefinir alguna fase. Parte de una idea que va acotándose y, una vez delimitada, se derivan objetos y preguntas de investigación, se revisa la literatura y se construye un marco o una perspectiva teórica. De las preguntas se establecen hipótesis y determinan variables; se traza un plan para probarlas (diseño); se miden las variables en un determinado contexto; se analizan las mediciones obtenidas utilizando métodos estadísticos, y se extrae unas series de conclusiones respecto de la o las hipótesis”. (Hernández Sampieri, Fernández-Collado, & Baptista Lucio, 2006), (pág. 4-5).

Del enfoque cuantitativo se tomó la técnica de fundamental de la predicción, se llevó a cabo mediante la utilización de procedimientos estandarizados y aceptados por la comunidad científica en los modelos predictivos y prospectivo, utilizando series de datos históricos de los factores hidrometeorológicos, para el relleno de una serie anual usando las diferencias finitas diseñando un algoritmo en un periodo de diez años.

Tiempo de ejecución

Para el desarrollo de la investigación, se contó con dos semanas en la búsqueda de la base de datos, tres semanas para desarrollar el modelo, y dos semanas para la redacción del informe final, en el periodo de octubre a diciembre del 2023.

Técnicas y métodos de recolección de datos

Las técnicas y métodos de recolección de datos son las establecidas para el análisis de la base de datos histórica y el desarrollo del algoritmo de diferencia finitas.

Fuentes Primarias

Base de datos de factores hidrometeorológicas, obtenidas de INETER.

Artículos científicos relevante al tema

Bibliografía.

Fuentes Secundarias

Sitio web.

Bibliotecas especializadas de INETER, CIRA, ANA

Universo

Los factores hidrometeorológicos registrados por el Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales, y que están en el espacio geográfico de Nicaragua.

Población

Base de datos de precipitación de la estación aeropuerto, ubicado en Managua.

Muestra

Los datos considerados de precipitación en el periodo 1958-2010.

Criterio de inclusión

Se analizan los datos de precipitación en el periodo 1958-2010 de la estación hidrometeorológica aeropuerto de Managua, Nicaragua.

Criterio de exclusión

Todos aquellos datos que no corresponden a la precipitación y no estén comprendido en el periodo 1958-2010, y que también no corresponden a la estación hidrometeorológica aeropuerto de Managua, Nicaragua

Aspectos teóricos

El factor hidrometeorológico a estudiar en este trabajo de investigación, es la precipitación. La precipitación porque es una variable inestable que depende de muchos factores ya que se puede observar cómo indicadores en la variabilidad climática.

En tal sentido y de acuerdo con (Pabón Caicedo, Eslava Ramírez, & Gómez Torres, 2001), acierta en que el clima es considerado, en primera aproximación, como las condiciones atmosféricas predominantes en un lugar determinado. Por tal razón (Pabón Caicedo, Eslava Ramírez, & Gómez Torres, 2001) para la descripción del clima se han venido utilizando las estadísticas de las variables meteorológicas. La distribución espacial y temporal de estas estadísticas permite identificar patrones de comportamiento del clima en una región. El conocimiento sobre estos patrones tiene diferentes aplicaciones.

Un segundo aspecto, (Carrera-Villacrés, y otros, 2016), manifiesta que la mejor metodología para el relleno de datos en series temporales para la región andina y costera del Ecuador, estudiada por (Carrera-Villacrés, y otros, 2016), es el método de regresión lineal simple, ya que es debido a la gran cantidad de datos faltantes que provee el INAMHI. (Carrera-Villacrés, y otros, 2016) relata también que para el cálculo de las precipitaciones medias de los sistemas hidrográficos analizados se determinó que mejor método fue el de la Isoyetas.

En concordancia a esto, (Alfaro & Soley, 2008), manifiesta que ambos métodos, la técnica multivariada de componentes principales y la utilidad en las situaciones, son herramientas validadas y que pueden ser de utilidad tanto en las labores de investigadores y docentes en el campo de la climatología, así como para el trabajo operativo del personal de los servicios meteorológicos e hidrológicos.

