DOI: 10.24850/j-tyca-18-03-10

Artículos

Corrección del sesgo del reanálisis ERA5-Land mediante observaciones terrestres para mejorar la estimación de la precipitación en la cuenca de aportación al embalse de la presa Peñitas, México

Bias correction of ERA5-Land reanalysis using ground observations to improve precipitation estimation in the Peñitas dam reservoir-contributing basin, Mexico

Edgar De Dios Sevilla-Rivera[1], ORCID: https://orcid.org/0009-0008-9293-7488

Faustino De Luna-Cruz[2], ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0455-0072

Maritza Liliana Arganis-Juárez[3], ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1429-1243

Margarita Elizabeth Preciado-Jiménez[4], ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5874-2603

Sinuhé Alejandro Sánchez-Martínez[5], ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2662-9988

[1]Universidad Nacional Autónoma de México-Instituto de Ingeniería, Ciudad de México, México, ESevillaR@iingen.unam.mx

[2]Universidad Nacional Autónoma de México-Instituto de Ingeniería, Ciudad de México, México, FLunaC@iingen.unam.mx

2026, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

[3]Universidad Nacional Autónoma de México-Instituto de Ingeniería, Ciudad de México, México, MArganisJ@iingen.unam.mx

[4]Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Jiutepec, Morelos, México, preciado@tlaloc.imta.mx

[5]Universidad Nacional Autónoma de México-Instituto de Ingeniería, Ciudad de México, México, ingsinuesanchez@hotmail.com

Autora para correspondencia: Maritza Liliana Arganis-Juárez, MArganisJ@iingen.unam.mx

Resumen

El presente trabajo lleva a cabo la evaluación y corrección del sesgo de las estimaciones de precipitación del producto de reanálisis ERA5-Land mediante observaciones de estaciones meteorológicas terrestres ubicadas en la cuenca de aportación al embalse de la presa Peñitas (Central Hidroeléctrica Ángel Albino Corzo), una de las regiones hidrológicamente más importantes del sureste de México. Se compararon series diarias de precipitación correspondientes al evento extremo ocurrido entre el 27 de septiembre y el 6 de octubre de 2020, empleando como métricas el coeficiente de correlación de Pearson (r), el error cuadrático medio (RMSE) y el coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE). Los resultados mostraron que ERA5-Land reproduce adecuadamente la variabilidad espacial de la precipitación, aunque presenta una subestimación sistemática de los valores observados, reflejada en un NSE de −0.80, un RMSE de 25.1 mm d^{-1} y un coeficiente de correlación de 0.44. Para reducir este sesgo se desarrolló una función de transferencia lineal basada en observaciones terrestres, obteniéndose mejoras

2026, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

sustanciales en el desempeño estadístico del producto corregido (NSE = 0.77, RMSE = 7.9 mm d^{-1} y r = 0.88). Los resultados demuestran que la corrección propuesta incrementa significativamente la confiabilidad de ERA5-Land para aplicaciones hidrológicas en cuencas con escasa instrumentación meteorológica. La metodología es reproducible y puede aplicarse en otras cuencas tropicales con características fisiográficas similares.

Palabras clave: precipitación, datos meteorológicos, cuenca fluvial, presa, embalse, modelo matemático, ERA5-Land, presa Peñitas, México.

Abstract

This paper evaluates and corrects the bias of precipitation estimates derived from the ERA5-Land reanalysis product using ground-based meteorological observations within the contributing basin of the Peñitas reservoir (Ángel Albino Corzo Hydroelectric Plant), one of the most hydrologically significant regions in southeastern Mexico. Daily precipitation series corresponding to the extreme event recorded between September 27 and October 6, 2020, were compared using the Pearson correlation coefficient (r), root mean square error (RMSE), and Nash-Sutcliffe efficiency coefficient (NSE). Results showed that ERA5-Land adequately reproduces the spatial variability of precipitation; however, it exhibits a systematic underestimation of observed values, reflected in an NSE of −0.80, an RMSE of 25.1 mm d^{-1}, and a correlation coefficient of 0.44. To reduce this bias, a linear transfer function based on ground observations was developed, yielding substantial improvements in the statistical performance of the bias-corrected product (NSE = 0.77, RMSE = 7.9 mm d^{-1}, and r = 0.88). These findings demonstrate that the

2026, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

proposed correction significantly enhances the reliability of ERA5-Land for hydrological applications in basins with sparse meteorological instrumentation. The methodology is reproducible and can be applied to other tropical basins with similar physiographic characteristics.

Keywords: precipitation, meteorological data, river basins, dams, reservoirs, mathematical models, ERA5-Land, Peñitas dam, Mexico.

Recibido: 14/10/2025

Aceptado: 06/08/2026

Publicado ahead of print: 06/11/2026

1. Introducción

Las observaciones de precipitación constituyen uno de los insumos más importantes para la modelación hidrológica, la gestión de los recursos hídricos, la estimación de disponibilidades de agua, el pronóstico de inundaciones y la evaluación de riesgos asociados a eventos hidrometeorológicos extremos. Sin embargo, en muchas regiones del mundo, especialmente en cuencas tropicales y montañosas, la cobertura espacial y temporal de las redes de observación continúa siendo insuficiente debido a limitaciones operativas, discontinuidad en los registros y problemas de mantenimiento de las estaciones meteorológicas (Sun et al., 2018; WMO, 2022).

Con el propósito de complementar las observaciones in situ, durante las últimas dos décadas se han desarrollado productos globales de precipitación derivados de satélites y de reanálisis atmosféricos. Entre estos últimos, el conjunto ERA5, desarrollado por el Centro Europeo de

2026, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Predicción Meteorológica a Medio Plazo (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF) dentro del programa Copernicus Climate Change Service (C3S) de la Unión Europea, constituye actualmente uno de los reanálisis climáticos de mayor resolución y calidad disponibles a escala global (Hersbach et al., 2020). ERA5 combina millones de observaciones provenientes de estaciones meteorológicas, radiosondas, satélites, aeronaves y otras plataformas mediante técnicas avanzadas de asimilación de datos con un modelo numérico de predicción atmosférica, proporcionando una reconstrucción físicamente consistente del estado de la atmósfera desde 1940 hasta la actualidad.

A partir de este producto se desarrolló ERA5-Land, una versión especializada para aplicaciones terrestres generada por el ECMWF mediante la ejecución fuera de línea (offline) del modelo de superficie terrestre HTESSEL, utilizando como forzamiento meteorológico los campos atmosféricos de ERA5. A diferencia del reanálisis ERA5, ERA5-Land no realiza una nueva asimilación de observaciones atmosféricas, sino que mejora la representación de los procesos de superficie mediante una resolución espacial aproximada de 0.1° (≈9 km), considerablemente más fina que la resolución original de ERA5 (≈0.25°, aproximadamente 31 km). Esta mayor resolución permite describir con mayor detalle la variabilidad espacial de variables hidrológicas como la precipitación, la humedad del suelo, la evaporación y la escorrentía superficial, lo que ha favorecido su utilización en estudios hidrológicos y climáticos (Muñoz-Sabater et al., 2021). No obstante, diversos estudios han demostrado que, aunque ERA5-Land reproduce adecuadamente la distribución espacial y temporal de la precipitación, sus estimaciones presentan sesgos sistemáticos cuya magnitud depende de la región, la topografía y el tipo de precipitación predominante. En regiones montañosas y

2026, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

tropicales, donde predominan procesos convectivos de alta intensidad y fuertes gradientes orográficos, es frecuente la subestimación de eventos extremos de precipitación, lo que puede afectar significativamente aplicaciones relacionadas con la modelación hidrológica, la simulación de avenidas y la gestión de embalses (Beck et al., 2019; Gomis-Cebolla et al., 2023; Alexopoulos et al., 2023).

