

Evaluación de Datos de Precipitación de Imágenes CHIRPS en Cuencas de Clima Seco y Tropical (San Luis Potosí) y Templado (Estado de México), México Evaluation of precipitation data from CHIRPS images in dry and tropical (San Luis Potosí) and temperate (Mexico State) basins in Mexico

Jorge Guillermo Rodríguez-Herrera¹ , Alejandro Amante-Orozco¹ ,
Carlos Alfonso Muñoz-Robles^{2*} , José Pimentel-López¹ ,
Víctor M. Ruiz-Vera¹ y Esteban Salvador-Osuna³

¹ Colegio de Postgraduados, Posgrado en Innovación en Manejo de Recursos Naturales, Campus San Luis Potosí. Iturbide 73, Col. San Agustín. 78622 Salinas de Hidalgo, San Luis Potosí, México; (J.G.R.H.), (A.A.O.), (J.P.L.), (V.M.R.V.).

² Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Instituto de Investigación de Zonas Desérticas. Altair No. 200, Col. del Llano. 78377 San Luis Potosí, S.L.P., México; (C.A.M.R.).

* Autor para correspondencia: carlos.munoz@uaslp.mx

³ Campo Experimental Pabellón-INIFAP. Carretera Aguascalientes-Zacatecas km 32.5. 20660 Pabellón de Arteaga, Aguascalientes, México; (E.S.O.).

RESUMEN

La modelación hidrológica requiere datos de precipitación como insumo básico, ya que representa la principal entrada de agua en el sistema hidrológico. Estos datos se obtienen principalmente de estaciones climatológicas, pero en muchos casos la cantidad de estaciones es insuficiente, además de que pueden tener datos faltantes, lo que ocasiona errores en la modelación. Con el avance tecnológico en la teledetección, los datos de precipitación satelitales de libre acceso están tomando importancia como insumo potencial para la modelación hidrológica. El objetivo de esta investigación es evaluar dos fuentes de datos de precipitación: estaciones meteorológicas e imágenes CHIRPS (Climate Hazards Center InfraRed Precipitation Station). Se compararon ambas fuentes en tres cuencas con climas contrastantes (seco, templado y tropical). El análisis se basó en medidas estadísticas como el coeficiente de correlación de Spearman ρ (ρ), el error medio cuadrático (RMSE) y la prueba de Wilcoxon para detectar correlaciones y diferencias estadísticas. Los resultados revelaron una correlación positiva y significativa ($P < 0.05$) entre ambas fuentes de datos en las tres cuencas, aunque con variación según el tipo de clima. Los errores de precipitación más bajos (RMSE < 21 mm) se registraron en las zonas templada y seca, mientras que, en la zona tropical, las imágenes CHIRPS subestimaron la precipitación, mientras que la mayor similitud ($P > 0.05$) entre ambas fuentes se encontró en la zona templada. Por lo tanto, las imágenes CHIRPS son una alternativa viable que puede sustituir a las estaciones meteorológicas en la modelación hidrológica, especialmente en cuencas de climas templados.

Palabras clave: estaciones climatológicas, gasto, imágenes de satélite, modelación hidrológica, SWAT.

SUMMARY

Hydrological modeling requires precipitation data as a basic input since it represents the primary water source entering the hydrological system. These data are mainly obtained from weather stations, but in many cases, the number of stations is low, and may have missing data, leading to errors in modeling. With technological advances in remote sensing, freely accessible satellite precipitation data are gaining importance as a potential input for hydrological modeling. Thus, the objective of the present research is to evaluate two sources of precipitation data: weather stations and CHIRPS (Climate Hazards Center InfraRed Precipitation Station) imagery.



Cita recomendada:

Rodríguez-Herrera, J. G., Amante-Orozco, A., Muñoz-Robles, C. A., Pimentel-López, J., Ruiz-Vera, V. M., & Salvador-Osuna, E. (2025). Evaluación de Datos de Precipitación de Imágenes CHIRPS en Cuencas de Clima Seco y Tropical (San Luis Potosí) y Templado (Estado de México), México. *Terra Latinoamericana*, 43, 1-13. e1953. <https://doi.org/10.28940/terra.v43i.1953>

Recibido: 15 de mayo de 2024.
Aceptado: 5 de noviembre de 2024.
Artículo. Volumen 43.
Febrero de 2025.

Editor de Sección:
Dr. Antonio Juárez-Maldonado

Editor Técnico:
Dr. Gerardo Cruz Flores



Copyright: © 2025 by the authors.
Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC ND) License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

Both sources were compared across three basins with contrasting climates (arid, temperate, and tropical). The analysis was based on statistical measures, such as Spearman's correlation coefficient ρ (rho), Root Mean Square Error (RMSE), and the Wilcoxon test to detect correlations and statistical differences. The results revealed a positive and significant correlation ($P < 0.05$) between both data sources across the three basins, though with variations depending on the climate type. The RMSE (< 21 mm) were recorded in temperate and arid regions, while in the tropical region, CHIRPS imagery underestimated precipitation. The greatest similarity ($P > 0.05$) between the two sources was found in the temperate region, which suggests that CHIRPS imagery is a viable alternative to weather stations for hydrological modeling, especially in temperate climate basins.

Index words: *climate stations, runoff, satellite images, hydrological modeling, SWAT.*

INTRODUCCIÓN

La precipitación pluvial es un componente importante del ciclo hidrológico e impulsa el cambio y la dinámica hidrológica a nivel mundial (Wang *et al.*, 2020) y es de suma importancia para los sistemas hidrológicos, agrícolas, industriales, energéticos, sociales y culturales (Asurza-Véliz, Ramos y Lavado, 2018). También es una variable importante en muchos estudios científicos, aplicaciones operativas y modelación hidrológica (Fernandez-Palomino *et al.*, 2021). La precipitación en los modelos hidrológicos es un elemento indispensable en el conjunto de datos climáticos de entrada, por lo que la representación detallada y precisa de su distribución temporal y espacial es esencial, para lograr la modelación de los procesos hidrológicos en cuencas (Cho, Bosch, Lowrance, Strickland y Vellidis, 2009).

Sin embargo, la distribución espacial y temporal de la lluvia presenta a menudo una gran variabilidad, por lo que es actualmente uno de los componentes climáticos más difíciles de incorporar a los modelos hidrológicos (Wang *et al.*, 2020). En la actualidad se mide en las estaciones meteorológicas de campo y con sistemas de teledetección espacial, como satélites y radares. Las estaciones meteorológicas han sido históricamente los instrumentos más utilizados en los diversos estudios y modelos hidrológicos (Li y Shao, 2010). Por su parte, Ramírez-Cruz, López e Ibáñez (2015), aplicaron ecuaciones de lluvia intensa generalizada para obtener la intensidad mensual máxima de lluvia en 30 min a partir de datos de precipitación máxima y recomiendan implementar la metodología desarrollada en ese estudio en otras cuencas donde se carece de la información pluviográfica o de estaciones meteorológicas automáticas para obtener la intensidad máxima de la lluvia en 30 min para cada mes.

No obstante, el uso de los datos climáticos medidos por estaciones meteorológicas implica el riesgo de que estos datos no se encuentren en la longitud temporal requerida (un mínimo de 30 años), o posean datos discontinuos o faltantes (Tan, Gassman, Liang y Haywood, 2021), debido a la escasa distribución o abandono de las estaciones, a una mala captura de datos, operación inadecuada de pluviómetros o inestabilidad política. Estos problemas generan que los modelos hidrológicos presenten alta incertidumbre y bajos rendimientos en el momento de su aplicación (Li, Christakos, Ding y Wu, 2018). Asimismo, Muche *et al.* (2020) señalan la posibilidad de que al utilizar datos de precipitación de estaciones meteorológicas, éstas no capturen la totalidad de los patrones espacio-temporales y la variabilidad de la lluvia, ya que, en muchas ocasiones las estaciones meteorológicas se encuentran distribuidas en puntos específicos que no representan la totalidad de las condiciones geo-orográficas de la región, como lo recomienda la Organización Meteorológica Mundial (WMO, 2018). Con base en esta problemática, el uso de mediciones de la precipitación mediante sistemas de teledetección, es de gran utilidad, ya que los datos son espacial y temporalmente continuos y pueden cubrir la totalidad de una zona geográfica de interés y no solo localizaciones puntuales como lo harían las estaciones meteorológicas (Huang *et al.*, 2020). Además de contar con una cobertura espacial amplia, los satélites meteorológicos tienen una resolución temporal alta (p. ej.: por hora o diaria), son de acceso libre y global en la mayoría de los casos, por lo que estos datos están tomando cada vez más relevancia, y pueden emplearse como alternativa para el modelado hidrológico; sin embargo, es necesaria una rigurosa evaluación de estas fuentes de datos antes de su implementación (Li, Christakos, Ding y Wu, 2018).

