

Análisis de cambio en la precipitación extrema en Oruro. Una evaluación preliminar con datos observados y reanálisis

Analysis of changes in extreme precipitation in Oruro. A preliminary assessment with observed data and reanalysis

Lina Carla Fernández Gutiérrez*
Universidad Técnica de Oruro
Oruro - Bolivia
lina.fernandez@uto.edu.bo
<https://orcid.org/0009-0007-3909-5173>

Jackson David Tellez Alvarez
Universidad Politécnica de Cataluña
Barcelona - España
jackson.david.tellez@upc.edu
<https://orcid.org/0000-0003-1428-9872>

*Correspondencia:
lina.fernandez@uto.edu.bo

Cómo citar este artículo:
Fernández, L., & Tellez, J. (2025). Análisis de cambio en la precipitación extrema en Oruro. Una evaluación preliminar con datos observados y reanálisis. *Esprint Investigación*, 4(4), 161-176.
<https://doi.org/10.61347/ei.v4i4.193>

Recibido: 4 de septiembre de 2025
Aceptado: 8 de octubre de 2025
Publicado: 19 de noviembre de 2025

Resumen: El cambio climático ha alterado la frecuencia e intensidad de los eventos de precipitación extrema, especialmente en regiones vulnerables. Este estudio analiza las tendencias históricas de los índices de precipitación extrema en Oruro, Bolivia, durante 1943–2012, utilizando datos observados de la estación AASANA y reanálisis ERA5. Se calcularon los siguientes índices climáticos: Rx1day, Rx5day, R10mm, R20mm, PRCPTOT, CDD y CWD. Para evaluar tendencias se aplicaron: el test de Mann-Kendall, la pendiente de Sen y métricas de desempeño (RMSE, sesgo, correlación de Pearson) para comparar los reanálisis con las observaciones. Los resultados muestran ausencia de tendencias significativas en todos los índices, aunque los productos ERA5 reproducen razonablemente los patrones observados. Estos hallazgos aportan información para la planificación hídrica, agrícola y gestión de riesgos, y sientan las bases para futuros estudios de proyección climática en la región.

Palabras clave: Mann-Kendall, pendiente de Sen, precipitación extrema, reanálisis ERA5, tendencias.

Abstract: Climate change has altered the frequency and intensity of extreme precipitation events, especially in vulnerable regions. This study analyzes historical trends in extreme precipitation indices in Oruro, Bolivia, from 1943 to 2012, using observed data from the AASANA station and ERA5 reanalysis. The following climate indices were calculated: Rx1day, Rx5day, R10mm, R20mm, PRCPTOT, CDD, and CWD. To assess trends, the Mann-Kendall test, Sen's slope, and performance metrics (RMSE, bias, Pearson correlation) were applied to compare the reanalysis data with the observations. The results show no significant trends in any of the indices, although the ERA5 products reasonably reproduce the observed patterns. These findings provide information for water resource planning, agricultural planning, and risk management, and lay the groundwork for future climate projection studies in the region.

Keywords: ERA5 reanalysis, extreme precipitation, Mann-Kendall, Sen's slope, trends.

Copyright: Derechos de autor 2025 Lina Carla Fernández Gutiérrez, Jackson David Tellez Alvarez.



Esta obra está bajo una licencia internacional Creative Commons Atribución-NoComercial 4.0.

1. Introducción

El cambio climático global está intensificando el ciclo hidrológico, lo que se traduce en un aumento generalizado de la frecuencia e intensidad de los eventos de precipitación extrema (Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC), 2023; Allen & Ingram, 2002; Trenberth, 2011). No obstante, estas tendencias muestran una notable variabilidad regional, haciendo indispensables los estudios locales, especialmente en zonas altamente vulnerables como el Altiplano andino (Westra et al., 2013; Donat et al., 2013; Groisman et al., 2005).

La ciudad de Oruro, Bolivia, se encuentra en una región caracterizada por su compleja orografía y una fuerte dependencia socioeconómica de sectores sensibles al clima, aumentando así la exposición de la población a eventos extremos de precipitación (Alexander & Arblaster, 2017; Min et al., 2011; Seneviratne et al., 2014). La principal limitación en esta área radica en la escasez de registros observacionales de largo plazo y en la falta de conocimiento detallado sobre las tendencias locales de precipitación, lo que dificulta la evaluación precisa del riesgo climático (Zhang et al., 2011; Alexander et al., 2006; Karl et al., 1996).

Para superar las limitaciones de los datos in situ, los productos de reanálisis atmosférico, como ERA5, constituyen una alternativa valiosa al proporcionar series climáticas continuas y completas en el tiempo (Hersbach et al., 2020; Wang & Swail, 2001; Hegerl et al., 2007). Sin embargo, su capacidad para representar con precisión eventos extremos en regiones montañosas aún requiere validación, introduciendo cierto grado de incertidumbre en los diagnósticos locales (Alexander & Arblaster, 2017; Zwiers & Kharin, 1998). Evaluar la concordancia entre datos observados y reanalizados es, por tanto, un paso fundamental para garantizar la solidez de los análisis de tendencias y la confiabilidad de las decisiones derivadas (Klein & Können, 2003; Easterling & Wehner, 2009).

En este marco, el presente estudio tiene como objetivo analizar los cambios históricos en los índices de precipitación extrema en Oruro durante el período 1943–2012, integrando datos observados de la estación meteorológica AASANA Aeropuerto y series de reanálisis ERA5. La elección de este periodo se justifica por la disponibilidad continua de registros de alta calidad, lo que permite un análisis de tendencias robusto y una evaluación confiable de la variabilidad interanual y multianual de los extremos de precipitación (Seneviratne et al., 2012; Meehl & Tebaldi, 2004; Salinger & Mullan, 1999).

Los objetivos específicos del estudio son: (i) caracterizar la variabilidad y las tendencias de los índices de precipitación extrema Rx1day, Rx5day, R10mm, CDD y PRCPTOT (Sen, 1968; Theil, 1950); (ii) evaluar preliminarmente la capacidad del producto de reanálisis ERA5 para reproducir los patrones históricos observados (Hersbach et al., 2020) y (iii) generar información útil para la planificación de recursos hídricos, la agricultura y la reducción del riesgo de desastres, contribuyendo a la resiliencia climática regional (Vicente-Serrano et al., 2014; Alexander et al., 2017).

Para alcanzar estos objetivos, se aplican metodologías internacionalmente reconocidas, como los índices climáticos propuestos por el Expert Team on Climate Change Detection and Indices (ETCCDI), ampliamente utilizados en estudios globales y regionales (Zhang et al., 2011; Alexander et al., 2006; Karl et al., 1996). Estos índices permiten evaluar cambios en la intensidad, frecuencia y duración de los eventos extremos a partir de registros observados y productos de reanálisis, facilitando comparaciones regionales y la validación de escenarios futuros (Seneviratne et al., 2012; Min et al., 2011; Seneviratne et al., 2014).

En consecuencia, esta investigación no solo aporta conocimiento científico relevante sobre la manifestación local del cambio climático en Oruro, sino que también proporciona una base sólida para

la planificación adaptativa y la toma de decisiones frente a eventos extremos (Donat et al., 2013; Groisman et al., 2005; Meehl & Tebaldi, 2004). La transición hacia la sección metodológica se realiza de manera natural, enfocándose en la preparación de los datos, los índices climáticos seleccionados y el procedimiento de análisis de tendencias, garantizando la claridad y reproducibilidad del estudio (Hegerl et al., 2007; Klein & Können, 2003; Wang & Swail, 2001).

