

Evaluación y ajuste de temperatura en datos de reanálisis: un enfoque metodológico para la cuenca Lerma-Santiago, México

Miguel Ángel González-González¹, Arturo Corrales-Suastegui¹

¹ Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, C.P. 20670, Carr. Ags. – Zac. Km 32.5, Pabellón de Arteaga, Ags., México, gonzalez.miguelangel@inifap.gob.mx, corrales.arturo@inifap.gob.mx

Resumen

Este estudio presenta una metodología para evaluar y corregir los datos de temperatura del conjunto de reanálisis ERA5-Land, aplicada a la cuenca Lerma-Santiago en México. Dada la creciente necesidad de información climática precisa a escala local para estudios hidrológicos y agrícolas, se propone un enfoque basado en los Sistemas de Información Geográfica (SIG) usando QGIS, combinando datos climáticos de modelos globales y estaciones meteorológicas. Se utilizó el método de interpolación IDW para generar una superficie continua de temperatura media mensual (octubre, 2023) a partir de estaciones meteorológicas del Servicio Meteorológico Nacional (SMN), que posteriormente fue comparada con la malla de reanálisis de ERA5-Land para estimar su sesgo. El análisis reveló una subestimación promedio de -2.2°C en zonas altas por parte de ERA5-Land, con diferencias extremas de hasta -7.6°C . A través del cálculo del sesgo y su incorporación correctiva, se ajustaron los datos de temperatura media mensual de octubre de 2023 de la malla del ERA5-Land, mejorando su precisión. Este ajuste resulta clave para el cálculo de variables hidrológicas importantes como la evapotranspiración, proceso altamente dependiente de la temperatura. El estudio concluye que la integración de reanálisis climáticos con datos locales permite mejorar la calidad de los datos y es replicable en otras cuencas de México y el mundo. Asimismo, se recomienda ampliar el uso de técnicas de interpolación avanzadas y fortalecer la red de observación meteorológica nacional.

Palabras clave— corrección de temperatura, cuenca Lerma-Santiago, ERA5-Land, observaciones in situ.

Evaluation and temperature adjustment in reanalysis data: a methodological approach for the Lerma-Santiago basin, Mexico

Abstract

This study presents a methodology to evaluate and correct temperature data from the ERA5-Land reanalysis dataset, applied to the Lerma-Santiago basin in Mexico. Given the growing need for accurate climate information at the local scale for hydrological and agricultural studies, a Geographic Information Systems (GIS)-based approach using QGIS is proposed, combining climate data from global models and meteorological stations. The IDW interpolation method was used to generate a continuous surface of monthly mean temperature (October 2023) from meteorological stations of the National Meteorological Service (SMN), which was then compared with the ERA5-Land reanalysis grid to estimate its bias. The analysis revealed an average underestimation of -2.2°C by ERA5-Land in high-altitude areas, with extreme differences of up to -7.6°C . By calculating the bias and incorporating it as a correction, the October 2023 monthly mean temperature data from the ERA5-Land grid were adjusted, improving its accuracy. This adjustment is key for calculating important hydrological variables such as evapotranspiration, a process highly dependent on temperature. The study concludes that integrating climate reanalysis with local data improves data quality and is replicable in other basins in Mexico and around the world. It also recommends expanding the use of advanced interpolation techniques and strengthening the national meteorological observation network.

Keywords— temperature correction, Lerma-Santiago basin, ERA5-Land, in situ observations.

I. INTRODUCCIÓN

El estudio del clima y su variabilidad es esencial para comprender los fenómenos meteorológicos, anticipar eventos extremos y diseñar estrategias de adaptación y mitigación frente al cambio climático [1]. En este marco, el manejo adecuado de datos climáticos se ha vuelto una tarea indispensable para investigadores, profesionales y estudiantes de disciplinas como la climatología, la geografía, la agricultura y la gestión ambiental [2].

El cambio climático ha generado alteraciones en los patrones de precipitación, incrementos en la temperatura y mayor frecuencia de eventos extremos, modificando la disponibilidad

hídrica, los caudales superficiales y la resiliencia de los ecosistemas en la cuenca. Bajo escenarios de emisiones elevadas (SSP5-8.5), el modelo CMIP6 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 6) proyecta para el año 2050 un aumento de la temperatura entre 2.0°C y 2.5°C en gran parte del territorio mexicano, acompañado de una disminución en la precipitación anual, mayor variabilidad interanual e intensificación de sequías, particularmente en cuencas subtropicales [3].

