

El déficit de evaporación como indicador del balance hídrico en Chiapas, México

Evaporation deficit as an indicator of water balance in Chiapas, Mexico

Teresa Marcela Hernández-Mendoza¹✉^{id}, Arturo Galvis-Spinola^{2*}✉^{id}, Ramón Arteaga-Ramírez³✉^{id}, Fernando Reyes González⁴ ✉^{id}

^{1,3}Departamento de Irrigación, Universidad Autónoma Chapingo, km 32.5 carretera México-Texcoco, Chapingo, Texcoco CP 56230.

^{2,4}Edafología, Colegio de Postgraduados, km 36.5 carretera México-Texcoco, Montecillo, Texcoco CP 56230, Estado de México.

ABSTRACT

This study introduces evaporation deficit (D_e) as a novel indicator to assess water balance and climate vulnerability in the state of Chiapas, Mexico. Analyzing data from 188 meteorological stations, we examined spatial and temporal variations in D_e . Results indicate that D_e is a robust tool for identifying regions and periods prone to drought or excessive moisture. A high spatial variability in D_e distribution was observed, attributed to the complexity of hydrometeorological processes in the region. To estimate monthly D_e from annual D_e , the state was subdivided into three zones (A: $R^2 = 0.94$, RMSE = 0.216; B: $R^2 = 0.96$, RMSE = 0.065; C: $R^2 = 0.88$, RMSE = 0.415). This study demonstrates that D_e is a valuable indicator for assessing water balance in Chiapas, providing insights with implications for water resources management and agriculture. However, the study acknowledges limitations related to data quality and spatial scale. Future investigations might explore the potential of D_e as a tool for agricultural decision-making.

Keywords: Drought; water stress; climate assessment; evaporation; rainfall.

RESUMEN

Este estudio propone el déficit de evaporación (D_e) como un nuevo indicador para evaluar el balance hídrico y la vulnerabilidad climática en el estado de Chiapas, México. Utilizando datos de 188 estaciones climáticas, se analizaron las variaciones espaciales y temporales del D_e . Los resultados muestran que el D_e es una herramienta efectiva para identificar regiones y períodos con riesgo de sequía o exceso de humedad. Se encontró una alta variabilidad espacial en la distribución del D_e por la complejidad de los procesos hidrometeorológicos en la región, cuya estimación del D_e mensual a partir del D_e anual se hizo subdividiendo el estado en tres zonas (A: $R^2 = 0.94$, RMSE = 0.216; B: $R^2 = 0.96$, RMSE = 0.065; C: $R^2 = 0.88$, RMSE = 0.415). El D_e es un indicador robusto y útil para evaluar el balance hídrico en Chiapas, proporcionando información con implicaciones para la gestión de recursos hídricos y la agricultura en Chiapas, aunque la calidad de los datos y la escala espacial del análisis podría tener limitaciones para la extrapolación de la información. Futuras investigaciones podrían explorar la relación entre el D_e y su aplicación agrícola.

Palabras clave: Estiaje; estrés hídrico; evaluación climática; evaporación; precipitación.

