



SEQUÍA METEOROLÓGICA FUTURA BAJO ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO EN LA CUENCA CHINCHIPE

FUTURE METEOROLOGICAL DROUGHT UNDER CLIMATE CHANGE SCENARIOS IN THE CHINCHIPE BASIN

Sanderson Narcizo Campos-Ruiz^{1*}; Julio Roger Chico Ruíz²; Joseph Campos-Ruiz³; Azucena Chávez Collantes³; Elfer García Carrasco⁴; Franciss Miguel Tapia Jiménez⁴

¹ Universidad Nacional de Cajamarca, Cajamarca, Perú.

² Laboratorio de Fisiología y Cultivo Celulares. Facultad de Ciencias Biológicas. Universidad Nacional de Trujillo – Perú

³ Instituto Nacional de Innovación Agraria, Cajamarca, Perú.

⁴ Facultad de Ingeniería Forestal y Ambiental, Universidad Nacional de Jaén.

Sanderson Narcizo Campos Ruiz  <https://orcid.org/0000-0001-9308-1767>
Julio Roger Chico Ruíz  <https://orcid.org/0000-0002-7287-321X>
Joseph Campos Ruiz  <https://orcid.org/0000-0002-6994-4670>
Azucena Chávez Collantes  <https://orcid.org/0000-0002-4782-1274>
Elfer García Carrasco  <https://orcid.org/0009-0007-2483-0200>
Franciss Miguel Tapia Jiménez  <https://orcid.org/0000-0001-5278-1951>

Artículo Original

Recibido: 27 de febrero de 2024
Aceptado: 02 de mayo de 2024

Resumen

La investigación evaluó la intensidad y frecuencia de sequías en la cuenca Chinchipe para el futuro cercano (2030–2059) y lejano (2070–2099). Se aplicó downscaling estadístico con quantile mapping a seis modelos de circulación global (CMIP5) usando datos de estaciones meteorológicas locales. Los indicadores estadísticos (Nash-Sutcliffe, error cuadrático medio, correlación de Pearson y coeficiente de determinación) permitieron seleccionar el modelo con mayor ajuste. La sequía se analizó mediante el índice de precipitación estandarizada (SPI) bajo escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5. El modelo HADGEM2-AO reprodujo mejor la precipitación registrada y proyecta eventos de sequía extrema y severa en ambos periodos, con aumento en su frecuencia e intensidad. Estos resultados evidencian riesgos hídricos futuros para la cuenca, reforzando la necesidad de estrategias de adaptación al cambio climático orientadas a la gestión sostenible del recurso hídrico y la reducción de vulnerabilidades locales.

Palabras clave: Modelos de circulación general, downscaling estadístico, escenarios de cambio climático, índice de sequía estandarizada, tendencia.

Abstract

The research evaluated the intensity and frequency of droughts in the Chinchipe basin for the near future (2030–2059) and distant future (2070–2099). Statistical downscaling with quantile mapping was applied to six global circulation models (CMIP5) using data from local weather stations. Statistical indicators (Nash-Sutcliffe, root mean square error, Pearson correlation, and coefficient of determination) were used to select the best-fitting model. Drought was analyzed using the standardized precipitation index (SPI) under RCP 4.5 and RCP 8.5 scenarios. The HADGEM2-AO model best reproduced the recorded precipitation and projects extreme and severe drought events in both periods, with an increase in their frequency and intensity. These results highlight future water risks for the basin, reinforcing the need for climate change adaptation strategies aimed at sustainable water resource management and the reduction of local vulnerabilities..

Keywords: General circulation models, statistical downscaling, climate change scenarios, standardized drought index, trend.

*Autor para correspondencia: E. mail: nachocamp9@gmail.com

DOI: <http://dx.doi.org/10.17268/rebiol.2024.44.01.09>

Citar como: Campos-Ruiz, S. N., Chico Ruíz, J. R., Campos-Ruiz, J., Chávez Collantes, A., García Carrasco, E., & Tapia Jiménez, F. M. (2024). Sequía meteorológica futura bajo escenarios de cambio climático en la cuenca Chinchipe. *REBIOL*, 42(1), 89–97.