La combinación de menor precipitación y mayor evaporación, derivada del incremento térmico, está modificando los caudales en diversas regiones. Por ejemplo, en la cuenca subtropical del río Cauto, en Cuba, la simulación con

el modelo SWAT (calibrado con datos históricos) proyecta una reducción significativa en la escorrentía media para el periodo 2015–2039, afectando la recarga de acuíferos y la disponibilidad de agua para la agricultura y el consumo humano [4], lo cual evidencia la vulnerabilidad de las cuencas subtropicales frente al estrés hídrico.

En el caso de México, las proyecciones de estrés hídrico sobre la cuenca Lerma-Santiago también sugieren una disminución en los rendimientos agrícolas, según simulaciones con modelos de cultivo [5]. Asimismo, los bosques tropicales secos de esta región, hábitat de especies endémicas, están expuestos a riesgos de degradación debido a la prolongación de la estación seca [6].

Ante este panorama, el cambio climático redefine la hidrología y la ecología de la cuenca, con importantes implicaciones para la seguridad hídrica y alimentaria. En este contexto, la integración de Sistemas de Información Geográfica (SIG) y datos climáticos regionales permite diseñar estrategias de adaptación ambientalmente sostenibles [7].

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG), y en particular el software QGIS (QGIS, 2025), han emergido como herramientas fundamentales para el análisis espacial y temporal de datos climáticos. Este tipo de software permite la visualización, el procesamiento y la interpretación de información proveniente de diversas fuentes. QGIS, como plataforma de código abierto, ofrece ventajas significativas: amplia compatibilidad con formatos de datos climáticos (como CSV, GeoTIFF, NetCDF y GRIB), capacidades avanzadas de análisis espacial, y una comunidad activa de usuarios y desarrolladores que impulsa su evolución constante [8]. Su flexibilidad permite adaptarlo a necesidades específicas, tanto en proyectos de investigación como en aplicaciones prácticas de gestión ambiental [9].

Por ejemplo, los datos climáticos de reanálisis de la plataforma de ERA5-Land del ECMWF (*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*), son utilizados a nivel mundial para estudios regionales y locales [10], así como una herramienta clave para investigaciones climáticas, hidrológicas y agrícolas [11]. ERA5-Land permite una reconstrucción consistente incluso en zonas con escasa instrumentación. Validaciones recientes, como la de Mistry et al. [12], han mostrado una alta correlación (>0.9) entre los datos simulados y las observaciones in situ de temperatura a nivel global.

Así mismo, datos de estaciones meteorológicas en superficie del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) son fundamentales para la gestión de recursos hídricos, el análisis del cambio climático y la prevención de desastres naturales en México [13], [6]. Sin embargo, este tipo de estaciones convencionales requieren intervención humana para el registro de datos. Según Brunet [14], estas estaciones presentan un error medio de ± 0.5 °C en condiciones óptimas de mantenimiento, aunque en regiones remotas la precisión puede disminuir. Para asegurar la calidad, el SMN aplica procedimientos de control, incluyendo la detección de valores atípicos y la comparación entre estaciones vecinas.

El objetivo de este artículo es proporcionar una guía para el uso de QGIS en la obtención de datos climáticos confiables,

empleada a una cuenca hidrológica de México como caso de estudio. Se presentan datos de reanálisis de temperatura de ERA5-Land y una metodología de evaluación y ajuste de estos datos simulados por medio de las estaciones meteorológicas convencionales en superficie. La calibración de los datos de temperatura de ERA5-Land permite mejorar la precisión espacial, lo que resulta clave para su aplicación en estudios regionales. En este sentido, la metodología propuesta y la accesibilidad de las plataformas de descarga de datos representan una herramienta eficaz y replicable para México y en otros contextos espaciales similares.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

A. Área de estudio

La cuenca Lerma-Santiago, situada en el occidente de México, constituye una de las regiones hidrológicas más relevantes del país por su importancia económica, social y ambiental. No obstante, en las últimas décadas ha enfrentado desafíos significativos, tales como la contaminación del agua, la sobreexplotación de recursos hídricos y los efectos adversos del cambio climático [15].

Para el presente estudio, se utilizó el archivo shapefile (shp) de la cuenca Lerma-Santiago descargado de la plataforma: http://geoportal.conabio.gob.mx/metadatos/doc/html/cuencas_mx.html de la CONABIO (Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad), el cual fue mapeado en el software QGIS 3.34 Prizren [16] (Fig. 1). Esta capa vectorial, así como las siguientes capas ráster fueron proyectadas en coordenadas geográficas decimales.