INTRODUCCIÓN

El balance hídrico (B_H) es un indicador de problemas asociados al estrés o exceso hídrico, los cuales están relacionados con la producción agrícola y la gestión de recursos hídricos. A pesar de su importancia, aún existen lagunas para estimar su valor (Evelt *et al.*, 2012), ya que se suele abordar con base en la evapotranspiración (E_T) la cual, al no ser una variable medida, su estimación implica cierto grado de incertidumbre que aún está en proceso de ser resuelto (Wanniarachchi y Sarukkalgige, 2022). Para mejorar la eficiencia del uso del agua de riego se requiere el dato de la E_T , sin embargo, prevalecen dudas respecto a la información generada (Villalobos-Cano *et al.*, 2024). De acuerdo con Ruiz-Ortega *et al.* (2024), el dato de la E_T se genera a partir de modelos con fundamento en la conservación de la masa y la energía, cuya diferencia está en si se generan sólo a partir de tales principios físicos, lo hacen de manera parcial o por algoritmos (redes neuronales, relaciones empíricas, entre otros) y, como alternativa actual, están los datos colectados por sensores remotos. Aunque hay avances significativos para contar con datos confiables de E_T , aún falta trabajo por hacer. Este estudio busca contribuir a llenar ese vacío que, a diferencia de investigaciones previas, emplea la medición de la precipitación (P_p) y la evaporación (E_v) que alejan la incertidumbre de la estimación como ocurre con la E_T . Se postula que a través del cociente de la P_p y la E_v se genera un nuevo índice, el déficit de evaporación (D_e), para identificar el B_H en zonas y épocas del año en la que es viable identificar problemas de vulnerabilidad climática asociada a sequías o anegamientos, según sea el caso, lo que sería útil para la planificación agrícola y la gestión de recursos hídricos. La P_p es un componente de la E_v y ambas inciden sobre el equilibrio hídrico de una región geográfica (Davis *et al.*, 2006). La P_p en la estación húmeda es controlada por diversos fenómenos en los que influye la combinación lluvia-viento-evaporación que por retroalimentación al aumentar la E_v se alimenta la P_p y viceversa (Sharmila y Hendon, 2020), como es el caso de que una intensa P_p se genera de la E_v oceánica forzada por el viento (Sekizawa *et al.*, 2019) y todo en conjunto repercute sobre la condición climática de una región (Geen *et al.*, 2023). La importancia que adquiere la E_v depende de la escala de tiempo que se evalúe, porque si se visualiza sólo como un evento diario, podría no ser significativa ante un evento llu-

*Autor para correspondencia: Arturo Galvis Spinola

Correo-e: galvis@colpos.mx

Recibido: 4 de octubre de 2024

Aceptado: 29 de junio de 2025

Publicado: 17 de julio de 2025

vioso, pero si el análisis abarca un periodo prolongado como sería su valor anual, representa una fracción importante de la P_p (Baiamonte, 2021). La E_v es un proceso endotérmico, por lo que la intensidad de los ciclones tropicales se atribuye a la condensación que es un proceso exotérmico. De acuerdo con Li *et al.* (2015), la actividad de las bandas de lluvia que se ocasionan tienen la capacidad de incidir sobre la cantidad y distribución de otros fenómenos asociados a la hidrodinámica en la atmósfera y en los ecosistemas terrestres, en el que la temperatura, humedad del suelo, radiación neta y déficit de presión de vapor son las variables que mejor explican los cambios de la E_v (Hidalgo-Sánchez *et al.*, 2021). Aún no hay un modelo de estimación del B_H que sea preciso y funcional con aplicación universal y los que llegan a funcionar, su éxito más bien depende de condiciones ambientales específicas. Sin embargo, se prevé que el empleo de tecnologías emergentes como el aprendizaje automático y la teledetección podrán mejorar la precisión y exactitud de las estimaciones de la E_T o del B_H (Derardja *et al.*, 2024), pero aún no hay una propuesta que sea viable. En este sentido, dada la relevancia que tiene la relación entre la P_p y la E_v en el B_H de una región, el objetivo de este estudio es evaluar el cociente entre ambas

variables para cuantificar el déficit de evaporación (D_e) como indicador del exceso ($D_e > 1.0$) o déficit de humedad ($D_e < 1.0$) en el estado de Chiapas, México, así como proponer un procedimiento para su estimación mensual.

MATERIALES Y MÉTODOS

El trabajo se desarrolló con la información de 188 estaciones climáticas ubicadas en Chiapas, México (Figura 1), seleccionadas por seguir vigentes y tener datos climáticos disponibles para un periodo de al menos 10 años. De cada estación se registró su clave, nombre, altitud, coordenadas, años de servicio, promedio registrado de la precipitación pluvial mensual total (PP), evaporación mensual total (EV) el valor anual de ambas (CONAGUA, 2024) y subprovincia fisiográfica (INEGI, 2001).