En México, particularmente en la cuenca de aportación al embalse de la presa Peñitas, localizada en la cuenca del río Grijalva, la disponibilidad de registros pluviométricos continuos continúa siendo limitada debido a la distribución irregular de las estaciones y a las dificultades de operación en zonas de relieve complejo. Esta situación incrementa la dependencia de productos de reanálisis como ERA5-Land; sin embargo, antes de emplearlos en aplicaciones hidrológicas es indispensable evaluar su desempeño frente a observaciones terrestres y, en caso necesario, desarrollar procedimientos de corrección de sesgo que incrementen su confiabilidad.

Con base en esta problemática, el objetivo del presente trabajo es evaluar el desempeño de las estimaciones de precipitación de ERA5-Land mediante su comparación con observaciones de estaciones meteorológicas terrestres y desarrollar una metodología de corrección de sesgo basada en una función de transferencia lineal para mejorar su aplicación en la cuenca de aportación al embalse de la presa Peñitas, México. La principal contribución del estudio consiste en proponer una metodología sencilla, reproducible y transferible a otras cuencas tropicales con disponibilidad limitada de información meteorológica.

La zona de estudio corresponde a la cuenca de aportación al embalse de la presa Peñitas (Central Hidroeléctrica Ángel Albino Corzo), localizada en la porción baja de la cuenca del río Grijalva, en el sureste

2026, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

de México (Figura 1). Esta cuenca abarca territorios de los estados de Chiapas y Tabasco y constituye uno de los sistemas hidrológicos más importantes del país debido a su contribución a la generación de energía hidroeléctrica, el abastecimiento de agua y el control de inundaciones en la planicie tabasqueña.

La presa Peñitas, puesta en operación en 1987, es la última infraestructura del sistema hidroeléctrico del río Grijalva y cuenta con una capacidad instalada de 420 MW, desempeñando un papel estratégico en el Sistema Eléctrico Nacional. Además de la generación de energía, el embalse regula los escurrimientos provenientes de la cuenca alta del Grijalva, contribuyendo a disminuir el riesgo de inundaciones aguas abajo, particularmente en el estado de Tabasco, donde históricamente se han registrado eventos hidrometeorológicos de gran magnitud. Durante eventos hidrometeorológicos extremos, ha sido necesario realizar desfogues extraordinarios del embalse para preservar la seguridad estructural de la presa, lo que ha contribuido al desarrollo de inundaciones en la planicie tabasqueña (SEMARNAT, 2008).

Desde el punto de vista fisiográfico, la cuenca presenta un relieve altamente contrastante. En la parte alta predominan zonas montañosas asociadas con la Sierra Madre de Chiapas, mientras que hacía aguas abajo el terreno evoluciona hacia lomeríos y finalmente hacia las planicies aluviales del estado de Tabasco. La altitud varía desde menos de 20 m.s.n.m. en la planicie costera hasta más de 2,500 m.s.n.m. en las zonas montañosas, lo que genera importantes gradientes de precipitación, temperatura y generación de escurrimiento superficial. La red hidrográfica está dominada por el río Grijalva y sus principales afluentes, los cuales transportan grandes volúmenes de agua hacia el embalse de Peñitas. La combinación de fuertes pendientes en la parte alta de la cuenca, una

2026, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

densa red de drenaje y precipitaciones intensas favorece respuestas hidrológicas rápidas durante eventos meteorológicos extremos.

Uno de los eventos más severos ocurrió en 2007, cuando la combinación de precipitaciones extraordinarias, asociadas con sistemas frontales y la influencia de ciclones tropicales, produjo caudales excepcionales en la cuenca Grijalva-Usumacinta. La operación de las presas del sistema hidroeléctrico, incluyendo Peñitas, requirió incrementos en los gastos de descarga, lo que contribuyó a las inundaciones generalizadas que afectaron aproximadamente el 70 % del territorio del estado de Tabasco, ocasionando importantes pérdidas económicas, sociales y ambientales (SEMARNAT, 2008; CONAGUA, 2008).

Un evento similar se presentó en 2020, cuando la interacción de los frentes fríos No. 4 y No. 5 con los remanentes de la Depresión Tropical 25, posteriormente denominada Tormenta Tropical Gamma, generó precipitaciones extraordinarias en la cuenca alta del río Grijalva. Como consecuencia, fue necesario incrementar los desfogues controlados de la presa Peñitas, provocando nuevamente inundaciones de gran magnitud en diversas localidades de Tabasco. Durante este evento, la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) realizó un seguimiento permanente de las condiciones hidrometeorológicas y de la operación del sistema de presas para reducir el riesgo aguas abajo (CONAGUA, 2020).

Desde el punto de vista climático, la cuenca presenta una elevada variabilidad espacial debido a su compleja fisiografía. Predominan climas cálido-húmedos en las zonas bajas y templado-húmedos en las regiones montañosas de la Sierra Madre de Chiapas. La temperatura media anual varía aproximadamente entre 12 °C y 30 °C, mientras que la precipitación anual supera los 2,000 mm en gran parte de la cuenca y puede alcanzar

2026, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

valores superiores a 3,000 mm en las zonas de mayor influencia orográfica (CEIEG, 2025). Estudios recientes indican que durante la temporada lluviosa (mayo-octubre) la mayor frecuencia de precipitación acumulada anual se concentra entre 2,000 y 2,300 mm, aunque existen sectores donde los acumulados superan los 2,600 mm, reflejando la marcada heterogeneidad espacial de las lluvias.

Estas condiciones fisiográficas y climáticas convierten a la cuenca de aportación al embalse de la presa Peñitas en un sitio de especial interés para la evaluación de productos de reanálisis climático como ERA5-Land. La combinación de relieve complejo, elevada variabilidad espacial de la precipitación y predominio de lluvias convectivas representa un desafío para la estimación de la precipitación mediante productos de reanálisis, por lo que resulta indispensable evaluar y corregir sus posibles sesgos antes de su utilización en aplicaciones hidrológicas, como la modelación lluvia-escurrimiento, la operación de embalses, el pronóstico de inundaciones y la evaluación de la disponibilidad de recursos hídricos.