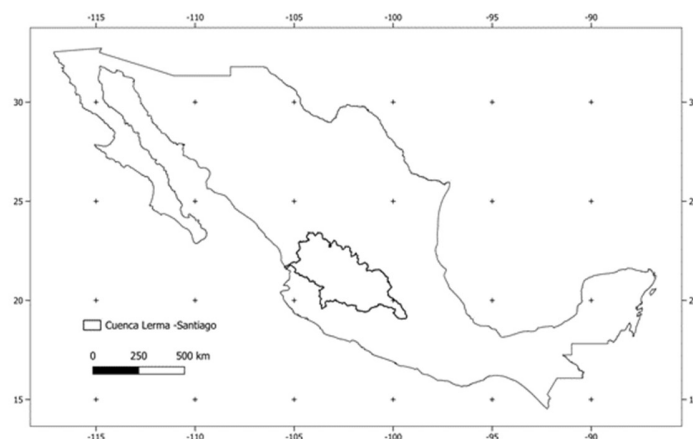


Figura 1. Ubicación geográfica de la cuenca Lerma-Santiago en México.

B. Datos de reanálisis de temperatura

Este trabajo introduce una de las principales fuentes de datos climáticos gratuitos disponibles en línea. Por lo que se emplearon datos del producto ERA5-Land, que es un conjunto de reanálisis climático de alta resolución desarrollado por el C3S (*Copernicus Climate Change Service*) y el ECMWF (*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*).

ERA5-Land se genera mediante el sistema de asimilación de datos del ECMWF, que integra millones de observaciones

históricas con el modelo numérico HTESSEL (Hydrology Tiled ECMWF Scheme for Surface Exchanges over Land). Este producto proporciona estimaciones horarias de variables de superficie terrestre desde 1950 hasta la actualidad, con una resolución espacial de aproximadamente 0.1° (~ 9 km) (TABLA I).

TABLA I.
CARACTERÍSTICAS DE LOS DATOS DE REANÁLISIS DE ERA5-LAND.

Característica	Descripción
Resolución temporal	Cada hora y resumen mensual disponible desde 1950 a la fecha
Resolución espacial	Tridimensional de $0.1^\circ = \sim 10$ km X ~ 10 km
Cobertura	Global
Variables	Temperatura a 2 metros ($^\circ$ K), humedad del suelo, precipitación, radiación superficial, evapotranspiración, entre otras...
Origen	Observaciones satelitales, estaciones meteorológicas y modelos numéricos.

En este estudio, se descargó la malla mensual de temperatura media correspondiente a octubre de 2023 para todo el territorio mexicano desde el sitio web de Copernicus (<https://cds.climate.copernicus.eu/datasets/reanalysis-era5-land-monthly-means?tab=download>), en formato NetCDF. Posteriormente, se transformó a formato .tif en QGIS, y se convirtieron las unidades de grados Kelvin ($^\circ$ K) a grados Celsius ($^\circ$ C) mediante la ecuación (1):

$$i^\circ\text{C} = i^\circ\text{K} - 273.15 \quad (1)$$

Donde $i^\circ\text{C}$ representa el valor de cada píxel en grados Celsius y $i^\circ\text{K}$ en grados Kelvin. Esta operación se realizó utilizando la herramienta “Calculadora ráster” de QGIS. Finalmente, se aplicó un recorte de la cuenca Lerma-Santiago a la malla nacional mediante la herramienta “Cortar ráster por capa de máscara” (Fig. 2).

C. Datos de temperatura de estaciones meteorológicas

El Servicio Meteorológico Nacional (SMN), adscrito a la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), es la entidad responsable de la recopilación y difusión de datos meteorológicos e hidrológicos en México. Su red de estaciones convencionales proporciona una base de datos climáticos extensa, con registros históricos y en tiempo real de variables como temperatura, precipitación y evaporación (TABLA II).

Para este estudio, se descargaron los datos oficiales de temperatura media mensual de octubre de 2023 desde el portal del SMN (<https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/temperaturas-y-lluvias/resumenes-mensuales-de-temperaturas-y-lluvias>). La información se obtuvo en formato tabular con coordenadas geográficas decimales (x, y), y fue incorporada al entorno de QGIS. Se generó un buffer de 1° geográfico alrededor de la cuenca Lerma-Santiago mediante la herramienta “Buffer”, y se recortaron las estaciones contenidas dentro de este límite utilizando “Superposición vectorial – Cortar” (Fig. 3).