Se realizó un análisis exploratorio de los datos mediante pruebas de normalidad para evaluar la distribución de las variables climáticas, eliminar valores atípicos y garantizar la calidad de la información. Para los valores faltantes aleatorios se utilizó el método de imputación por la media de los vecinos más cercanos y los faltantes sistemáticos se excluyeron del análisis para maximizar el uso de la información disponible y

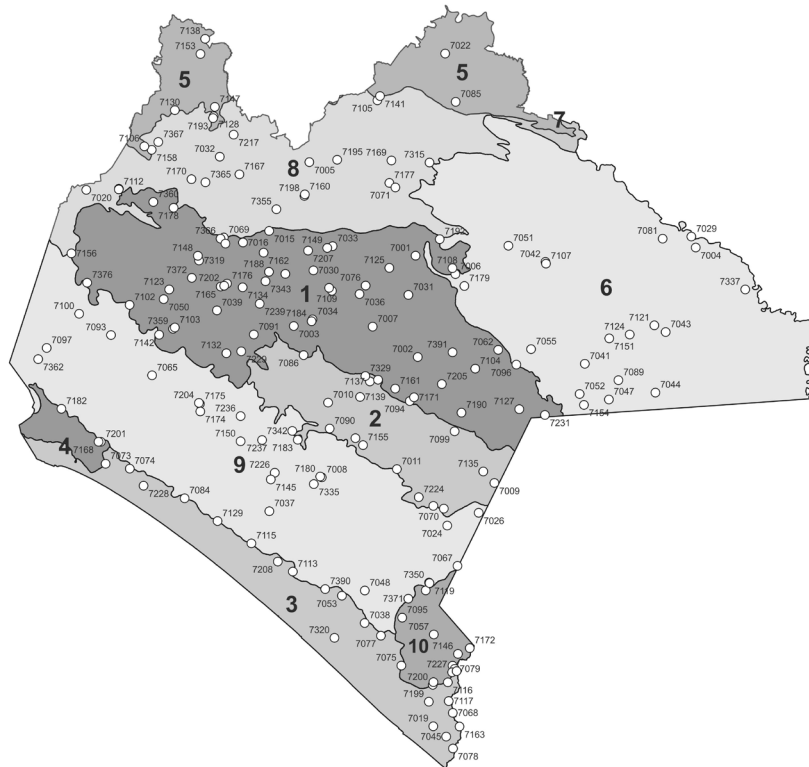


Figura 1. Ubicación de las 188 estaciones climáticas y clave correspondiente (CONAGUA, 2024) por subprovincia fisiográfica (INEGI, 2001) del estado de Chiapas: 1. Altos de Chiapas; 2. Depresión Central de Chiapas; 3. Llanura Costera de Chiapas y Guatemala; 4. Llanura del Istmo; 5. Llanuras y Pantanos Tabasqueños; 6. Sierra Lacandona; 7. Sierras Bajas del Petén; 8. Sierras del Norte de Chiapas; 9. Sierras del Sur de Chiapas; 10. Volcanes de Centroamérica.

Figure 1. Location of the 188 weather stations and corresponding key (CONAGUA, 2024) by physiographic subprovince (INEGI, 2001) of the state of Chiapas: 1. Chiapas Highlands; 2. Central Depression of Chiapas; 3. Coastal Plain of Chiapas and Guatemala; 4. Isthmus Plain; 5. Tabasco Plains and Swamps; 6. Lacandon Jungle; 7. Low Mountains of the Petén; 8. Northern Chiapas Mountains; 9. Southern Chiapas Mountains; 10. Central American Volcanoes.

se minimizó el sesgo en los resultados. Se empleó el software QGIS (2023) para la visualización espacial de los datos y la interpolación espacial se hizo a través del método de kriging, seleccionado por su capacidad de modelar la estructura espacial de los datos y generar mapas de alta resolución. Se utilizó la prueba de Mann-Kendall para evaluar las tendencias temporales de las variables climáticas. El desarrollo del trabajo se hizo a través de relaciones cuantitativas entre las distintas variables con el apoyo del paquete estadístico R (R Core Team, 2020). El ámbito de exploración de la pluviosidad anual en el estado varió entre 673.7 y 4953.7 mm, cuya distribución mensual se observa en la Tabla 1.