2026, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Tecnología y Ciencias del Agua
OPEN ACCESS
Check for updates

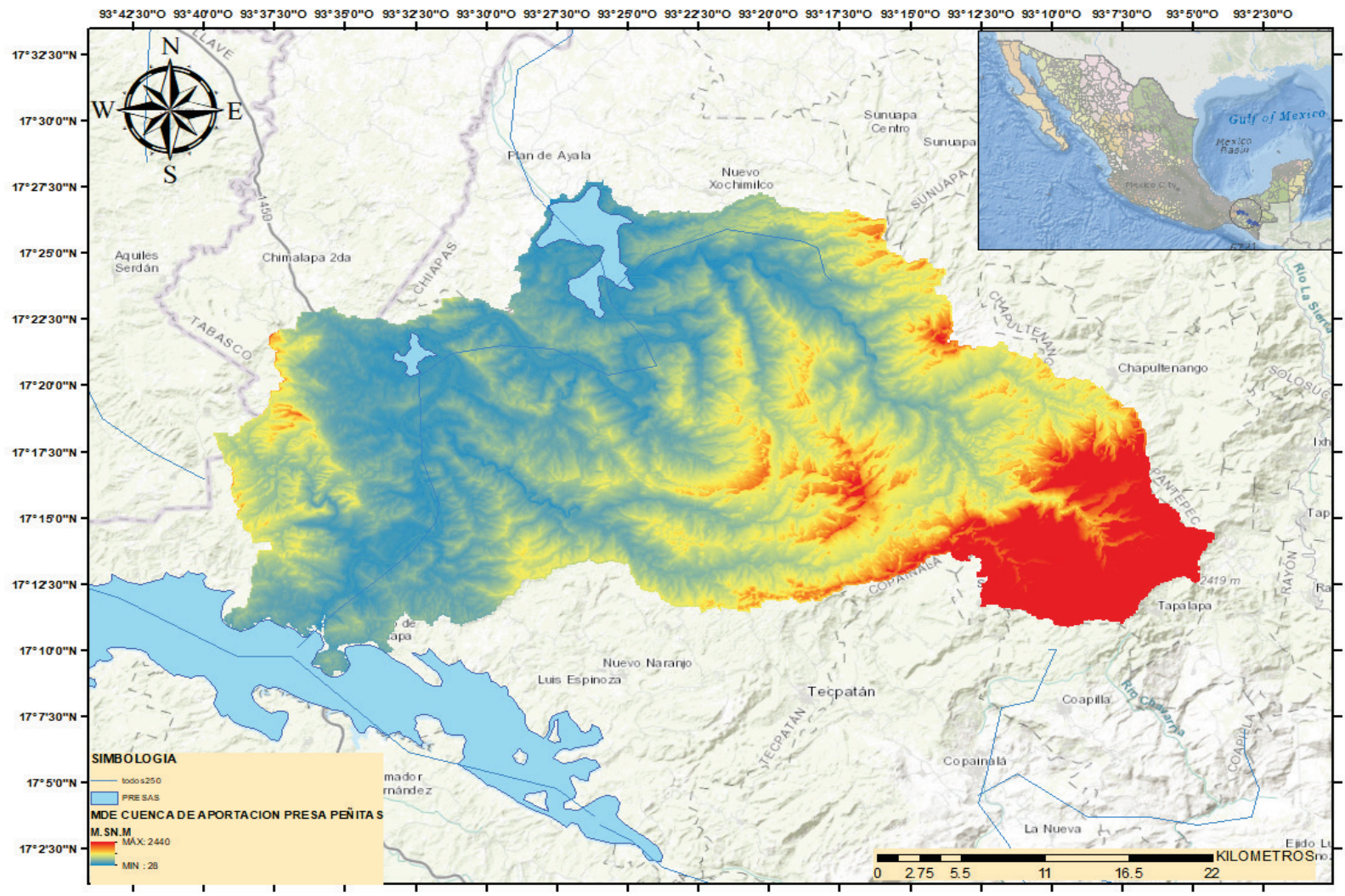


Figura 1. Ubicación de la cuenca de aportación al embalse de la presa Peñitas (Central Hidroeléctrica Ángel Albino Corzo), mostrando el modelo digital de elevación, la red hidrográfica.

2. Materiales y Métodos

2.1. Fuentes de información

La información empleada en este estudio provino de tres fuentes principales:

2026, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

i. estaciones hidrometeorológicas operadas por la Comisión Federal de Electricidad (CFE)

ii. estaciones meteorológicas del Sistema de Información Hidrológica (SIH) de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA)

iii. el producto de reanálisis climático ERA5-Land.

La red hidrometeorológica de la CFE está integrada por 34 estaciones distribuidas dentro de la cuenca de aportación al embalse de la presa Peñitas, cuya finalidad es monitorear las condiciones hidrometeorológicas para apoyar la operación del sistema hidroeléctrico y la gestión del riesgo por inundaciones. Por su parte, el SIH de CONAGUA proporciona registros históricos y recientes de precipitación diaria acumulada, con un horario oficial de observación correspondiente a las 08:00 horas (tiempo del centro de México). En la figura 2 se observa la cuenca de aportación directa al embalse, así como la red de medición de CFE.

2026, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Tecnología y Ciencias del Agua
OPEN ACCESS
Check for updates

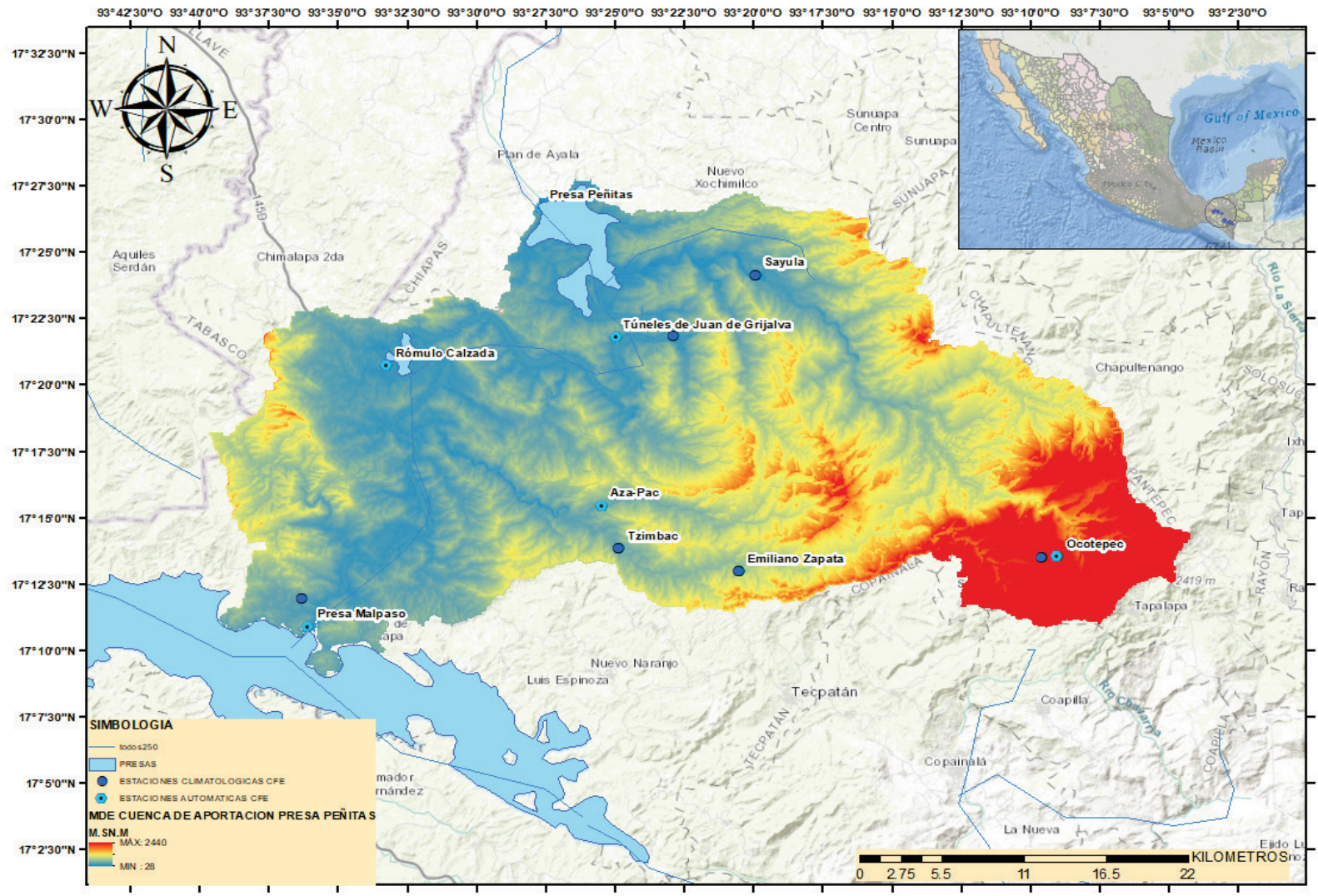


Figura 2. Cuenca de aportación al embalse de la presa Peñitas y su red de medición.

