

Análisis de la serie de tiempo de la precipitación mensual y eventos de sequía extrema en el municipio de Carmo do Paranaíba/MG - Brasil

Luiz Antônio de Oliveira¹, Eduardo Petrucci¹

¹Universidade Federal de Uberlândia, Brasil.

Autor para correspondencia: Luiz Antônio de Oliveira¹, luiz.oliveira@ufu.br

(Recibido: 29-10-2022. Publicado: 31-12-2022.)

Resumen

Las sequías pluviométricas pueden ocurrir en cualquier región del planeta, independiente de su ritmo climático y los índices de sequías son capaces de estimar las características de esos fenómenos, determinando el inicio y término, bien como su perdurabilidad en el tiempo. Las series temporales son una importante herramienta estadística para extraer informaciones en datos pasados y realizar proyecciones a partir de esas informaciones. El objetivo es analizar la serie de tiempo de la precipitación mensual en el municipio de Carmo do Paranaíba/MG, período de 1942 a 2020, utilizando el método de la descomposición clásica y cuantificar las ocurrencias de sequías extremas a través del Índice Estandarizado de Sequías Pluviométricas (IESP). Los resultados mostraron que el modelo que produjo menores errores fue el aditivo, con fuerte influencia estacional en el primero semestre del año, con grandes irregularidades en el periodo entre diciembre y abril, provocando acortamiento de la temporada lluviosa en el referido municipio. En cuanto a las sequías extremas, fueron identificadas 24 ocurrencias desde 1942 hasta 2020, con mayor magnitud y perdurabilidad en la década de 1950 en relación con las demás.

Palabras clave: Precipitación; Índices de sequía; Series de tiempo; Brasil.

Abstract

Rainfall droughts can occur in any region of the planet, regardless of its climatic rhythm, and drought indices are able to estimate the characteristics of these phenomena, determining the beginning and end, as well as their durability over time. Time series are an important statistical tool for extracting information from past data and making projections from this information. The objective of this study is to analyze the time series of monthly rainfall in the municipality of Carmo do Paranaíba/MG, from 1942 to 2020, using the classical decomposition method and quantify the occurrence of extreme droughts through the Standardized Index of Pluviometrical Droughts (IESP). The results showed that the model that produced the smallest errors was the additive, with a strong seasonal influence in the first half of the year, with large irregularities in the period between December and April, causing a shortening of the rainy season in that municipality. Regarding extreme droughts, 24 occurrences were identified from 1942 to 2020, with

greater magnitude and durability in the 1950s when compared to other decades.

Keywords: *Precipitation; Drought indices; Time series; Brazil.*

1. Introducción

La presión ejercida por las actividades humanas sobre el medio ambiente nunca fue tan fuerte como actualmente. La falta de preocupación por la sostenibilidad de las prácticas o acciones utilizadas en la apropiación o transformación del bien ambiental ha comprometido el mantenimiento de los ecosistemas en los distintos ámbitos donde se desarrolla la vida. A pesar de existir muchas iniciativas para la protección y preservación ambiental, aún son insuficientes para asegurar la destrucción ambiental. En ese escenario caótico, más que nunca, la investigación que involucra los diversos temas ambientales es de gran relevancia, sea para comprender las transformaciones en curso, o para apoyar medidas de mitigación destinadas a minimizar los efectos adversos resultantes de esas transformaciones. Desde el periodo posterior a la Revolución Industrial, el ser humano ha liberado gran cantidad de gases nocivos al medio ambiente y esto ha alterado la dinámica climática global, provocando el calentamiento paulatino de la atmósfera y de los océanos (calentamiento global), desencadenando, con mayor frecuencia, la ocurrencia de eventos climáticos extremos, tal como afirma el Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 2014), especialmente en las últimas décadas (IPCC, 2001, 2007, 2014 e 2021). Según Ayoade (2006), el clima es resultante de las relaciones que se establecen entre los sistemas dinámicos de la atmósfera y los factores locales y regionales, que redistribuyen los elementos climáticos (temperatura, humedad y presión atmosférica), caracterizando así los tipos climáticos de las regiones. La medición de las variables climáticas para la caracterización de los climas se realiza a través de estaciones meteorológicas, en las cuales se recopilan los valores numéricos de estas variables y se realizan promedios, que equivalen a las Normales Climatológicas (NC), en un período de 30 años. Estas series de temporales de datos son una importante herramienta que ayuda en las investigaciones en climatología y áreas afines, además de ser de gran utilidad para la planificación estratégica de los municipios. Los eventos climatológicos están propensos a ocurrir en los intervalos de NC, sin embargo, existen eventos que se alejan mucho de las condiciones normales, teniendo una baja frecuencia de ocurrencia, como situaciones de exceso o déficit de precipitación, heladas, olas de calor/frío, ciclones, entre muchos otros (DIAS Y SILVA, 2009). Cuando estos ocurren, se dice que hubo episodios de Eventos Extremos Climáticos (ECE). Según Liebmann, Jones y Carvalho (2001), conceptualizar lo que es un evento extremo es una tarea compleja porque se debe tener en cuenta las heterogeneidades de los espacios y fenómenos involucrados. Sin embargo, para este artículo, se considerarán eventos extremos las ocurrencias de fenómenos que se alejen, tanto positiva como negativamente de los valores climáticos medios (INPE, 2009). Una serie de tiempo se define como una secuencia de N observaciones de datos en una posición fija en el espacio y la variación es solo sobre el tiempo de la recopilación de datos (MORETTIN Y TOLOI, 1981; BAYER, CASTRO Y BAYER 2012), entonces, los valores de una variable Y , siendo: $Y_1, Y_2 \dots Y_n$ es observada en los tiempos (T) $T_1, T_2 \dots T_n$, así, se puede establecer una relación en la que los datos (Y) varían en función del tiempo (T) y, solo en función del tiempo, siendo: $Y = f(t)$. El conjunto de tiempo establecido para las series continuas es $T = t_1, \dots, t_n$, y se denotará por $X_t : t \in T$ y, el conjunto de tiempo para las series discretas es $T = t : t_1 \text{ } | \text{ } t_2$, y se denotará por $X(t) : t \in T$ (EHLERS, 2009). Análisis en series temporales tiene como objetivo comprender las variables que componen estas series de datos, extrayendo informaciones importantes, como oscilaciones, amplitud, ciclos, tendencia, errores, para que se puedan hacer predicciones (BAYER Y SOUZA, 2010). Bowerman, O'Connell y Koehler (2007) señalan que estas informaciones se utilizan para describir las series temporales con posibilidad de realizar proyecciones. A lo largo de los años, se han mejorado los métodos de predicción de datos, especialmente en las ciencias ambientales, para predecir eventos adversos (FARIA et al.,

2008). La predicción en datos climatológicos cobra mucha relevancia, debido a la intensificación de los eventos extremos, ya que a partir del análisis de las series temporales aplicadas a los factores climatológicos, se relacionan directamente con el éxito o fracaso de los proyectos (SILVA, GUIMARÃES Y TAVARES, 2008). Entre los métodos más consolidados y utilizados para el análisis de series temporales se encuentra la Descomposición Clásica. Este método asume que los valores de la serie de tiempo son resultado de una relación entre cuatro componentes o patrones de distribución, siendo: Tendencia (T), Estacionalidad (S), Cíclico (C) y Componentes Irregulares (I), que pueden ser aislados y comprobar cómo actúa cada componente en la composición de la serie temporal, permitiendo así realizar su predicción (VIÑALS 2001; HERNANDEZ S, PEDRAZA M Y DIAZ, 2008). La descomposición clásica admite la relación entre esas variables de varias maneras, entre las más utilizadas se encuentra la aditiva o multiplicativa. El modelo aditivo se construye a partir de la adición de los valores de sus componentes y el modelo multiplicativo, a través de la multiplicación de sus componentes. Bowerman, O'Connell y Koehler (2007) explican que el modelo multiplicativo es el mejor para las series temporales que presentan variaciones estacionales crecientes o decrecientes y, el modelo aditivo, para las series temporales con variación estacional constante. Las sequías son fenómenos naturales que pueden ocurrir en regiones con cualquier condición climática y, en Brasil, los registros de sus ocurrencias se remontan desde el periodo de la colonización portuguesa (CAMPS, 1997; CAMPOS Y STUDART, 2001). Molion y Bernardo (2002) señalan las características naturales de las sequías, que pueden ocurrir debido a procesos de inhibición de la convección y, en consecuencia, la producción de lluvias. La American Meteorological Society (AMS, 2003) divide las sequías en cuatro grupos: la sequía meteorológica o climatológica, la sequía agrícola, la sequía hidrológica y la sequía socioeconómica. La sequía meteorológica o climatológica consiste en un déficit de precipitación y la persistencia de este evento alrededor de un valor de referencia, por ejemplo, la Normal Climatológica (NC) de precipitación, no necesariamente la ausencia de lluvia. La sequía agrícola ocurre debido al déficit de humedad del suelo, comprometiendo el desarrollo de los cultivos en cualquier etapa del ciclo vegetativo (VALIENTE, 2001). Las sequías hidrológicas ocurren cuando las sequías se mantienen por largos periodos, se reduce la infiltración y, consecuentemente, disminuye el volumen de los embalses de aguas subterráneas y/o superficiales y el caudal de los ríos. La sequía socioeconómica ocurre cuando la disponibilidad de agua produce daños económicos o sociales a la población afectada por este tipo de sequía, perjudicando la producción de algún bien, dotado de valor económico para la supervivencia de esta población o generando malestar social (VALIENTE, 2001). Otros factores naturales que son responsables por los periodos de sequía también fueron estudiados por Nobre (1994), Molion y Bernardo (2002), Kayano y Andreoli (2009), Silva et al. (2010), Silva Galvêncio y Nóbrega (2011), entre otros, quienes señalan anomalías asociadas a circulaciones a gran escala que influyen negativamente en la precipitación, tales como: ENOS (El Niño y La Niña); Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT); Células de Hadley y Walker; Temperatura de la superficie del Mar (Atlántico y Pacífico); Oscilación Decadal del Pacífico (ODP). Los índices de sequía se desarrollaron ampliamente a lo largo del siglo XX y, según Fernandes et al. (2009) y Zargar (2011), tienen como objetivo determinar el periodo de ocurrencia de una sequía, con énfasis en los periodos de inicio y fin, intensidad y duración, principalmente. Entre los índices más utilizados destacan: SPI (Standard Precipitation Index), PDSI (Palmer Drought Severity Index), RAI (Rainfall Anomaly Index), IA (Índice de Aridez), PN (Percent of Normal), entre otros. No existe un índice de sequía perfecto, adecuado para todas las regiones (PENALBA Y RIVERA, 2015), es necesario realizar adaptaciones de los parámetros de los índices para determinar ese fenómeno en las diversas regiones del planeta. Para contornar este hecho, se propone utilizar el Índice Estandarizado de Sequías Pluviométricas, desarrollado por Pita Lopez (2001a) en el cual las sequías pluviométricas son consideradas como desviaciones acumuladas de las precipitaciones mensuales en relación con la mediana de estos meses, en un periodo mínimo de 30 años. Este índice fue diseñado para superar las dificultades de aplicar otros índices más complejos y reconocidos, de manera que, sus resultados puedan ser comparados entre regiones