2. Metodología

El estudio se desarrolló con un enfoque cuantitativo, orientado al análisis de series temporales de precipitación diaria, con el fin de evaluar tendencias históricas en índices de precipitación extrema en Oruro, Bolivia. Se trabajó con fuentes primarias de la estación meteorológica AASANA Aeropuerto (Latitud: -17.952778; Longitud: -67.076722) y como fuentes secundarias se emplearon datos de reanálisis ERA5, descargados en formato NetCDF4 desde la plataforma del Climate Data Store (CDS). La muestra estuvo constituida por la totalidad de los datos diarios de precipitación en el periodo de estudio, procesados en índices de extremos climáticos recomendados por la OMM/ETCCDI (Rx1day, Rx5day, R10mm, R20mm, PRCPTOT, CDD y CWD). Los datos de reanálisis se visualizaron utilizando el programa Panoply para convertirlos a formatos Excel y CSV, permitiendo un análisis completo de las series temporales.

Como instrumentos de análisis se utilizaron rutinas estadísticas implementadas en R. Para la detección y cuantificación de tendencias se aplicaron las pruebas no paramétricas de Mann-Kendall y la estimación de la pendiente de Sen, dada su robustez frente a distribuciones no normales y valores atípicos. Los índices basados en intensidad o acumulación (Rx1day, Rx5day, PRCPTOT, R10mm y R20mm) se expresaron en milímetros por año (mm/año), mientras que para los índices basados en duración (CDD y CWD) la pendiente se expresó en días por año (días/año), aclarando de esta manera las unidades utilizadas e interpretaciones asociadas. Se consideró estadísticamente significativa toda tendencia con valores $p < 0.05$.

Los índices climáticos se calcularon a partir de los registros diarios del período 1943–2012 garantizando la consistencia temporal y calidad de los datos. Asimismo, se aplicó estadística descriptiva, complementada con análisis gráfico mediante diagramas de caja (boxplots), con el fin de comparar la distribución de los índices entre datos observados y reanálisis, identificar patrones, valores atípicos y variabilidad interanual.

Para la detección y cuantificación de tendencias en series temporales de precipitación extrema, se emplearon dos pruebas no paramétricas complementarias: la de Mann-Kendall y la pendiente de Sen. Inicialmente, la prueba de Mann-Kendall fue utilizada para evaluar la existencia de una tendencia monótona. Este método es preferido en estudios hidrológicos y climatológicos por su robustez y la ausencia de supuestos sobre la distribución de los datos. La prueba calcula el estadístico Tau de Kendall para determinar la dirección de la tendencia, se consideró una tendencia significativa cuando $p < 0.05$.

Una vez confirmada la existencia de una tendencia, la pendiente de Sen se aplicó para cuantificar su magnitud. Este estimador, también robusto frente a valores atípicos, determina la tasa promedio de cambio de la variable por unidad de tiempo (por ejemplo, mm/año). La metodología permitió calcular la mediana de todas las pendientes de los pares de puntos en la serie. El signo de la pendiente de Sen indica la dirección de la tendencia (positivo para un aumento y negativo para una disminución), proporcionando una medida cuantitativa precisa y confiable de la tasa de cambio.

La evaluación de desempeño del reanálisis se realizó mediante las siguientes métricas:

RMSE (Root Mean Square Error)

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (R_i - O_i)^2}$$

Bias (Sesgo)

$$Bias = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (R_i - O_i)$$

Correlación de Pearson (r)

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(R_i - \bar{R})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 \sum_{i=1}^n (R_i - \bar{R})^2}}$$

Donde O_i y R_i representan los valores observados y de reanálisis, respectivamente, y n es el número total de observaciones. Estas métricas permitieron determinar el grado de ajuste y concordancia entre los datos de reanálisis y observados, proporcionando una evaluación preliminar de la capacidad del ERA5 para reproducir patrones históricos locales. El procedimiento metodológico asegura la reproducibilidad del estudio y establece una base objetiva para la interpretación de tendencias y la validación de los datos de reanálisis.

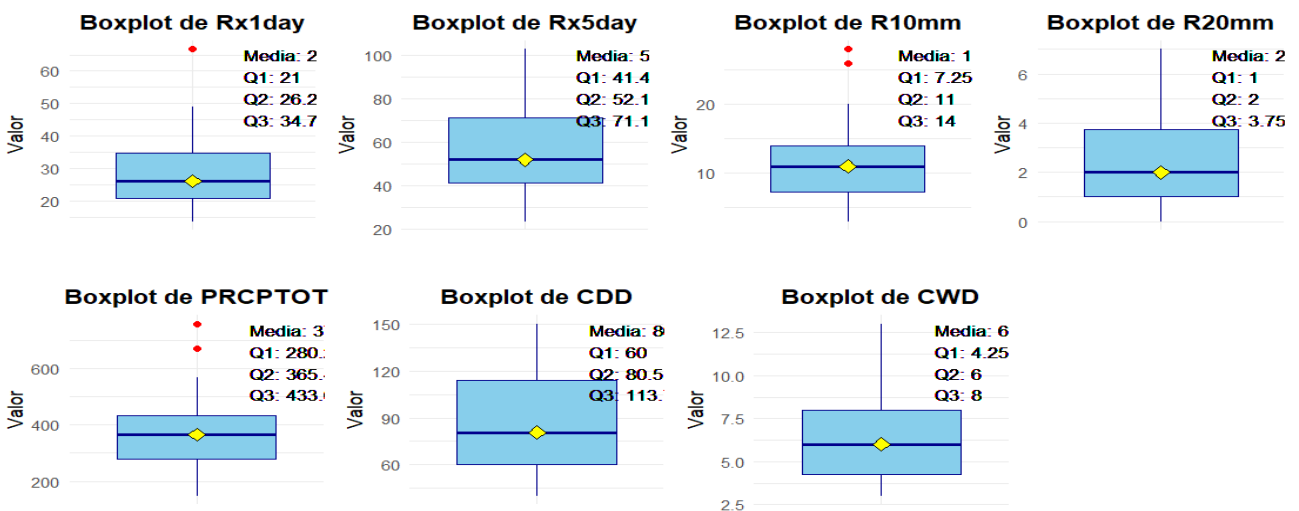
3. Resultados

Estadística descriptiva y distribución de los índices

La distribución de los índices de precipitación se analizó mediante estadística descriptiva y diagramas de caja (boxplots), comparando las series observadas y de reanálisis. La Figura 1 presenta los boxplots comparativos de los índices Rx1day, Rx5day, R10mm, R20mm, PRCPTOT, CDD y CWD correspondientes a los datos observados.

Figura 1

Boxplots comparativos de los índices Rx1day, Rx5day, R10mm, R20mm, PRCPTOT, CDD y CWD para datos observados



En la Tabla 1 se observa el resumen estadístico de los principales índices de precipitación, calculados a partir de las series observadas.