Como fuente complementaria se empleó el producto de reanálisis ERA5-Land, desarrollado por el European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) dentro del programa Copernicus Climate Change Service (C3S). Se utilizó la variable Total Precipitation, con resolución espacial de 0.1° × 0.1° (aproximadamente 9 km) y resolución temporal horaria (Hersbach et al., 2020; Muñoz-Sabater et al., 2021).

2026, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Aunque ERA5-Land proporciona una representación espacial continua de la precipitación, sus estimaciones pueden presentar sesgos debido a que el modelo de superficie terrestre no asimila directamente observaciones pluviométricas, sino que utiliza como forzamiento las variables atmosféricas provenientes del reanálisis ERA5.

2.2. Preparación y homogeneización de la información

Con el propósito de garantizar la comparabilidad entre las diferentes fuentes de información, todas las series de precipitación fueron homogeneizadas temporalmente.

Los registros horarios de ERA5-Land y de las estaciones automáticas de la CFE fueron convertidos a precipitación acumulada diaria utilizando el mismo horario de corte empleado por el Sistema de Información Hidrológica (08:00 horas, tiempo del centro de México). Posteriormente, se realizó un control de calidad para identificar registros incompletos, inconsistencias temporales y valores atípicos. Únicamente se conservaron aquellas fechas para las cuales existía información simultánea en las estaciones meteorológicas y en ERA5-Land.

2.3. Estimación de la precipitación media areal

La precipitación media sobre la cuenca se estimó mediante el método de polígonos de Thiessen, ampliamente utilizado para asignar un área de influencia a cada estación meteorológica cuando la distribución espacial de la red es irregular. Los polígonos fueron generados a partir de la ubicación geográfica de las estaciones utilizando Global Mapper, software empleado para la delimitación de la cuenca, el procesamiento cartográfico

2026, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

y la integración espacial de la información. El porcentaje de influencia de cada estación se calculó mediante:

$$PI = \frac{AI}{AT} * 100 \quad (1)$$

PI = Porcentaje de Influencia, %

AI = Área de Influencia, m^2 o km^2

AI = Área Total, m^2 o km^2

La precipitación media areal se obtuvo mediante:

$$P_{Med} = \sum_{i=1}^{n} [P_i * PI_i] \quad (2)$$

P_{Med} = Precipitación Media, mm

P_i = Precipitación de una estación o punto, mm

PI_i = Porcentaje de influencia

2.4. Corrección del sesgo de ERA5-Land

La evaluación del sesgo se realizó comparando la precipitación media obtenida a partir de las observaciones terrestres con la estimada por ERA5-Land. Se definió un factor de corrección (FC) como la razón entre la precipitación total observada y la precipitación total estimada por el producto de reanálisis:

2026, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

$$FC = \frac{P_{Tot_{REAL}}}{P_{Tot_{TEO}}} \quad (3)$$

2.5. Evaluación estadística

El desempeño de ERA5-Land antes y después de la corrección fue evaluado mediante tres indicadores estadísticos ampliamente utilizados en hidrología:

- Coeficiente de correlación de Pearson (r)
- Error cuadrático medio (RMSE)
- Coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE)

Estas métricas fueron calculadas utilizando la totalidad de las observaciones disponibles durante el periodo de estudio (septiembre-octubre 2020), por lo que representan el desempeño global del producto de reanálisis en la cuenca.

2.6. Esquema metodológico

La Figura 3 resume el procedimiento seguido en esta investigación.

i. Obtención de registros de precipitación de CFE, SIH y ERA5-Land

ii. Homogeneización temporal de las series (08:00 h)

iii. Control de calidad de la información

iv. Delimitación de la cuenca y generación de polígonos de Thiessen

v. Cálculo de la precipitación media areal

2026, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

vi. Comparación entre observaciones y ERA5-Land

vii. Obtención del factor de corrección

viii. Aplicación del ajuste

ix. Evaluación estadística del desempeño antes y después de la corrección

2026, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Tecnología y Ciencias del Agua
OPEN ACCESS
Check for updates