Siguiendo la fundamentación teórica, en un tercer aspecto, se tiene la evaluación de modelos empíricos, matemáticos y redes neuronales para estimar datos faltantes en estaciones meteorológicas en México, desarrollado por (Gamboa Chel, 2015), concluye que los mejores modelos de estimación de datos faltantes es la Transformada de Wavelet, como segundo modelo es el del servicio climático de los Estados Unidos que considera cinco estaciones cercanas, y finalmente el tercer mejor modelo es el de las Redes Neuronales Artificiales, ya que fueron los modelos que en su mayoría tuvieron una buena estimación de los datos faltantes.

Otro modelo para estimar los datos faltantes de una serie de datos, se menciona el modelo estocástico para completar series hidrológicas y meteorológicas de la provincia de Chimborazo del 2000 al 2011, desarrollado por (Patiño & García Cabay, 2014), concluyo que el modelo matemático estocástico Markoviano de orden I empleado en su propia investigación, deja al criterio del ingeniero la toma de

decisiones, debido a que los fenómenos naturales no se presentan siempre en la misma condiciones dependiente de las características del lugar en estudio, siguiendo con (Patiño & García Cabay, 2014) manifiesta que el mejor modelo para completar un registro de una serie carente de datos, es mediante la recta de regresión, ya que este método admite hasta dos datos faltantes.

Siguiendo la fundamentación, (Mancero-Mosquera & Chehab, 2015), en el trabajo que desarrollaron, manifiestan que la utilidad de la transformación de wavelet, Fourier, se han analizado, y estos permitió establecer si las oscilaciones previamente detectadas por medio de las transformaciones de Fourier son de tipo estacionario o transitorio, y estudiar con mejor detalle la naturaleza de los fenómenos medidos. Otros autores como (Gélvez Ruiz, 2019), (Bayas Altamirano, 2018), desarrollaron un sistema informático que permitiera gestionar estadísticamente los datos suministrados por las estaciones meteorológicas, las aplicaciones consta de un modulo Java Server Faces (JSF), el framework JSF, Tomcat 8.5 como servidor web y para la gestión de base de datos manejaron PostgreSQL, ambos autores concluyeron que el sistema emulado cumplido con las necesidades.

En ninguna de las investigaciones descritas, han desarrollado la estimación de datos faltantes mediante y algoritmo matemático de diferencia finitas, en la mayoría de los escritos desarrollaron los modelos utilizando son de dos a cinco estaciones, teniendo como base una estación índice principal.

De acuerdo con (Picado V. , 2023), manifiesta que el método de diferencias finitas, es una poderosa herramienta para el tratamiento de variables medidas, en este caso fueron el índice atmosférico NAO y ONI, precipitación, y temperatura.

Es importante definir el Método Diferencias Finitas, según los autores (Lara Romero, Chávez Aliaga, & Castañeda Vergara, 2019), el método de diferencias finitas (MDF) lo definen como un método de carácter general que permite la resolución aproximada de ecuaciones diferenciales definidas en dominios finitos. (Lara Romero, Chávez Aliaga, & Castañeda Vergara, 2019), declara que, probablemente es uno de los primeros métodos numéricos utilizados en la resolución de problemas en dinámica de fluidos y transferencia de calor, así como en problemas electromagnéticos; (Lara Romero, Chávez Aliaga, & Castañeda Vergara, 2019) también manifiestan que existen documentación en la que se menciona que Gauss utilizó este método.

En correspondencia con (Chapra & Canale, 2011), (de Greiff Bravo, 1955), desarrollo el procedimientos polinómicos utilizando el método diferencias finitas, (Martinez, M, 1995), presentan un estudio de esquemas en diferencias finitas para le resolución numérica de sistemas hiperbólicos de leyes de conservación, son aplicados al caso de las ecuaciones que gobiernan el flujo en conductos de admisión y escapes de motores, (Martinez, M, 1995) también dedujo el rango de variación de los parámetros que intervienen en la definición de las técnicas de corrección de flujos para que estas verifiquen la propiedad (TVD).