de diferentes características climáticas. En Brasil, el método del IESP aún es poco conocido, siendo los índices PDSI, IA y SPI (que es el método de clasificación de sequías oficial del gobierno brasileño) los más reconocidos. Sin embargo, existen algunos trabajos que utilizaron el IESP como método de clasificación de las sequías, cómo, por ejemplo, Binda e Verdum (2020) en la región sur brasileña, Silva Castro y Oliveira (2012), Oliveira, Maciel y Queiroz (2014), y Petrucci, Oliveira y Silva (2022) en la región sureste brasileña y, Petrucci y Oliveira (2018) en la región noreste brasileña. En vista de lo anterior, el objetivo de este artículo es caracterizar y analizar la serie de tiempo de precipitación mensual, a través del método de la descomposición clásica y verificar las ocurrencias de eventos de sequías extremas a través del Índice estandarizado de Sequías Pluviométricas (IESP), en el municipio de Carmo do Paranaíba/MG, período de 1942 a 2020.

2. Metodología

Se utilizaron datos de precipitación mensual de la estación meteorológica Carmo do Paranaíba, código 1946022, ubicada en el municipio de Carmo do Paranaíba, mesorregión del noreste del departamento de Minas Gerais, en el periodo de 1942 hasta 2020, disponibles en el sitio web Hidroweb , de la Agencia Nacional de Aguas – ANA. La organización y tratamiento estadístico de los datos se realizó en una hoja de cálculo de Microsoft Excel, donde se calcularon los parámetros de la precipitación anual y mensual: mínimo, máximo, media, desviación estándar, mediana, coeficiente de variación, asimetría, curtosis y distribución de frecuencias, con el fin de diferenciar y comprender la distribución de la precipitación en el municipio de Carmo do Paranaíba/MG.

Para la aplicación del método de descomposición clásica, es necesario aislar las variables Tendencia (T), Estacionalidad (E), Ciclicidad (C) e Irregularidad (I) que componen las series temporales. La relación entre las variables T, E, C e I para los modelos aditivo y multiplicativo son:

Modelo aditivo:

$$Z_t = T_t + E_t + C_t + I_t \quad (1)$$

Modelo Multiplicativo:

$$Z_t = T_t * E_t * C_t * I_t \quad (2)$$

donde: Z_t es el valor de la serie en el tiempo t ; T_t es la tendencia en el tiempo t ; E_t es el movimiento estacional en el tiempo t ; C_t es el movimiento cíclico en el tiempo t ; e I_t es el movimiento irregular en el tiempo t . Donde, $t = 1, \dots, N$, que es el tamaño de la serie temporal. En la determinación de la Tendencia (T), se utilizaron las ecuaciones de las líneas de regresión de los modelos: lineal, polinómico de 2º grado, logarítmico, potencia, exponencial, medias móviles y suavizado exponencial. La selección del mejor modelo de tendencia fue a través de las medidas de precisión, ellos son: Error Absoluto Medio (EAM), Error Cuadrático Medio (ECM), Error Porcentual Medio (EPM) y Error Promedio Absoluto Porcentual (EPAM), y el que tuvo el valor más cercano a 0 fue el modelo elegido, o sea, el menor error, que significa la menor diferencia entre los datos reales y los datos estimados. Para determinar la Estacionalidad (E) se aplicaron los modelos Aditivo y Multiplicativo, que consiste en la diferencia entre el valor observado y las medias móviles centradas (MMC). La estacionalidad se mide como un índice

mensual, donde en el modelo aditivo se mide en la misma unidad de los datos y, en el modelo multiplicativo se mide en porcentaje. La suma de los índices estacionales anuales debe ser 0 (aditivo) o 1 (multiplicativo), siendo que, ese valor es diferente de 0 o 1, se debe corregir el exceso.

Modelo aditivo:

$$E = Y - MMC \quad (3)$$

Modelo Multiplicativo:

$$E = \frac{Y}{MMC} \quad (4)$$

Donde: E es la estacionalidad; Y es el dato observado; y MMC es la media móvil centrado de 12 períodos. Los componentes Cíclicos e Irregulares se determinaron a partir de la relación entre el valor observado, el valor de tendencia y el valor del índice estacional, encontrado en el paso anterior. En el modelo aditivo, el factor estacional mensual y el valor de tendencia se restan de los datos originales. En el modelo multiplicativo, es la división entre datos originales y el producto de la tendencia y el factor estacional.

Modelo aditivo:

$$CI = T - E \quad (5)$$

Modelo Multiplicativo:

$$CI = \frac{Y}{T * E} \quad (6)$$

Donde: CI es la componente Cíclica e Irregular (o aleatoria), T es la tendencia definida por la ecuación de línea, E es el factor estacional mensual. Después de determinar las variables, se aplican nuevamente las medidas de precisión EAM, EQM, EPM y EPAM para verificar qué modelo presentó el menor error entre los datos pronosticados y los datos originales. Después de seleccionar el modelo de datos (aditivo o multiplicativo), es posible recomponer la serie temporal y pronosticar datos futuros. En cuanto a las anomalías de precipitación, se aplicó el Índice Estandarizado de Sequías Pluviométricas (IESP), desarrollado por Pita Lopez (2001a), que considera que el índice estandarizado acumulado de desviaciones de precipitación (anomalías) en relación con las medianas mensuales. Como se mencionó, la anomalía de la precipitación mensual se refiere con la desviación del valor de precipitación mensual de cada mes con relación a la mediana de ese mes en la serie histórica, y el resultado se puede obtener aplicando la ecuación 7.

$$AP_i = P_i - P_{MED} \quad (7)$$

Donde:

AP_i es la anomalía pluviométrica del mes i ; P_i es la precipitación total del mes i ; P_{MED} es la mediana de la precipitación del mes i a lo largo de la serie histórica.

En el siguiente paso, se acumulan las anomalías de precipitación (positivas o negativas) y, cuando ocurre una anomalía positiva, se caracteriza un periodo de excedente de precipitación, que se

interrumpirá cuando aparezca una anomalía negativa, tras un periodo de déficit de precipitación. Así, cuanto mayor sea el acúmulo de las desviaciones, positivas o negativas en relación con la mediana, más intensos van a ser los periodos de déficit o superávit. Durante los meses en que la anomalía es igual a 0, no hay inversión de periodos secos/húmedos, ver ecuación 8:

$$APA_i = \sum AP_i \quad (8)$$

En el siguiente paso, se estandarizan los valores acumulados de anomalías, obteniendo el puntaje estandarizado:

$$IESP_i = \left(\frac{APA_i - \left(\frac{\sum APA}{N} \right)}{APA_{iS}} \right) \quad (9)$$

Donde: $IESP_i$ es el Índice Estandarizado de Sequía en el mes i ; APA_i – valor de la anomalía acumulada en el mes i ; APA_{iS} – desviación estándar de los valores de anomalía acumulada. Con base en los valores mensuales del $IESP$, Pita (2001b) definió clases de sequías para el análisis de los resultados, que van desde ausencia de sequía hasta sequías excepcionales. Sin embargo, como el mencionado índice clasifica tanto los periodos secos como húmedos, aquí se propone una adaptación de las escalas de clasificación, ver tabla 1.

Cuadro 1: Clasificación mensual del Índice Estandarizado de Sequías Pluviométricas (IESP).

Valores IESP	Clasificación
≥ 2.3	Excedente Extremo de Precipitación (EEp)
2.3 a 1.7	Excedente Severo de Precipitación (ESp)
1.7 a 1.0	Excedente Moderado de Precipitación (EMp)
1.0 a 0.0	Normal Húmedo (NH)
0.0 a -1.0	Normal Seco (NS)
-1.0 a -1.7	Déficit Moderado de Precipitación (DMp)
-1.7 a -2.3	Déficit Severo de Precipitación (DSp)
≤ -2.3	Déficit Extremo de Precipitación (DEp)

Es importante señalar que el cálculo considera la desviación de la anomalía con relación a la mediana de los valores de precipitación mensual y, por lo tanto, la clasificación se refiere a la intensidad de esta desviación. Por tanto, exceso de humedad o sequía no implica que el lugar esté seco o húmedo. El índice es adimensional.

3. Resultados

3.1 Ubicación del área de estudio

El municipio de Carmo do Paranaíba está ubicado en la mesorregión Noreste del departamento de Minas Gerais, entre las coordenadas 18°38' y 19° 5' de latitud Sur y 45°51' y 46°24' de longitud Oeste. Tiene aproximadamente 1.308 km² y una población estimada al final de 2021 de

30339 habitantes (IBGE, 2022). El clima es Cwa (subtropical húmedo), con veranos calurosos e inviernos secos, según la clasificación climática de Köppen (ÁLVARES et al., 2013). La Figura 1 muestra el mapa de ubicación del municipio de Carmo do Paranaíba/MG.

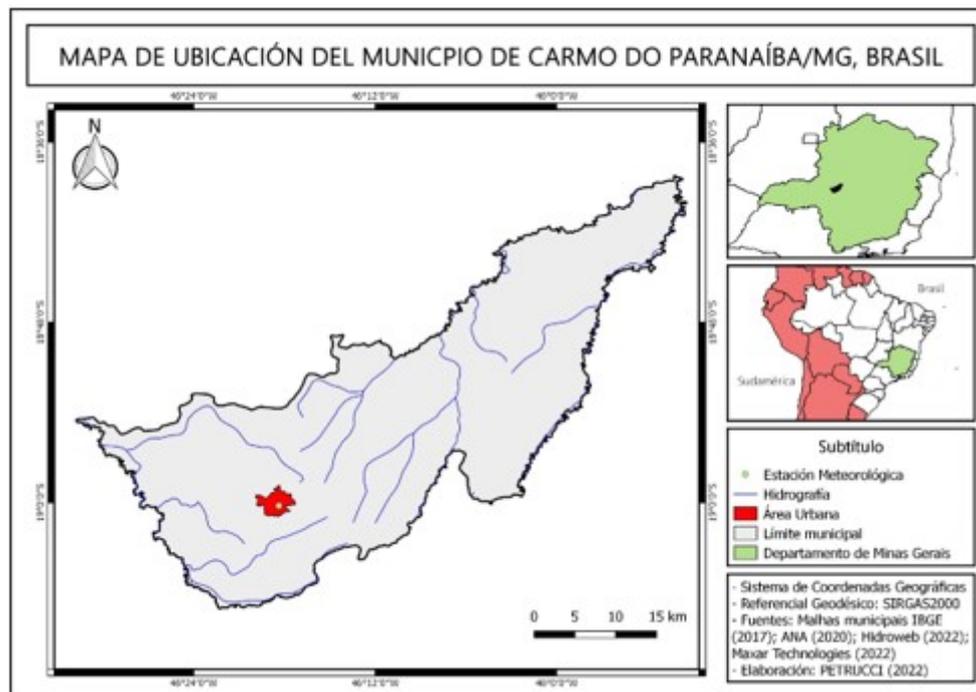


Figura 1: Mapa de ubicación del municipio de Carmo do Paranaíba-MG, con destaque para el área urbana y estación pluviométrica.