1. Introducción

Las sequías son fenómenos naturales que se caracterizan por una precipitación por debajo del promedio durante un largo periodo de tiempo en un espacio geográfico determinado (Panisset et al, 2018). Los periodos prolongados de sequías afectan la disponibilidad del recurso hídrico para el consumo, la agricultura, ganadería, hidroeléctricas y la industria (Gozzo et al, 2019; Vicente-serrano, 2018). Debido al cambio climático se espera un aumento de la frecuencia y la duración de fenómenos extremos como sequías, tormentas, olas de calor, ciclones. Muchos estudios con proyecciones climáticas indican un mayor riesgo de sequías extremas en diferentes partes del mundo (Silva et al, 2022).

Las sequías son fenómenos complejos y difíciles de cuantificar en el tiempo y espacio, es por ello que para una correcta evaluación de episodios e intensidad de las sequías se utilizan distintos indicadores e índices (Freitas et al., 2023; Vicente-serrano et al., 2018). El índice de precipitación estandarizado (SPI) se caracteriza por su sencillez, debido a que solo requiere de datos de precipitación para determinar el déficit o exceso de lluvia a diferentes escalas de tiempo (Mckee et al., 1993).

En ese contexto, para el estudio de los impactos del cambio climático se utilizan los modelos de circulación global (GCM), estos se basan en el modelado numérico de las propiedades físicas y dinámicas del sistema climático (Meehl et al, 2007). Los GCM representan el clima a escalas superiores a los 100 km, siendo esta una resolución muy gruesa para estudiar el clima a escala local. Por lo tanto, para evaluar de manera confiable los impactos del cambio climático como las sequías, se requiere de una mayor resolución (Florian et al, 2021; Maraun et al, 2010).

Para mejorar la resolución espacial de los GCM se utilizan técnicas de reducción de escala, estos se basan en el supuesto de que el clima a gran escala influye significativamente sobre el clima a escala local, pero sin tener en cuenta el efecto inverso de las escalas locales sobre las escalas globales. De esta manera se logran generar datos que permiten realizar proyecciones locales del cambio climático y sus impactos. Dentro de las principales técnicas tenemos a la reducción de escala estadística, dinámica y la utilización de redes neuronales (Hawkins et al, 2013; Maraun et al, 2010).

La reducción de escala estadística se basa en establecer una relación estadística entre el clima a gran escala y el clima observado a escala local, para posteriormente aplicarlo en proyecciones locales de simulaciones futuras de los GCM, siendo un método más fácil y menos costoso desde el punto de vista computacional (Gebrechorkos et al, 2019).

Este estudio tiene como objetivo determinar los episodios e intensidad de la sequía meteorológica futura bajo escenarios de cambio climático en la cuenca Chinchipe, para ello primero se aplicaron técnicas de reducción de escala estadísticas a diferentes GCM del proyecto CMIP5, luego se cuantificaron las sequías utilizando el índice SPI para los escenarios de cambio climático RCP 4.5 y RCP 8.5, finalmente se evaluaron los episodios e intensidad de las sequías para los periodos 2030 – 2059 y 2070 – 2099.