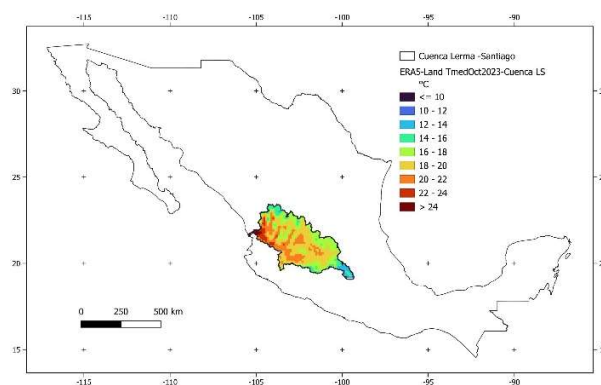


Fig. 2. Malla de reanálisis de ERA5-Land de temperatura media en octubre de 2023, sobre la cuenca Lerma-Santiago.

TABLA II.
CARACTERÍSTICAS DE LAS OBSERVACIONES DE LAS ESTACIONES METEOROLÓGICAS DEL SMN.

Característica	Descripción
Resolución temporal	Cada 24h, y resumen mensual disponible desde 1920 a la fecha (dependiendo de la estación)
Resolución espacial	Bidimensional e irregular (dispersa), de unos pocos kilómetros a decenas de kilómetros entre estaciones
Cobertura	En todos los estados de la república mexicana
Variables	Temperatura máxima y mínima a 1.5 metros ($^\circ$ C), precipitación (mm) y evaporación potencial (mm)
Origen	Observaciones en casetas meteorológicas

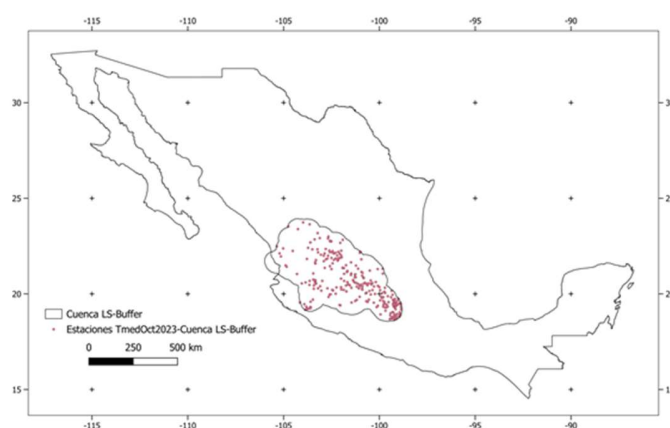


Fig. 3. Ubicación de las estaciones del SMN donde se registró la temperatura media de octubre de 2023, dentro del buffer de la cuenca Lerma-Santiago.

D. Evaluación y ajuste de la malla de reanálisis

Los datos de reanálisis climático, como ERA5-Land, son fundamentales para estudios regionales, pero su precisión puede variar debido a la falta de asimilación directa de observaciones terrestres en zonas complejas [17]. Las estaciones meteorológicas del SMN ofrecen datos puntuales de temperatura que, al ser interpolados mediante métodos bidimensionales, como IDW, Spline y Kriging, son útiles para generar superficies climáticas continuas de alta resolución a

partir de datos puntuales [18], [8], y de esta manera permite comparar y ajustar los productos de ERA5-Land.

Por lo que, primeramente, con las estaciones meteorológicas en superficie del SMN se realizó la interpolación espacial de la temperatura media de octubre de 2023 con el método IDW (Inverse Distance Weighting), disponible en la herramienta “Interpolación – Interpolación IDW” de QGIS. Este método asigna mayor peso a las estaciones más cercanas, representando de manera más fiel las condiciones locales [19] (Fig. 4). La malla interpolada fue generada con la misma resolución y alineación que la malla de ERA5-Land, con el objetivo de facilitar la comparación posterior entre ambas mallas de datos.

Para conocer la diferencia cuantitativa entre la información climática de ERA5-Land y la interpolación IDW de la temperatura media de octubre de 2023, se calculó el sesgo por medio de la herramienta “Calculadora ráster” con la ecuación (2):

$$i S = i ERA5Land - i SMN \quad (2)$$

Donde $i S$ es el sesgo del píxel, que es la resta entre los píxeles de ERA5-Land ($i ERA5Land$) y los píxeles de la interpolación IDW de las estaciones del SMN ($i SMN$).