3.2 Ubicación del área de estudio

La serie temporal de la precipitación anual de Carmo do Paranaíba/MG está representada en la figura 2 y los parámetros estadísticos en la tabla 1:

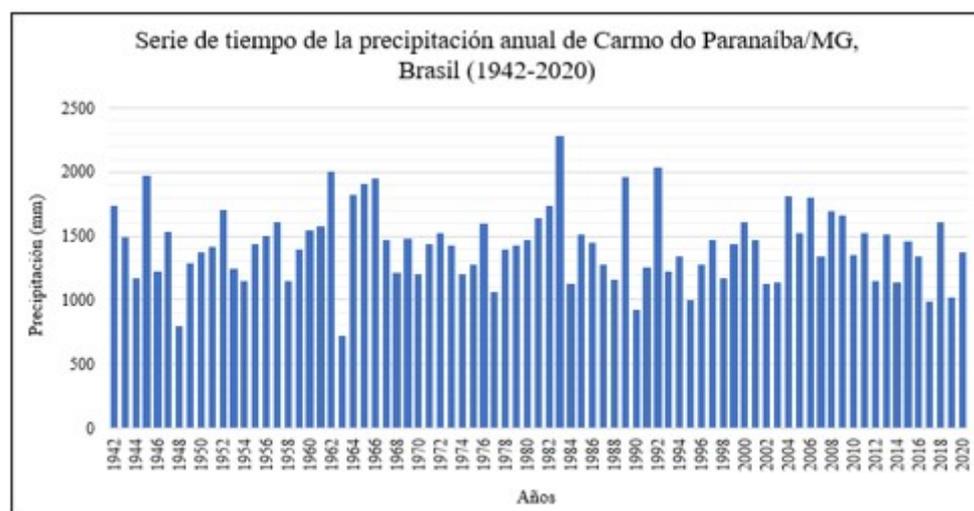


Figura 2: Serie temporal de la precipitación anual de Carmo do Paranaíba/MG, Brasil (1942-2020) pluviométrica.

Tabla 1: Estadística básica de los datos de precipitación anual del municipio de Carmo do Paranaíba/MG, 1942 a 2020.

N	Mínimo	Media	Máximo	Desviación Estándar	Varianza
79	719,3	1.428,4	2.281,1	292,1	85.294,0
Q1	Mediana	Q3	Asimetría	Curtosis	Coefficiente de Variación
1.271,2	1.436,4	1.599,9	0,33	0,39	20,45

De acuerdo con la figura 2, no es posible percibir un patrón de ocurrencia de acumulaciones anuales de precipitación, con alternancia entre años muy y poco lluviosos. Analizando los resultados de la tabla 1, la media es 1428.4 mm, con una desviación estándar de 292.1 mm y varianza de 85294. Las mayores precipitaciones anuales ocurrieron en los años de 1983 (2281.1 mm), 1992 (2036.4 mm) y 1962 (2008.7 mm), todas por encima de los 2000 mm anuales. Por otro lado, las precipitaciones más bajas se dieron en los años 1963 (719.3 mm), 1948 (801.2 mm), 1990 (927.2 mm), 2017 (989.6 mm) y 1995 (996.7 mm), todas ellas inferiores a 1000 mm. El coeficiente de variación fue de 20.45 %, lo que significa una dispersión moderada de los datos con relación a su media. El coeficiente de Asimetría indica una distribución simétrica (0.33) y el coeficiente de curtosis indica una distribución platicúrtica (curva más plana que la normal), con un valor de 0.39. Las características de la distribución de la precipitación anual se pueden visualizar por la distribución de frecuencias, representada por la tabla 2 y la figura 3.

Tabla 2: Distribución de frecuencias de la precipitación anual del municipio de Carmo do Paranaíba/MG, Brasil (1942-2020).

Orden	Clases	Frecuencia Absoluta	Frecuencia Abs. Acumulada	Frecuencia Relativa	Frecuencia Rel. Acumulada
1	0 - 1000	5	5	6.3 %	6.3 %
2	1000 - 1200	12	17	15.2 %	21.5 %
3	1200 - 1400	19	36	24.1 %	45.6 %
4	1400 - 1600	24	60	30.4 %	75.9 %
5	1600 - 1800	10	70	12.7 %	88.6 %
6	1800 - 2000	6	76	7.6 %	96.2 %
7	2000 - 2282	3	79	3.8 %	100 %

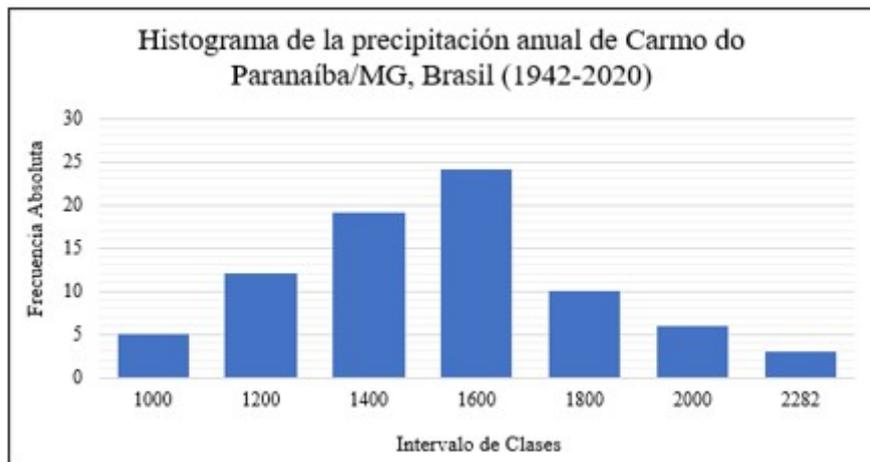


Figura 3: Distribución de frecuencias de la precipitación anual del municipio de Carmo do Paranaíba/MG, Brasil (1942-2020)

Analizando los datos presentados en la tabla 2 y figura 3, la clase de mayor frecuencia absoluta es entre 1400 mm y 1600 mm anuales, en un total de 24 ocurrencias, que representan 30.4% de todos los registros. Luego, en el intervalo entre 1200 mm y 1400 mm se concentran 19 ocurrencias, que representan 24.1% de todos los registros. La menor frecuencia absoluta está en la clase entre 2000 mm y 2282 mm, en un total de 3 ocurrencias, que representan el 3.8%. La mayor concentración de datos se da en los intervalos centrales entre 1200 mm y 1800 mm, y las menores apariciones en los extremos, tanto inferior como superior, acercándose a una curva normal. La Figura 4 muestra la prueba de normalidad de los datos de precipitación anual de Carmo do Paranaíba/MG, Brasil, de 1942 a 2020, con la hipótesis nula (H_0) de que los datos obedecen a una distribución normal y la hipótesis alternativa (H_1) de que los datos obedecen a otro tipo de distribución.

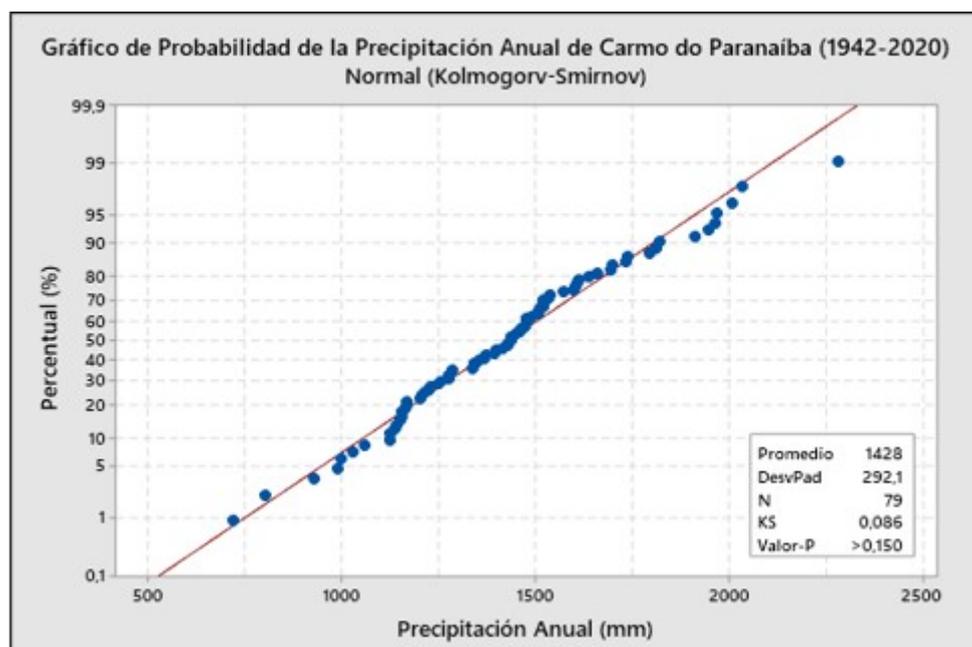


Figura 4: Prueba de normalidad de los datos de precipitación anual de Carmo do Paranaíba/MG, Brasil (1942-2020)

De acuerdo con la figura 4, la prueba de normalidad aplicada fue la prueba de Kolmogorov-Smirnov, con un nivel de significancia de 95 %. El p-valor fue ≤ 0.150 , indicando que los datos obedecen a una distribución normal, aceptándose la hipótesis nula (H_0). Las desviaciones más acentuadas se dan en el rango de extremos, tanto positivos como negativos. En cuanto a la precipitación mensual, se puede verificar que se concentra entre los meses de octubre y marzo, en las temporadas de primavera y verano, lo que representa el 87 % del total anual, propio de climas tropicales. El mes más lluvioso es diciembre, con 277.5 mm, seguido de enero, con 262.6 mm. Por otro lado, los meses de junio, julio y agosto son los meses de menor precipitación, con mínima de 9.5 mm en julio. Ver tabla 3 y figura 5.