Tabla 1

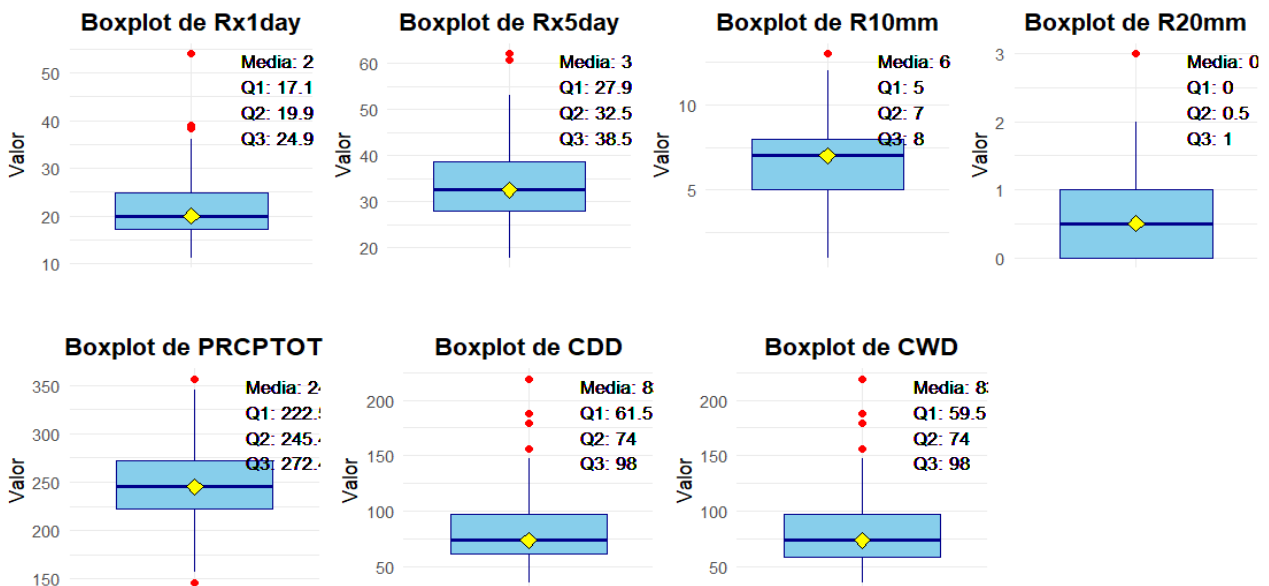
Estadísticas de datos observados

	Rx1day	Rx5day	R10mm	R20mm	PRCPTOT	CDD	CWD
Media	28.61	57.22	11.47	2.30	372.75	86.11	6
Error Típico	1.27	2.42	0.62	0.23	14.60	3.62	0.27
Mediana	26.2	52.15	11	2	365.4	80.5	6
Moda	19	60.5	6	1	306.6	54	4
Desviación Estándar	10.66	20.24	5.22	1.91	122.14	30.25	2.29
Varianza de la muestra	113.68	409.58	27.21	3.63	14919.02	914.86	5.24
Curtosis	1.12	-0.73	0.63	-0.62	0.36	-0.86	0.63
Coefficiente de asimetría	1.06	0.47	0.78	0.59	0.61	0.52	0.94
Rango	52.9	79.3	25	7	609.7	110	10
Mínimo	13.8	23.6	3	0	147.6	40	3
Máximo	66.7	102.9	28	7	757.3	150	13
Suma	2002.7	4005.2	803	161	26092.2	6028	451
Cuenta	70	70	70	70	70	70	70

La Figura 2 presenta los boxplots comparativos de los índices Rx1day, Rx5day, R10mm, R20mm, PRCPTOT, CDD y CWD correspondientes a los datos de reanálisis.

Figura 2

Boxplots comparativos de los índices Rx1day, Rx5day, R10mm, R20mm, PRCPTOT, CDD y CWD para datos de reanálisis



La Tabla 2 detalla el resumen estadístico de los principales índices de precipitación, calculados a partir de las series de reanálisis.

Tabla 2

Estadísticas de datos de reanálisis

	Rx1day	Rx5day	R10mm	R20mm	PRCPTOT	CDD	CWD
Media	22.594	34.22	6.49	0.76	243.78	83.47	83
Error Típico	0.93	1.10	0.27	0.11	5.20	4.43	4.44
Mediana	19.985	32.53	7	0.5	245.435	74	74
Moda	-	28.02	7	0	-	51	51
Desviación Estándar	7.76	9.23	2.26	0.89	43.50	37.09	37.19
Varianza de la muestra	60.27	85.22	5.12	0.80	1891.99	1375.82	1382.87
Curtosis	2.71	0.92	0.65	-0.23	0.29	2.43	2.41
Coefficiente de asimetría	1.41	0.87	0.23	0.88	-0.11	1.49	1.49
Rango	42.71	44.28	12	3	210.71	183	183
Mínimo	11.28	17.78	1	0	145.96	36	36
Máximo	53.99	62.06	13	3	356.67	219	219
Suma	1581.58	2395.07	454	53	17064.82	5843	5829
Cuenta	70	70	70	70	70	70	70

En las Figuras 1 y 2, así como en las Tablas 1 y 2, los resultados evidencian una marcada variabilidad interanual en todos los índices, reflejada en la amplitud de los rangos intercuartílicos y en la presencia de valores extremos. A partir de ello, se identifican los siguientes patrones:

En los índices Rx1day y PRCPTOT, las medianas y percentiles superiores fueron mayores en los datos observados, lo que expone que los eventos máximos diarios y la precipitación total anual tienden a estar subestimados en los reanálisis.

De manera complementaria, en los índices Rx5day y CWD, los reanálisis mostraron una mayor cantidad de valores atípicos, evidenciando una mayor dispersión en la acumulación de precipitación en cinco días y en la duración de los periodos húmedos consecutivos.

Por su parte, los índices R10mm y R20mm presentaron medianas similares entre ambas fuentes de datos, lo que indica que el reanálisis ERA5 reproduce de manera adecuada la frecuencia de días lluviosos de intensidad moderada y alta.

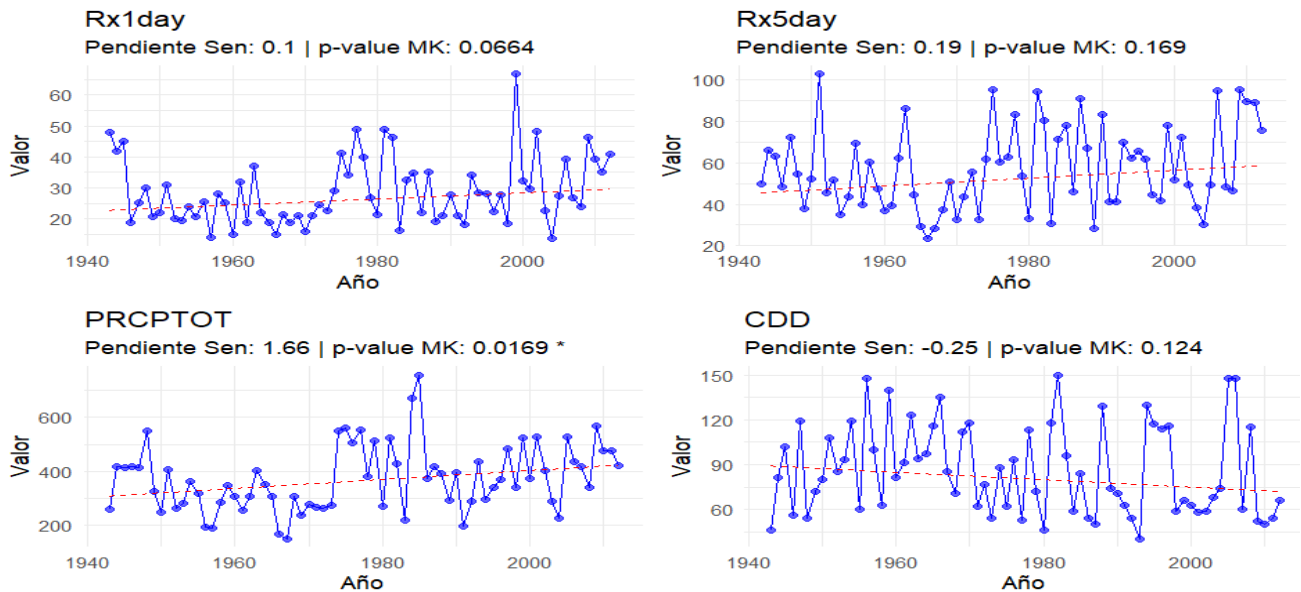
Finalmente, el índice CDD mostró distribuciones consistentes en ambas series, aunque se observaron leves diferencias en los valores extremos, lo que podría asociarse a variaciones locales en la persistencia de periodos secos.