Para calibrar la malla simulada de ERA5-Land, se sumó con la “Calculadora ráster” esta misma capa con la del sesgo, es decir (3),

$$i A = i ERA5Land + i SMN \quad (3)$$

Donde $i A$ es el ajuste del píxel, que suma o resta (dependiendo del sesgo) a la malla de ERA5-Land.

Esta comparación y calibración permite evaluar la calidad y consistencia de los datos de reanálisis.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En principio, para una evaluación visual de los resultados de la malla interpolada de la temperatura media de octubre de 2023 (Fig. 4), con datos de estaciones meteorológicas, muestran un patrón diferente al de la malla de ERA5-Land (Fig. 2); solamente es posible detectar un gradiente de temperatura más alta hacia el noroeste, cuyos valores son concordantes a las zonas más bajas de la cuenca Lerma-Santiago. Sin embargo, difícilmente se pueden observar algunos detalles de la relación de la altitud y la temperatura. Lo anterior, debido a la naturaleza del método que no incorpora el gradiente térmico [20], [21].

En la evaluación cuantitativa del ráster en la Fig. 5, se observa que la malla de reanálisis de ERA5-Land 2023, de la temperatura media de octubre de 2023, muestra un sesgo negativo en la mayor parte de la cuenca Lerma-Santiago, en especial sobre las zonas más altas o zonas de las sierras, es decir, existe una subestimación de la temperatura de la malla de ERA5-Land con base en los datos en superficie de las estaciones meteorológicas. En “Propiedades de la capa” en QGIS, el promedio de dicha capa ráster de sesgo fue de -2.2°C , con un máximo de 2°C (zona más baja de la cuenca Lerma-Santiago), un mínimo de hasta -7.6°C (zona alta de los cañones

al noroeste de la cuenca Lerma-Santiago) y una desviación estándar de 1.7°C (TABLA III).

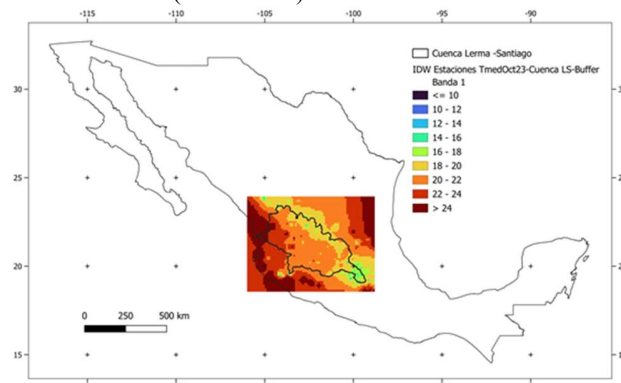


Fig. 4. Malla interpolada de temperatura media ($^{\circ}\text{C}$) de las estaciones del SMN en octubre de 2023, sobre la cuenca Lerma-Santiago.

TABLA III.
ESTADÍSTICAS DE LA CAPA RÁSTER DEL SESGO ENTRE LA MALLA INTERPOLADA CON ESTACIONES METEOROLÓGICAS Y LA MALLA DE DATOS DE REANÁLISIS DE ERA5-LAND PARA EL CASO DE LA TEMPERATURA DE OCTUBRE DE 2023.

Estadístico	Valor
Promedio	-2.176988415445
Máximo	1.9917454719543
Mínimo	-7.6366176605225
Desviación Estándar	1.5376239522371

Diferentes autores han encontrado estas diferencias o sesgos entre los datos de reanálisis de ERA5-Land y datos de estaciones meteorológicas debido al tamaño de la rejilla o resolución del píxel, que conllevan a una baja precisión de las temperaturas en elevaciones más altas [22]-[24] y, principalmente, en subestimaciones de temperatura [25], tal y como se observa en el modelo digital de elevación de la cuenca Lerma-Santiago (Fig. 6).

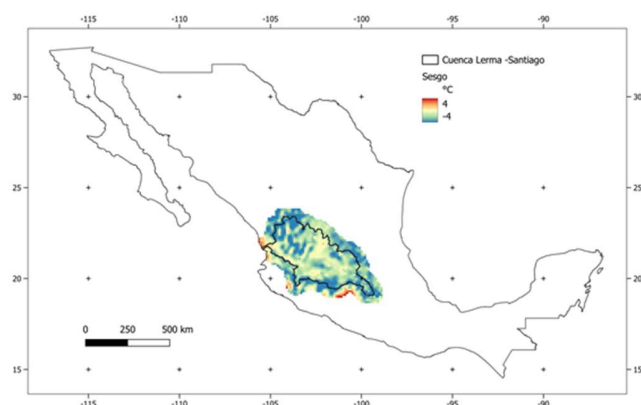


Fig. 5. Sesgo ($^{\circ}\text{C}$) de la malla de ERA5-Land de la temperatura media de octubre de 2023, sobre la cuenca Lerma-Santiago.