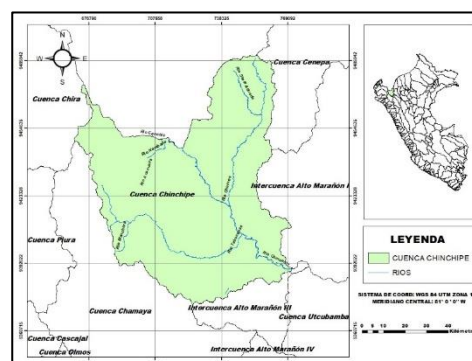
2. Materiales y Métodos

Área de estudio

La cuenca Chinchipe comprende parte del territorio ecuatoriano y peruano, por ello se le considera una cuenca transfronteriza. Su extensión es de 9686 km², de los cuales 6538 km² se encuentran en Perú, específicamente en la zona norte del departamento de Cajamarca. Puntualmente abarca la totalidad de la provincia de San Ignacio y parte de la provincia de Jaén. La cuenca en la parte peruana, es atravesada por el río Chinchipe, este es alimentado por los ríos Chirinos y Tabaconas para unirse finalmente al río Marañón (Ver Figura 01). Presenta una altitud que varía entre los 500 y 3800 metros sobre el nivel del mar (msnm), aproximadamente el 50 % del territorio de la cuenca alcanza altitudes del rango de los 1200 – 2000 msnm. La precipitación total anual (mm/año) se encuentra entre los 800 – 3500 mm/año. La temperatura media mensual de la cuenca alcanza registros dentro del rango de los 22° – 25° C, la temperatura mínima es de 16° C y la temperatura máxima alcanza los 32° C (Llerena, 2010).

Figura 1

Mapa de ubicación de la cuenca Chinchipe



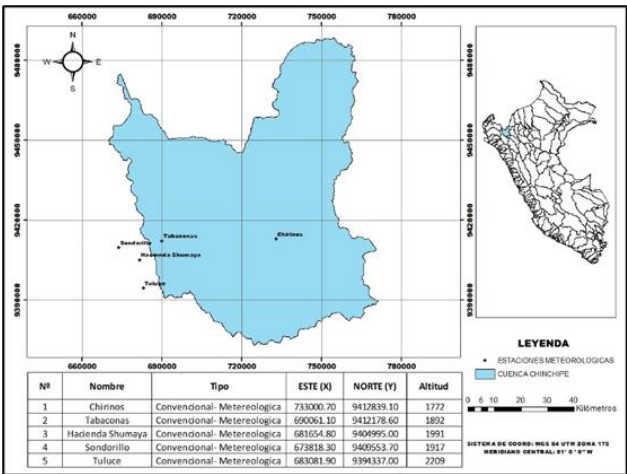
Base de datos

• Precipitación registrada:

La información que se utilizó procedió de la base de datos del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI), correspondiente a 5 estaciones meteorológicas ubicadas dentro y próximas a la cuenca Chinchipe (Ver Figura 2). Las estaciones fueron seleccionadas porque contienen al menos 20 años de datos consecutivos de precipitación (1970 - 2013). Se realizó un análisis exploratorio de datos para maximizar el entendimiento de la información, posteriormente se verificó la consistencia y homogeneidad de los datos mediante un análisis de consistencia. Finalmente se usó el método del vector regional para determinar si las estaciones pertenecían a una misma zona climática bajo un mismo régimen de precipitación.

Figura 2

Mapa de ubicación de las estaciones meteorológicas



• Precipitación modelada:

Para la construcción de los escenarios futuros se utilizaron GCM a partir del inventario del proyecto CMIP5. Se seleccionaron aquellos modelos que mejor modulan el clima de Sudamérica, tomándose como referencia los propuestos por Acuña et al (2019). A partir de los modelos de la Tabla 1, se seleccionaron datos históricos de cada GCM para el periodo 1970 – 2013, como también datos proyectados al futuro cercano (2030 – 2059) y futuro lejano (2070 – 2099) de los escenarios de cambio climático RCP 4.5 y RCP 8.5.

Tabla 1.

Lista de GCM seleccionados

Nº	Modelos	Institución	Resolución atmosférica (longitud x latitud)
1	CCSM4	National center for Atmospheric Research (NCAR-USA)	1,25 x 0,942408
2	HadGem2-AO	National Institute of Meteorological Research/Korea Meteorological Administration (Corea)	1,875 x 1,25
3	HadGem2-ES	Met Office Hadley Centre (Reino Unido)	1,875 x 1,25
4	HadGem2-CC	Met Office Hadley Center	1,88 x 1,24
5	MPI-ESM-LR	Max Plank Institute for Meteorology (Alemania)	1,875 x 1,8496
6	MIROC5	National Institute For Environmental Studies and Japan Agency for Marine- Earth Science and Technology, Japón	1,406 x 1,39

Reducción de escala estadística

Se realizó la reducción de escala estadística de cada uno de los GCMs seleccionados, a partir de la metodología quantile mapping utilizada por Gudmundsson et al (2012) se utilizaron transformaciones estadísticas paramétricas y no paramétricas. Los GCMs producto de las transformaciones paramétricas (P-CCSM4, P-HadGem2-AO, P-HadGem2-AO, P-HadGem2-AO, P-MPI-ESM-LR y P-MIROC5) como también los que provienen de transformaciones no paramétricas (NP-CCSM4, NP-HadGem2-AO, NP-HadGem2-AO, NP-HadGem2-AO, NP-MPI-ESM-LR y NP-MIROC5), proyectan las precipitaciones mensuales ajustadas a las estaciones meteorológicas de la cuenca Chinchipe, bajo los dos escenarios de las Vías de Concentración Representativas RCP 4.5 y 8.5.