La medición de la precipitación mediante teledetección espacial se basa en una combinación de diferentes tecnologías y métodos que pueden incluir sensores de microondas, infrarrojos, radares de apertura sintética y radares de precipitación, los cuales se combinan y procesan utilizando algoritmos avanzados para proporcionar estimaciones precisas y detalladas de la precipitación a nivel global (Mohia *et al.*, 2023). Actualmente la implementación de mediciones de precipitación con base en datos de satélite para modelos hidrológicos es considerada una buena opción para superar las limitaciones de las estaciones meteorológicas (Muche *et al.*, 2020; Tan *et al.*, 2021). Especialmente en zonas donde la densidad de las estaciones meteorológicas es escasa (Katirae-Boroujerdy, Akbari Asanjan, Hsu y Sorooshian, 2017; Li *et al.*, 2018; Luo, Wu, He, Li y Ji, 2019).

Existen diversos estudios que han usado modelos hidrológicos con datos de precipitación provenientes de teledetección espacial. Sin embargo, en la mayoría se han realizado modelaciones con el objetivo de comparar y evaluar diferentes productos de precipitación para una cuenca. Por ejemplo, Pang *et al.* (2020) implementaron una evaluación de tres productos de precipitación de acceso abierto en la cuenca del río Jiang ubicada en el suroeste de China con el fin de analizar la similitud de caudales modelados utilizando las mediciones de precipitación y las satelitales. Los datos de precipitación fueron el producto de Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station (CHIRPS), que se genera por medio de la combinación de datos satelitales y de estaciones terrestres para proporcionar estimaciones de precipitación precisas y detalladas, que lo convierte en una herramienta invaluable para diversas aplicaciones ambientales y climáticas (Funk *et al.*, 2015); el producto de Climate Prediction Center Gauge-Based Analysis of Global Daily Precipitation (CPC), que al igual que CHIRPS combina de datos de estaciones terrestres, pero emplea técnicas avanzadas de interpolación que proporcionan estimaciones precisas y detalladas de la precipitación global (Chen y Xie, 2008¹) y por último, las estaciones meteorológicas ubicadas en la cuenca. Asimismo, Tuo, Duan, Disse y Chiogna (2016) evaluaron diferentes fuentes de datos de precipitación para la simulación hidrológica en el programa Soil and Water Assessment Tool (SWAT), con el objetivo de identificar las diferencias ocasionadas por el uso de estos productos en el balance hidrológico en tres cuencas ubicadas en el norte de Italia; los datos de precipitación empleados fueron datos interpolados mediante el método de ponderación con el inverso de la distancia (IDW), datos de imágenes CHIRPS, imágenes de la Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) y datos de estaciones meteorológicas. Aunque aplicaron el modelo en tres cuencas diferentes y evaluaron las simulaciones del balance hidrológico con los cuatro productos de precipitación para cada cuenca, éstas se ubicaban en una misma región climática, pero con rangos altitudinales diferentes, lo que no proporciona una idea clara sobre su aplicación en otras zonas climáticas.

El estudio realizado por Dhanesh *et al.* (2020), tuvo como propósito comparar y evaluar el desempeño de tres conjuntos de datos de precipitación en la simulación del caudal diario y mensual dentro del modelo SWAT: el Climate Forecast System Reanalysis (CFRS), CHIRPS y datos de estaciones meteorológicas. El estudio incluyó diez cuencas ubicadas en ocho zonas climáticas, y los resultados indicaron que CHIRPS tuvo el mejor ajuste, es decir, que los datos de CHIRPS eran los más similares a la precipitación medida por las estaciones meteorológicas.

Debido a lo anterior, los datos de precipitación obtenidos por satélites pueden ser considerados como una alternativa a las estaciones meteorológicas. En particular, el producto CHIRPS es de gran utilidad debido a la cobertura mundial que tiene, lo que lo ha posicionado como una de las fuentes alternas de precipitación más empleadas en modelación hidrológica (Paredes-Trejo, Alves, Peñaloza, Moreno y Farías, 2016).

En México existen alrededor de 3329 estaciones climatológicas en operación (SMN, 2022). A pesar del número relativamente alto de estaciones en algunas regiones de México, particularmente en el noreste y centro del país, existen grandes áreas con densidad baja de estaciones, y muchas de ellas cuentan con observaciones históricas con datos faltantes, lo que dificulta el estudio y análisis de la variabilidad de la precipitación a diferentes escalas espacio-temporales (Perdigón-Morales, Romero, Pérez y Barrett, 2018).

Una solución a esta problemática es emplear los datos de precipitación basados en imágenes de satélite que estiman la precipitación a una escala global, y que, además, brindan la posibilidad de monitorizar continuamente la lluvia en grandes extensiones y casi en tiempo real (Kaptué, Hanan, Prihodko y Ramirez, 2015). Asimismo, otra de las ventajas de usar mediciones de precipitación satelital, es que son distribuidas a un largo plazo por agencias espaciales nacionales y servicios meteorológicos acreditados, y en su mayor parte, se encuentran disponibles para su descarga en línea de forma gratuita (Wild, Chua y Kuleshov, 2021).

El uso de estos datos posibilita realizar simulaciones hidrológicas eficientes, ante los distintos obstáculos que pueden presentar las estaciones meteorológicas. De esta manera, el objetivo de la presente investigación fue comparar los datos de precipitación provenientes de estaciones meteorológicas con imágenes CHIRPS, en tres cuencas con climas contrastantes (seco, templado y tropical) utilizando medidas estadísticas ampliamente aceptadas como el coeficiente de correlación de Spearman ρ (rho), el error medio cuadrático (RMSE) y la prueba de Wilcoxon para detectar la correlación, el error, las diferencias y similitudes estadísticas que pueden presentarse entre ambos productos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Áreas de Estudio

El estudio se centró en evaluar la precipitación utilizando imágenes CHIRPS y estaciones meteorológicas en tres zonas climáticas contrastantes en México. Se seleccionaron tres cuencas, cuenca del río Verde (clima seco) y cuenca del río Axtla en San Luis Potosí (clima tropical) y la cuenca del río Cuautitlán en el estado de México

¹ Chen, M., & Xie, P., (2008). CPC Unified Gauge-based Analysis of Global Daily Precipitation. In *Western Pacific Geophysics Meeting* (pp. 179-184). Australia: Clivar.

(clima templado; Cuadro 1). La selección se basó en dos criterios principales; primero, cada cuenca debía contar con una estación hidrométrica con la finalidad de contar con el punto de aforo, y, en segundo lugar, que tuviera una serie de datos históricos con al menos 25 años de registros consecutivos. Las cuencas se delimitaron utilizando el módulo de delimitación de cuencas del modelo hidrológico SWAT, utilizando el modelo digital de elevación de INEGI (INEGI, 2023) con una resolución espacial de 15 m, y las tres estaciones hidrométricas, que representaron los puntos de salida hacia los cuales drena el agua y determinan el área de captación de cada cuenca.