(Chapra & Canale, 2011) plantea que las soluciones numéricas de la ecuación de Laplace se tienen sistemas que son mucho más grandes de lo normal. Por ejemplo, para una malla de 10 x 10 se tienen 100 ecuaciones algebraicas lineales. (Chapra & Canale, 2011) describe que el método de aproximación representa un mejor procedimiento para obtener soluciones de ecuaciones diferenciales finitas elípticas. Esta técnica se expresa como sigue la ecuación 1.

$$T_{i,j} = \frac{T_{i+1,j} + T_{i-1,j} + T_{i,j+1} + T_{i,j-1}}{4} \text{ ecuación 1}$$

Se resuelve de manera interactiva para $j=1$ hasta n e $i=1$ hasta m . Como dicta una ecuación diagonal a partir de la construcción de la matriz, el procedimiento al final convergerá a una solución estable. Algunas veces se utiliza la sobrerrelajación para acelerar la velocidad de la convergencia, aplicando la siguiente ecuación 2 después de cada interacción.

$$T_{i,j}^{nuevo} = \lambda T_{i,j}^{nuevo} + (1 - \lambda) T_{i,j}^{anterior} \text{ ecuación 2}$$

Donde $T_{i,j}^{nuevo}$ y $T_{i,j}^{anterior}$ son los valores de $T_{i,j}$ de la actual interacción y de la previa respectivamente:

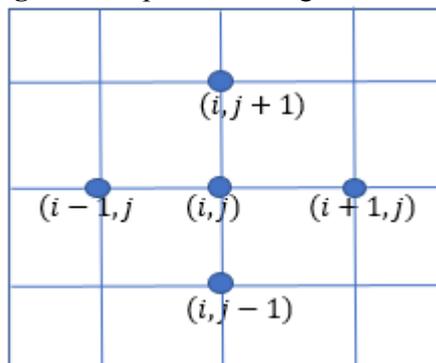
λ es un factor de ponderación que esta entre 1 y 2.

Como el método convencional de Gauss-Seidel, las iteraciones se repiten hasta que los valores absolutos de todos los errores relativos porcentuales $(\varepsilon_a)_{i,j}$ están por debajo de un criterio preespecificado de terminación ε_s . Dichos errores relativos porcentuales se estiman mediante la siguiente ecuación 3:

$$|(\varepsilon_a)_{i,j}| = \left| \frac{T_{i,j}^{nuevo} - T_{i,j}^{anterior}}{T_{i,j}^{nuevo}} \right| * 100\% \text{ ecuación 3}$$

A continuación, se presenta un ejemplo de malla bidimensional organizada para implementar el método de diferencia finita ver figura 1.

Figura 1. Representación gráfica de una malla bidimensional



Nota: retomado de (Chapra & Canale, 2011)

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se presenta base de datos históricos de la precipitación de la estación aeropuerto en el periodo de 1958-2010. ver tabla 1.

Tabla 1. Base de datos histórico de la precipitación de la estación aeropuerto, Managua, Nicaragua