Tabla 3: Distribución de frecuencias de la precipitación anual del municipio de Carmo do Paranaíba/MG, Brasil (1942-2020).

Mes	Media Mensual	Mediana
Enero	262,6	239,8
Febrero	189,1	177,0
Marzo	183,2	161,3
Abril	71,0	64,4
Mayo	37,8	24,9
Junio	12,1	3,9
Julio	9,5	0,0
Agosto	12,5	0,2
Septiembre	43,2	36,2
Octubre	126,7	114,5
Noviembre	203,1	197,4
Diciembre	277,5	261,7

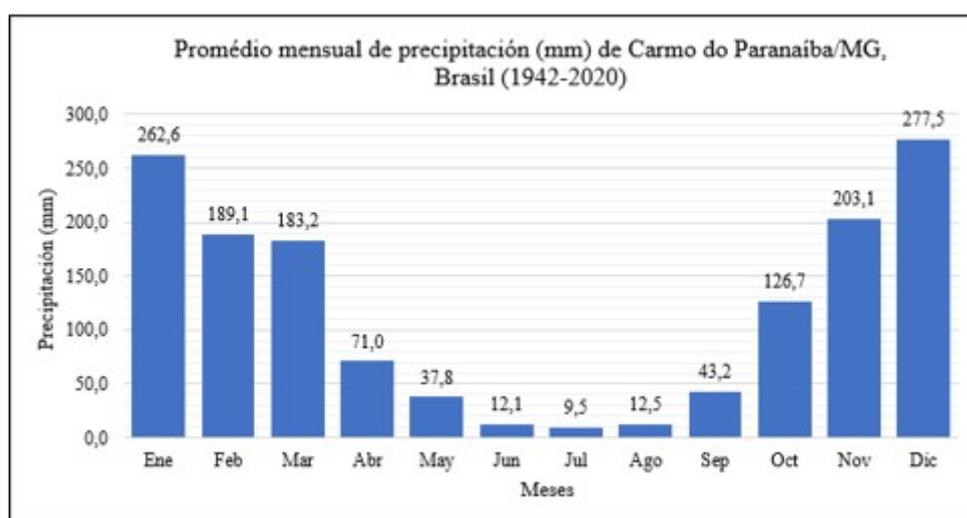


Figura 5: Medias mensuales de la precipitación de Carmo do Paranaíba/MG, Brasil, en el periodo de 1942 hasta 2020

3.3 Descomposición Clásica

Se aplicó el método de descomposición clásica a los valores de precipitación mensual, en el periodo de 1942 hasta 2020, en la estación Carmo do Paranaíba, en el departamento de Minas Gerais, Brasil. El primer paso es la representación gráfica del fenómeno analizado para extraer informaciones sobre series temporales. Así, en la figura 6 se representa la serie de tiempo de la precipitación mensual.

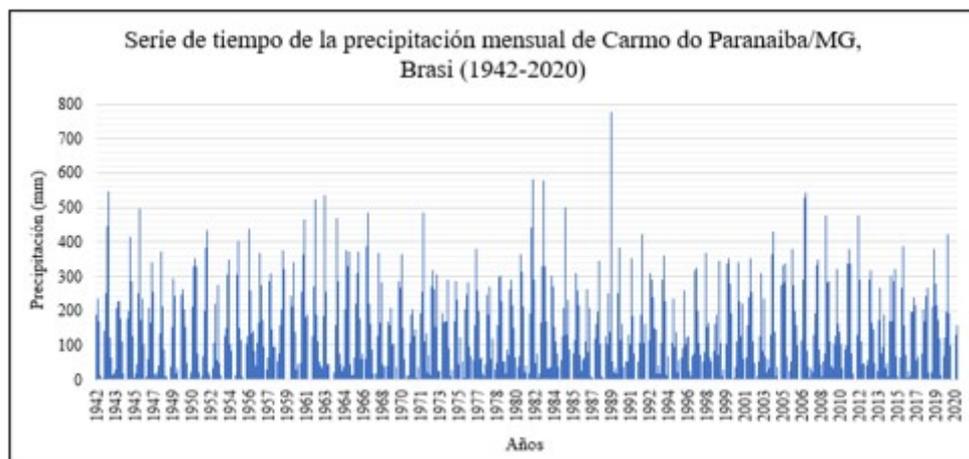


Figura 6: Gráfico de serie de tiempo de la precipitación mensual del municipio de Carmo do Paranaíba/MG, Brasil (1942-2020)

Analizando la figura 6, no es posible comprobar ocurrencia de patrones en la serie temporal. A partir de ahí, se analizaron la variación decenal de las precipitaciones media, máxima y mínima y la distribución de frecuencias, como se puede ver en las figuras 7 y 8.

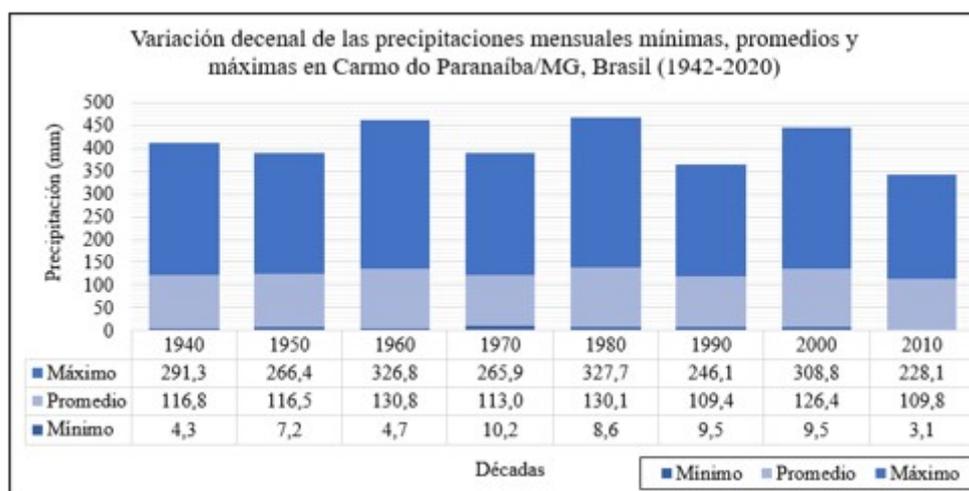


Figura 7: Variación entre décadas de la precipitación mensual de Carmo do Paranaíba/MG, Brasil (1942-2020)

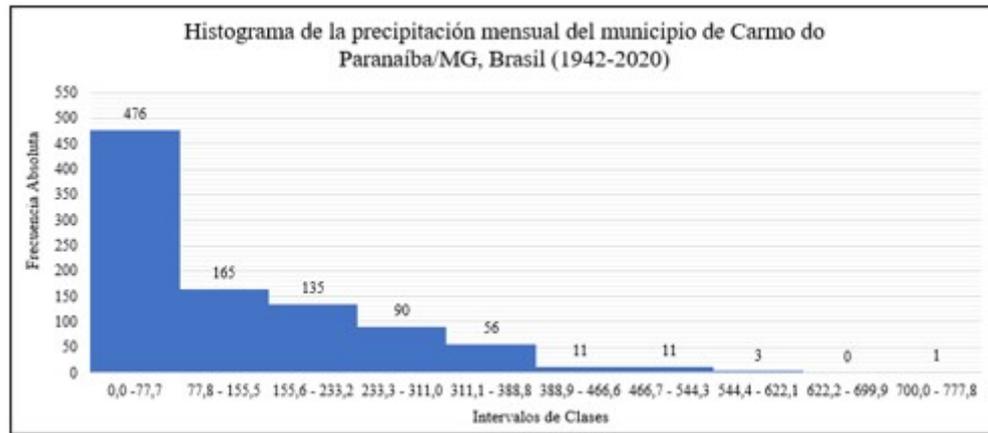


Figura 8: Frecuencia de la precipitación mensual del municipio de Carmo do Paranaíba/MG, Brasil (1942-2020)

De acuerdo con la figura 7, es posible ver que hubo una variación en la precipitación entre las décadas de 1940 y 2010. Durante las décadas de 1960, 1980 y 2000, la precipitación acumulada fue mayor que en las décadas de 1950, 1970, 1990 y 2010. Esta variación es más evidente en la categoría de precipitación máxima, que en las precipitaciones media y mínima. Con esto, se puede inferir que existen picos en los volúmenes de precipitación en décadas alternadas, lo que puede estar relacionado con patrones de teleconexión entre trópicos-tópicos y trópicos-extra-tópicos que pueden resultar en variaciones de precipitación entre décadas, requiriendo mayores investigaciones. A partir del histograma (Figura 8), se observa que las mayores cantidades de eventos de precipitación mensual se dan en el rango entre 0,0 mm y 77,7 mm, concentrando el 50,2% del total. Cuanto mayor es el volumen de precipitación mensual, menor es la frecuencia de ocurrencia, como se observa en los rangos superiores a 388.9 mm, que totalizan 26 ocurrencias, que representa solamente 1.6% del total y, no hay registro de ocurrencia de precipitaciones en el rango entre 622.2 mm e 699.9 mm. La máxima precipitación sucedió en marzo de 1989, cuando llovió 777.7 mm.

3.3.1 Tendencia (T)

Para determinar el mejor modelo que explique la tendencia en los datos de precipitación mensual de la estación Carmo do Paranaíba, se aplicaron los modelos de ecuaciones lineales de regresión: Lineal, Exponencial, Logarítmico, Polinomial (2° grado), Potencia, Media Móvil y Exponencial Suavizante. Después de modelar los datos, se reconstruyó la serie temporal a partir de las ecuaciones generadas. Se aplicaron pruebas de precisión para verificar qué modelo tenía el menor error de predicción. Fueron calculados el error absoluto medio (MEA), el error cuadrático medio (EQM), el error porcentual medio (SEM) y el error porcentual absoluto medio (EPAM). Los resultados están resumidos en la tabla 4.

Tabla 4: Medidas de precisión para los modelos de Tendencia (T).