Para el análisis de sequía meteorológica y tendencia se eligieron a los modelos que lograron un mayor ajuste con la precipitación registrada de las estaciones meteorológicas. Para lograr esto, se utilizaron los indicadores estadísticos: coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe, error cuadrático medio, coeficiente de correlación de Pearson y coeficiente de determinación.

Sequía meteorológica futura

Para determinar los eventos de sequía bajo los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5 en los periodos futuro cercano (2030 – 2059) y lejano (2070 – 2099), se utilizó el índice de precipitación estandarizada (SPI). El SPI se basa en la probabilidad de precipitación para cualquier escala temporal. Teniendo en cuenta la precipitación observada, la probabilidad de precipitación se transforma en un

índice, que se utiliza en las investigaciones (Svoboda et al., 2012).

Para el cálculo del SPI se tuvo en cuenta la probabilidad de precipitación para una escala temporal de 12 meses y los resultados fueron comparados con el sistema de clasificación de valores de la Tabla 2 utilizado por Mckee et al. (1993, Svoboda et al., 2012). Los periodos de sequía tienen lugar siempre que el SPI sea continuamente negativo y alcance una intensidad de -1,0 o inferior. El periodo de sequía finaliza cuando el SPI alcanza valores positivos.

Tabla 2

Valores del Índice normalizado de precipitación

Índice	Intensidad
2,0 y más	extremadamente húmedo
1,5 a 1,99	muy húmedo
1,0 a 1,49	moderadamente húmedo
-0,99 a 0,99	normal o aproximadamente normal
-1,0 a -1,49	moderadamente seco
-1,5 a -1,99	severamente seco
-2 y menos	extremadamente seco

3. Resultados

Modelos con mayor ajuste logrado

Se utilizaron los indicadores estadísticos: Coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE), error cuadrático medio (RMSE), coeficiente de correlación de Pearson (R) y coeficiente de determinación (R²). Cada GCM ajustado fue evaluado a escala promedio mensual multianual respecto a la precipitación registrada de cada estación meteorológica, como resultado se obtuvo que el modelo NP-HADGEM2 AO logra explicar la precipitación registrada en las estaciones Chirinos, Tabaconas, Tuluca, Sondorillo y Hacienda Shumaya (Tabla 3).

Tabla 3

Indicadores estadísticos de ajuste en torno a cada estación

MODELO	ESTACIÓN	INDICADOR ESTADÍSTICO			
		NSE	R	R ²	RMSE
NP-HADGEM2 AO	CHIRINOS	0.73	0.88	0.78	22.93
	TABACONAS	0.73	0.88	0.78	15.58
	TULUCE	0.83	0.92	0.85	17.01
	SONDORILLO	0.85	0.93	0.86	7.95
	HACIENDA SHUMAYA	0.7	0.89	0.79	22.31