Posteriormente, se llevó a cabo una selección espacial de las estaciones meteorológicas situadas tanto dentro de cada cuenca o adyacentes a ella, a una distancia ≤ 20 km del límite de cada cuenca, ya que las estaciones adyacentes también aportan información de precipitación cercana a las cuencas de estudio. Se eligieron aquellas estaciones que contaran con series de datos diarios de precipitación > 25 años de registros consecutivos y con una cantidad de datos faltantes ≤ 2 años. Encontrar estaciones que cumplan estos requisitos es difícil en muchas ocasiones debido a interrupciones en la operación de las estaciones o al instrumental dañado. Para identificar las estaciones a emplear, se elaboraron gráficos de tipo *heatmap* con los datos de precipitación para cada cuenca (Figura 1), lo que permitió corroborar la proporción de años completos: 96.4% para la cuenca del Río Verde, 93.5% para la cuenca del Río Cuautitlán y 96.7% para la cuenca del río Verde. Finalmente, siete estaciones para cada cuenca delimitada (Figura 2) cumplieron con los criterios de selección y con datos diarios para el periodo 1987-2015 (Cuadro 2) y fueron utilizadas para los análisis subsecuentes.

De acuerdo con la clasificación de Köppen, la cuenca del Río Verde se ubica en una zona climática seca, con temperatura media mensual que oscila entre 18 y 22 °C, con temperatura extrema superior a 26 °C y precipitación media anual de 100 a 300 mm. Por otra parte, en la cuenca del río Cuautitlán (clima templado) se registra una temperatura media entre 12 °C y 18 °C, con una precipitación media anual entre 600 y 1500 mm. La cuenca del río Axtla, con un clima tropical, presenta temperatura media anual superior a 18 °C y precipitación media anual que oscila entre rango de 800 a 4000 mm anuales.

Datos CHIRPS

Para obtener los datos diarios de precipitación de las imágenes CHIRPS se empleó el paquete "chirps" en el programa R (R Core Team, 2024), que proporciona una interfaz de programación de aplicaciones (API) para obtener los datos de precipitación en forma de puntos desde 1981 a la fecha (Funk *et al.*, 2015). El paquete requiere como primer dato de entrada un rango de fechas, que para este estudio abarcó del 1 de enero de 1987 al 31 de diciembre de 2015. Después se incorporó la ubicación puntual (longitud y latitud), de cada una de las estaciones meteorológicas de las tres cuencas de estudio.

Evaluación del Producto de Precipitación CHIRPS

Para determinar la fiabilidad de los datos provenientes de CHIRPS, se realizaron tres análisis estadísticos: el coeficiente de correlación de Spearman ρ (rho), de la raíz cuadrada del error cuadrático medio (RMSE) y la prueba de Wilcoxon. Antes de estos análisis, se llevó a cabo la prueba de normalidad de Kolmogorov-Smirnov en ambos conjuntos de datos de precipitación (de las estaciones meteorológicas y de las imágenes CHIRPS) para verificar si seguían una distribución normal y así fundamentar la elección de las pruebas estadísticas adecuadas. Este análisis mostró que los datos de ambas fuentes no cumplían con el supuesto de normalidad, por lo que se optó por usar la prueba de Wilcoxon. Primero, se utilizó el análisis de correlación de Spearman ρ (rho), entre los datos de precipitación de las estaciones meteorológicas y los datos de CHIRPS para evaluar la fuerza y dirección de la relación entre las dos fuentes de datos. Además, se estimó el error medio cuadrático (RMSE), (Ecuación 1), primero mediante el cálculo del error de predicción para cada observación (la diferencia entre el valor observado y el valor predicho) y luego evaluando la diferencia entre los valores de precipitación registrados en las estaciones y en las imágenes CHIRPS.

Cuadro 1. Área y perímetro de las cuencas estudiadas. Todas las cuencas se encuentran en la región hidrológica no. 26, Pánuco.
Table 1. Area and perimeter of the studied basins. All basins are located within the hydrological region 26, Panuco.

| Estación | Nombre de la Cuenca | Perímetro | Área | Zona climática | Estado |
|----------|---------------------|-----------|-----------------|----------------|------------------|
| | | km | km ² | | |
| 26389 | Río Verde | 111 | 179 | Seca | San Luis Potosí |
| 26243 | Río Axtla | 195 | 561 | Tropical | San Luis Potosí |
| 26056 | Río Cuautitlán | 263 | 785 | Templada | Estado de México |

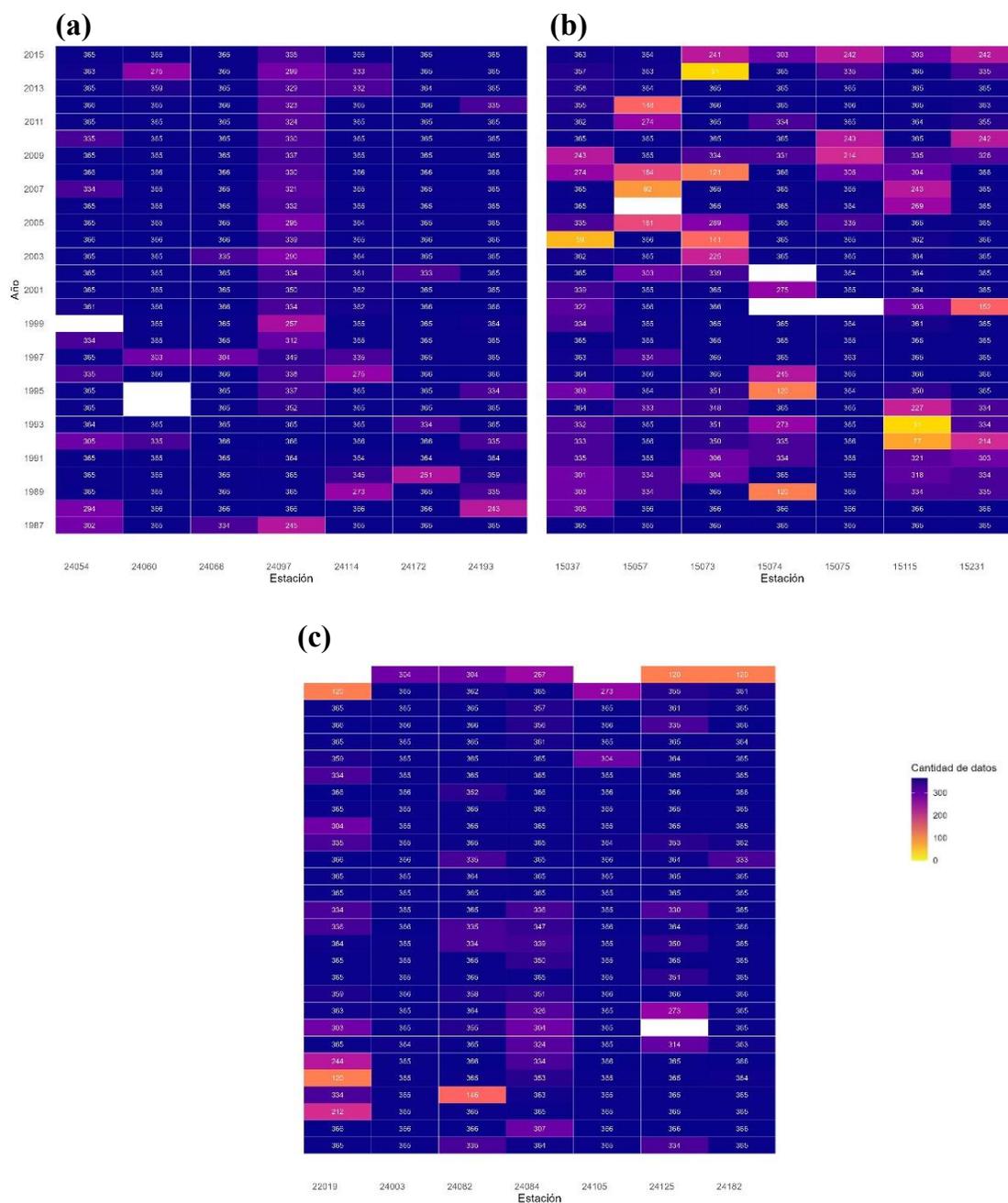


Figura 1. Completitud de datos de precipitación en las estaciones seleccionadas para: (a) cuenca del Río Verde en la zona climática seca; (b) cuenca del Río Cuautitlán en la zona climática templada; (c) cuenca del Río Axtla, en la zona climática tropical.
Figure 1. Completeness of precipitation data of the selected climatic stations for: (a) Rio Verde basin, in the temperate climate zone; (b) Rio Cuautitlan basin, in the temperate climate zone; (c) Rio Axtla basin, in the tropical climate zone.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_t - y)^2}{n}} \tag{1}$$

Donde: \hat{y}_t = Es el dato actual u observado (Precipitación de estaciones meteorológicas), y = Es el dato predicho (Precipitación de CHIRPS) y n = Es el número de datos.