Tendencias de los índices

La evaluación de tendencias mediante el test de Mann–Kendall y la pendiente de Sen permitió identificar evidenciar diversos comportamientos en las series analizadas. En la Figura 3 se muestran las tendencias de los índices *Rx1day*, *Rx5day*, *PRCPTOT*, *CDD* para datos observados.

Figura 3

Tendencias de los índices Rx1day, Rx5day, PRCPTOT, CDD para datos observados



En el índice *Rx1day*, el test de Mann–Kendall arrojó un Tau positivo, pero con $p=0.0664 > 0.05$, lo que demuestra que no existe una tendencia estadísticamente significativa en la máxima precipitación diaria. La pendiente de Sen fue positiva, sugiriendo un leve incremento de aproximadamente 0.10 mm/año en la intensidad máxima diaria de precipitación.

De manera similar, el índice *Rx5day* presentó un Tau cercano a cero, con $p=0.169 > 0.05$, indicando ausencia de tendencia definida. La pendiente de Sen fue muy baja (0.19 mm/año), confirmando estabilidad en las acumulaciones máximas de cinco días.

A diferencia de los anteriores, el índice *PRCPTOT* mostró un comportamiento distinto presentó con una pendiente de Sen 1.66 mm/año indicando un incremento a lo largo del periodo analizado. Además, el valor $p = 0.0169 < 0.05$ obtenido mediante la prueba de Mann–Kendall evidencia la existencia de una tendencia estadísticamente significativa en la precipitación total anual. En la Figura 4 se muestran las tendencias de los índices *R10mm*, *R20mm*, y *CWD* para datos observados.

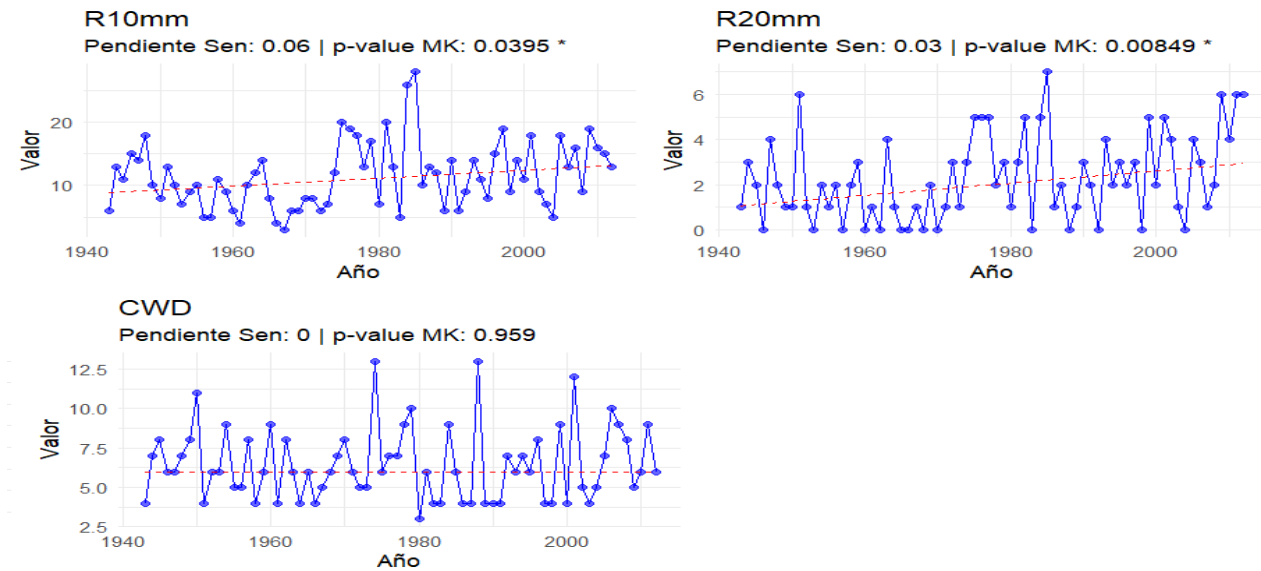
En los índices *R10mm* y *R20mm*, se observaron valores de Tau positivos, con $p = 0.0395 < 0.05$ para *R10mm* y $p = 0.00849 < 0.05$ para *R20mm*, lo que indica la presencia de tendencias crecientes estadísticamente significativas. No obstante, las pendientes de Sen fueron pequeñas (0.06 mm/año y 0.03 mm/año, respectivamente), lo que sugiere un ligero aumento en la frecuencia de días lluviosos intensos, aunque de magnitud reducida y sin implicaciones climáticas relevantes.

En cuanto a los índices *CDD* y *CWD* que representan los periodos secos y húmedos consecutivos, no se evidenciaron tendencias definidas. Para *CDD*, el valor $p = 0.124 > 0.05$ indica ausencia de significancia estadística, mientras que la pendiente de Sen (-0.25) refleja una leve disminución de aproximadamente 0.25 días/año.

Por su parte, CWD presentó $p = 0.959 > 0.05$ y una pendiente de Sen igual a cero, lo que confirma la estabilidad del número de días húmedos consecutivos a lo largo del periodo analizado. En conjunto, estos resultados sugieren que tanto los periodos secos como los húmedos se han mantenido prácticamente constantes, sin cambios apreciables en su duración.