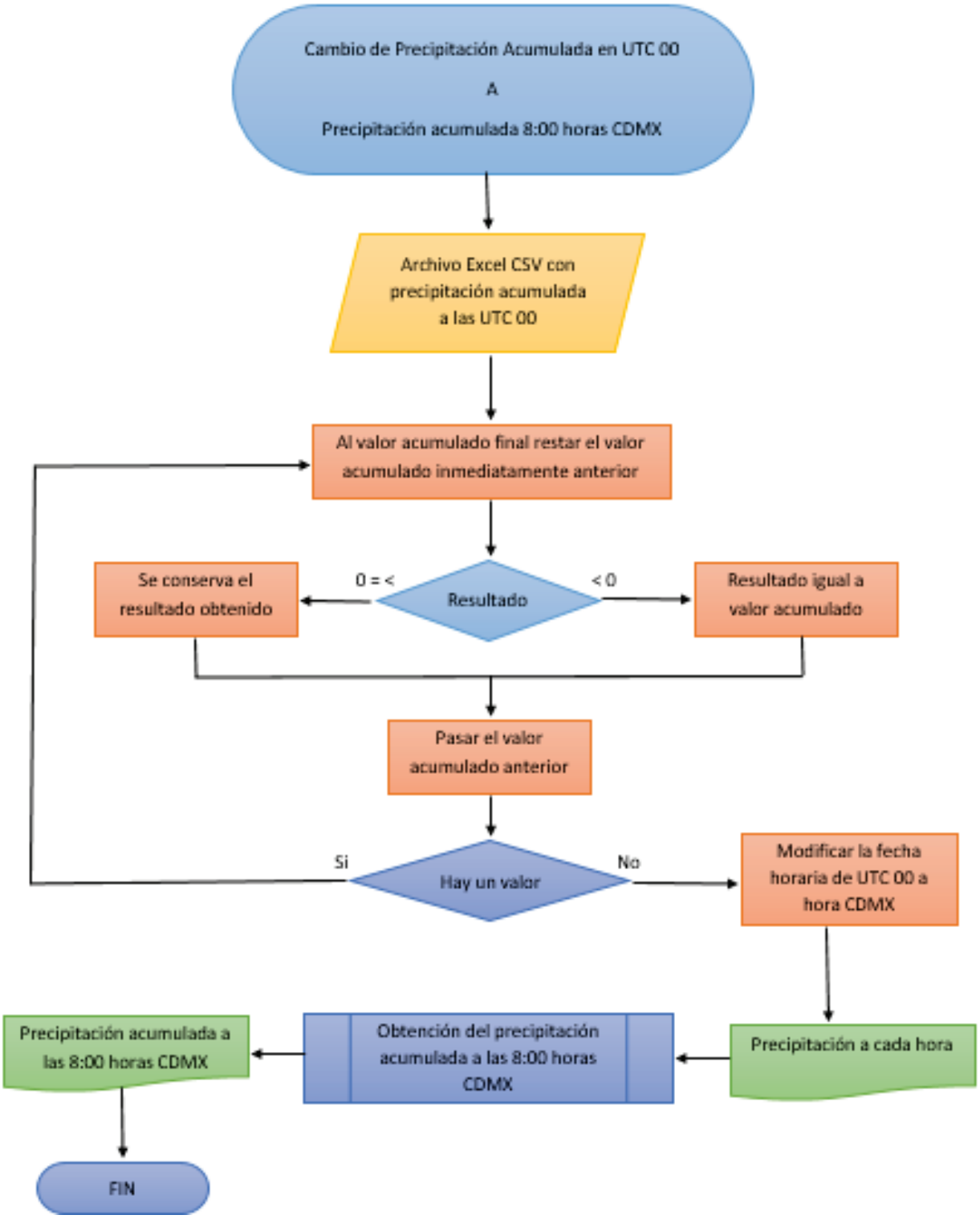


Figura 3 Diagrama de cálculo de precipitación acumulada a las 8:00 CDMX.

2026, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

2.6.1. Manejo de Información de CFE

En el caso de la información de CFE se cuenta con una lectura de precipitación a cada hora por lo que sólo es requerido obtener un acumulado con corte a las 8 hrs CDMX cumpliendo el diagrama indicado en la Figura 4.

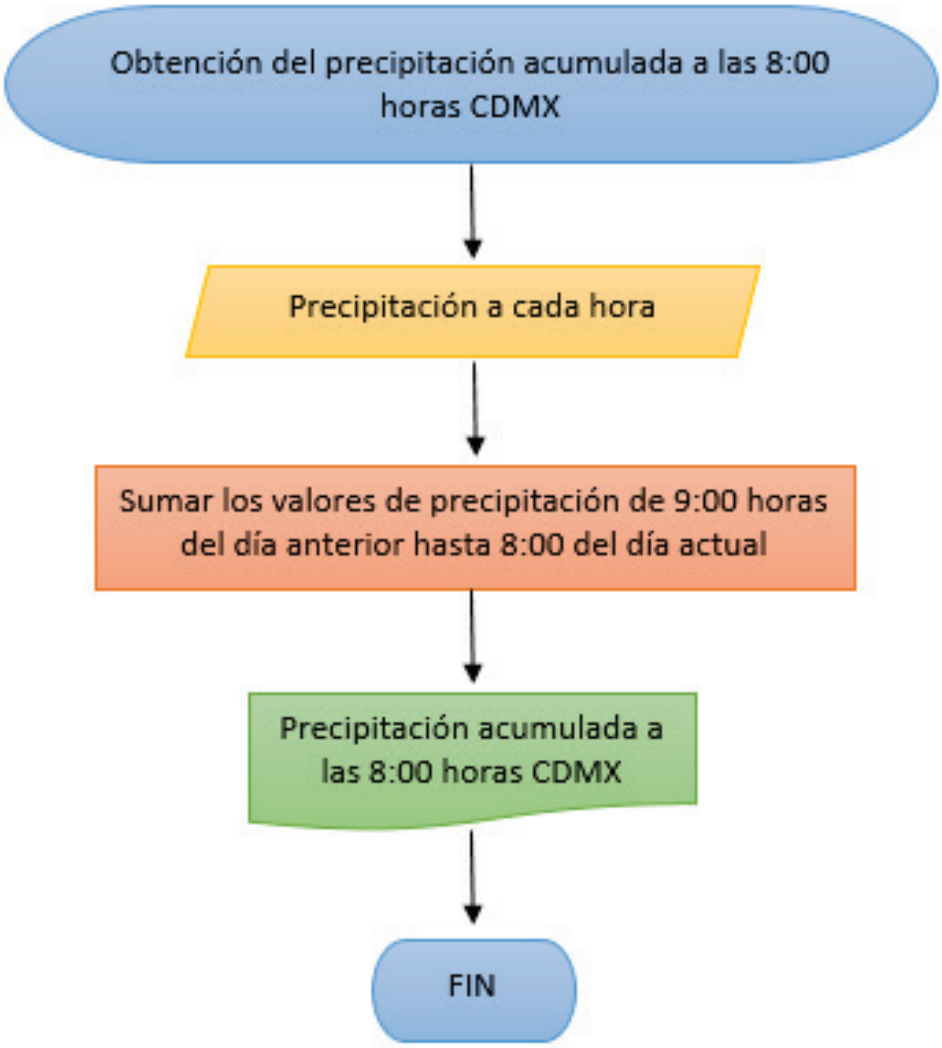


Figura 4. Obtención de la precipitación acumulada con datos de CFE.

2026, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Tecnología y Ciencias del Agua
OPEN ACCESS
Check for updates

3. Resultados y discusión

3.1. Evaluación del desempeño de ERA5-Land

A lo largo de su historia, la cuenca de aportación al embalse de la presa Peñitas ha estado expuesta a múltiples eventos hidrometeorológicos severos. No obstante, para efectos de esta evaluación, el análisis se centró en el evento extremo registrado del 27 de septiembre al 6 de octubre de 2020, asociado a la interacción de frentes fríos con la Tormenta Tropical Gamma.

La comparación entre las precipitaciones estimadas por ERA5-Land y las observadas por la red de estaciones meteorológicas terrestres durante dicho periodo mostró que el producto de reanálisis reproduce de manera adecuada la variabilidad temporal y el inicio de las lluvias; sin embargo, presenta un sesgo sistemático hacia la subestimación de los eventos de mayor intensidad.

El análisis estadístico del evento arrojó un coeficiente de correlación de Pearson (r) de 0.44, un error cuadrático medio (RMSE) de 25.1 mm d^{-1} y un coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) de −0.80. Estos resultados indican que, si bien ERA5-Land capta la tendencia general del fenómeno, su capacidad para reproducir cuantitativamente los picos acumulados es limitada antes de aplicar un procedimiento de corrección.

En particular, el valor negativo del NSE evidencia que las estimaciones originales del reanálisis presentan un desempeño inferior al del promedio de las observaciones terrestres, lo que confirma la existencia de un sesgo estructural en la representación de las lluvias intensas para esta cuenca.

2026, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Tecnología y Ciencias del Agua
OPEN ACCESS
Check for updates

3.2. Corrección del Sesgo

Con el propósito de reducir la subestimación identificada, se desarrolló una función de transferencia lineal basada en la relación entre la precipitación observada y la estimada por ERA5-Land.

Después de aplicar el procedimiento de corrección, el desempeño estadístico mejoró considerablemente. El coeficiente de correlación aumentó de 0.44 a 0.88, el RMSE disminuyó de 25.1 a 7.9 mm d^{-1}, mientras que el NSE pasó de −0.80 a 0.77, lo que representa una mejora sustancial en la capacidad del producto para reproducir la precipitación observada.

Estos resultados demuestran que la mayor parte del error asociado a ERA5-Land corresponde a un sesgo sistemático susceptible de corregirse mediante procedimientos relativamente sencillos de ajuste estadístico.