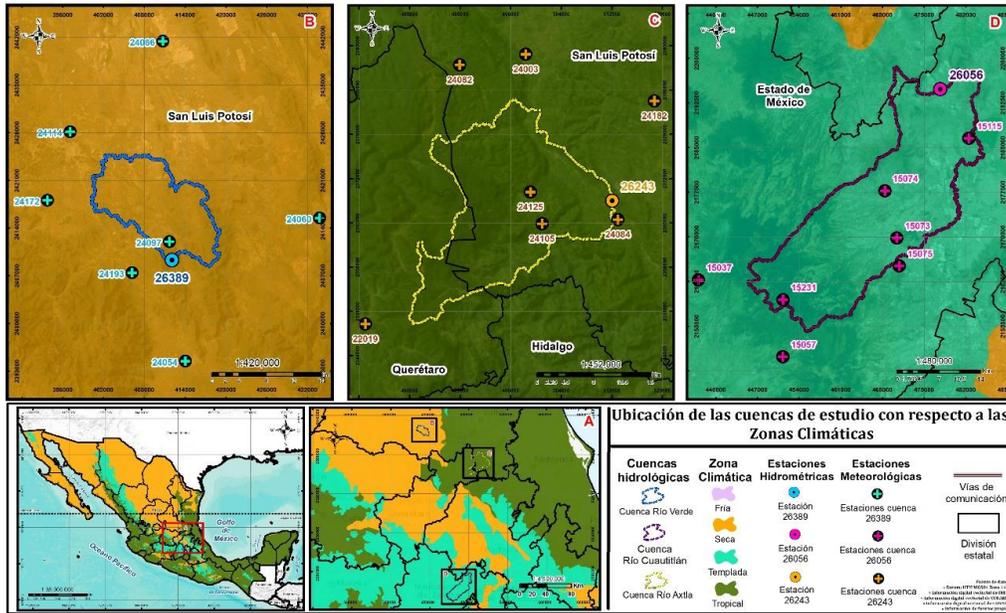


Figura 2. Ubicación de las estaciones meteorológicas e hidrométricas y las cuencas de estudio.
Figure 2. Location of meteorological and gauging stations and studied basins.

Finalmente, se aplicó la prueba pareada de los signos de Wilcoxon, que es una prueba no paramétrica para responder a la hipótesis de que las dos fuentes de datos son idénticas o no. De esta manera, se empleó esta prueba para determinar si existía diferencia significativa entre los datos de precipitación medida por las estaciones meteorológicas y los datos estimados por las imágenes CHIRPS en escala mensual dentro de cada cuenca. El nivel de significancia para el análisis se estableció en $P < 0.05$. Por lo tanto, un valor de P mayor a 0.05 indicó que no hay diferencias significativas entre ambas fuentes de datos, mientras que un valor de P menor a 0.05 sugiere que existen diferencias significativas. Todas las pruebas estadísticas se realizaron en el programa R, con la librería de MLmetrics (Yachen, 2016), la cual se empleó para el cálculo de la correlación de Spearman y de la raíz cuadrada del error cuadrático medio (RMSE), mientras que para la prueba de Wilcoxon se calculó con la función con la que cuenta el programa R, para su cálculo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este estudio se compararon los datos de precipitación mensual obtenida de las dos fuentes de información: las imágenes CHIRPS y de las estaciones meteorológicas de CONAGUA (Comisión Nacional del Agua), para cada cuenca distribuida en tres zonas climáticas contrastantes.

El análisis de correlación indicó correlaciones positivas y significativas ($P < 0.05$) dentro de cada zona climática entre los datos de precipitación de las imágenes CHIRPS y las estaciones meteorológicas en escala mensual. Los valores del coeficiente de correlación de Spearman oscilaron entre 0.73 (clima templado) y 0.98 (clima tropical; Cuadro 3), lo que sugiere que los datos provenientes de CHIRPS están estrechamente correlacionados con los de las estaciones meteorológicas y podrían usarse para describir la variación de la precipitación mensual en las tres zonas climáticas.

Los valores más bajos del RMSE se observaron en la zona climática seca (5.22 mm en diciembre (Cuadro 4) y las menores diferencias entre los valores de precipitación (Cuadro 4), (Figura 3). En contraste, en la zona tropical se observaron los errores más altos (104.56 mm en julio) y las mayores diferencias entre los valores de precipitación medidos por las estaciones meteorológicas y las imágenes CHIRPS. Esto puede deberse a que las zonas climáticas secas y templadas tienen una precipitación total menor y una magnitud de la variabilidad menor en comparación con las zonas tropicales. La menor cantidad de precipitación en las zonas secas y templadas conduce a errores de precipitación absoluta más bajos en la predicción de los datos, lo que se refleja en valores de RMSE bajos. En contraste, las zonas tropicales suelen tener precipitaciones mucho más altas y variables; esta variabilidad y magnitud de las precipitaciones alta en las zonas tropicales pueden resultar en errores de predicción más grandes, lo que conduce a valores más altos de RMSE.

Cuadro 2. Estaciones meteorológicas para cada cuenca. † Indica que la estación está dentro de la cuenca. ‡ Indica que la estación se encuentra adyacente al límite de la cuenca (< 20 km).

Table 2. Weather stations for each basin. † Indicates that the station is within the basin. ‡ Indicates that the station is adjacent to the basin boundary (< 20 km).

| Nombre de la Cuenca | Clave de la estación | Municipio | Longitud | | Latitud | Altitud | |
|---------------------|----------------------|-----------------------------|------------------|-----|---------|---------|------|
| | | | grados decimales | | | | |
| Río Verde | 24 054† | Pedro Montoya | 99.830 | 556 | 21.651 | 111 | 920 |
| | 24 060† | Rayón | 99.640 | 833 | 21.841 | 944 | 972 |
| | 24 066† | San Francisco | 99.865 | 278 | 22.075 | 556 | 1013 |
| | 24 097† | Vigas | 99.854 | 444 | 21.809 | 444 | 995 |
| | 24 114† | Río Verde (DGE) | 99.996 | 389 | 21.954 | 722 | 991 |
| | 24 172† | Manantial de la Media Luna | 100.028 | 056 | 21.863 | 611 | 1006 |
| | 24 193† | San José de Tapanco | 99.906 | 944 | 21.768 | 056 | 907 |
| Río Axtla | 22 019‡ | La Lagunita | 99.260 | 278 | 21.242 | 222 | 1087 |
| | 24 003‡ | Aquismón | 99.015 | 833 | 21.627 | 778 | 33 |
| | 24 082‡ | Tamapatz | 99.116 | 667 | 21.612 | 50 | 1071 |
| | 24 084‡ | Tancuilin | 98.875 | 000 | 21.391 | 667 | 92 |
| | 24 105† | Xilitla | 98.990 | 556 | 21.385 | 556 | 676 |
| | 24 125† | Tlamaya | 99.008 | 333 | 21.430 | 833 | 619 |
| | 24 182‡ | Tampomolon | 98.819 | 167 | 21.560 | 833 | 91 |
| Río Cuautitlán | 15 037‡ | Jiquipilco | 99.600 | 000 | 19.559 | 167 | 2772 |
| | 15 057‡ | Mimiapan | 99.464 | 444 | 19.443 | 056 | 2882 |
| | 15 073† | Presa Guadalupe | 99.282 | 222 | 19.623 | 333 | 2310 |
| | 15 074† | Presa la Concepción | 99.301 | 667 | 19.695 | 000 | 2300 |
| | 15 075‡ | Presa las Ruinas | 99.278 | 333 | 19.581 | 111 | 2360 |
| | 15 115† | Santo Tomas Puente Colgante | 99.166 | 944 | 19.774 | 722 | 2250 |
| | 15 231† | Presa Iturbide | 99.464 | 167 | 19.529 | 444 | 3290 |