Figura 4

Tendencias de los índices R10mm, R20mm, y CWD para datos observados

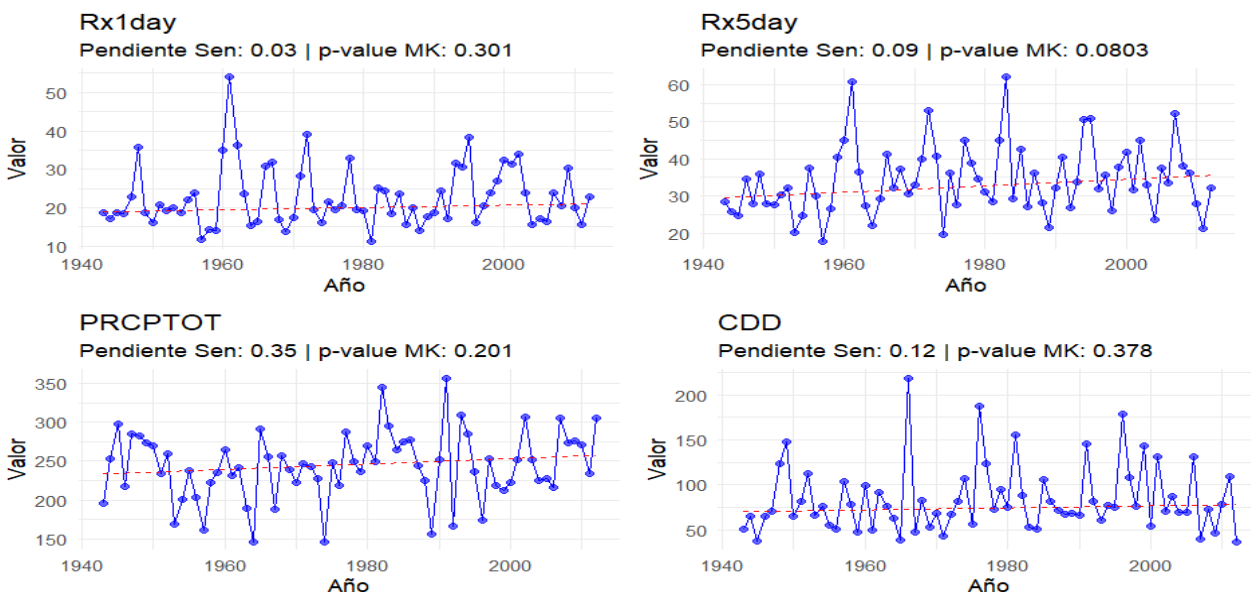


Datos de reanálisis

El análisis de los datos de reanálisis procedentes de ERA5 permitió mostrar variaciones diferenciadas en el comportamiento de las series analizadas. En la Figura 5 se presentan las tendencias de los índices Rx1day, Rx5day y PRCPTOT correspondientes a los datos de reanálisis.

Figura 5

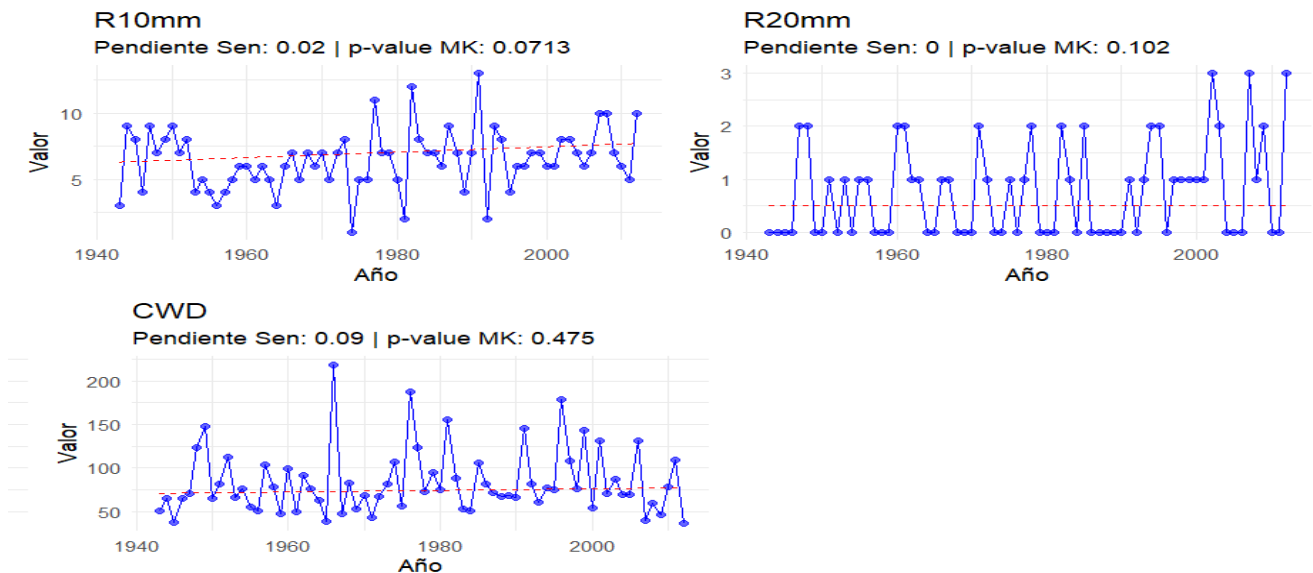
Tendencias de los índices Rx1day, Rx5day, PRCPTOT para datos de reanálisis



En la Figura 6 se presentan las tendencias de los índices R10mm, R20mm, y CWD correspondientes a los datos de reanálisis.

Figura 6

Tendencias de los índices R10mm, R20mm, y CWD para datos de reanálisis



En las Figuras 5 y 6 se observa que, en el caso del Rx1day, el test de Mann-Kendall dio un Tau positivo con $p=0.301 > 0.05$, lo que indica que no existe una tendencia estadísticamente significativa en la máxima precipitación diaria. La pendiente de Sen positiva, sugiriendo un leve aumento de 0.03 mm/año.

Para el Rx5day, se obtuvo $p=0.0803 > 0.05$, indicando la existencia de tendencia significativa. La pendiente de Sen positiva sugiriendo un leve aumento de 0.09 mm/año, confirmando estabilidad en las acumulaciones máximas de cinco días.

En cuanto a los índices R10mm y R20mm, los resultados mostraron $p=0.0713 > 0.05$ y $p=0.102 > 0.05$, respectivamente, lo que permite inferir que no existe una tendencia clara en la frecuencia de días lluviosos intensos. Las pendientes de Sen evidenciaron una variación mínima: positiva para R10mm, con un incremento de 0.02 S días/año, y nula para R20mm, indicando estabilidad en la ocurrencia de eventos de mayor intensidad.

Respecto a los índices de duración, CDD y CWD, tanto los periodos secos como los húmedos consecutivos no evidenciaron tendencias claras. Para CDD $p=0.378 > 0.05$ no se puede afirmar que existe una tendencia clara y con Sen positivo refleja un incremento en 0.12 días/año. En el caso de CWD $p=0.378 > 0.05$ por lo que se puede afirmar que no existe una tendencia estadísticamente significativa por lo que cualquier variación observada puede ser atribuible al azar y no aún cambio real en el clima.

Finalmente, el índice PRCPTOT presentó un comportamiento estable en el total anual de precipitación. Aunque la pendiente de Sen fue positiva (0.35 mm/año), el valor de $p = 0.201 > 0.05$ indica que no existe evidencia estadística suficiente para afirmar una tendencia significativa. Esto refuerza la idea de que las fluctuaciones observadas en la precipitación total anual son marginales y no representan un cambio sustancial en el régimen pluviométrico.

Comparación entre datos observados y de reanálisis

En las figuras 7 y 8 se presentan las tendencias de los índices Rx1day, Rx5day, R10mm, R20mm, PRCPTOT, CDD y CWD tanto para los datos observados como para los obtenidos a partir del reanálisis.

Las figuras muestran que los datos observados presentan mayor variabilidad y registran picos más altos en los índices de precipitación extrema, mientras que los reanálisis tienden a suavizar estos valores y subestimar eventos intensos. En la mayoría de los índices, las tendencias no son estadísticamente significativas, lo que sugiere estabilidad en los eventos extremos durante el período analizado.