Sequía meteorológica futura bajo escenario RCP 4.5

A partir de la Figura 3, se tiene que el modelo NP-HADGEM2 AO proyecta para la estación Chirinos una ocurrencia de 2 eventos de sequía extrema y 15 de sequía severa para el futuro cercano. En cambio, determinó la ocurrencia de 12 eventos de sequía extrema y 14 de sequía severa para el futuro lejano. Los resultados del SPI para la estación Tabaconas muestran la ocurrencia de 5 eventos de sequía extrema y 17 de sequía severa para el futuro cercano, mientras que para el futuro lejano los eventos de sequía extrema son 16 eventos de sequía extrema y 11 eventos de sequía severa. La estación Tuluca proyecta la ocurrencia de 1 evento de sequía extrema y 12 de sequía severa para el futuro cercano, además proyecta la ocurrencia de 15 eventos de sequía extrema y 10 de sequía severa para el futuro lejano. Así mismo el modelo proyecta para la estación Sondorillo, bajo el escenario de cambio climático RCP 4.5 la ocurrencia de 12 eventos de sequía extrema y 27 de sequía severa para el futuro cercano, bajo el mismo escenario en el futuro lejano la ocurrencia de eventos de sequía extrema y severa es de 19 y 17 respectivamente. Para la estación Hacienda Shumaya, se proyecta la ocurrencia de 5 eventos de sequía extrema y 15 de sequía severa para el futuro cercano, mientras que para el futuro lejano se determinó la ocurrencia de 16 eventos de sequía extrema y 6 de sequía severa.

Figura 3

Eventos e intensidad de sequía bajo escenario RCP 4.5 en las estaciones meteorológicas



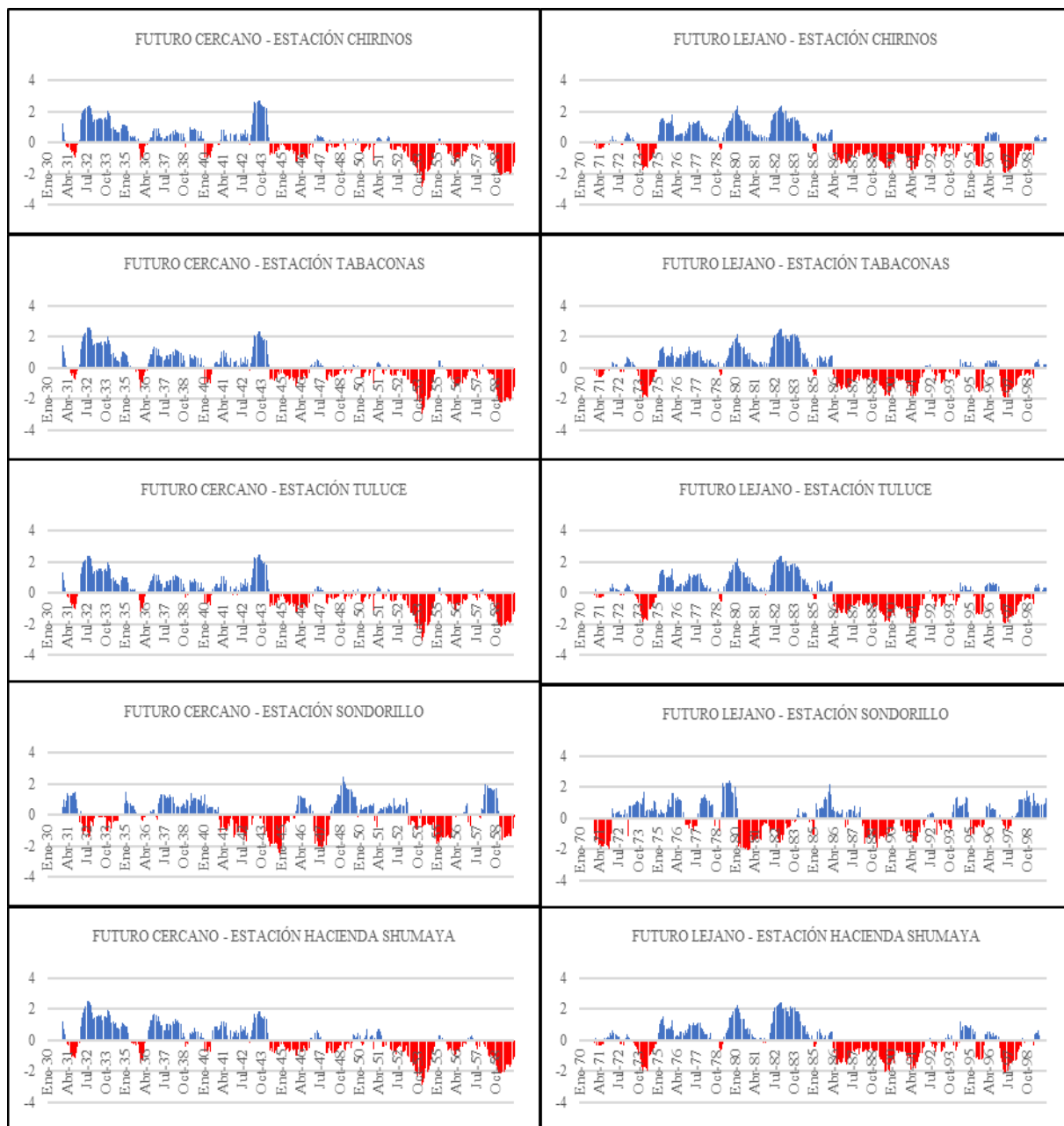
Sequía meteorológica futura bajo escenario RCP 8.5