Tabla 1. Desempeño estadístico de ERA5-Land antes y después de la corrección del sesgo.

Indicador	ERA5-Land original	ERA5-Land corregido
Pearson (r)	0.44	0.88
RMSE (mm d^{-1})	25.1	7.9
NSE	-0.80	0.77

2026, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

3.3. Interpretación Hidrológica de los Resultados

La subestimación observada en el producto ERA5-Land puede atribuirse a diversos factores físicos e instrumentales. La cuenca de aportación al embalse de la presa Peñitas presenta una topografía altamente compleja, caracterizada por fuertes gradientes altitudinales y una elevada influencia orográfica sobre los procesos de condensación y generación de lluvia.

Asimismo, durante la temporada húmeda predominan los procesos convectivos de mesoescala y pequeña escala, cuya representación adecuada constituye uno de los principales desafíos en los modelos atmosféricos globales. En consecuencia, los productos de reanálisis tienden a suavizar espacialmente los máximos de precipitación y a subestimar la magnitud de los eventos extremos.

Este comportamiento concuerda con lo documentado por Beck et al. (2019), Hersbach et al. (2020), Muñoz-Sabater et al. (2021) y Gomis-Cebolla et al. (2023), quienes identificaron patrones similares de subestimación en cuencas tropicales y de alta montaña. La evaluación espacial de este comportamiento se ejemplifica en la Figura 5, la cual contrasta los acumulados de precipitación obtenidos mediante estaciones terrestres del SIH y CFE respecto a los estimadores de ERA5-Land para el evento extremo registrado del 2 al 6 de octubre de 2020.

2026, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Tecnología y Ciencias del Agua
OPEN ACCESS
Check for updates

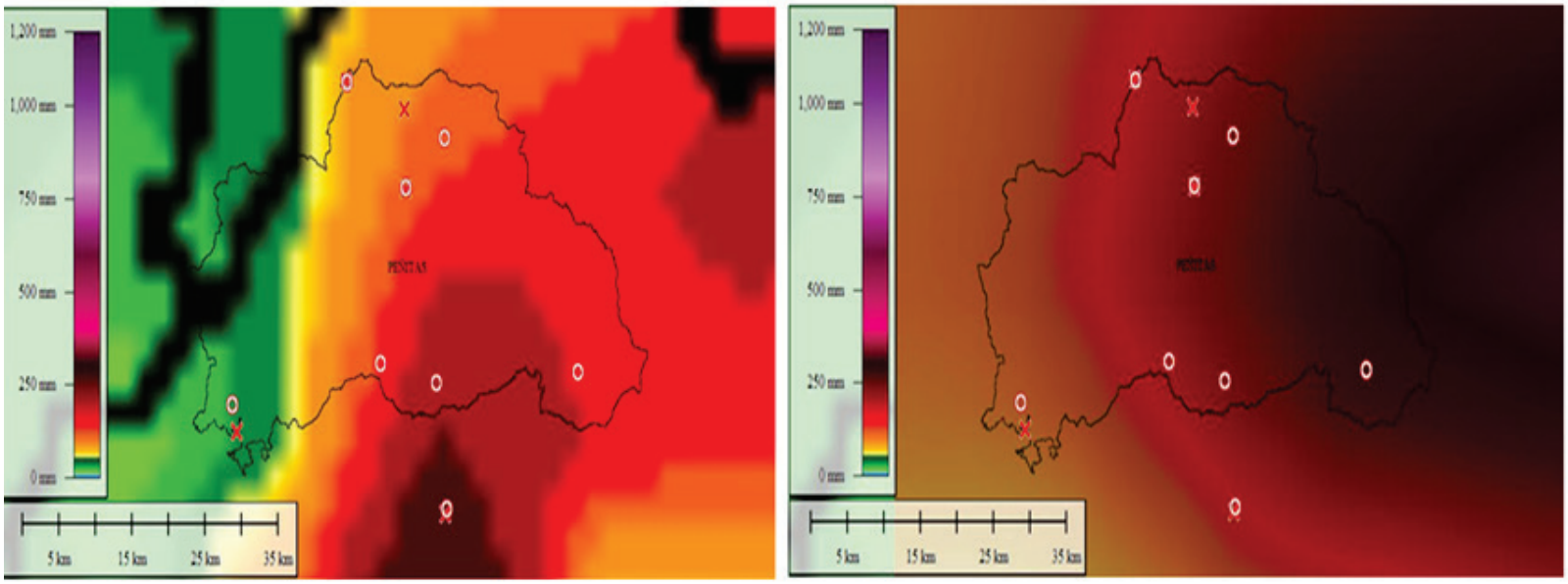


Figura 5. Izquierda) Precipitación acumulada del 2 al 6 de octubre de 2020 a partir de estaciones del SIH y CFE (reelaboración de CONAGUA en GM). **Derecha)** Precipitación acumulada para el mismo periodo combinando datos de ERA5-Land y estaciones del SIH y CFE.

Este periodo de análisis corresponde a un evento hidrometeorológico extremo en el que la interacción de frentes fríos con la Tormenta Tropical Gamma generó precipitaciones excepcionales sobre la cuenca alta del río Grijalva.

La distribución espacial de los acumulados evidencia una marcada heterogeneidad, registrándose los núcleos de mayor precipitación en los sectores montañosos de Chiapas, lo cual confirma el papel determinante del relieve orográfico en la intensificación de las lluvias.

Las curvas masa promedio evidencian que ERA5-Land subestima de manera sistemática la precipitación acumulada a lo largo de la serie histórica (Figura 6), registrándose las mayores divergencias durante los

2026, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

meses de mayor intensidad pluvial. Este comportamiento temporal confirma que el sesgo del reanálisis no es aleatorio sino estructural y persistente, lo que fundamenta la necesidad de aplicar esquemas de corrección de sesgo que prevengan la propagación del error acumulado en el modelado e investigación hidrológica.