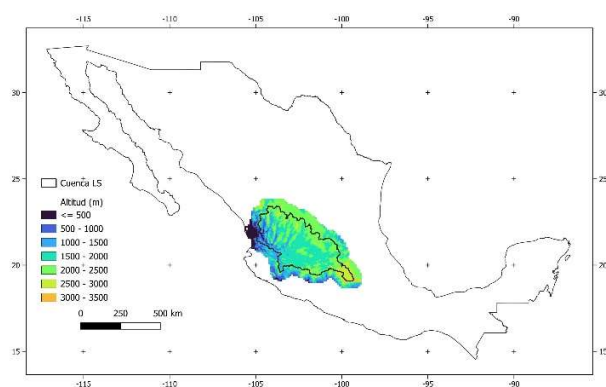


Fig. 6. Modelo digital de elevación (m) de la cuenca Lerma-Santiago.

En la malla ajustada por sesgo de la Fig. 7, de la temperatura media de octubre de 2023, se observa el ligero cambio en las temperaturas de 2 a 4°C más que los datos de reanálisis de ERA5-Land, sobre la mayor parte de la cuenca Lerma-Santiago.

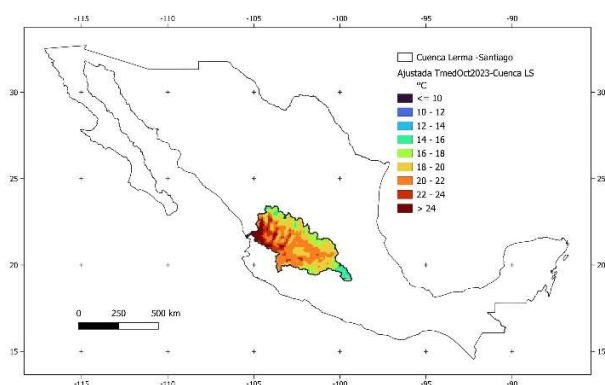


Fig. 7. Malla ajustada de ERA5-Land de temperatura media (°C) de octubre de 2023, sobre la cuenca Lerma-Santiago.

El uso de datos de reanálisis, como ERA5, se ha consolidado como una fuente confiable para el análisis climático en regiones con escasa cobertura de estaciones meteorológicas. Sin embargo, su resolución espacial y posibles sesgos en zonas montañosas o heterogéneas hacen necesario aplicar métodos de ajuste o corrección para mejorar su precisión a escala de cuenca [26], [25]. Por ejemplo, en el caso particular del cálculo de la evapotranspiración, variable sensible a la temperatura del aire, la aplicación de procedimientos de corrección de sesgo y ajuste espacial permite una estimación más precisa y representativa de los procesos hidrológicos locales [27], [28]. De esta manera, la corrección de la temperatura en cuencas hidrológicas no solo es metodológicamente válido, sino también necesario para obtener estimaciones confiables, como la evapotranspiración mediante métodos como Penman-Monteith o Hargreaves-Samani que dependen directamente de dicha variable climática.

IV. CONCLUSIONES

Los datos climáticos de ERA5-Land y del SMN ofrecen información valiosa para el análisis del clima en México. Sus series temporales históricas permiten identificar y evaluar tendencias en eventos extremos, como olas de calor y sequías.

No obstante, ambas fuentes presentan limitaciones. En el caso del SMN, la baja densidad de estaciones meteorológicas en regiones montañosas (particularmente en zonas escarpadas) representa un desafío para una representación precisa del clima. Además, algunas series presentan discontinuidades causadas por cambios tecnológicos, cierres de estaciones o dificultades en la descarga masiva de datos, que en ocasiones requiere permisos institucionales, limitando su accesibilidad para proyectos externos.

Por su parte, aunque ERA5-Land ofrece importantes ventajas como su cobertura y disponibilidad gratuita, presenta restricciones, especialmente en la representación de microclimas —por ejemplo, islas de calor urbanas o zonas de alta montaña— y en la cuantificación del error frente a observaciones in situ. Por esta razón, este estudio se enfocó en comparar y ajustar los datos de ERA5-Land con los registros puntuales del SMN, con el objetivo de mejorar la precisión climática a escala local.