Figura 7

Tendencias de los índices Rx1day, Rx5day, R10mm, R20mm para datos observados y de reanálisis

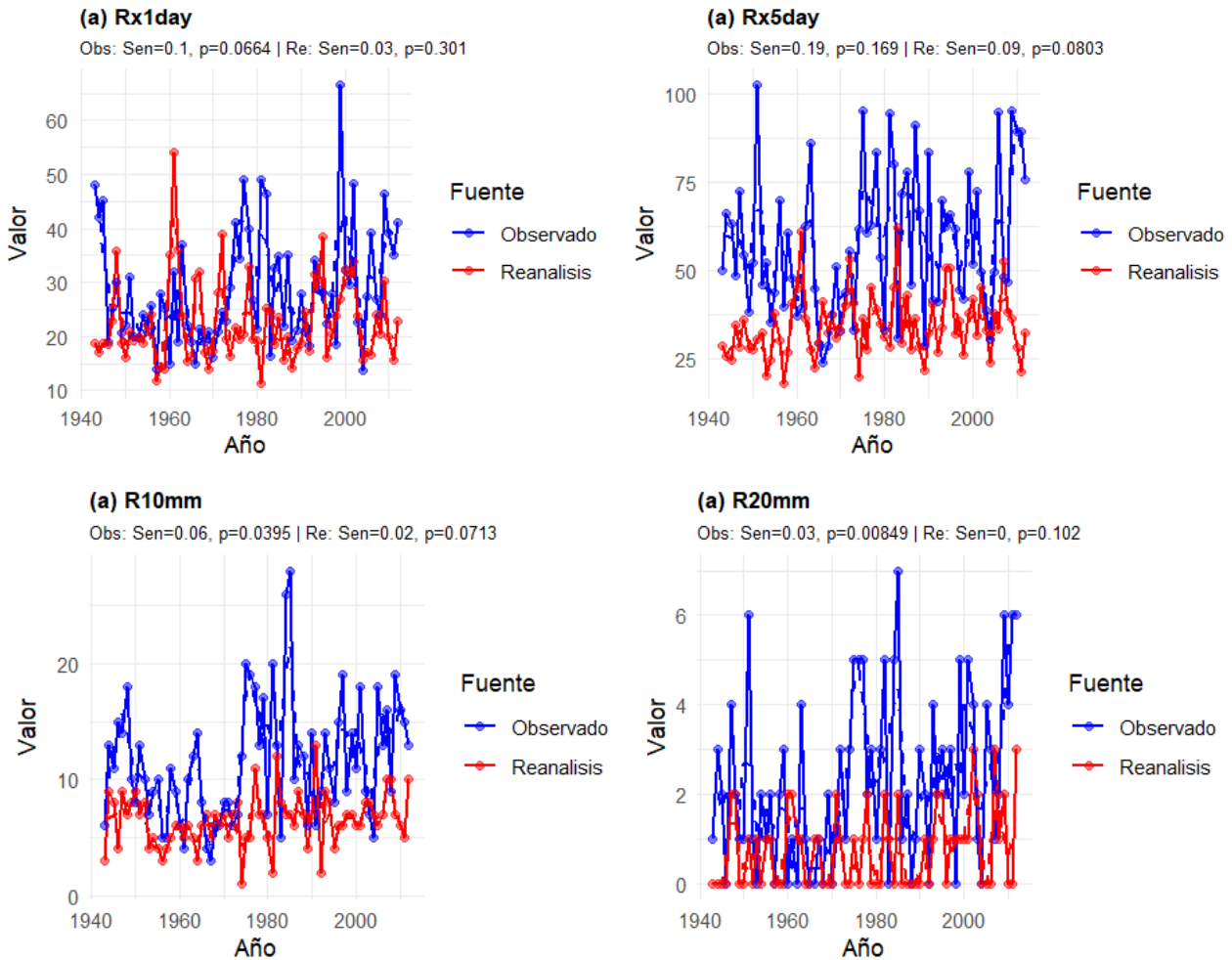
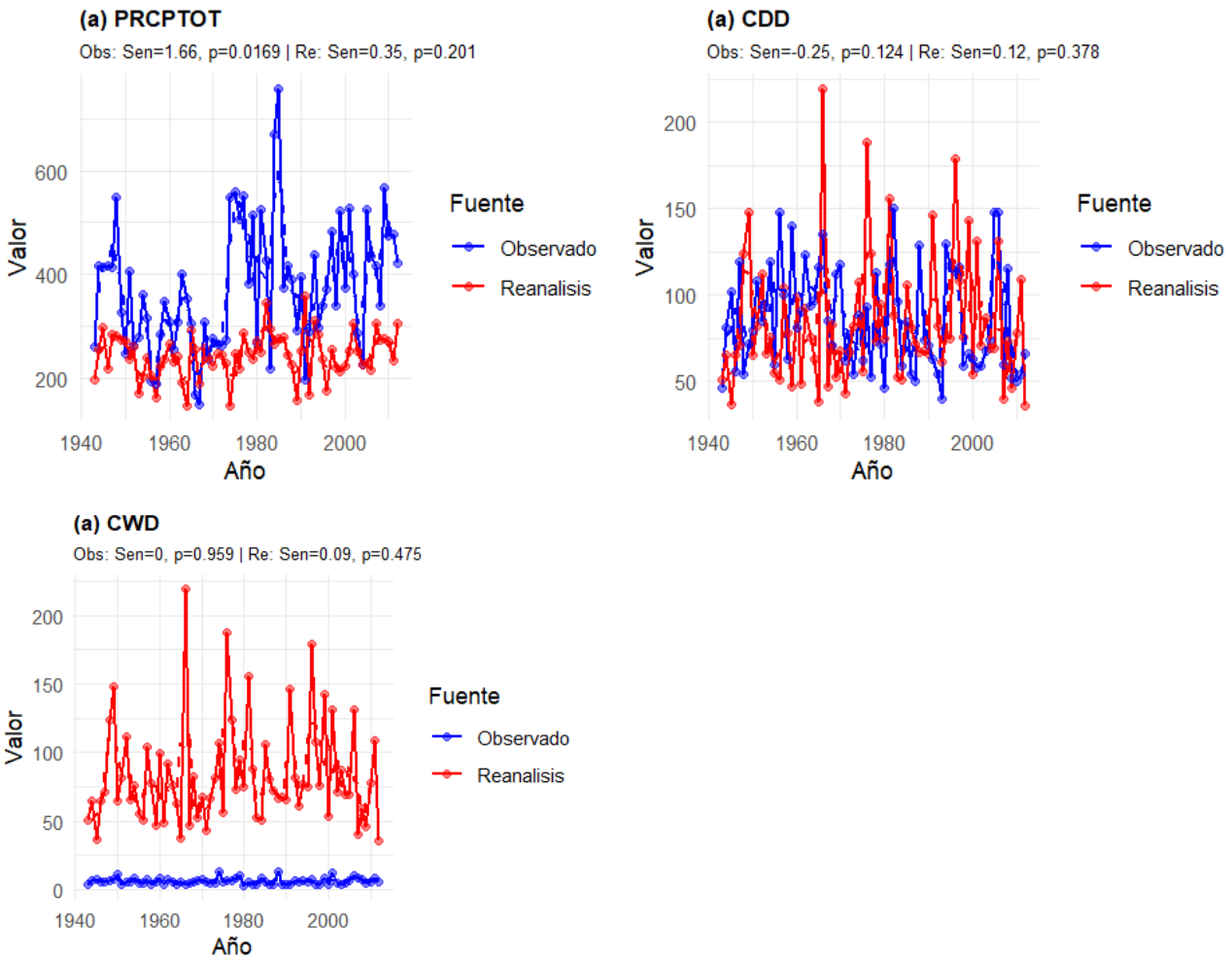