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1958	0.0	0.0	32.0	0.0	184.3	530.5	170.9	83.0	156.1	204.5	75.1	1.2
1959	0.3	2.0	0.2	0.0	44.2	224.4	72.5	82.8	146.5	286.8	17.7	0.8
1960	9.1	2.1	0.2	3.8	130.5	212.4	193.2	270.8	183.6	263.3	50.1	1.0
1961	1.1	0.3	0.0	0.0	8.4	240.9	170.1	40.3	240.2	152.4	90.5	20.6
1962	9.1	0.0	3.5	3.3	7.8	258.8	105.0	193.9	207.7	397.7	15.5	7.5
1963	5.8	0.8	0.0	1.5	17.0	183.0	86.6	106.9	156.5	110.0	86.7	8.5
1964	1.7	0.0	0.4	32.9	136.3	422.2	207.0	154.2	91.8	340.8	27.4	5.8
1965	4.8	0.5	0.4	0.0	130.5	129.2	85.3	97.0	130.2	153.8	35.0	9.5
1966	0.0	0.0	0.0	0.2	149.8	383.8	220.3	137.1	203.1	238.4	13.9	37.0
1967	2.2	0.2	2.6	0.6	3.8	222.7	119.5	51.1	192.8	123.7	91.3	13.7
1968	8.3	0.0	0.0	0.7	207.2	228.3	74.6	103.4	267.9	341.1	25.9	9.2
1969	5.6	0.0	0.0	21.7	94.3	252.0	104.2	262.7	255.7	302.7	64.1	5.5
1970	5.9	1.4	7.2	13.0	98.0	95.6	128.2	203.5	275.9	116.9	111.3	25.1
1971	17.1	1.5	0.0	0.2	226.1	137.3	207.5	132.4	367.3	159.6	22.8	21.6
1972	4.9	0.2	0.0	0.0	158.2	81.6	79.8	100.0	116.1	79.7	46.0	3.2
1973	0.1	0.3	0.0	3.9	212.0	182.1	267.3	361.8	239.9	430.3	37.5	7.7
1974	15.2	0.5	0.1	0.0	105.8	148.3	50.3	140.1	331.8	64.4	3.6	8.7
1975	17.1	0.0	0.0	0.0	207.2	241.3	137.8	198.6	324.5	182.0	56.3	0.2
1976	0.8	0.6	3.0	0.2	21.1	156.7	57.3	152.0	69.5	265.3	14.2	3.7
1977	0.0	0.0	0.0	0.0	84.0	210.2	56.7	74.0	94.9	134.9	155.8	2.2