	EAM	EQM	EPM	EPAM
Lineal	99.8	15142.4	16520.5	16554.3
Exponencial	103.2	22834.7	3756.4	3854.8
Logarítmica	102.5	15802.1	18130.3	18164.4
Polinomial (2º grado)	97.3	14572.3	15856.7	15890.5
Potencia	101.5	22607.9	2845.1	2943.1
Media Móvil	97.9	14553.7	15508.0	15508.0
Alisado Exponencial ($\alpha = 0,9$)	8.2	138.1	341.2	346.3

La tabla 4 muestra los resultados de las medidas de precisión entre los modelos de tendencias probados. El valor más cercano de 0 indica que hubo error de predicción de la tendencia. En ese caso, el método de suavizado exponencial fue el que presentó menor error entre todas las medidas de precisión (EAM, EQM, EPM y EPAM), por tanto, el de mejor ajuste de tendencia. El factor de ajuste (α) utilizado en el Suavizado Exponencial fue de 0.9, como se puede observar en la figura 9, y en la figura 10, la correlación entre los datos originales y modelados sin tendencia.

**Figura 9:** Tendencia de la precipitación mensual de Carmo do Paranaíba/MG, Brasil por el método de suavizado exponencial de precipitación mensual (1942-2020)

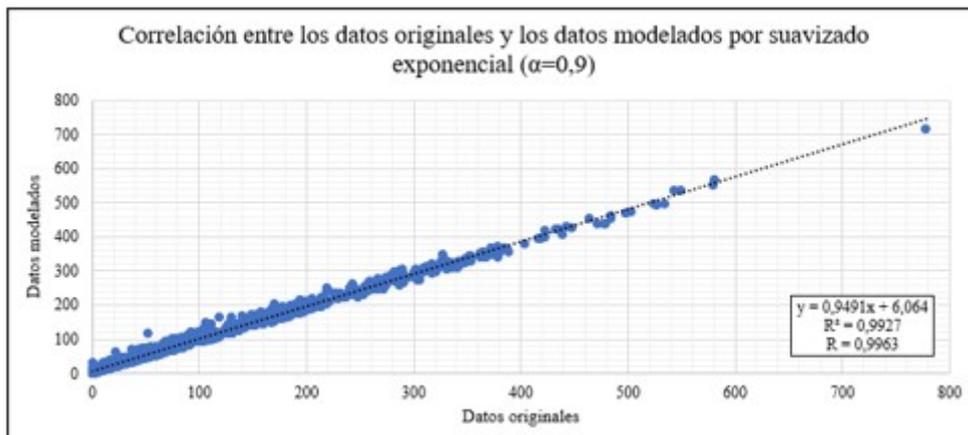


Figura 10: Gráfico de correlación entre los datos originales y los datos modelados.

Para probar que hubo un buen ajuste entre los datos originales y los datos modelados por suavizado exponencial, se realizó una correlación lineal entre las dos series de tiempo, como se puede ver en la figura 10. El coeficiente de determinación (R^2) fue igual a 0.9927 y el coeficiente de correlación (R) fue de 0.9963, lo que corresponde a una fuerte relación en las dos series temporales.

3.3.2 Estacionalidad (E)

En posesión de los valores de tendencia, fue posible encontrar el efecto de la estacionalidad. El índice estacional muestra las fluctuaciones de los valores del mes con relación a los promedios mensuales de la serie, con esto, se tendrá un índice estacional para cada mes. La suma de los doce índices estacionales mensuales debe ser 0 para el modelo aditivo y 12 para el modelo multiplicativo. En el análisis de los resultados, para el modelo aditivo, se consideran fluctuaciones cercanas a 0 hasta un valor entre -5 o +5 sin influencia estacional o baja influencia estacional (ya que 0 en una suma no influye en el resultado) y, los valores mayores de 5 y menores de -5 indican una evidente influencia estacional. En el modelo multiplicativo, se considera que las fluctuaciones cercanas a 1 no tienen influencia estacional o tienen poca influencia estacional (ya que el 1 en una multiplicación es neutralidad). Los resultados de los índices estacionales de los modelos aditivo y multiplicativo se muestran en las figuras 11 y 12.

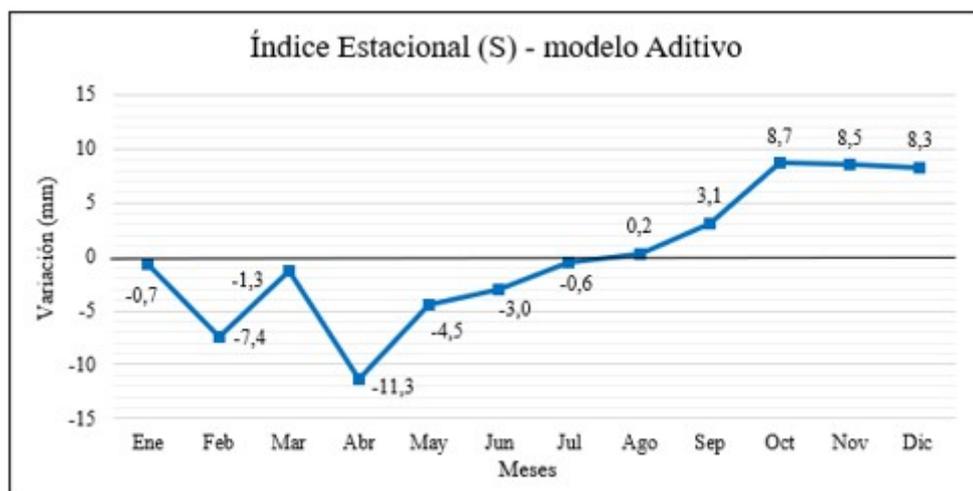


Figura 11: Índice estacional de la precipitación mensual del modelo aditivo.

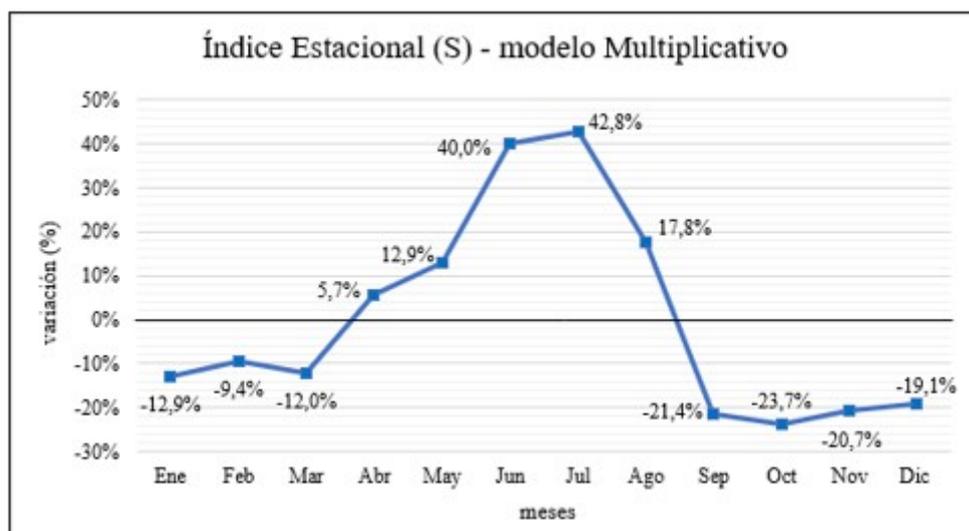


Figura 12: Índice estacional de la precipitación mensual del modelo multiplicativo.

La Figura 11 muestra las desviaciones positivas y negativas en los valores de precipitación mensual de la estación Carmo do Paranaíba/MG, indicando que hay sí influencia de la estacionalidad. Hay un predominio de las variaciones negativas en relación con las variaciones positivas. Los índices positivos significativos (≥ 5.0 mm) ocurrieron entre los meses de octubre a diciembre, lo que significa que la precipitación mensual está por encima de la media de estos meses, con un máximo de 8.7 mm por encima de la media en el mes de noviembre. O sea, a lo largo de los años, la precipitación de noviembre ha estado por encima del promedio en relación con el promedio del propio mes. Los índices negativos se ocurren entre los meses de enero y agosto, indicando una reducción de la precipitación mensual a lo largo de la serie histórica en estos meses. En febrero y abril se presentan las mínimas desviaciones negativas, con una variación de -13.7 mm y -12.0 mm, respectivamente. En la Figura 12, que representa el índice estacional para el modelo multiplicativo, hubo más influencias negativas que positivas. Los índices positivos ocurren entre los meses de abril y agosto, con un máximo de 42.8% en julio y 40.0% en julio, lo que significa que los acumulados mensuales de los meses de junio y julio están aumentando con relación al promedio de esos meses en la serie temporal. Los índices negativos ocurren entre los meses de septiembre y marzo (año hidrológico), con un mínimo en los meses de octubre y septiembre, con una variación negativa de 23.7% y 21.4%, respectivamente. A lo largo del período analizado, el aumento porcentual de la precipitación ocurre durante las estaciones otoño/invierno, que es la estación seca en el municipio de Carmo do Paranaíba y en la región tropical brasileña, y la disminución porcentual de la precipitación ocurre durante las estaciones primavera/verano, que es la temporada de lluvias. El comportamiento de la precipitación es diferente en los modelos aditivo y multiplicativo, sin embargo, en ambos modelos se comprueba influencias negativas de la estacionalidad en la época de las lluvias, entre los meses de enero y abril. Estos resultados son preocupantes, porque es en este periodo que se almacena agua de lluvia para el abastecimiento público, hay mantenimiento de los caudales de los ríos para la producción máxima de energía eléctrica, poniendo en riesgo además la seguridad alimenticia y la degradación de los recursos hídricos en el municipio y en la cuenca al que pertenece.

3.3.3 Componentes Cíclica e Irregular (CI)

Los componentes cíclicos e irregulares se calculan con los valores de los índices de Tendencia (T) y Estacionalidad (S) descubiertos anteriormente. Por el método aditivo se restan los valores de

E y T a los valores de precipitación de la serie original. Por el método multiplicativo, los valores de T y E se multiplican y luego se dividen por los datos originales. Las Figuras 13 y 14 muestran los resultados de las componentes cíclica e irregular en los modelos aditivo y multiplicativo, respectivamente.