Figura 8

Tendencias de los índices PRCPTOT, CDD y CWD para datos observados y de reanálisis



Evaluación de desempeño del reanálisis

La evaluación de desempeño del reanálisis consiste en comparar los datos simulados con observaciones locales para determinar su precisión en la representación de la precipitación y eventos extremos, identificando sesgos y limitaciones antes de su uso en estudios hidrológicos o climáticos. A continuación, en la Tabla 3 se presenta el análisis de las métricas de desempeño calculados con los datos observados y de reanálisis

Tabla 3

Métricas de desempeño entre datos observados y reanálisis

Índice	Root Mean Square Error (RMSE)	Bias correction (BIAS)	Correlación (r)
Rx5day	32.37	-23.00	-0.08
Rx1day	13.73	-6.02	0.12
R20mm	2.43	-1.54	0.25
R10mm	7.41	-4.99	0.08

PRCPTOT	177.52	-128.96	0.16
CWD	85.10	+76.83	0.17
CDD	44.62	-2.64	0.12

Los índices Rx5day y Rx1day presentan errores moderados a altos y subestimación sistemática de los valores extremos, con correlaciones cercanas a cero, lo que evidencia que el reanálisis no logra reproducir adecuadamente los máximos de precipitación en periodos cortos.

En contraste, el índice R20mm muestra el mejor desempeño relativo, con un RMSE bajo (2.43), un sesgo negativo reducido (-1.54) y la correlación más alta (0.25). Aunque la relación sigue siendo débil, sugiere que el reanálisis logra representar de manera parcial los eventos de lluvias moderadas a intensas.

Por su parte, el índice R10mm evidencia una subestimación de la frecuencia de lluvias mayores a 10 mm, con error intermedio y correlación casi nula, lo que limita su confiabilidad.

En el caso de PRCPTOT, los resultados muestran un error muy elevado (RMSE = 177.52) y un sesgo fuertemente negativo (-128.96), revelando que el reanálisis subestima la precipitación total anual en la región de estudio. La correlación baja (0.16) confirma su incapacidad de reproducir la variabilidad interanual.

Un comportamiento opuesto se observa en el índice CWD correspondiente a la máxima duración de días húmedos consecutivos. Este presenta una fuerte sobreestimación (+76.83) y un error muy alto (85.10). Esto indica que los datos reconstruidos generan secuencias húmedas considerablemente más largas que las observadas, distorsionando el régimen de persistencia de lluvias.

Finalmente, el índice CDD que representa la máxima duración de días secos consecutivos, muestra un error intermedio y ligera subestimación (-2.64), aunque con correlación baja (0.12), lo que refleja una capacidad limitada para representar las sequías prolongadas.

4. Discusión

El análisis indica que durante el período 1943–2012 no se detectaron tendencias significativas en los índices de precipitación extrema en Oruro, tanto en series observadas como de reanálisis. Esto puede interpretarse como una estabilidad relativa de la precipitación extrema en la región, aunque con alta variabilidad interanual, consistente con estudios globales que muestran fuerte heterogeneidad espacial de tendencias (Alexander & Arblaster, 2017; Groisman et al., 2005; Donat et al., 2013).

El hecho de que no se observen patrones claros de cambio no significa que la región esté libre de riesgo, sino que los cambios extremos no siguen un patrón monotónico detectable con los métodos utilizados, lo que resalta la necesidad de enfoques integrados que consideren la estacionalidad, fenómenos ENSO y variabilidad interanual (Trenberth, 2011; Zhang et al., 2011; Min et al., 2011).

El desempeño global del reanálisis es deficiente para todos los índices climáticos analizados. Predomina un sesgo negativo, es decir, una tendencia a subestimar tanto los extremos de precipitación como los acumulados totales, con la excepción de CWD, que resulta significativamente sobreestimado. Las correlaciones bajas ($r < 0.25$ en todos los casos) muestran que el reanálisis no logra capturar adecuadamente la variabilidad temporal de los índices, limitando su aplicabilidad directa en estudios hidrológicos o de cambio climático sin un proceso previo de corrección de sesgos (bias correction).

Los datos de reconstrucción climática subestiman de manera sistemática la precipitación y los eventos extremos, salvo en la duración de días húmedos (CWD), donde presenta una marcada

sobreestimación. La precipitación total anual (PRCPTOT) es el índice con mayor discrepancia, lo que compromete su uso en análisis hidrológicos sin ajustes. El índice R20mm exhibe el mejor ajuste relativo, aunque con correlación aún baja, lo que refleja cierta capacidad para representar lluvias moderadas a intensas. En general, los datos de reanálisis no reproducen fielmente la variabilidad interanual de los índices climáticos en la región, por lo que su empleo requiere calibración estadística antes de su aplicación en investigaciones regionales.

En términos generales, los resultados muestran que el reanálisis no refleja con precisión la lluvia observada: casi siempre reporta menos agua de la que realmente cayó, y en algunos casos (como en CWD) inventa periodos lluviosos mucho más largos de lo real. Solo en el índice R20mm los datos del reanálisis se acercan un poco a la realidad. En resumen, los datos de reanálisis necesitan ser corregidos antes de usarse, porque tal como están no representan bien el clima de la zona.

Este hallazgo coincide con estudios que señalan que los modelos de reanálisis capturan bien eventos puntuales, pero pueden subestimar o sobreestimar la persistencia de condiciones extremas en regiones montañosas (Hersbach et al., 2020) aunque la incertidumbre asociada a la densidad de estaciones y limitaciones de reanálisis debe considerarse (Vicente-Serrano et al., 2014; Seneviratne et al., 2012).

5. Conclusiones

Durante el período 1943–2012 no se detectaron tendencias significativas. Esto indica una estabilidad relativa de los extremos hidrometeorológicos locales, aunque la ausencia de tendencias no excluye la ocurrencia de eventos extremos aislados.

El reanálisis ERA5 mostró un desempeño moderado: reproduce de manera aceptable la intensidad y acumulación de precipitación, pero presenta limitaciones para representar correctamente los periodos prolongados de días secos (CDD) y húmedos (CWD). La precipitación total anual (PRCPTOT) y los extremos diarios (Rx1day, Rx5day) tienden a subestimarse, mientras que CWD está sobreestimado, evidenciando sesgos que requieren corrección antes de utilizar los datos en estudios hidrológicos o climáticos regionales.

Entre los índices analizados, R20mm mostró el mejor desempeño relativo, aunque la correlación con observaciones sigue siendo baja, indicando cierta capacidad para capturar lluvias moderadas a intensas. Los resultados de este estudio proporcionan una base metodológica sólida y reproducible para futuras evaluaciones, incluyendo análisis de escenarios de cambio climático, y son útiles para la planificación hídrica, agrícola, y la reducción de riesgos de desastres en la región.