1978	1.1	0.0	0.0	29.3	167.9	121.9	160.9	161.0	152.4	148.3	31.6	33.7
1979	4.2	0.0	0.0	14.0	43.1	268.8	135.5	158.2	238.4	162.1	23.4	11.0
1980	5.0	0.0	0.0	0.0	164.9	199.1	154.3	146.9	189.5	312.7	202.6	1.0
1981	0.0	1.1	91.2	6.1	195.7	203.2	140.9	175.7	252.0	153.3	74.2	12.7
1982	7.3	9.8	3.0	12.4	519.4	200.5	118.0	44.8	219.1	190.0	29.3	0.8
1983	0.5	27.9	4.0	24.8	56.8	138.2	125.3	116.6	184.2	92.9	31.0	4.5
1984	1.9	0.6	0.1	0.5	63.2	230.5	221.1	149.9	296.5	133.1	54.2	0.3
1985	0.0	0.9	0.4	14.7	307.2	127.6	101.2	163.6	114.4	379.4	37.6	4.9
1986	0.5	9.0	0.0	0.0	213.3	85.5	107.0	148.4	122.7	58.6	32.9	2.3
1987	6.0	0.0	0.9	0.0	70.7	153.3	311.4	167.7	228.4	128.7	5.3	30.4
1988	2.0	3.2	0.0	3.8	104.5	346.4	220.8	302.7	276.8	392.7	12.9	13.8
1989	0.4	0.0	0.0	0.0	5.4	130.0	118.3	82.8	315.7	54.7	50.6	27.3
1990	1.2	1.2	0.0	3.7	89.7	114.1	103.9	114.9	85.3	100.9	132.3	8.6
1991	1.8	2.4	0.0	0.5	203.2	152.4	76.0	106.6	188.0	221.1	25.9	2.6
1992	0.3	0.0	0.0	0.0	86.7	159.0	119.4	61.7	143.2	114.4	4.1	16.0
1993	1.3	0.0	0.0	29.2	347.1	101.1	104.7	287.2	345.3	117.5	85.2	1.4
1994	2.9	0.6	2.7	129.1	83.2	49.3	97.4	109.4	167.7	223.1	143.3	10.2
1995	0.0	0.0	16.0	115.6	20.6	212.3	112.3	326.1	297.4	202.6	43.9	13.4
1996	21.3	0.0	5.3	0.0	240.8	221.6	282.3	116.6	275.9	315.6	127.1	2.1
1997	5.8	0.5	0.4	1.3	14.1	291.7	57.5	82.3	99.3	246.2	63.3	0.0
1998	0.0	0.0	0.0	0.0	50.6	117.2	100.5	119.2	229.8	836.4	91.6	19.7
1999	4.1	56.5	6.9	37.2	45.2	141.5	195.9	168.6	348.9	192.1	56.7	0.3
2000	2.7	0.2	0.1	4.3	72.8	118.1	103.0	63.5	452.7	121.8	12.7	5.2
2001	0.6	1.7	0.0	0.0	122.7	79.4	103.5	173.4	256.4	102.8	21.2	0.3
2002	2.3	1.4	0.0	0.5	473.7	98.4	106.3	154.9	237.0	130.8	18.5	0.8
2003	1.1	0.0	9.1	113.7	211.4	260.7	100.0	100.6	151.6	176.6	99.0	5.8
2004	6.9	0.2	1.2	0.0	162.7	140.3	112.2	77.1	62.1	231.7	24.6	0.2
2005	0.1	0.0	0.0	31.1	289.2	220.1	105.3	196.2	238.7	243.2	70.8	0.4
2006	8.1	0.2	2.7	0.1	40.2	138.2	136.4	74.6	130.9	105.0	44.2	2.7
2007	0.0	0.0	0.8	25.8	251.9	108.7	140.3	292.0	219.6	300.0	61.3	11.5
2008	2.0	0.7	2.4	3.4	226.1	126.3	276.8	125.7	213.0	455.6	7.2	0.3
2009	0.0	0.0	0.0	0.0	91.3	171.1	106.6	75.3	107.4	163.2	63.4	17.8
2010	0.0	0.0	0.0	103.7	293.2	229.7	253.4	331.7	379.2	103.9	80.9	0.2
Suma	200.5	128.5	196.8	786.8	7555.0	9997.5	7302.5	7921.5	11271.5	11259.3	2903.5	454.9
Media	3.8	2.4	3.7	14.8	142.5	188.6	137.8	149.5	212.7	212.4	54.8	8.6
Max	21.3	56.5	91.2	129.1	519.4	530.5	311.4	361.8	452.7	836.4	202.6	37.0
Min	0.0	0.0	0.0	0.0	3.8	49.3	50.3	40.3	62.1	54.7	3.6	0.0

Nota. Datos obtenidos del Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales, INETER.



De acuerdo con la metodología, se trabajará con los datos en el periodo de 1958-2010, y se desea estimar los datos del 2011 al 2021, utilizando el arreglo de diferencias finitas, una vez realizado el proceso de estimación, se prosigue analizar los resultados con los datos reales suministrado por INETER en el periodo 2011 al 2021, esto para validar y correlacionar el resultado.

El arreglo consiste, en la parte superior colocar los valores correspondientes al año 2001, de enero a diciembre, en la parte inferior colocar la media en la serie de datos de enero a diciembre, en la parte izquierda colocar los valores de enero del periodo 2001-2010, los datos medidos correspondiente a los diez años antes de la estimación, y en la parte izquierda colocar los valores de diciembre del periodo 2001-2010. La matriz del arreglo con diferencias finitas queda de la siguiente manera, ver tabla 2 y 3.

Tabla 2. Matriz del arreglo con diferencias finitas, periodo 2011-2021

	0.0	0.0	0.0	103.7	293.2	229.7	253.4	331.7	379.2	103.9	80.9	0.2
0.6												0.3
2.3												0.8
1.1												5.8
6.9												0.2
0.1												0.4
8.1												2.7
0.0												11.5
2.0												0.3
0.0												17.8
0.0												0.2
	3.8	2.4	3.7	14.8	142.5	188.6	137.8	149.5	212.7	212.4	54.8	8.6

Fuente: elaboración propia. (2024)

Tabla 3. Estimación de los datos faltantes con el arreglo de diferencias finitas, periodo 2011-2021