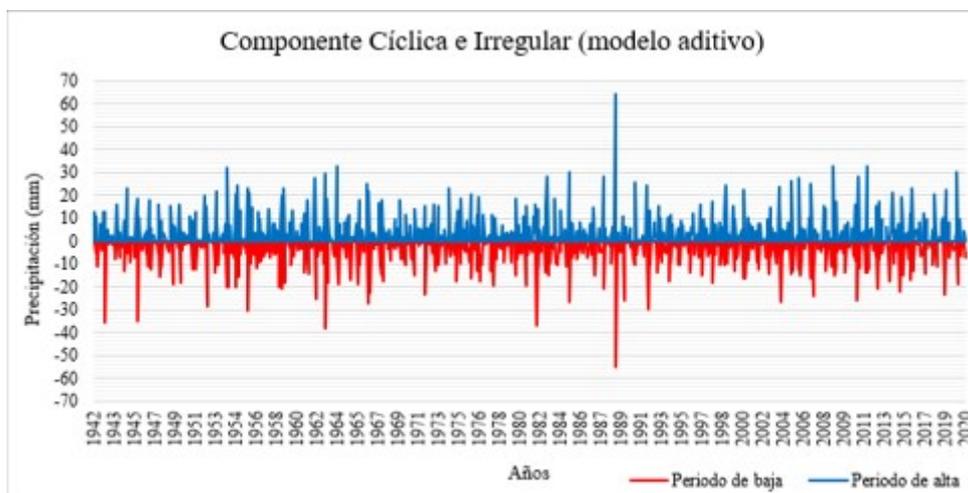


Figura 13: Componentes Cíclicas e Irregulares de la precipitación mensual del modelo aditivo.

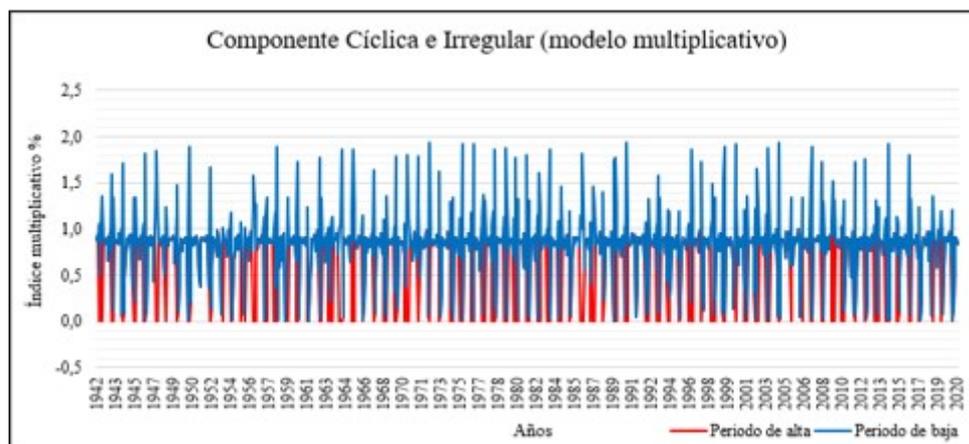


Figura 14: Componentes Cíclicas e Irregulares de la precipitación mensual del modelo multiplicativo.

De acuerdo con las figuras 13 y 14, es posible verificar que hubo una variación significativa en los movimientos irregulares, alternando entre positivos y negativos en meses consecutivos. Para el modelo aditivo, el valor de referencia es 0, y para el modelo multiplicativo, la referencia es 1. En el modelo aditivo (figura 13) los movimientos cíclicos no superaron el período de 12 meses consecutivos, siendo el ciclo más largo de 7 meses, ciclo descendente, entre junio y diciembre de 2019. Las variaciones irregulares fueron más expresivas que los movimientos cíclicos. Los picos de los ciclos alcistas fueron más significativos que los valles de los ciclos bajistas. En ciclos altos, el pico fue de 64,6 mm en 1989. En ciclos bajos, el mínimo fue de 54,9 mm, también registrado en 1989. Las irregularidades son presentes a lo largo de la serie temporal en el modelo aditivo, con alternancia de cortos periodos de alta, seguidos de cortos periodos de baja. La mayor variación positiva ocurrió en 1989, totalizando 6369 %, pasando de 0.6 mm en febrero para 64.6 mm en marzo. La mayor variación negativa también ocurrió en 1989, totalizando -5595 %, pasando de

64.6 mm en marzo para -54.9 mm en abril. La serie terminó en un ciclo de baja. En cuanto al componente irregular, la variación positiva más significativa, pasando de un ciclo de baja a un ciclo de alta, se presentó en 1989 al pasar de 0.0 en mayo a 1.7 en junio, lo que representa un incremento del 17855 %. La variación negativa más significativa, pasando de un ciclo de alta con otro de baja, se presentó en 1959, pasando de 1.0 en marzo a 0.0 en abril. La serie temporal del modelo multiplicativo terminó en un ciclo de alta. Después de realizar los cálculos e identificar los periodos de los movimientos cíclicos, es necesario calcular el Índice Cíclico, para ello, se calcula la mediana de los ciclos de alta y la mediana de los ciclos de baja para la recomposición (tanto en los modelos aditivo y multiplicativo) y, para el pronóstico, se utiliza la mediana del último período de alta o baja. Los valores del índice se resumen en la tabla 5.

Tabla 5: Índices Cíclicos para recomposición y predicción para la serie de tiempo de precipitación mensual de la estación Carmo do Paranaíba/MG, Brasil, 1942 hasta 2020.

		Modelos	
		Aditivo	Multiplicativo
Recomposición	Ciclo de alta	4.78	1.30
	Ciclo de baja	-4.42	0.86
Predicción	Ciclo de alta	4.10	1.21
	Ciclo de baja	-5.17	0.84

Los ciclos son uno de los componentes utilizados en la etapa de la descomposición de las series temporales. Luego, para cada mes se identificó si correspondía a un ciclo alcista o bajista. La identificación de ciclos es fundamental para aplicar estos índices.

3.3.4 Precisión entre los modelos aditivo y multiplicativo

Después de aplicado el método de la descomposición clásica y aislado las variables de tendencia (T), estacionalidad (E), componente cíclica (C) y componente irregular (I), se realizó la recomposición de la serie de tiempo, tanto en el modelo aditivo cuanto en el multiplicativo, empleando los valores de las variables descubiertos previamente. A partir de eso, se calculó los errores para comprobar cuál fue el mejor modelo que explique los datos de precipitación mensual en el municipio de Carmo do Paranaíba/MG, Brasil. La Tabla 6 resume las medidas de precisión entre los modelos.

Tabla 6: Medidas de precisión de las series recompuestas por los modelos aditivo y multiplicativo.

Medidas de Precisión	Modelos	
	Aditivo	Multiplicativo
EAM	5.0	7.6
EQM	58.8	147.9
EPM	-142.39	192.94
EPAM	425.33	199.89

De la tabla 6, se puede observar que el modelo Aditivo presentó los valores de EAM (error absoluto medio), EQM (error cuadrático medio) y EPM (error porcentual medio) más cercanos a cero, lo que significa que representa menores errores de predicción, por lo tanto, es el modelo que mejor se ajusta a los datos. Los resultados muestran una fuerte correlación entre las dos series

temporales, con coeficiente de correlación (r^2) igual a 0.9968 y coeficiente de determinación (r) igual a 0.9984. La correlación entre los datos originales y los datos del modelo se puede ver en la figura 15 y la serie temporal de los datos anuales de precipitación recompuesta en la figura 16.

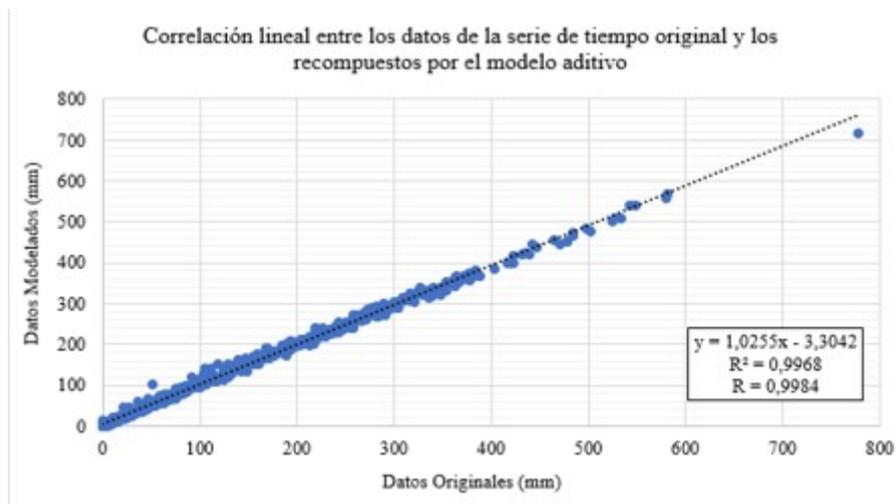


Figura 15: Gráfico de dispersión entre los datos originales de precipitación mensual de Carmo do Paranaíba/MG y la serie de tiempo recompuesta por el modelo aditivo.

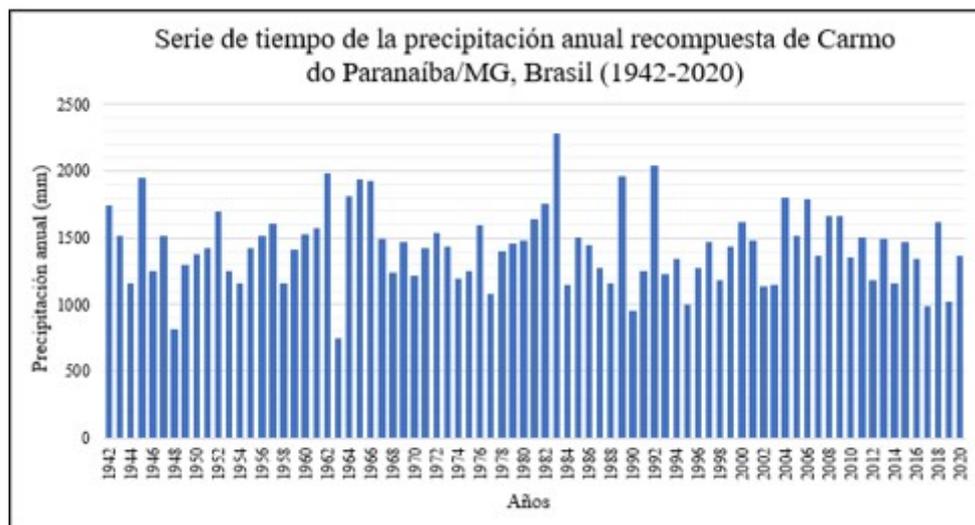


Figura 16: Serie temporal de la precipitación anual recompuesta después de aplicar el método de descomposición clásico y eliminar los efectos de Tendencia (T), Estacionalidad (E) y Componentes Cíclicos e Irregular (CI) de la estación Carmo do Paranaíba/MG, Brasil (1942-2020).

3.4 Índice Estandarizado de Sequías Pluviométricas (IESP)

Para la aplicación del IESP, se utilizaron datos de precipitaciones mensuales del municipio de Carmo do Paranaíba/MG de 1942 a 2020, totalizando 948 registros mensuales. Las distribuciones de frecuencia de las clases del índice IESP se representan en la tabla 7 y en el histograma de la figura 17.