El análisis de comparación mediante la prueba de Wilcoxon reveló que la mayor similitud entre los datos de las estaciones meteorológicas y las imágenes CHIRPS se encontró en la zona templada en donde solo hubo diferencia significativa en el mes de julio ($P < 0.05$; Cuadro 5), lo que indica que para esta zona climática y en esta cuenca, con excepción del mes de julio, no hay diferencias en la precipitación entre ambas fuentes de datos, y la precipitación de las imágenes CHIRPS es similar que la medida en las estaciones meteorológicas. Sin embargo, en la zona seca, las diferencias en precipitación entre las dos fuentes de datos fueron significativas en siete meses del año ($P < 0.05$), mientras que en la zona climática tropical la precipitación mensual fue diferente entre ambas fuentes de precipitación en todos los meses del año ($P > 0.05$). Esto sugiere que, en las zonas climáticas templada y tropical y sus respectivas cuencas, es necesario tener cautela al usar la precipitación de las imágenes CHIRPS como variable *proxy* de la precipitación medida en las estaciones meteorológicas, ya que la precipitación puede diferir entre ambos productos.

Zona Seca

Para la cuenca del río Verde (zona seca), los coeficientes de correlación oscilaron entre ρ (rho) = 0.75 y 0.96 y todos fueron significativos ($P < 0.05$). Estos coeficientes son más altos que los obtenidos en otros estudios similares como los desarrollados en la cuenca del río Tekeze (Reda, Liu, Haile, Sun y Tang, 2022), con precipitaciones entre 200 a 800 mm, donde se registraron coeficientes de correlación entre 0.58 y 0.73, en la cuenca del Indo en Pakistán, donde se obtuvieron coeficientes entre 0.43 y 0.79 (Shahid et al., 2021) y en las cuencas de Souss Massa y del Alto Draa (Rachdane et al., 2022), ubicadas al sur de Marruecos, con coeficientes de correlación entre 0.48 y 0.79. Estos resultados demuestran que las imágenes de CHIRPS presentan correlaciones significativas con los datos recolectados por las estaciones meteorológicas en zonas secas, fortaleciendo así la validez y utilidad de CHIRPS como herramienta para la evaluación y monitoreo de condiciones climáticas en áreas de clima seco.

Cuadro 3. Coeficientes de correlación de Spearman (ρ rho) entre precipitación promedio acumulada mensual registrada en estaciones meteorológicas y la estimada por imágenes CHIRPS en cada zona climática.
Table 3. Spearman correlation coefficients (ρ rho) between monthly average accumulated precipitation recorded at meteorological stations and that estimated by CHIRPS images in each climatic zone.

| Meses | Clima seco (Cuenca del Río Verde) | | Clima templado (Cuenca del Río Cuautitlán) | | Clima tropical (Cuenca del Río Axtla) | |
|------------|-----------------------------------|------------|--|------------|---------------------------------------|--------------|
| | ρ (rho) | P | ρ (rho) | P | ρ (rho) | P |
| Enero | 0.91 | **1.09E-13 | 0.85 | **2.13E-10 | 0.86 | **8.159E-11 |
| Febrero | 0.80 | **1.72E-08 | 0.75 | **3.03E-07 | 0.82 | **3.0329E-09 |
| Marzo | 0.82 | **2.91E-09 | 0.86 | **7.16E-11 | 0.83 | **1.0544E-09 |
| Abril | 0.95 | **7.33E-18 | 0.84 | **7.01E-10 | 0.88 | **9.736E-12 |
| Mayo | 0.90 | **9.12E-13 | 0.89 | **1.90E-12 | 0.90 | **7.6283E-13 |
| Junio | 0.90 | **7.63E-13 | 0.83 | **1.58E-09 | 0.93 | **4.5981E-15 |
| Julio | 0.95 | **8.38E-18 | 0.76 | **1.48E-07 | 0.96 | **9.5172E-19 |
| Agosto | 0.96 | **5.07E-20 | 0.74 | **6.60E-07 | 0.98 | **3.6563E-24 |
| Septiembre | 0.92 | **8.57E-15 | 0.88 | **6.91E-12 | 0.95 | **5.6658E-18 |
| Octubre | 0.93 | **9.19E-16 | 0.92 | **7.58E-15 | 0.95 | **1.1163E-17 |
| Noviembre | 0.79 | **4.86E-08 | 0.86 | **1.36E-10 | 0.85 | **3.4338E-10 |
| Diciembre | 0.75 | **6.22E-07 | 0.73 | **1.46E-06 | 0.81 | **1.3245E-08 |

Al comparar los resultados del RMSE con investigaciones que emplearon el producto CHIRPS en zonas climáticas secas, se encontraron similitudes con los errores cuadráticos medios entre 20 y 45 mm reportados en Pakistan (Shahid *et al.*, 2021). Esto se debe principalmente a la baja cantidad de la precipitación que caracteriza a este tipo de climas.

En los meses de febrero, marzo, abril, agosto y noviembre las precipitaciones de las estaciones y CHIRPS fueron similares ($P > 0.05$), estos meses corresponden a la mayoría de los meses secos. Sin embargo, en la mayor parte del año las precipitaciones de ambos productos no son equiparables.

Zona Templada

En la cuenca del Río Cuautitlán de la zona climática templada se obtuvieron coeficientes de correlación de Spearman significativos ($P < 0.05$) que oscilaron entre 0.73 y 0.93. Estos resultados son similares a los encontrados en la cuenca del río Jialing en China ($R = 0.97$; Pang *et al.*, 2020) y en cuencas de España ($R = 0.98$; Dhanesh *et al.*, 2020), en donde se emplearon 20 estaciones meteorológicas con datos de 1997 a 2018 y 11 estaciones con datos de 1988 a 2013, respectivamente. Por otra parte, se registraron errores cuadráticos medios que oscilaron entre $RMSE = 7.2$ y 47 mm. Este resultado es menor al error observado en la cuenca del lago Ziway en Etiopía, que osciló entre 63.3 y 66.01 mm (Musie, Sen y Srivastava, 2019) donde se utilizaron nueve estaciones con datos de 1985 a 2005. Tanto la similitud de la precipitación y del RMSE con respecto a estos estudios, sugiere una relación evidente entre las mediciones de las estaciones meteorológicas y las estimaciones de precipitación de CHIRPS en entornos climáticos templados.

El único mes en donde los datos de lluvia registrados por las imágenes CHIRPS no fueron similares ($P < 0.05$) a los datos de precipitación de las estaciones meteorológicas fue en julio. En este mes se presenta la mayor cantidad de precipitación media (181.83 mm), lo que sugiere que en la cuenca del Río Cuautitlán con precipitaciones mensuales superiores a este valor estos productos no pueden considerarse similares.