	0.0	0.0	0.0	103.7	293.2	229.7	253.4	331.7	379.2	103.9	80.9	0.2	
0.6	10.33	23.71	48.91	109.82	185.76	198.64	216.72	239.29	228.56	132.23	79.04	28.53	0.3
2.3	17.01	35.59	62.10	100.92	141.38	162.37	175.56	180.17	163.52	117.43	74.51	34.59	0.8
1.1	19.81	39.54	63.00	90.38	116.47	133.90	142.99	142.31	127.92	99.46	66.98	34.52	5.8
6.9	21.61	39.76	59.98	81.11	100.22	113.77	120.20	118.17	106.38	85.53	59.42	30.69	0.2
0.1	19.96	37.91	56.06	73.88	89.54	100.75	105.87	103.78	93.92	76.85	54.47	28.65	0.4
8.1	20.23	35.85	52.45	68.83	83.30	93.81	98.74	97.17	88.66	73.48	52.96	29.03	2.7
0.0	17.01	32.81	49.09	65.67	81.03	92.47	98.12	97.50	90.08	75.44	54.85	31.82	11.5
2.0	15.00	29.30	45.41	63.72	82.70	96.90	103.78	104.64	98.73	83.35	59.19	31.91	0.3
0.0	11.68	23.99	39.54	61.09	89.16	108.65	115.47	118.54	116.83	100.04	66.63	36.34	17.8
0.0	7.73	15.45	27.66	51.95	104.19	133.09	130.89	137.23	150.02	133.36	70.95	29.02	0.2
	3.8	2.4	3.7	14.8	142.5	188.6	137.8	149.5	212.7	212.4	54.8	8.6	

Fuente: elaboración propia. (2024)

Validación del modelo

La validación consiste en correlacionar los valores medidos en tiempo real en el periodo 2011 al 2021, y los valores estimados en el mismo periodo. Se determina la media en ambos matriz de datos tanto de los valores medidos como de los valores estimados, se correlacionan con la correlación lineal, dando como resultado los siguientes valores, ver tabla 4.

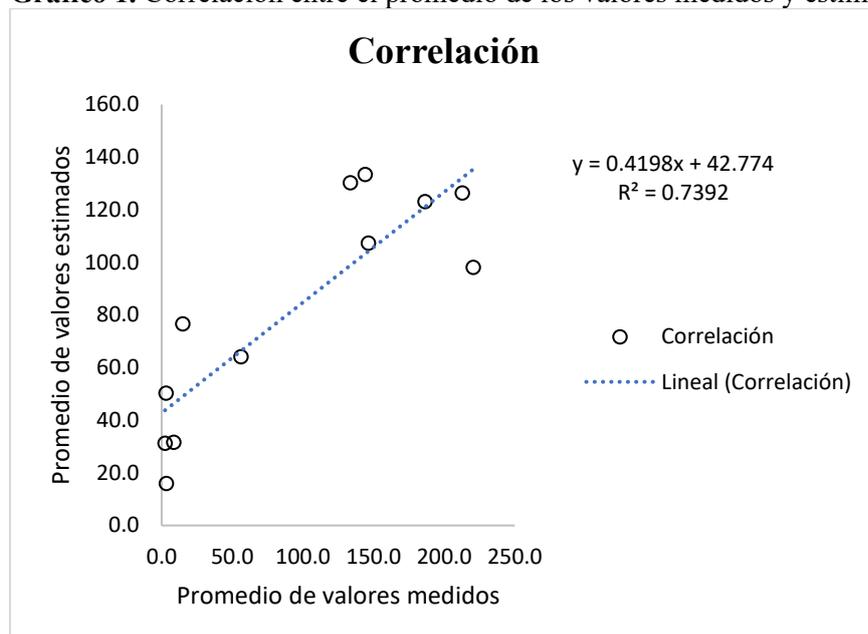
Tabla 4. Promedio de la serie de datos medidos, y estimados evaluados en el periodo 2011-2021

Media de valores medidos	3.4	2.3	3.1	14.9	146.3	186.5	133.6	144.1	212.9	220.6	56.2	8.5
Media de valores estimados	16.0	31.3	50.3	76.6	107.3	123.1	130.3	133.4	126.4	98.1	64.1	31.6

Fuente: elaboración propia. (2024)

Se presenta la gráfica de correlación entre los valores promedios medidos y estimados.