Referencias

- Alexander, L., & Arblaster, J. (2017). Historical and projected trends in temperature and precipitation extremes in Australia in observations and CMIP5. *Weather and climate extremes*, 15, 34-56. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2017.02.001>
- Alexander, L., Zhang, X., Peterson, T., César, J., Gleason, B., Klein Tank, A., Haylock, M., Collins, D., Trewin, B., Rahimzadeh, F., Tagipour, A., Rupa Kumar, K., Revadekar, J., Griffiths, G., Vincent, L., Stephenson, D. B., Burn, J., Aguilar, E., Brunet, M., ..., Vázquez-Aguirre, J. (2006). Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 111(5). <https://doi.org/10.1029/2005JD006290>
- Allen, M., & Ingram, W. (2002). Constraints on future changes in climate and the hydrologic cycle. *Nature*, 419(6903), 224-232. <https://n9.cl/p57wf>

- Donat, M., Alexander, L., Yang, H., Durre, I., Vose, R., & Caesar, J. (2013). Global land-based datasets for monitoring climatic extremes. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 94(7), 997–1006. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-12-00109.1>
- Easterling, D., & Wehner, M. (2009). Is the climate warming or cooling? *Geophysical Research Letters*, 36(8), L08706. <https://doi.org/10.1029/2009GL037810>
- Groisman, P., Knight, R. W., Easterling, D., Karl, T., Hegerl, G., & Razuvaev, V. (2005). Trends in intense precipitation in the climate record. *Journal of Climate*, 18(9), 1326–1350. <https://doi.org/10.1175/JCLI3339.1>
- Hegerl, G. C., Zwiers, F. W., Braconnot, P., Gillett, N. P., Luo, Y., Marengo Orsini, J. A., Nicholls, N., Penner, J. E., Stott, P. A., Allen, M., Ammann, C., Andronova, N., Betts, R. A., Clement, A., Collins, W. D., Crooks, S., Delworth, T. L., Forest, C., Forster, P., ... Planton, S. (2007). Understanding and attributing climate change. In S. Solomon et al. (Eds.), *Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the IPCC* (pp. 663–745). Cambridge University Press. <https://n9.cl/lkujx8>
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Schepers, D., Simmons, A., Soci, S., Abdalla, S., Abellan, X., Balsamo, G., Bechtold, P., Biavati, G., Bidlot, J., Bonavita, M., De Chiara, G., Dahlgren, P., Dee, D., Diamantakis, M., Dragani, R., Flemming, J., Forbes, R., Fuentes, M., Geer, A., Haimberger, L., Healy, S., Hogan, R., Hólm, E., Janisková, M., Keeley, S., Laloyaux, P., Lopez, P., Lupu, C., Radnoti, G., De Rosnay, P., Rozum, I., Vamborg, F., Villaume, S., & Thépaut, J. (2020). The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146(730), 1999–2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). *Climate Change 2021 – The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press; 2023. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>
- Karl, T., Knight, R. W., Easterling, D., & Quayle, R. (1996). Indices of climate change for the United States. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 77(2), 279–292. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1996\)077<0279:IOCCFT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1996)077<0279:IOCCFT>2.0.CO;2)
- Klein, A., & Können, G. (2003). Trends in indices of daily temperature and precipitation extremes in Europe, 1946–99. *Journal of Climate*, 16(22), 3665–3680. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2003\)016<3665:TIIDOT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2003)016<3665:TIIDOT>2.0.CO;2)
- Meehl, G., & Tebaldi, C. (2004). More intense, more frequent, and longer lasting heat waves in the 21st century. *Science*, 305(5686), 994–997. <https://doi.org/10.1126/science.1098704>
- Min, S., Zhang, X., Zwiers, F., & Hegerl, G. (2011). Human contribution to more-intense precipitation extremes. *Nature*, 470(7334), 378–381. <https://doi.org/10.1038/nature09763>
- Salinger, M., & Mullan, A. (1999). New Zealand climate: Temperature and precipitation variations and their links with atmospheric circulation 1930–1994. *International Journal of Climatology*, 19(10), 1049–1071. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0088\(199908\)19:10<1049::AID-JOC417>3.0.CO;2-Z](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0088(199908)19:10<1049::AID-JOC417>3.0.CO;2-Z)
- Sen, P. (1968). Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of the American Statistical Association*, 63(324), 1379–1389. <https://doi.org/10.1080/01621459.1968.10480934>
- Seneviratne, S., Donat, M., Mueller, B., & Alexander, L. (2014). No pause in the increase of hot temperature extremes. *Nature Climate Change*, 4(3), 161–163. <https://doi.org/10.1038/nclimate2145>

- Seneviratne, S., Nicholls, N., Easterling, D., Goodess, C. M., Kanae, S., Kossin, J., Luo, Y., Marengo, J., McInnes, K., Rahimi, M., Reichstein, M., Sorteberg, A., Vera, C., Zhang, X., Alexander, L., Allen, S., Benito, G., Cavazos, T., Clague, J., ... Zwiers, F. (2012). Changes in climate extremes and their impacts on the natural physical environment. In C. B. Field et al. (Eds.), *Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation (SREX)* (pp. 109–230). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.7916/d8-6nbt-s431>
- Theil, H. (1950). A rank-invariant method of linear and polynomial regression analysis. *Indagationes mathematicae*, 12(85), 173. <https://ir.cwi.nl/pub/18446/18446A.pdf>
- Trenberth, K. (2011). Changes in precipitation with climate change. *Climate Research*, 47(1–2), 123–138. <https://doi.org/10.3354/cr00953>
- Vicente-Serrano, S., López-Moreno, J., Beguería, S., Lorenzo-Lacruz, J., Sánchez Lorenzo, A., García-Ruiz, C., Azorín-Molina, C., & Morán-Tejeda, E. (2014). Evidence of increasing drought severity caused by temperature rise in southern Europe. *Environmental Research Letters*, 9(4), 044001. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/4/044001>
- Wang, X., & Swail, V. (2001). Changes in extreme wave heights in the North Atlantic Ocean and related atmospheric circulation regimes, 14 (10), 2204–2221. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2001\)014<2204:COEWHI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2001)014<2204:COEWHI>2.0.CO;2)
- Westra, S., Alexander, L., & Zwiers, F. (2013). Global increasing trends in annual maximum daily precipitation. *Journal of Climate*, 26(11), 3904–3918. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00502.1>
- Zhang, X., Alexander, L., Hegerl, G., Jones, P., Klein, T, Peterson, T. C., Trewin, B., & Zwiers, F. W. (2011). Indices for monitoring changes in extremes based on daily temperature and precipitation data. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 2(6), 851–870. <https://doi.org/10.1002/wcc.147>
- Zwiers, F., & Kharin, V. (1998). Changes in the extremes of the climate simulated by CCC GCM2 under CO2 doubling. *Journal of Climate*, 11(12), 2200–2222. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1998\)011<2200:CITEOT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1998)011<2200:CITEOT>2.0.CO;2)

Transparencia

Conflicto de interés

Los autores declaran que no existen conflictos de interés de naturaleza alguna como parte de la presente investigación.

Fuente de financiamiento

Los autores financiaron completamente la investigación.

Contribución de autoría

Lina Carla Fernández Gutiérrez: Conceptualización, validación, análisis formal, investigación, gestión de datos, visualización, redacción - preparación del borrador original, redacción - revisión y edición, financiamiento, administración del proyecto, recursos, supervisión.

Jackson David Tellez Alvarez: Conceptualización, metodología, software, validación, análisis formal, investigación, gestión de datos, visualización, redacción - revisión y edición, financiamiento, supervisión.

Los autores contribuyeron activamente en el análisis de los resultados, revisión y aprobación del manuscrito final.