La integración de ERA5-Land con datos interpolados del SMN mediante el método de distancia inversa ponderada (IDW) permite reducir sesgos sistemáticos y, en principio, mejorar la exactitud de los estudios climáticos en regiones como la cuenca Lerma-Santiago. No obstante, se recomienda evaluar otros métodos de interpolación, como Splines o Kriging, ya que la distribución desigual de estaciones puede afectar la eficacia del IDW.

En el ejercicio aplicado a la cuenca Lerma-Santiago, se detectó una subestimación de la temperatura en octubre de 2023 por parte de ERA5-Land. Sin embargo, para confirmar si esta subestimación es sistemática a lo largo del tiempo, será necesario analizar toda la serie histórica de ERA5-Land desde 1950. Este análisis puede replicarse fácilmente mediante el procedimiento descrito en este estudio.

Además, este enfoque puede ser aplicado en otras cuencas de México y del mundo, aunque requiere fortalecer las redes de estaciones meteorológicas terrestres y desarrollar capacidades técnicas en el manejo de datos y SIGs. Esto incluye habilidades en el manejo de formatos NetCDF, el uso de herramientas basadas en inteligencia artificial y la capacidad de procesamiento y almacenamiento de grandes volúmenes de información.

Los esfuerzos futuros deben centrarse en la modernización de la red de estaciones meteorológicas, asegurando la calidad, disponibilidad y acceso oportuno a los datos, especialmente ante el contexto de crisis climática global que se ha intensificado en las últimas décadas.

Finalmente, la integración de herramientas SIG y datos climáticos ajustados, como los de ERA5-Land, amplía las posibilidades de aplicación en escenarios de adaptación al cambio climático. Entre estas aplicaciones se incluyen modelos hidrológicos como SWAT o VIC, que permiten mejorar la estimación de escurrimientos o caudales y optimizar la gestión de los recursos hídricos.