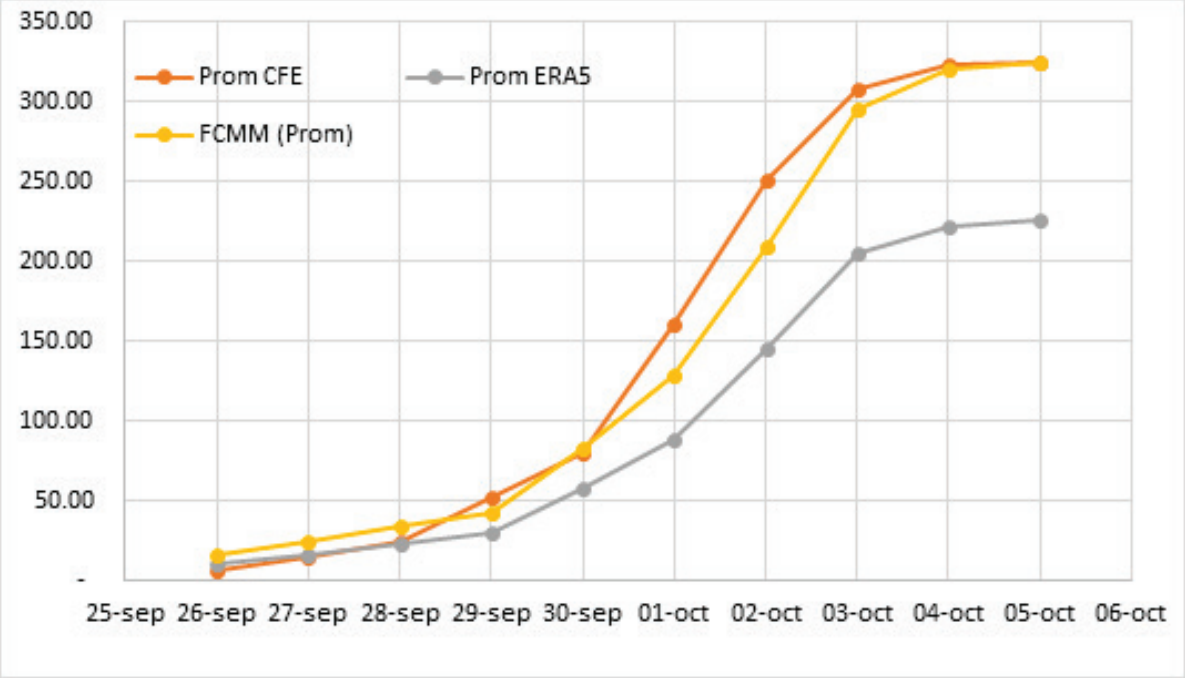


Figura 6. Curvas masa promedio para evento extremo registrado del 2 al 6 de octubre de 2020, comparación de observaciones terrestres y estimaciones de ERA5-Land.

Para analizar el comportamiento dinámico de las precipitaciones en la escala de tiempo diaria durante el evento hidrometeorológico extremo de 2020, la Figura 7 ilustra el hietograma de precipitación acumulada cada 24 horas para el periodo del 27 de septiembre al 6 de octubre.

2026, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Tecnología y Ciencias del Agua
OPEN ACCESS
Check for updates

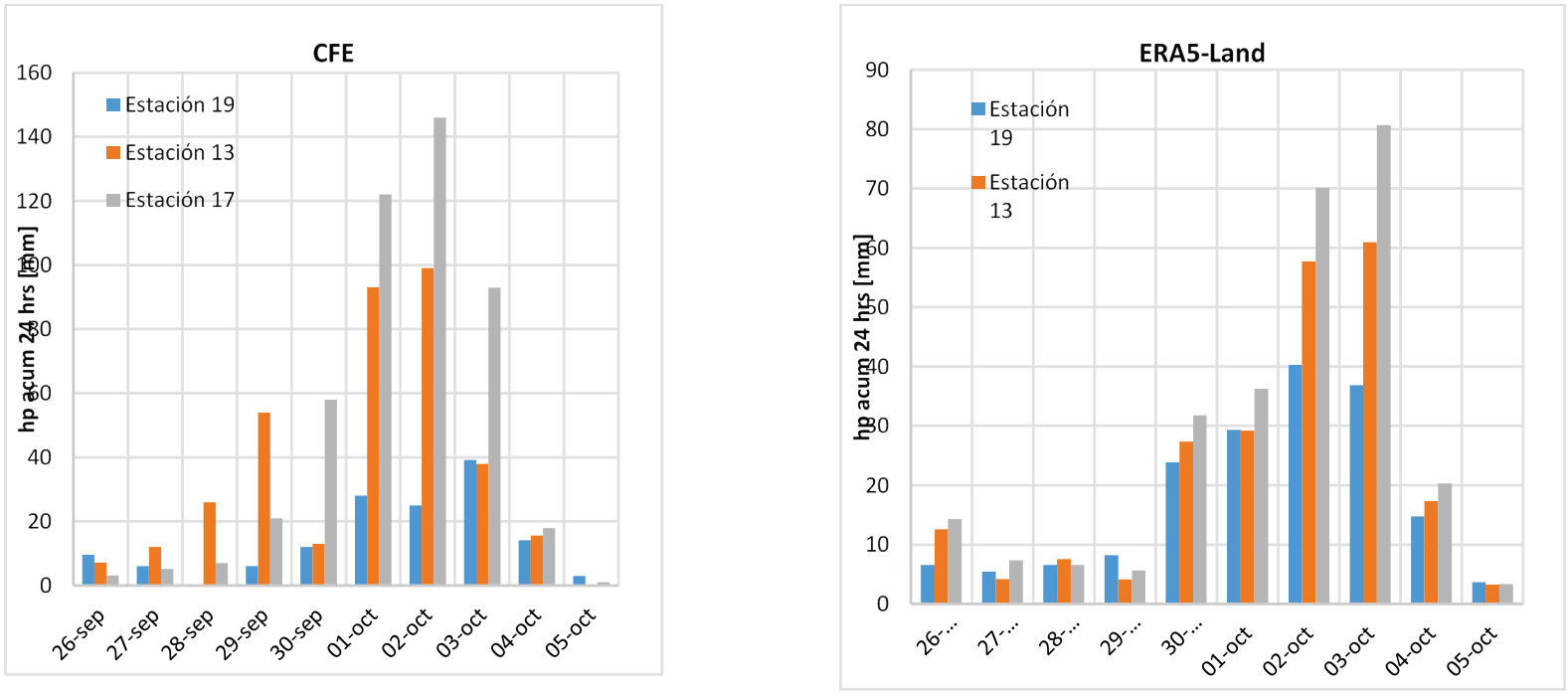


Figura 7. Hietograma de precipitación acumulada diaria (cada 24 h) del 27 de septiembre al 6 de octubre de 2020, obtenido a partir de los datos de ERA5-Land.

El hietograma derivado de ERA5-Land revela que el producto de reanálisis captura adecuadamente la distribución temporal y la evolución de los eventos de lluvia; sin embargo, tiende a atenuar la magnitud de los picos diarios máximos en comparación con los registros de las estaciones terrestres. Esta amortiguación de las intensidades extremas diarias es consistente con el efecto de suavizado espacial y temporal típicamente asociado a los modelos globales de reanálisis, particularmente en regiones de topografía compleja donde predomina la convección de pequeña escala.

2026, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

3.4. Comparación con Otros Estudios

Los resultados obtenidos son consistentes con investigaciones realizadas en diferentes regiones del mundo.

Muñoz-Sabater et al. (2021) indican que ERA5-Land representa adecuadamente la variabilidad espacial de la precipitación; sin embargo, su precisión disminuye considerablemente en regiones donde predominan lluvias convectivas.

Por su parte, Beck et al. (2019) encontraron que los productos globales de precipitación presentan errores importantes en zonas tropicales con relieve complejo debido a limitaciones en la representación de procesos orográficos. De manera similar, Gomis-Cebolla et al. (2023) concluyeron que ERA5-Land requiere procedimientos de corrección local antes de ser empleado en aplicaciones hidrológicas operativas.

Los resultados obtenidos en la presente investigación coinciden con dichas observaciones y demuestran que una corrección basada en observaciones terrestres mejora significativamente el desempeño del producto.

3.5. Implicaciones para Aplicaciones Hidrológicas

La mejora obtenida después de la corrección del sesgo tiene importantes implicaciones para la gestión de recursos hídricos.

Las estimaciones corregidas de precipitación permiten reducir las incertidumbres asociadas con modelos lluvia-escurrimiento, pronósticos de inundación, simulaciones de operación de embalses y evaluaciones de disponibilidad hídrica.

2026, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

En cuencas como la del embalse de la presa Peñitas, donde la seguridad hidráulica depende de una estimación adecuada de los aportes al embalse, la utilización de productos de reanálisis previamente corregidos puede incrementar la confiabilidad de los sistemas de apoyo para la toma de decisiones.