Cuadro 4. RMSE (Root Mean Square Error) de los datos de precipitación mensual registrada por las estaciones meteorológicas y las imágenes CHIRPS, por zona climática.**Table 4. RMSE Error of monthly precipitation data recorded by meteorological stations and CHIRPS images by climatic zone.**

| Cuenca del río Verde (zona climática seca) | | | | | | |
|---|--|--|--------------|------------------------------------|--------|--|
| Meses | Precipitación media mensual, estaciones meteorológicas | Precipitación media mensual, imágenes CHIRPS | RMSE mensual | Diferencia entre Estación y CHIRPS | | |
| | | | | mm | % | |
| Enero | 9.49 | 12.34 | 5.37 | -2.85 | -30.01 | |
| Febrero | 9.80 | 8.58 | 9.84 | 1.23 | 12.50 | |
| Marzo | 9.34 | 8.24 | 13.35 | 1.11 | 11.83 | |
| Abril | 19.93 | 20.46 | 11.19 | -0.53 | -2.66 | |
| Mayo | 29.10 | 35.91 | 15.24 | -6.81 | -23.41 | |
| Junio | 63.82 | 75.47 | 25.07 | -11.65 | -18.26 | |
| Julio | 91.88 | 99.21 | 23.85 | -7.33 | -7.98 | |
| Agosto | 70.05 | 70.06 | 15.28 | -0.02 | -0.02 | |
| Septiembre | 105.39 | 109.39 | 24.70 | -4.00 | -3.79 | |
| Octubre | 51.11 | 59.24 | 17.97 | -8.13 | -15.90 | |
| Noviembre | 15.49 | 15.22 | 10.40 | 0.26 | 1.71 | |
| Diciembre | 7.37 | 8.94 | 5.22 | -1.57 | -21.26 | |
| Cuenca del río Cuautitlán (zona climática templada) | | | | | | |
| Meses | Precipitación media anual acumulada, estaciones meteorológicas | Precipitación media anual acumulada, imágenes CHIRPS | RMSE mensual | Diferencia entre Estación y CHIRPS | | |
| | | | | mm | % | |
| Enero | 10.14 | 9.16 | 7.20 | 0.98 | 9.70 | |
| Febrero | 13.56 | 7.09 | 21.67 | 6.47 | 47.68 | |
| Marzo | 13.18 | 9.19 | 11.75 | 3.99 | 30.27 | |
| Abril | 25.94 | 23.43 | 7.74 | 2.51 | 9.67 | |
| Mayo | 61.03 | 59.00 | 13.55 | 2.04 | 3.34 | |
| Junio | 137.77 | 130.35 | 24.03 | 7.42 | 5.38 | |
| Julio | 181.83 | 161.10 | 42.87 | 20.73 | 11.40 | |
| Agosto | 163.45 | 146.85 | 47.82 | 16.60 | 10.15 | |
| Septiembre | 139.01 | 131.48 | 24.93 | 7.52 | 5.41 | |
| Octubre | 60.34 | 56.15 | 16.78 | 4.19 | 6.94 | |
| Noviembre | 16.83 | 17.21 | 10.10 | -0.38 | -2.24 | |
| Diciembre | 6.70 | 4.90 | 7.49 | 1.80 | 26.86 | |
| Cuenca del río Axtla (zona climática tropical) | | | | | | |
| Meses | Precipitación media acumulada mensual, estaciones meteorológicas | Precipitación media acumulada mensual, imágenes CHIRPS | RMSE mensual | Diferencia entre Estación y CHIRPS | | |
| | | | | mm | % | |
| Enero | 54.00 | 36.60 | 24.12 | 17.39 | 32.21 | |
| Febrero | 52.61 | 33.40 | 24.66 | 19.21 | 36.51 | |
| Marzo | 61.45 | 28.01 | 47.47 | 33.44 | 54.42 | |
| Abril | 97.56 | 60.09 | 48.36 | 37.48 | 38.41 | |
| Mayo | 146.42 | 103.14 | 65.53 | 43.28 | 29.56 | |
| Junio | 257.71 | 200.59 | 81.11 | 57.12 | 22.17 | |
| Julio | 341.52 | 273.99 | 104.56 | 67.53 | 19.77 | |
| Agosto | 271.75 | 215.48 | 79.88 | 56.27 | 20.71 | |
| Septiembre | 402.14 | 342.05 | 104.50 | 60.09 | 14.94 | |
| Octubre | 218.37 | 175.72 | 68.95 | 42.65 | 19.53 | |
| Noviembre | 86.87 | 58.74 | 43.49 | 28.12 | 32.38 | |
| Diciembre | 49.56 | 26.85 | 29.62 | 22.72 | 45.83 | |

Cuadro 5. Resultados de la prueba de Wilcoxon para la comparación de la precipitación mensual registrada por las estaciones meteorológicas y las imágenes CHIRPS (Climate Hazards Center InfraRed Precipitation Station). Valores en negritas indican diferencias significativas ($P < 0.05$).

Table 5. Results of the Wilcoxon test for the comparison of monthly precipitation recorded by weather stations and CHIRPS (Climate Hazards Center InfraRed Precipitation Station) images. Values in bold indicate significant differences ($P < 0.05$).

| Meses | Clima Seco | Clima Templado | Clima Tropical |
|------------|---------------|----------------|----------------|
| Enero | *0.00 | 0.65 | *0.00 |
| Febrero | 0.31 | 0.06 | *0.00 |
| Marzo | 0.05 | 0.05 | *0.00 |
| Abril | 0.18 | 0.13 | *0.00 |
| Mayo | *0.00 | 0.78 | *0.00 |
| Junio | *0.00 | 0.13 | *0.00 |
| Julio | *0.03 | *0.01 | *0.00 |
| Agosto | 0.41 | 0.07 | *0.00 |
| Septiembre | *0.04 | 0.09 | *0.00 |
| Octubre | **0.00 | 0.35 | 0.00 |
| Noviembre | 0.11 | 0.12 | *0.00 |
| Diciembre | 0.01 | 0.84 | *0.00 |

Zona Tropical

En la cuenca del Río Axtla, con clima tropical, se obtuvieron coeficientes de correlación de Spearman altos ($R = 0.81$ y 0.95) y significativos ($P < 0.05$) entre los datos de las imágenes CHIRPS y las estaciones meteorológicas. Estos resultados se asemejan a los obtenidos en investigaciones previas en entornos tropicales con precipitaciones mayores 1800 mm. Por ejemplo, en la cuenca del río Grande de San Miguel en El Salvador y en la cuenca del río Baitarani en la India, donde se reportaron coeficientes de correlación de 0.89 a 0.94 y 0.95, respectivamente (Dhanesh *et al.*, 2020; Jimeno-Sáez, Blanco, Pérez, Cecilia y Senent, 2021). Otros resultados similares fueron registrados en Yunnan, China (Wu *et al.*, 2019), con $R = 0.89$ y en el departamento de Antioquia, Colombia (López-Bermeo, Montoya, Caro y Díaz, 2022) con $R = 0.87$. Estos hallazgos indican que, en general, CHIRPS muestra una correlación positiva y elevada con las estaciones meteorológicas en zonas tropicales.

Por otro lado, para el RMSE en esta zona climática se registraron errores que oscilaron entre 24.12 a 107.56 mm. Este resultado es similar al rango de error (58.63 a 161.78 mm), obtenido en el departamento de Antioquia, Colombia (López-Bermeo *et al.*, 2022) donde se presentan precipitaciones de 1392.18 a 3110.10 mm, similar al rango de lluvias que presenta la cuenca del Río Axtla.

Al identificar, a través del RMSE, la amplitud de los errores de la precipitación presentes en esta zona climática se observó que las diferencias entre estos dos productos podrían ser significativas. Esta observación fue respaldada por la prueba de Wilcoxon, que demostró diferencias significativas ($P < 0.05$) en todos los meses y en todas las estaciones de esta zona climática. Esto sugiere que, en condiciones de precipitaciones altas, los datos de las imágenes CHIRPS y las estaciones meteorológicas no pueden considerarse similares.

Con estos resultados y considerando las medidas estadísticas previamente aplicadas, se puede reforzar que, al igual que en otros sitios, los datos de CHIRPS presentan una correlación significativa con los datos de las estaciones meteorológicas, un error bajo y en general se pueden considerar ambos productos como similares, con excepción de la zona climática tropical. La zona climática templada muestra los resultados más consistentes en cada una de estas pruebas, seguido por la zona climática seca, y finalmente, la tropical. A pesar de los resultados menos favorables en la zona tropical, se sugiere que CHIRPS podría ser útil para el modelado hidrológico ante la ausencia o escasez de estaciones meteorológicas, aunque su aplicación puede tener ciertas limitaciones.