REFERENCIAS

- [1] IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. DOI: 10.1017/9781009157896.
- [2] WMO (World Meteorological Organization). (2021). *State of the Global Climate 2021*. WMO-No. 1290. Disponible en: https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=11178
- [3] Estrada, F., Calderón-Bustamante, O., Raga, G., Altamirano del Carmen, M.A., Torres, V., & Zavala-Hidalgo, J. (2023). Análisis del cambio climático observado y proyectado para México. *Cambio Climático UNAM*. Recuperado de: https://cambioclimatico.unam.mx/wp-content/uploads/2023/10/cambio-climatico-en-mexico-analisis-observado-y-proyectado.pdf?utm_source=chatgpt.com
- [4] Montecelos-Zamora, Y., Cavazos, T., Kretschmar, T., Vivoni, E. R., Corzo, G., & Molina-Navarro, E. (2018). Hydrological modeling of climate change impacts in a Tropical River Basin: A case study of the Cauto River, Cuba. *Water*, 10(9), 1135.
- [5] Arce-Romero, A., Monterroso-Rivas, A. I., Gómez-Díaz, J. D., Palacios-Mendoza, M. Á., Navarro-Salas, E. N., López-Blanco, J., & Conde-Álvarez, A. C. (2020). Crop yield simulations in Mexican agriculture for climate change adaptation. *Atmósfera*, 33(3), 215-231.
- [6] Sáenz-Romero, C., Mendoza-Maya, E., Gómez-Pineda, E., Blanco-García, A., Endara-Agramont, A. R., Lindig-Cisneros, R., ... & Vargas-Hernández, J. J. (2020). Recent evidence of Mexican temperate forest decline and the need for ex situ conservation, assisted migration, and translocation of species ensembles as adaptive management to face projected climatic change impacts in a megadiverse country. *Canadian Journal of Forest Research*, 50(9), 843-854.
- [7] Shepard, D. (1968). A two-dimensional interpolation function for irregularly-spaced data*. *Proceedings of the ACM National Conference*, 517-524.
- [8] Burrough, P. A., McDonnell, R. A., & Lloyd, C. D. (2015). *Principles of Geographical Information Systems*. Oxford University Press.
- [9] Neteler, M., & Mitasova, H. (2013). *Open Source GIS: A GRASS GIS Approach*. Springer.
- [10] Pérez-Lantigua, C. L., Pérez-Sosa, T., Moura-Vieira, V., & Montalvo-Arango, I. (2025). Extensión de qgis para el análisis de sistemas de distribución de agua. *XII Convención Científica Internacional de la Universidad de Matanzas, Cuba*. <https://rein.umcc.cu/bitstream/handle/123456789/4486/ok%20CIUM%202025%20Carlos%20Luis%20Pérez%20Lantigua.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [11] Hersbach, H., et al. (2020). The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146(730), 1999-2049.
- [12] Muñoz-Sabater, J., Dutra, E., Agustí-Panareda, A., Albergel, C., Arduini, G., Balsamo, G., ... & 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.
- [13] Mistry, M.N., Schneider, R., Masselot, P. et al. (2022) Comparison of weather station and climate reanalysis data for modelling temperature-related mortality. *Sci Rep* 12, 5178. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-09049-4>.
- [14] Plonykova, H., Koepfel, S., Bernardini, F., Tiefenauer-Linardon, S., de Strasser, L., & Connor, R. (2020). *The United Nations World Water Development Report 2020: Water and Climate Change*.
- [15] Brunet, M. (2010). Datos e indicadores para detectar y atribuir eventos al cambio climático: los registros históricos del clima y su problemática. *Realidad, datos y espacio. Revista internacional de estadística y geografía*, 1(1), 19-29.
- [16] Bollo-Manent, M., Hernández-Santana, J. R., Montañón-Salazar, R., Morales-Manilla, L. M., Ortiz-Rivera, A., Flores-Díaz, A., ... & Amador-García, A. (2017). *Situación Ambiental de la Cuenca del Río Santiago-Guadalajara*. Bruno Taverna: Guadalajara, México.
- [17] QGIS.org. (2025). QGIS Geographic Information System. QGIS Association. <http://www.qgis.org>
- [18] Mihalevich, B. A., Neilson, B. T., & Buahin, C. A. (2022). Evaluation of the ERA5-land reanalysis data set for process-based river temperature modeling over data sparse and topographically complex regions. *Water resources research*, 58(7), e2021WR031294.
- [19] Hijmans, R. J., Cameron, S. E., Parra, J. L., Jones, P. G., & Jarvis, A. (2005). Very high-resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 25(15), 1965-1978.
- [20] Chávez, L. S. A., & Moreano, R. (2013). Sistema de información para la interpolación de datos de temperatura y precipitación del Ecuador. *Revista Politécnica*, 32.
- [21] Li, J., & Heap, A. D. (2014). Spatial interpolation methods applied in the environmental sciences: A review. *Environmental Modelling & Software*, 53, 173-189.
- [22] Goovaerts, P. (2000). Geostatistical approaches for incorporating elevation into the spatial interpolation of rainfall. *Journal of hydrology*, 228(1-2), 113-129.
- [23] Dutra, E., Muñoz-Sabater, J., Boussetta, S., Komori, T., Hirahara, S., & Balsamo, G. (2020). Environmental lapse rate for high-resolution land surface downscaling: An application to ERA5. *Earth and Space Science*, 7(5), e2019EA000984.
- [24] Almeida, M., & Coelho, P. (2023). A first assessment of ERA5 and ERA5-Land reanalysis air temperature in Portugal. *Int. J. Climatol*, 43(14), 6643-6663.
- [25] Pelosi, A., Terribile, F., D'Urso, G., & Chirico, G. B. (2020). Comparison of ERA5-Land and UERRA MESCAN-SURFEX reanalysis data with spatially interpolated weather observations for the regional assessment of reference evapotranspiration. *Water*, 12(6), 1669.
- [26] Zhao, P., & He, Z. (2022). A first evaluation of ERA5-Land reanalysis temperature product over the Chinese Qilian Mountains. *Frontiers in Earth Science*, 10, 907730.
- [27] Tarek, M., Brissette, F. P., & Arsenault, R. (2020). Evaluation of the ERA5 reanalysis as a potential reference dataset for hydrological modelling over North America. *Hydrology and Earth System Sciences*, 24(5), 2527-2544.
- [28] Dalla Torre, D., Di Marco, N., Menapace, A., Avesani, D., Righetti, M., & Majone, B. (2024). Suitability of ERA5-Land reanalysis dataset for hydrological modelling in the Alpine region. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 52, 101718.
- [29] García-Prats, A., Carricondo-Anton, J. M., Ippolito, M., De Caro, D., Jiménez-Bello, M. A., Manzano-Juárez, J., & Pulido-Velázquez, M. High-Resolution Spatially Interpolated Fao Penman-Monteith Crop Reference Evapotranspiration Maps Using Agera5 and Era5-Land Reanalysis Datasets. Available at SSRN 5065028.