Según la Figura 4, bajo el escenario de cambio climático RCP 8.5, se proyecta para la estación Chirinos 9 eventos de sequía extrema y 16 eventos de sequía severa para el futuro cercano, también se determinaron 29 eventos de sequía severa en el futuro lejano. Los resultados para la estación Tabaconas muestran la ocurrencia de 16 eventos de sequía extrema y 9 de sequía severa para el futuro cercano, en cambio para el futuro lejano se proyectan 26 eventos de sequía severa. Para la estación Tuluce, el modelo proyecta la ocurrencia de 15 evento de sequía extrema y 11 de sequía severa para el futuro cercano,

mientras que para el futuro lejano determinó la ocurrencia de 1 evento de sequía extrema y 25 de sequía severa. Así mismo se proyecta que la estación Sondorillo, experimentara en el futuro cercano la ocurrencia de 10 eventos de sequía extrema y 21 de sequía severa, para el futuro lejano se determinó la ocurrencia de 4 eventos de sequía extrema y 25 de sequía severa. Para la estación Hacienda Shumaya se proyectan para el futuro cercano la ocurrencia de 14 eventos de sequía extrema y 14 de sequía severa, en cambio para el futuro lejano se proyecta la ocurrencia de 4 eventos de sequía extrema y 22 de sequía severa.

Figura 4

Eventos e intensidad de sequía bajo escenario RCP 8.5 en las estaciones meteorológicas



4. Discusión

Los resultados de la figura 3 demuestran que bajo el escenario de cambio climático RCP 4.5 se proyectan la ocurrencia de un mayor número de eventos de sequías de intensidad severa para el periodo futuro cercano, mientras que los eventos de sequía de intensidad extrema serán más frecuentes para el periodo futuro lejano en cada una de las estaciones evaluadas. Estos resultados guardan relación con los hallazgos de Palomino-Lemus et al. (2017, 2018) en cuyos estudios de proyecciones de cambio climático para la precipitación en América tropical utilizando técnicas de downscaling estadístico a 20 GCM del proyecto CMIP5, encontró una disminución de la precipitación y una mayor frecuencia de periodos secos bajo los escenarios RCP 4.5 Y 8.5 para el periodo 2071 – 2100.

En la figura 4 se observó que bajo el escenario de cambio climático RCP 8.5, las estaciones experimentarían una mayor ocurrencia de eventos de intensidad extrema para el periodo futuro cercano, en cambio para el periodo futuro lejano habrá un mayor número de eventos de sequías de intensidad severa. Morote et al. (2020) manifiestan que la presencia de eventos severos y extremos de sequías reflejan los efectos del cambio climático, los cuales constituyen un riesgo ambiental y una amenaza para la humanidad, debido a que presenta impactos perjudiciales que abarcan aspectos ambientales y socio-económicos.

Basados en los resultados obtenidos se infiere que la cuenca Chinchipe experimentaría un incremento en la frecuencia e intensidad de los periodos secos. Douville et al. (2021) establecen que en el continente americano la disminución de la precipitación se registra principalmente en el sur de América del Norte y América Central, el norte de América del Sur, la cuenca del Amazonas y el suroeste de América. Este patrón espacial concuerda con las regiones en las que se proyecta un aumento en la duración de la sequía meteorológica basada en el SPI.