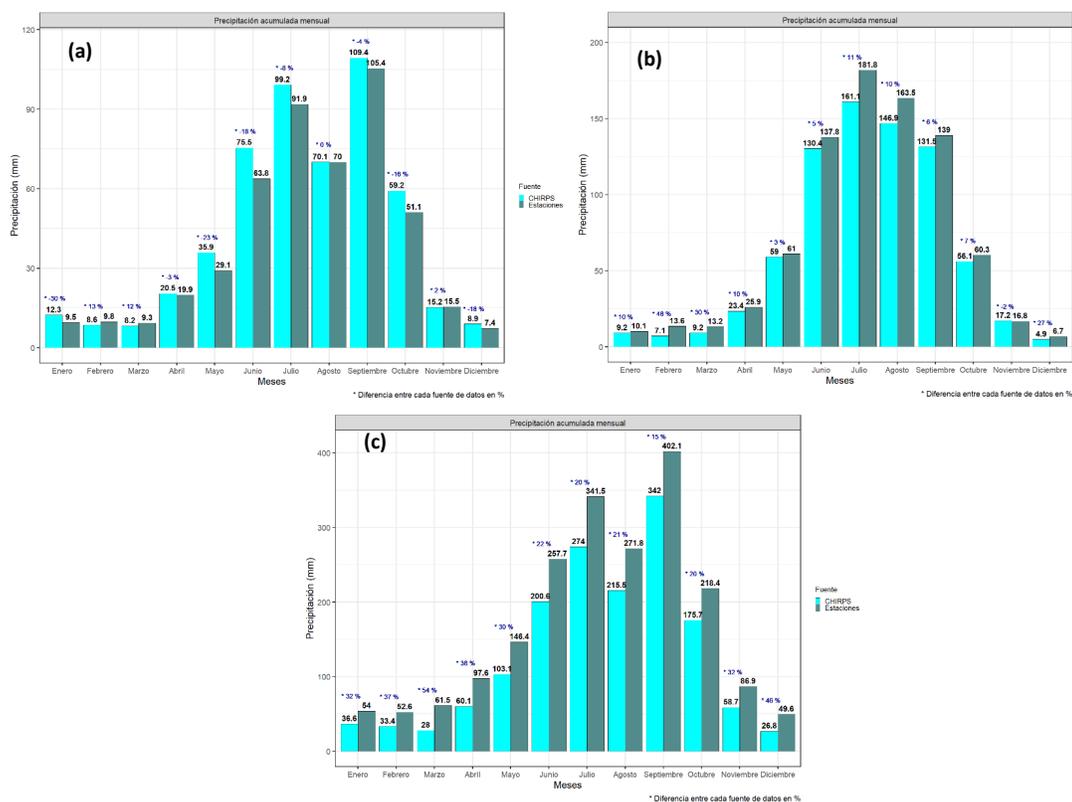


Figura 3. Precipitación mensual promedio medida en estaciones meteorológicas e imágenes CHIRPS (Climate Hazards Center InfraRed Precipitation Station) en cuencas hidrológicas en diferentes zonas climáticas: (a) Cuenca del río Verde (clima seco); (b) Cuenca del río Cuautitlán (clima templado); (c) Cuenca del río Axtla (clima tropical).
Figure 3. Average monthly precipitation measured at meteorological stations and CHIRPS (Climate Hazards Center InfraRed Precipitation Station) images in basins in different climatic zones: (a) Rio Verde basin (dry climate); (b) Rio Cuautitlán basin (temperate climate); (c) Rio Axtla basin (tropical climate).

Los estudios que comparan las diferencias entre los valores absolutos de precipitación proveniente de estos productos son escasos (p. ej.: pruebas de T o Wilcoxon), por lo que su contextualización con respecto a condiciones similares es compleja. Por esta razón, se recomienda llevar a cabo mayor investigación que permita facilitar las comparaciones de la precipitación entre estos productos para robustecer su aplicación en modelos hidrológicos.

CONCLUSIONES

Los resultados de este estudio indican que los datos de precipitación de las imágenes CHIRPS son similares a los de las estaciones meteorológicas para describir la variación mensual de la precipitación con base en análisis de correlación y análisis comparativos en las tres cuencas estudiadas de las zonas climáticas analizadas. Se encontraron correlaciones positivas y significativas ($R > 0.73$) entre la precipitación de ambas fuentes de datos en las tres cuencas con diferentes climas: tropical (río Axtla), templado (río Cuautitlán) y seco (río Verde). Los errores cuadráticos medios más bajos ($RMSE < 21$ mm) de precipitación se registraron en las zonas climáticas templadas y secas, mientras que los errores más altos ocurrieron en la cuenca de zona tropical (hasta 68 mm), en donde las imágenes CHIRPS subestimaron la precipitación. Por otra parte, la mayor similitud de la precipitación entre ambas fuentes de datos se encontró en la zona templada, donde solo se hallaron diferencias significativas en el mes de julio. En zonas secas, las diferencias fueron significativas en siete meses del año, mientras que, en la zona tropical, no se encontró similitud en la precipitación mensual entre ambas fuentes de datos.

Con base en los resultados de este estudio, las imágenes CHIRPS constituyen una herramienta valiosa para complementar la información de las estaciones meteorológicas, especialmente en áreas con baja densidad de estaciones o con datos escasos. Su disponibilidad resulta crucial cuando no se cuenta con datos de estaciones meteorológicas, ya que la precipitación de las imágenes CHIRPS son en su mayoría estadísticamente similares a los registrados en dichas estaciones.

DECLARACIÓN DE ÉTICA

No aplicable.

CONSENTIMIENTO PARA PUBLICACIÓN

No aplicable

DISPONIBILIDAD DE DATOS

Los conjuntos de datos utilizados o analizados durante el estudio actual están disponibles del autor correspondiente a solicitud razonable.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no tienen intereses en competencia, en esta sección.

FINANCIACIÓN

No aplicable.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Conceptualización e idea principal: J.G.R.H., J.P.L. y C.A.M.R. Metodología y análisis de datos: J.G.R.H., J.P.L. y C.A.M.R. Escritura: preparación de borrador original: J.G.R.H., J.P.L. y C.A.M.R. Escritura, revisión y edición final: J.G.R.H., J.P.L. y C.A.M.R., A.A.O., V.M.R.V. y E.S.O.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo económico de la beca de estudios del autor principal.