Tabla 7: Distribución de frecuencias das clases del Índice Estandarizado de Sequías Pluviométricas (IESP) para el municipio de Carmo do Paranaíba/MG, entre 1942 y 2020.

Categoría	Intervalo de Clase	Frecuencia Absoluta	Frecuencia Relativa
Déficit Extremo de Precipitación (DEp)	≥ 2.3	16	1.69 %
Déficit Severo de Precipitación (DSp)	2.3 a 1.7	22	2.32 %
Déficit Moderado de Precipitación (DMp)	1.7 a 1.0	46	4.85 %
Normal Seco (NS)	1.0 a 0.0	410	43.25 %
Normal Húmedo (NH)	0.0 a -1.0	332	35.02 %
Excedente Moderado de Precipitación (EMp)	-1.0 a -1.7	81	8.54 %
Excedente Severo de Precipitación (ESp)	-1.7 a -2.3	17	1.79 %
Excedente Extremo de Precipitación (EEp)	≤ -2.3	24	2.53 %
Suma		948	100 %

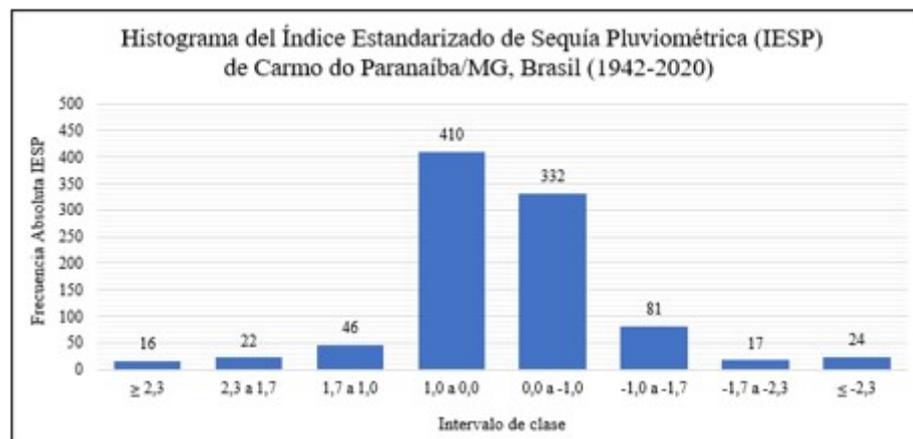


Figura 17: Histograma de distribución del índice de sequía (IESP) aplicado al municipio de Carmo do Paranaíba/MG, de 1942 hasta 2020.

De acuerdo con la tabla 7 y el histograma de la figura 17, se observa que la mayor concentración de datos se encuentra en el intervalo que corresponde a las categorías normal húmedo y seco, entre -1.0 a +1.0), con 742 ocurrencias o 78.27 % del total y, dentro de esta predomina la clase húmeda normal con 410 ocurrencias o 43.25 % de los datos. En las clases de déficit moderado y déficit severo de precipitación, índices entre -1.0 a -1.7 y -1.7 a -2.3, respectivamente, los valores sumados suman 98 ocurrencias, que representan el 10.33 % de los datos, mientras que la clase de déficit extremo, índices ≤ -2.3 , se registró 24 veces a lo largo de la serie histórica, lo que representa el 2.53 % del total de ocurrencias. En las clases de exceso moderado y exceso de precipitación severa, índices entre +1.0 a +1.7 y +1.7 a +2.3, los valores sumados suman 68 registros o 7.17 % de los datos, mientras que la clase de exceso extremo, índices $\geq +2.3$ tienen 16 ocurrencias o 1.69 % de los datos. El comportamiento del índice IESP se puede observar en el gráfico de la figura 18.

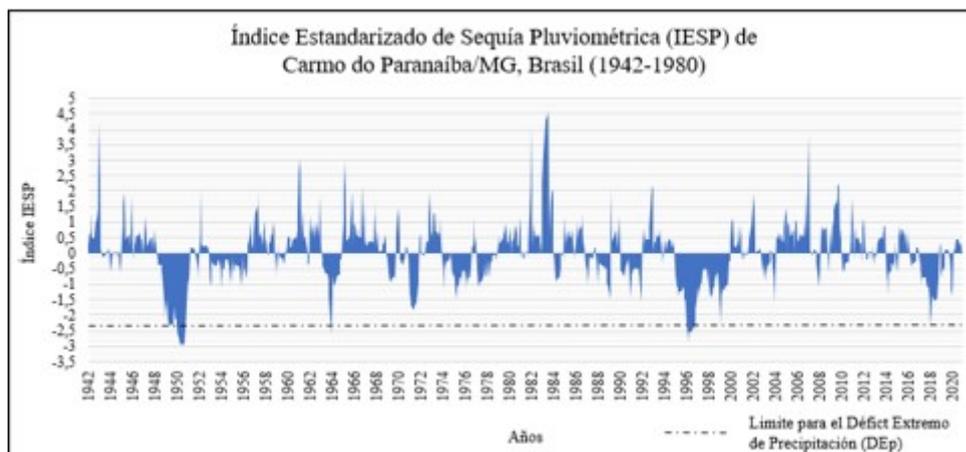


Figura 18: Gráfico do Índice Estandarizado de Sequía Pluviométrica (IESP) aplicado ao município de Carmo do Paranaíba/MG, de 1942 a 2020.

Analizando a figura 18, se observa que as anomalias de excesso superaram as anomalias de déficit precipitação, com 122 e 84 registros, respectivamente. Não foi possível identificar um padrão sobre as ocorrências de DEp na série temporal, com ocorrências ocasionais nos anos 1949, 1950, 1963, 1996, 1999 e 2018. Durante as duas primeiras décadas (1940 e 1950) as anomalias negativas foram mais expressivas que as anomalias positivas. Em esse período, se registraram DEp nos anos de 1949 e 1950, e em 1950 se registrou a maior permanência de eventos DEp da série histórica em meses consecutivos, em um total de 10 meses, entre janeiro e outubro. Além disso, em setembro de 1950 se registrou o valor do índice mais baixo de todo o período analisado, alcançando -3,00353. Com exceção de dezembro de 1963, que foi classificado como DEp (com índice IESP de -2,61647), nas décadas de 1960, 1970 e 1980 as anomalias positivas de precipitação foram mais relevantes, culminando com o maior valor do índice de precipitação de todo o período analisado, de 4,55862 em julho de 1983. Durante a década de 1990, se registraram novamente ocorrências de DEp, em 1996 e 1999. Em 1996, houve oito episódios de DEp, dos quais, em sete meses consecutivos, entre fevereiro e agosto, se considerou a segunda maior sequência de déficit extremo de precipitação do período analisado. Em 1999 só houve uma ocorrência, em fevereiro. Durante a década de 2000, as variações positivas de precipitação foram maiores que as variações negativas, sem registro de DEp, só déficit de precipitação moderado (DMp), no intervalo entre -1,0 a -1,7. Na década de 2010, houve ocorrências tanto de anomalias positivas quanto de anomalias negativas, no entanto, os períodos de superávit não foram tão abundantes como nas décadas anteriores, pois não houve ocorrência de Excesso de Precipitação Extrema (EEp), só Excesso de Precipitação Moderado (EMp). Em relação aos déficits, só houve uma ocorrência de DEp em janeiro de 2018, onde se registrou um índice de -2,31441. Na tabela 8, se resume as informações sobre as ocorrências mensais de DEp no município de Carmo do Paranaíba/MG, período entre 1942 até 2020, sobre as sequências consecutivas mais longas e os registros de cada ano (destacados em cinza).

Tabla 8: Síntesis de las ocurrencias de DEp en el municipio de Carmo do Paranaíba/MG, de 1942 hasta 2020.

Mes/Año	1949	1950	1963	1996	1999	2018
Enero		X				X
Febrero		X		X	X	
Marzo		X		X		
Abril	X	X		X		
Mayo	X	X		X		
Junio		X		X		
Julio		X		X		
Agosto		X		X		
Septiembre	X	X				
Octubre		X		X		
Noviembre						
Diciembre			X			
Secuencia	2 meses	10 meses	1 mes	7 meses	1 mes	1 mes
Mínimo	-2,48159	-3,00353	-2,61647	-2,88509	-2,38752	-2,31441

4. Conclusiones

El clima, considerado como uno de los componentes del sistema ambiental, ejerce una gran influencia sobre la vida en el planeta. En las regiones tropicales, la temperatura es alta durante todo el año y la precipitación es el elemento climático con mayor variabilidad, la cual se concentra en las temporadas de primavera/verano y, durante las temporadas de otoño/invierno, se presenta una disminución brusca de las precipitaciones. Entonces, cuando da ocurrencia de fenómenos climáticos extremos que puedan causar reducción en la cantidad de precipitación durante la estación lluviosa o demorar el inicio de las lluvias o anticipar el fin de este periodo, puede generar graves consecuencias para el funcionamiento y planificación de las actividades humanas, energéticas, productivas, sociales, entre otras. Debido a la importancia de las precipitaciones, el análisis de las series temporales de precipitación es de fundamental importancia para que podamos entender cómo ocurrieron los eventos en el pasado para entender cómo será este comportamiento en el futuro. Los métodos utilizados en este trabajo, tanto la descomposición clásica como el IESP, fueron satisfactorios y lograron cumplir con los objetivos propuestos. Respecto a la descomposición clásica, el modelo aditivo fue el que mejor se ajustó a los datos, con el menor error. En cuanto a la tendencia, el ajuste exponencial con $\alpha = 0,9$ fue el que mejor mostró adherencia a los datos de precipitación mensual, verificando todas las medidas de precisión con menores errores en relación con las demás. La línea de tendencia tiene una ligera pendiente negativa (coeficiente angular), lo que significa una pequeña variación alrededor del promedio anual de precipitaciones, evidenciando una reducción significativa en los volúmenes anuales de lluvia. Fue notable el efecto de la estacionalidad, que mostró una reducción de la precipitación acumulada en el primer semestre y un aumento de la precipitación en el segundo semestre. Las variaciones negativas en los meses de enero a marzo indican una reducción en la cantidad de precipitación en la época lluviosa (verano) y, en el mes de abril, que comprende la época otoñal, que representa una época de transición entre los periodos lluviosos y poco lluvioso, significa que hay un acortamiento de la temporada de lluvias en el municipio de Carmo do Paranaíba, estado de Minas Gerais. En cuanto a los movimientos cíclicos, determinados por el modelo aditivo, no fue posible identificar un patrón definido de ocurrencias entre los ciclos altos y los ciclos bajos.