Gráfico 1. Correlación entre el promedio de los valores medidos y estimados



Fuente: elaboración propia, a partir del resultado promedios medidos y estimados de precipitación.

Es importante mencionar que la tendencia es lineal con pendiente positiva, la correlación es igual a $R^2=0.7392$ muy fuerte, por lo que se puede decir que los valores medidos y los estimados son correlacionales, por lo que el modelo del arreglo de diferencias finitas es útil para estimar datos faltantes utilizando una única estación, sin necesidad de usar una estación base.

Para el uso de la ecuación de tendencia de la forma $Y = a * X + b$ se hace uso de las estadísticas descriptiva con medidas de variabilidad, resultados obtenidos de las series de datos medidos de la estación aeropuerto para la variable de precipitación, reduciéndose a la siguiente tabla 5:

Tabla 5. Estadísticos para hacer uso la ecuación de correlación lineal presentada en esta investigación.

Criterios para determinar la estimación de datos faltante	Rango		
	Desviación	Promedio	Desviación
Desviación	109.19	-14.88	94.31
Promedio	94.31	<-14.88	-14.88> y <203.5
			203.50

Nota: los criterios fueron obtenidos a partir de los datos históricos medidos en la estación aeropuerto, de acuerdo a los resultados, en el primer rango, si la precipitación medida es ≤ 0 entonces la ecuación de correlación $Y = 0$, y la estimación es cero; si la precipitación medida está en el rango de $-14.88 > y < 203.5$ entonces la ecuación de la correlación es igual $Y = a * X$ y la estimación es la determinada por la expresión descrita; si la precipitación medida esta en el rango $203.50 >$ entonces la ecuación de la correlación es igual a $Y = a * X + b$, y la estimación es la determinada por la expresión descrita.

A continuación, se realizan un cálculo a manera de ejemplo, para los meses de enero, junio y octubre, para el año 2020:

Tabla 6. Ejemplo para el cálculo de estimación de precipitación en el año 2020, a partir de datos medidos en el año 2019.

Descripción	Ecuación simplificada	Ecuación determinada	Datos medidos en el año 2019, por la estación, en mm		
			Ene	Jun	Oct
			0.00	97.8	423.9
			Datos estimados para el año 2020, por la estación en mm		
<-14.88	$Y = 0$		0.00		
-14.88> y	$Y = a * X$			41.056	
<203.5		$Y = 0.4198 * X + 42.774$			
203.50>	$Y = a * X + b$				220.73

Fuente: elaboración propia. (2023).

CONCLUSIONES

De acuerdo a los objetivos planteados, de manera general se desarrollo un modelo para el relleno de series anuales de datos meteorológicos faltantes, utilizando una matriz con arreglo de diferencias finitas, se utilizó una base de series históricas, de datos de precipitación de la estación aeropuerto en el periodo de 1958-2010, después de haber consultado las diferentes teorías se demostró que el modelo de arreglo de diferencias finitas es una herramienta poderosa para la estimación de datos faltantes.

El algoritmo desarrollado, da como resultado una tendencia lineal con una ecuación igual a $Y = 0.4198 * X + 42.774$ y correlación $R^2 = 0.7392$, y definiéndose criterios para la evaluación de la ecuación deducida, todo a partir de una sola estación.