Esto se puede relacionar con los resultados de Penalba y Rivera (2013), quienes proyectaron que el sur de Sudamérica evidenciaría un aumento en el número de episodios e intensidad de sequías tanto a corto como a largo plazo en el siglo XXI, esta proyección de escasez hídrica puede generar grandes pérdidas económicas para el sector agrario y afectar los recursos hídricos. El conocimiento de la evolución temporal del riesgo futuro de periodos de sequía, representa información muy importante para la gestión del agua, la toma de decisiones, reducción de riesgo de desastres, protección de la salud humana, producción de alimentos, actividades turísticas y de transporte (Campozano et al., 2020).

5. Conclusiones

La aplicación de la reducción de escala estadístico con métodos paramétrico y no paramétrico de la técnica quantile mapping demostró lograr ajustar las funciones de distribución de la precipitación modelada de los GCMs (HADGEM2 AO, HADGEM2 ES, HADGEM2 CC, MIROC5, CCSM4 y MPI ESM LR) a la función de distribución de la precipitación registrada de las 5 estaciones meteorológicas estudiadas de la cuenca Chinchipe. Mediante indicadores estadísticos se determinó que el modelo NP-HADGEM2 AO con reducción de escala no paramétrico logra el mayor ajuste con la precipitación registrada de las estaciones estudiadas.

El modelo proyecta que bajo el escenario climático RCP 4.5, todas las estaciones estudiadas experimentarán una mayor ocurrencia de eventos de sequía severa para el futuro cercano, mientras que para el futuro lejano prevalecerán las sequías extremas. Mientras que bajo el escenario de cambio climático RCP 8.5 los modelos proyectan un mayor número de eventos de sequías extremas el futuro cercano, en cambio, en el futuro lejano prevalecerán las sequías severas.

Basados en los resultados puntuales de las estaciones estudiadas, se concluye que la cuenca Chinchipe experimentará bajo el escenario RCP 4.5 un mayor número eventos de sequía severa en el futuro cercano,

en cambio los eventos de sequía extrema prevalecerán en el futuro lejano. El escenario RCP 8.5 plantea que la cuenca experimentara un mayor número de sequías extremas en el futuro cercano, intensificándose las sequías severas para el futuro lejano.

6. Contribución de los autores

SNCR; Trabajo de campo y laboratorio, obtención de datos y análisis estadístico, JRCR: En la concepción y el diseño del estudio, revisión final, JCR; En la concepción, el diseño del estudio, redacción del manuscrito, ACC: Diseño del estudio y revisión final, EGC; Trabajo de campo y laboratorio, FMTJ: Trabajo de campo y laboratorio, obtención de datos

7. Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existe conflicto de intereses.

8. Referencias Bibliográficas

Acuña-Azarte, D., Flores-Villanueva, W., Llacza-Rodríguez, A., & Rorher, M. (2019). Escenarios futuros de cambio climático desde modelos globales para localidades de los Andes centrales. *Anales Científicos*, 80(2), 476. <https://doi.org/10.21704/AC.V80I2.1482>

Campozano, L., Ballari, D., Montenegro, M., & Avilés, A. (2020). Future meteorological droughts in Ecuador: Decreasing trends and associated spatio-temporal features derived from CMIP5 models. *Frontiers in Earth Science*, 8, 17. <https://doi.org/10.3389/feart.2020.00017>

Douville, H., et al. (2021). Water cycle changes. En *Climate change 2021: The physical climate basis. Contribution of working group I to the sixth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 1055–1210). Cambridge University Press.

Freitas, A. A., Reboita, M. S., Carvalho, V. S. B., Drumond, A., Ferraz, S. E. T., Silva, B. C., & da Rocha, R. P.