Sin embargo, comparando el número de ciclos bajos/altos entre décadas, en la última década

(entre 2010 y 2020), se registró la mayor concentración de ciclos bajos de toda la serie histórica analizada, en un total de 76 ciclos, frente a 64 ciclos bajos que ocurrió en los años 50/60. Por lo demás, en la década de 2010 se presentó la menor frecuencia de ocurrencia de ciclos altos, en un total de 56, la misma cantidad encontrada en las décadas de 1950/1960. Las mayores variaciones de las componentes irregulares, por el método aditivo, ocurrieron durante los meses de diciembre a abril, período de mayor precipitación en las regiones tropicales. Sin embargo, las variaciones más expresivas, tanto positivas como negativas, ocurrieron ambas en 1989, mostrando que las precipitaciones en ese año fueron más volátiles que en décadas más recientes. La serie histórica terminó en un período bajo. Considerando que existe una ligera reducción de la precipitación anual, corroborada por el análisis de tendencia y una fuerte reducción de la precipitación estacional (verano), se puede inferir que la precipitación se mantiene más o menos constante a lo largo de los años, sin embargo, tiende a ser concentrada en los meses estrictamente estivales (diciembre, enero, febrero y marzo), con un brusco descenso de las precipitaciones en la estación otoñal, estación de transición en la que se siguen produciendo lluvias, pero con menor frecuencia y volumen. En cuanto a las anomalías de precipitación, obtenidas por el método IESP, en general, hubo un predominio de las anomalías de precipitación positivas, en detrimento de las anomalías negativas. Los déficits extremos de precipitación (DEp) ocurrieron en 24 meses de la serie histórica, con énfasis en las ocurrencias entre los años 1949/1950 y el año 1996, que también corresponden a la mayor permanencia de eventos DEp en meses consecutivos. En el año 1950, las secuencias DEp comienzan precisamente en el mes de enero, uno de los meses de mayor precipitación en Carmo do Paranaíba/MG, permaneciendo así hasta la llegada de la primavera, en septiembre/octubre. En 1996, DEp comenzó en marzo, el final de la temporada de verano y el comienzo del otoño. En los períodos mencionados, hubo actuación de eventos de La Niña, lo que puede significar la influencia de las teleconexiones (directa o indirectamente) en la climatología de las lluvias en el estado de Minas Gerais, especialmente en Carmo do Paranaíba. De lo anterior, para futuros trabajos, se sugiere analizar la dinámica atmosférica que propició la ocurrencia de estos déficits de precipitación en la región, verificar el número de días con y sin lluvia, para extraer información sobre el adelanto/retraso de la estación lluviosa y concentración de precipitación en pocos eventos o días, así como analizar la frecuencia de ocurrencia de eventos extremos de lluvia, verificando si tienen una tendencia creciente.

Referencias bibliográficas

Agência Nacional de Águas (2022): Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH), Portal Hidroweb. Disponible en: <https://www.snirh.gov.br/hidroweb/serieshistoricas>.

Alvares CA, Stape JL, Sentelhas PC, Moraes-Gonçalves JL, Sparovek G (2013): Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, 22:711-728.

American Meteorological Society (2003): Meteorological Drought. *Bull. Amer. Met. Soc.*, 85. Disponible en: <https://www.ametsoc.org/index.cfm/ams/about-ams/ams-statements/archive-statements-of-the-ams/meteorological-drought/>.

Ayoade JO (2006): Introdução à climatologia para os trópicos. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, pp. 332.

Bayer DM, Castro NMR, Bayer FM (2012): Modelagem e previsão de vazões médias mensais do rio Potiribu utilizando modelos de séries temporais. *RBRH - Revista Brasileira de Recursos*

Hídricos, 17:229-239.

Bayer FM, Souza AM (2010): Wavelets e modelos tradicionais de previsão: um estudo comparativo. *Revista Brasileira de Biometria*, 28:40-61.

Binda AL, Verdum R (2020): Estiagens, secas e os processos de arenização na Bacia Hidrográfica do Arroio Miracatu, sudoeste do estado do Rio Grande do Sul. *Geotextos*, 16:131-150.

Bowerman BL, O'Connell RT, Koehler AN (2007): Pronósticos, series de tiempo y regrsión: un enfoque aplicado. México: Cengage Learning ed.

Campos JNB (1997). Vulnerabilidade do Semi-Árido às secas sob o ponto de vista dos recursos hídricos. In: PROJETO ARIDAS_RH SEPLAN/PR, Brasília-DF, pp. 262-298.

Campos JNB, Studart TMC (2001): Secas no Nordeste do Brasil: origens, causas e soluções. Anales del 4^o Inter-american dialogue on water management, Foz do Iguaçu, Associação Brasileira de Recursos Hídricos, pp. 1-10.

Dias MAFS, Silva MGAJ (2009): Para entender Tempo e Clima. In: Tempo e Clima no Brasil (Cavalcanti IFA et al.). São Paulo: Oficina de Textos, pp. 15-22.

Ehlers, RS (2022) Análise de séries temporais. 5 ed. Departamento de Estadística, UFPR. Disponible en: <http://www.each.usp.br/rvicente/AnaliseDeSeriesTemporais.pdf>.

Faria EL. et al. (2008): Previsão de Séries Temporais utilizando Métodos Estatísticos. Rio de Janeiro: CBPF. Disponible en: http://cbpfindex.cbpf.br/publication_pdfs/NT00308.2011_01_04_11_12_17.pdf.

Fernandes DS et al. (2009): Índices para a quantificação da seca. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão. Disponible en: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/663874/1/doc244.pdf>.

Hernandez CAS, Pedraza LFM, Diaz AE (2008): Aplicaciones de las series de tiempo en modelo de tráfico para una red de datos. *Scientia Et Technica*, 14:31-36. Disponible en: <https://revistas.utp.edu.co/index.php/revistaciencia/article/view/3697/2087>.

Hidroweb – Séries Históricas. Agência Nacional de Águas (ANA), Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH). Disponible en: <https://www.snirh.gov.br/hidroweb/serieshistoricas>.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. IBGE cidades. Disponible en: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/mg/carmo-do-paranaiba/panorama>.

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE (2009): Boletim do Grupo de Pesquisas em Mu-

danças Climáticas-GPMC-. 8:[s. P.]. Disponível em: http://mudancasclimaticas.cptec.inpe.br/~rmclima/pdfs/newsletters/Boletim_No8_Port.pdf. (Edição Especial).

IPCC - Climate Change: Synthesis Report (2001): A Contribution of Working Groups I, II, and III to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Watson, R.T. and the Core Writing Team (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, and New York, NY, USA, pp. 398.

IPCC – Climate Change: Summary for Policymakers (2007): Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [B. Metz, O.R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave, L.A. Meyer (eds)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

IPCC - Climate Change: Synthesis Report (2014): Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 151.

IPCC – Climate Change: Summary for Policymakers (2021): The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V, P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. In Press.

Kayano MT, Andreoli RV (2009): Clima da região Nordeste do Brasil. In: Tempo e Clima no Brasil (Cavalcanti IFA et al.). São Paulo: Oficina de Textos, pp. 213-234.

Liebmann B, Jones C, Carvalho LMV (2001): Interannual Variability of Daily Extreme Precipitation Events in the State of São Paulo, Brazil. *Journal of Climate*, 14:208-18.

Molion LCB, Bernardo SO (2002): Uma revisão da dinâmica das chuvas no nordeste brasileiro. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 17:1-10.

Morettin PA, Toloí CMC (1981): Modelos para previsão de séries temporais. Rio de Janeiro: IMPA. Disponível em: https://impa.br/wp-content/uploads/2017/04/13-CBM_81.01.pdf.

Nobre P (1994): Variabilidade Climática sobre o Atlântico Tropical. Parte II: Estudo de Casos. Anales del 8º Congresso Brasileiro de Meteorologia, Belo Horizonte/MG, pp. 10-14.

Oliveira LA, Maciel SA, Queiroz LL (2014): Avaliação do Índice Padronizado de Estiagem Pluviométrica (IESP) aplicado ao município de Patos de Minas/MG. Anales del 10º Simpósio Brasileiro de Climatologia Geografia, Curitiba, Associação Brasileira de Climatologia, pp. 1848-1859.

Penalba OC, Rivera JA (2015): Comparación de seis índices para el monitoreo de sequías meteorológicas en el sur de sudamérica. *Meteorológica*, 40:33-57.

Petrucci E, Oliveira LA (2018): Índice Estandarizado de Seca Pluviométrica (IESP) aplicado na mesorregião Sul Cearense (CE) – Brasil. Anales del 13^o Simpósio Brasileiro de Climatologia Geográfica, Juiz de Fora/MG, Associação Brasileira de Climatologia, pp. 2141-2150.

Petrucci E, Oliveira LA, Silva RC (2022): Secas pluviométricas no estado de Minas Gerais, de 1980 a 2017. *RA'EGA*, 54:129-153.

Pita López MF (2001a): Un nouvel indice de sécheresse pour les domaines méditerranéens: Application au bassin du Guadalquivir (sudo-uest de l'Espagne). Nice, 13:225-234 (L'association Internationale de Climatologie).

Silva LRT, Castro LP, Oliveira LA (2012): Análise das anomalias pluviométricas na cidade de Ituiutaba/MG, período de 1980 a 2010. Anales del 10^o Simpósio Brasileiro de Climatologia Geográfica, Manaus/AM, Associação Brasileira de Climatologia, pp. 506-514. Disponible en: www.encurtador.com.br/AR156.

Silva DF, Galvêncio JD, Nóbrega RS (2011): Influência da variabilidade climática e da associação de fenômenos climáticos sobre sub-bacias do rio São Francisco. *Revista Brasileira de Ciências Ambientais*, 19:46-56.

Silva PCG et al. (2010): Caracterização do semiárido brasileiro: fatores naturais e humanos. In: Semiárido brasileiro: pesquisa, desenvolvimento e inovação (Sá, IB, Silva PCG, Ed). Petrolina: Embrapa Semiárido, 2010, pp. 17-48.

Silva MIS, Guimarães EC, Tavares M (2008): Previsão da temperatura média mensal de Uberlândia, MG, com modelos de séries temporais. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 12:480-485. Valiente OM (2001): Sequía: definiciones, tipologías y métodos de cuantificación. *Investigaciones Geográficas*, 26:59-80.

Viñals MP (2009): Series temporales. Barcelona: Universidad Politècnica de Catalunya.

Zargar et al. (2011): A review of droughts indices. *Environmental Reviews*, 19:333-349.