LITERATURA CITADA

- Asurza-Véliz, F. A., Ramos-Taípe, C. L., & Lavado-Casimiro, W. S. (2018). Assessment of Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) and Global Precipitation Measurement (GPM) products in hydrological modeling of the Huancane river basin, Peru. *Scientia Agropecuaria*, 9(1), 53-62.
- Cho, J., Bosch, D., Lowrance, R., Strickland, T., & Vellidis, G. (2009). Effect of spatial distribution of rainfall on temporal and spatial uncertainty of SWAT output. *Transactions of the ASABE*, 52(5), 1545-1556. <https://doi.org/10.13031/2013.29143>
- Dhanesh, Y., Bindhu, V. M., Senent-Aparicio, J., Brighenti, T. M., Ayana, E., Smitha, P. S., ... & Srinivasan, R. (2020). A comparative evaluation of the performance of CHIRPS and CFSR data for different climate zones using the SWAT model. *Remote Sensing*, 12(18), 3088. <https://doi.org/10.3390/rs12183088>
- Fernandez-Palomino, C. A., Hattermann, F. F., Krysanova, V., Lobanova, A., Vega-Jácome, F., Lavado, W., ... & Bronstert, A. (2022). A novel high-resolution gridded precipitation dataset for Peruvian and Ecuadorian watersheds: Development and hydrological evaluation. *Journal of Hydrometeorology*, 23(3), 309-336.
- Funk, C., Peterson, P., Landsfeld, M., Pedreros, D., Verdin, J., Shukla, S., ... & Michaelsen, J. (2015). The climate hazards infrared precipitation with stations-a new environmental record for monitoring extremes. *Scientific Data*, 2(1), 1-21.
- Huang, Q., Qin, G., Zhang, Y., Tang, Q., Liu, C., Xia, J., ... & Post, D. (2020). Using remote sensing databased hydrological model calibrations for predicting runoff in ungauged or poorly gauged catchments. *Water Resources Research*, 56(8), e2020WR028205. <https://doi.org/10.1029/2020WR028205>
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). (2023). Continuo de elevaciones mexicano. Consultado el 20 de enero, 2022, desde <https://www.inegi.org.mx/app/geo2/elevacionesmex/>
- Jimeno-Sáez, P., Blanco-Gómez, P., Pérez-Sánchez, J., Cecilia, J. M., & Senent-Aparicio, J. (2021). Impact assessment of gridded precipitation products on streamflow simulations over a poorly gauged basin in El Salvador. *Water*, 13(18), 2497. <https://doi.org/10.3390/w13182497>
- Kaptué, A. T., Hanan, N. P., Prihodko, L., & Ramirez, J. A. (2015). Spatial and temporal characteristics of rainfall in Africa: Summary statistics for temporal downscaling. *Water Resources Research*, 51(4), 2668-2679.
- Katiraie-Boroujerdy, P. S., Asanjan, A. A., Hsu, K. L., & Sorooshian, S. (2017). Intercomparison of PERSIANN-CDR and TRMM-3B42V7 precipitation estimates at monthly and daily time scales. *Atmospheric Research*, 193, 36-49. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2017.04.005>
- Lí, D., Christakos, G., Ding, X., & Wu, J. (2018). Adequacy of TRMM satellite rainfall data in driving the SWAT modeling of Tiaoxi catchment (Taihu lake basin, China). *Journal of Hydrology*, 556, 1139-1152. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.01.006>

- Li, M., & Shao, Q. (2010). An improved statistical approach to merge satellite rainfall estimates and raingauge data. *Journal of Hydrology*, 385(1-4), 51-64. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.01.023>
- López-Bermeo, C., Montoya, R. D., Caro-Lopera, F. J., & Díaz-García, J. A. (2022). Validation of the accuracy of the CHIRPS precipitation dataset at representing climate variability in a tropical mountainous region of South America. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 127, 103184. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2022.103184>
- Luo, X., Wu, W., He, D., Li, Y., & Ji, X. (2019). Hydrological Simulation Using TRMM and CHIRPS Precipitation Estimates in the Lower Lancang-Mekong River Basin. *Chinese Geographical Science*, 29(1), 13-25. <https://doi.org/10.1007/s11769-019-1014-6>
- Mohia, Y., Absi, R., Lazri, M., Labadi, K., Ouallouche, F., & Ameer, S. (2023). Quantitative Estimation of Rainfall from Remote Sensing Data Using Machine Learning Regression Models. *Hydrology*, 10(2), 52. <https://doi.org/10.3390/hydrology10020052>
- Muche, M. E., Sinnathamby, S., Parmar, R., Knightes, C. D., Johnston, J. M., Wolfe, K., ... & Smith, D. (2020). Comparison and evaluation of gridded precipitation datasets in a Kansas agricultural watershed using SWAT. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 56(3), 486-506. <https://doi.org/10.1111/1752-1688.12819>
- Musie, M., Sen, S., & Srivastava, P. (2019). Comparison and evaluation of gridded precipitation datasets for streamflow simulation in data scarce watersheds of Ethiopia. *Journal of Hydrology*, 579, 124168. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124168>
- Pang, J., Zhang, H., Xu, Q., Wang, Y., Wang, Y., Zhang, O., & Hao, J. (2020). Hydrological evaluation of open-access precipitation data using SWAT at multiple temporal and spatial scales. *Hydrology and Earth System Sciences*, 24(7), 3603-3626. <https://doi.org/10.5194/hess-24-3603-2020>
- Paredes-Trejo, F. J., Alves-Barbosa, H., Peñalosa-Murillo, M. A., Moreno, M. A., & Farías, A. (2016). Intercomparison of improved satellite rainfall estimation with CHIRPS gridded product and rain gauge data over Venezuela. *Atmósfera*, 29(4), 323-342.
- Perdigón-Morales, J., Romero-Centeno, R., Pérez, P. O., & Barrett, B. S. (2018). The midsummer drought in Mexico: perspectives on duration and intensity from the CHIRPS precipitation database. *International Journal of Climatology*, 38(5), 2174-2186.
- R Core Team (2024). *R: A language and environment for statistical computing*. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing.
- Rachdane, M., Khalki, E. M. E., Saidi, M. E., Nehmadou, M., Ahbari, A., & Trambly, Y. (2022). Comparison of high-resolution satellite precipitation products in sub-saharan Morocco. *Water*, 14(20), 3336. <https://doi.org/10.3390/w14203336>
- Ramírez-Cruz, H., López-Velasco, O., & Ibáñez-Castillo, L. A. (2015). Estimación mensual de intensidad de la lluvia en 30 minutos a partir de datos pluviométricos. *Terra Latinoamericana*, 33(2), 151-159.
- Reda, K. W., Liu, X., Haile, G. G., Sun, S., & Tang, Q. (2022). Hydrological evaluation of satellite and reanalysis-based rainfall estimates over the Upper Tekeze Basin, Ethiopia. *Hydrology Research*, 53(4), 584-604.
- SMN (Servicio Meteorológico Nacional). (2022). Información Estadística Climatológica, Estadística Climática. Datos diarios de precipitación, temperatura máxima y mínima. Consultado EL 20 de enero, 2023, desde <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica/informacion-estadistica-climatologica>.
- Shahid, M., Rahman, K. U., Haider, S., Gabriel, H. F., Khan, A. J., Pham, Q. B., ... & Anh, D. T. (2021). Assessing the potential and hydrological usefulness of the CHIRPS precipitation dataset over a complex topography in Pakistan. *Hydrological Sciences Journal*, 66(11), 1664-1684. <https://doi.org/10.1080/02626667.2021.1957476>
- Tan, M. L., Gassman, P. W., Liang, J., & Haywood, J. M. (2021). A review of alternative climate products for SWAT modelling: Sources, assessment and future directions. *Science of the Total Environment*, 795, 148915. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148915>
- Tuo, Y., Duan, Z., Disse, M., & Chiogna, G. (2016). Evaluation of precipitation input for SWAT modeling in Alpine catchment: A case study in the Adige river basin (Italy). *Science of the Total Environment*, 573, 66-82.
- Wang, X., Li, B., Chen, Y., Guo, H., Wang, Y., & Lian, L. (2020). Applicability evaluation of multisource satellite precipitation data for hydrological research in arid mountainous areas. *Remote Sensing*, 12(18), 2886. <https://doi.org/10.3390/rs12182886>
- Wild, A., Chua, Z. W., & Kuleshov, Y. (2021). Evaluation of satellite precipitation estimates over the south west pacific region. *Remote Sensing*, 13(19), 3929. <https://doi.org/10.3390/rs13193929>
- WMO (World Meteorological Organization). (2018). *Guide to Climatological Practices, WMO-No. 100, World Meteorological Organization*. Geneva, Switzerland: WMO.
- Wu, W., Li, Y., Luo, X., Zhang, Y., Ji, X., & Li, X. (2019). Performance evaluation of the CHIRPS precipitation dataset and its utility in drought monitoring over Yunnan Province, China. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 10(1), 2145-2162. <https://doi.org/10.1080/19475705.2019.1683082>
- Yachen, Y. (2016). Package 'MLmetrics', Machine Learning Evaluation Metrics. Consultado el 24 de febrero, 2024, desde <https://github.com/yanyachen/MLmetrics>