(2023). Atmospheric and oceanic patterns associated with extreme drought events over the Paraná Hydrographic Region, Brazil. *Climate*, 11(12). <https://doi.org/10.3390/cli11120192>

Gebrechorkos, S. H., Hülsmann, S., & Bernhofer, C. (2019). Conjunto de datos climáticos estadísticamente reducidos para África Oriental. *Scientific Data*, 6, 31. <https://doi.org/10.1038/s41597-019-0036-8>

Gozzo, L. F., Palma, D. S., Custodio, M. S., & Machado, J. P. (2019). Climatology and trend of severe drought events in the state of Sao Paulo, Brazil, during the 20th century. *Atmosphere*, 10(190). <https://doi.org/10.3390/atmos10040190>

Gudmundsson, L., Bremnes, J. B., Haugen, J. E., & Engen-Skaugen, T. (2012). Technical note: Downscaling RCM precipitation to the station scale using statistical transformations – A comparison of methods. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(9), 3383–3390. <https://doi.org/10.5194/hess-16-3383-2012>

Hawkins, E., Osborne, T. M., Ho, C. K., & Challinor, A. J. (2013). Calibración y corrección de sesgo de proyecciones climáticas para modelado de cultivos: Un estudio de caso idealizado. *Agricultural and Forest Meteorology*, 170, 19–31. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2012.04.007>

Llerena, C. (2010). *Gestión ambiental de un ecosistema frágil: Los bosques nublados de San Ignacio, Cajamarca, cuenca del río Chinchipe*.

Maraun, D., Wetterhall, F., Ireson, A. M., Chandler, R. E., Kendon, E. J., Widmann, M., ... & Thiele-Eich, I. (2010). Precipitation downscaling under climate change: Recent developments to bridge the gap between dynamical models and the end user. *Reviews of Geophysics*, 48(3). <https://doi.org/10.1029/2009RG000314>

- McKee, T. B., Doesken, N. J., & Kleist, J. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales. En *Proceedings of the Eighth Conference on Applied Climatology* (pp. 17–22). American Meteorological Society.
- Meehl, G. A., et al. (2007). Global climate projections. En *Climate Change 2007: The physical science basis. Contribution of working group I to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 747–845). Cambridge University Press.
- Morote Seguido, Á.-F., Olcina Cantos, J., & Hernández Hernández, M. (2020). Gestión de las sequías en la planificación hidrológica. Aplicación al sureste español. *Revista de Geografía Norte Grande*, 2020(76), 303–320. <https://doi.org/10.4067/S0718-34022020000200303>
- Palomino-Lemus, R., Córdoba-Machado, S., Gámiz-Fortis, S. R., Castro-Díez, Y., & Esteban-Parra, M. J. (2017). Climate change projections of boreal summer precipitation over tropical America by using statistical downscaling from CMIP5 models. *Environmental Research Letters*, 12(12). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa9bf7>
- Palomino-Lemus, R., Córdoba-Machado, S., Gámiz-Fortis, S. R., Castro-Díez, Y., & Esteban-Parra, M. J. (2018). High-resolution boreal winter precipitation projections over tropical America from CMIP5 models. *Climate Dynamics*, 51(5–6), 1773–1792. <https://doi.org/10.1007/s00382-017-3982-5>
- Panisset, J. S., Libonati, R., Gouveia, C. M. P., Machado-Silva, F., França, D. A., França, J. R. A., & Peres, L. F. (2018). Contrasting patterns of the extreme drought episodes of 2005, 2010 and 2015 in the Amazon Basin. *International Journal of Climatology*, 38, 1096–1104. <https://doi.org/10.1002/joc.5224>
- Penalba, O. C., & Rivera, J. A. (2013). Future changes in drought characteristics over southern South America projected by a CMIP5 multi-model ensemble. *Climate Dynamics*, 41(11–12), 3265–3288. <https://doi.org/10.1007/s00382-013-1714-7>
- Silva, V. O., de Mello, C. R., & Chou, S. C. (2022). Projections of severe droughts in future climate in Southeast Brazil: A case study in Southern Minas Gerais State, Brazil. *Theoretical and Applied Climatology*, 148(3–4), 1289–1302. <https://doi.org/10.1007/s00704-022-03967-6>
- Svoboda, M., Hayes, M., Wood, D. A., & Organización Meteorológica Mundial. (2012). *Índice normalizado de precipitación*. OMM.
- Vicente-Serrano, S., Miralles, D., Domínguez-Castro, F., et al. (2018). Global assessment of the standardized evapotranspiration deficit index (SEDI) for drought analysis and monitoring. *Journal of Climate*, 31(14), 5371–5393. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-17-0775.1>