En tal sentido se planteo una nueva forma validada para la estimación de datos faltantes a partir de datos históricos de precipitaciones, misma que se puede usar para estimar datos faltantes para temperaturas, humedad, velocidad del viento, evaporación paran, u otro factor hidrometeorológico en la que se desea estimar por la ausencia de los mismos, queda entonces, seguir validando el modelo con otros factores de otras estaciones.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Alfaro, E. J., & Soley, F. J. (2008). Descripción de dos métodos de rellenado de datos ausentes en series de tiempo meteorológicas. *Revista de Matemática: Teoría y Aplicaciones*, 60-75.
- Aparicio Mijares, F. (1992). *Fundamentos de Hidrología de Superficie*. México, D.F.: EDITORIAL LIMUSA, S.A. de C.V.
- Bayas Altamirano, V. H. (2018). *Implementación de un sistema informático para la gestión de datos climáticos en las estaciones meteorológicas de la ESPOCH, a través de la plataforma Java JEE7*. Riobamba: Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.
- Carrera-Villacrés, D., Guevara-García, P. V., Tamayo-Bacadela, L. C., Balarezo-Aguilar, A. L., Narváez-Rivera, C. A., & Morocho-López, D. R. (2016). Relleno de series anuales de datos meteorológicos mediante métodos estadísticos en la zona costera e interandina del Ecuador, y cálculo de la precipitación media. *IDESIA*, 79-88.
- Chapra, S. C., & Canale, R. P. (2011). *Métodos numéricos para ingenieros*. México D.F.: McGraw-Hill/Interamericana Editores, S.A. de C.V.
- de Greiff Bravo, L. (1955). Aplicación de la teoría de diferencias finitas al calculo de polinomios. *Revista Colombiana de Matemáticas*, 1-12.
- Gamboa Chel, R. O. (2015). *Evaluación de modelos empíricos, matemáticos y redes neuronales para estimar datos faltantes en estaciones meteorológicas en México*. Montecilo, Texococo, EDO. de México: Montecillo, Texococo, EDO. de México.
- Gélvez Ruiz, R. (2019). *Procedimiento para el Análisis de Comportamiento Meteorológico Utilizando el Módulo Big Data de la Herramienta Pentaho*.
- Hernández Sampieri, R., Fernández-Collado, C., & Baptista Lucio, P. (2006). *Metodología de la Investigación*. México, D.F: McGraw-Hill/IBEROAMERICANA EDITORES, S.A. DE C.V.
- INETER. (28 de diciembre de 2023). *Instituto Nicaraguense de Estudios Territoriales*. Obtenido de <https://www.ineter.gob.ni/met>
- Lara Romero, L., Chávez Aliaga, Z., & Castañeda Vergara, J. (2019). *El método de diferencias finitas. Teoría y Práctica*. Trujillo-Perú: Imprenta Editorial Gráfica Real S.A.C.

- Mancero-Mosquera, I., & Chehab, X. (2015). Análisis de Fourier y Wavelet de las series de tiempo de la estación meteorológica ESPOL-FIMCBOR. *Revista Tecnológica-ESPOL*, 28(2).
- Martinez, M, L. (1995). *Estudio de esquemas en diferencias finitas para el calculo del flujo comprensible unidimensional, no estacionario y no isentópico (Doctoral dissertation, Unversitat Politècnica de Válcencia)*.
- Monsalve Saenz, G. (1999). *Hidrología en la Ingeniería*. México, D.F.: ALFAOMEGA GRUPO EDITOR, S.A. de C.V.
- OMM. (28 de diciembre de 2023). *Organización Meteorológica Mundial*. Obtenido de <https://wmo.int/es/sinopsis>
- Pabón Caicedo, J. D., Eslava Ramírez, J. A., & Gómez Torres, R. E. (2001). Generalidades de la distribución espacial y temporal de la temperatura del aire y de la precipitación en Colombia. *Meteorología Colombiana*, 47-59.
- Patiño, N., & García Cabay, M. E. (2014). *Modelos estocásticos para completar series hidrológicas y meteorológicas de la provincia de Chimborazo del 2000 al 2011*. Chimborazo, Ecuador: Riobamba: Universidad Nacional de Chimborazo, 2014.
- Picado, V. (2023). Análisis de datos con el arreglo de diferencias finitas en el contexto de la crisis climática global. *Ciencias Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 4160-4182.