No obstante, la corrección propuesta fue obtenida utilizando un único factor de ajuste representativo del periodo completo de estudio. En investigaciones futuras sería conveniente desarrollar factores de corrección dependientes de la estación del año o del régimen de precipitación, ya que el sesgo de ERA5-Land puede variar entre la temporada seca y la temporada lluviosa, mejorando así la precisión de las estimaciones en aplicaciones hidrológicas.

4. Conclusiones

En el presente trabajo se llevó a cabo la evaluación del desempeño del producto de reanálisis ERA5-Land para estimar la precipitación en la cuenca de aportación al embalse de la presa Peñitas, mediante su comparación con observaciones de estaciones meteorológicas terrestres correspondientes al periodo del 27 de septiembre al 6 de octubre de 2020. Los resultados mostraron que, aunque ERA5-Land reproduce adecuadamente la variabilidad temporal de la precipitación, presenta un sesgo sistemático que conduce a la subestimación de los eventos de lluvia de mayor intensidad, particularmente en una cuenca caracterizada por relieve complejo y predominio de precipitación convectiva.

La aplicación de un procedimiento de corrección basado en observaciones terrestres permitió mejorar significativamente el desempeño del producto de reanálisis. Después del ajuste, el coeficiente

2026, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

de correlación de Pearson aumentó de 0.44 a 0.88, el RMSE disminuyó de 25.1 a 7.9 mm d^{-1}, mientras que el coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) mejoró de −0.80 a 0.77, demostrando que una parte importante del error corresponde a un sesgo sistemático susceptible de corregirse mediante procedimientos estadísticos relativamente sencillos.

Los resultados obtenidos confirman que ERA5-Land constituye una fuente de información valiosa para regiones con disponibilidad limitada de observaciones meteorológicas, siempre que sus estimaciones sean previamente validadas y corregidas con datos locales. Esto es especialmente relevante para cuencas estratégicas como la del embalse de la presa Peñitas, donde una estimación adecuada de la precipitación es fundamental para la operación de embalses, el pronóstico de inundaciones, la modelación hidrológica y la gestión de los recursos hídricos.

La metodología propuesta presenta la ventaja de ser sencilla, reproducible y fácilmente transferible a otras cuencas con características fisiográficas similares, contribuyendo a mejorar el aprovechamiento de productos globales de reanálisis en aplicaciones hidrológicas regionales.

Como principal limitación del estudio, la corrección se desarrolló utilizando un único factor representativo para todo el periodo de análisis. Dado que el comportamiento del sesgo puede variar a lo largo del año, investigaciones futuras deberán evaluar esquemas de corrección estacionales o mensuales, así como explorar metodologías más avanzadas basadas en aprendizaje automático, *quantile mapping* o técnicas geoestadísticas. Asimismo, será de interés analizar el desempeño de ERA5-Land durante eventos hidrometeorológicos extremos adicionales, como las inundaciones registradas en 2007 y 2020, con el fin

2026, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

de fortalecer su aplicación en sistemas de alerta temprana y gestión del riesgo de inundaciones.

5. Agradecimientos

Agradecemos a la Secretaría de Investigación y Desarrollo de la Coordinación de Investigación Científica, UNAM, y al proyecto TUBs-UNAM Validación de productos de reanálisis de precipitación para la modelación lluvia-escurrimiento en México (VIP MÉXICO) por su apoyo para la realización de esta investigación.

6. Financiamiento

No se contó con financiamiento para esta investigación.

7. Declaración de conflictos de interés

Los autores manifiestan que no se cuenta con ningún conflicto de interés.

8. Declaración de uso de IA

Durante la preparación de este manuscrito, los autores utilizaron el modelo de lenguaje Gemini (Google) exclusivamente como apoyo para la revisión gramatical, ortográfica, claridad expositiva y el pulido de estilo del texto. Tras la aplicación de esta herramienta, el contenido fue minuciosamente revisado, supervisado, evaluado y aceptado en su totalidad por los autores Edgar De Dios Sevilla-Rivera, Faustino De Luna Cruz, Maritza Liliana Arganis-Juárez, Margarita Elizabeth Preciado-

2026, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Jiménez y Sinuhé Alejandro Sánchez-Martínez, quienes asumen la plena y exclusiva responsabilidad por la precisión técnica, integridad científica y originalidad de todo el contenido presentado en este artículo.

9. Referencias

Alexopoulos, M. J., Müller-Thomy, H., Nistahl, P., Šraj, M., & Bezak, N. (2023).Validation of precipitation reanalysis products for rainfall-runoff modelling in Slovenia. *Hydrology and Earth System Sciences*, *27*(13), 2559-2578.https://doi.org/10.5194/hess-27-2559-2023

Beck, H. E., Pan, M., Roy, T., Weedon, G. P., Pappenberger, F., van Dijk, A. I. J. M.,Huffman, G. J., Adler, R. F., & Wood, E. F. (2019). Daily evaluation of 26 precipitation datasets using Stage-IV gauge-radar data for the CONUS. *Hydrology and Earth System Sciences*, *23*(1), 207-224. https://doi.org/10.5194/hess-23-207-2019

CEIEG, Comité Estatal de Información Estadística y Geográfica de Chiapas. (2025). *Información geográfica, unidades climáticas y registros de precipitación del estado de Chiapas*. https://ceieg.chiapas.gob.mx/

Gomis-Cebolla, J., Rattayova, V., Salazar-Galán, S., & Francés, F. (2023). Evaluation of ERA5 and ERA5-Land reanalysis precipitation datasets over Spain (1951-2020). *Atmospheric Research*, 284, 106606. https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2023.106606

CONAGUA, Comisión Nacional del Agua. (2008).*Reporte de la operación del sistema de presas Grijalva durante las inundaciones de 2007*. CONAGUA.

2026, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

CONAGUA, Comisión Nacional del Agua. (2020). *Informe hidrometeorológico de la temporada de lluvias 2020*. CONAGUA.

Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Abdalla, S., Abellan, X., Balsamo, G., Bechtold, P., Biavati, G., Bidlot, J., Bonavita, M.,…, Thépaut, J. N. (2020). The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, *146*(730), 1999-2049. https://doi.org/10.1002/qj.3803

Muñoz-Sabater, J., Dutra, E., Agustí-Panareda, A., Albergel, C., Arduini, G., Balsamo, G., Boussetta, S., Choulga, M., Harrigan, S., Hersbach, H., Martens, B., Miralles, D. G., Piles, M., Rodríguez-Fernández, N. J., Zsoter, E., Buontempo, C., & Thépaut, J.-N. (2021). ERA5-Land: A state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications. *Earth System Science Data*, *13*(9), 4349-4383. https://doi.org/10.5194/essd-13-4349-2021

SEMARNAT, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2008). *Inundaciones en Tabasco 2007: Diagnóstico y acciones*. SEMARNAT.

Sun, Q., Miao, C., Duan, Q., Ashouri, H., Sorooshian, S., & Hsu, K.-L. (2018). A review of global precipitation datasets: Data sources, estimation, and intercomparisons. *Reviews of Geophysics*, *56*(1), 79-107. https://doi.org/10.1002/2017RG000574

WMO, World Meteorological Organization. (2023). *State of the Global Climate 2022* (WMO-No. 1316). World Meteorological Organization. https://library.wmo.int/idurl/4/66214

2026, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)