La lluvia se distribuye principalmente en dos periodos: P₁ = noviembre a abril; P₂ = junio a septiembre, donde P₁ < P₂ en todos los casos, mientras que la ocurrida en mayo y octubre es de transición entre P₂ y P₁, respectivamente.

Como procedimiento alterno para mejorar la evaluación de la pluviosidad se empleó el déficit de evaporación (D_E), que es el cociente de la precipitación total (P_p) y la evaporación total (E_v), para indicar el exceso (D_E > 1.0) o déficit (D_E < 1.0) de humedad: $D_E = P_p/E_v$. La relación entre el D_E y otras variables climáticas (temperatura máxima y temperatura mínima) siguieron una distribución normal y se evaluó su monotonicidad a través de la correlación de Pearson para identificar posibles relaciones, sin que se hubiesen detectado asociaciones significativas. Se ajustaron modelos de regresión para evaluar la relación entre el D_E y el tiempo (meses del año) y para estimar el D_E mensual en función del D_E anual. Se calculó el D_E mensual y anual por estación climática, que se consideró como el balance entre entradas y salidas de humedad. Debido a que en P₁ ocurrieron las principales diferencias de lluvia en la región, se verificó la tendencia del D_E en dicho periodo de la siguiente manera: a) se calculó la proporción del D_E anual por estación climática para cada mes entre noviembre y abril para disminuir la heterogeneidad natural de los valores absolutos; b) se codificaron los meses de noviembre a abril, asignando los números del uno al seis en ese orden; c) dada la tendencia de los datos en evaluación, se ajustó una ecuación de regresión cuadrática en cada serie de datos por estación climática: $D_{EP1} = a(M)^2 + b(M) + c$, siendo el D_E mensual en P₁ la variable dependiente (D_{EP1}) y los meses codificados (M) como variable independiente, lo que originó

tres zonas (A, B y C), definidas con base en la similitud en la distribución temporal del D_E y el análisis de agrupamiento jerárquico. Los criterios de selección de los grupos incluyeron la homogeneidad en los perfiles temporales del D_E y la coherencia geográfica de las estaciones dentro de cada grupo. Para identificar patrones espaciales en el D_E se realizaron análisis de agrupamiento y se construyeron mapas de isólineas. Para incluir en el análisis de la información a los demás meses del año, se agruparon las estaciones climáticas por zona. Se calculó para cada caso la proporción del D_E mensual respecto al D_E anual y se promedió la tendencia mensual del D_E por zona, para crear los coeficientes del D_E mensual para cada zona. Para cotejar la validez de las agrupaciones, se correlacionó el D_E mensual de cada estación climática con el D_E promedio por zona. Con base en dicho criterio, se realizó una nueva división de las zonas, reagrupando las estaciones climáticas de acuerdo con el mayor coeficiente de correlación. Lo anterior permitió estimar el valor del D_E mensual para cualquier estación en Chiapas, esto es, se selecciona el sitio geográfico de interés, el cual está vinculado al coeficiente del D_E específico y se multiplica por el D_E anual correspondiente. Se empleó una validación cruzada (k = 10) para evaluar la robustez de los modelos. Los datos se dividieron aleatoriamente en 10 subconjuntos, asegurando una representación balanceada de las diferentes condiciones climáticas en cada iteración. Se calculó el RMSE y se seleccionó el modelo con el menor RMSE promedio.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En Chiapas la P_p ocurre en dos periodos claramente diferenciados por el volumen captado, el estiaje o menos lluvioso se presenta de noviembre a abril (P₁) y el lluvioso de junio a septiembre (P₂), indistintamente de la zona geográfica o subprovincia fisiográfica, situación que de acuerdo con Arreola Muñoz (2019) se atribuye al movimiento de traslación de la Tierra y la perpendicularidad de los rayos del Sol. En la Figura 2 se muestra la relación de P₁ y P₂ respecto a la P_p total anual (P_λ) en el estado.

El estiaje ocurre cuando la disposición lumínica del Sol se desplaza hacia el Trópico de Capricornio, que aunado con los vientos del Golfo de México y la orografía del estado, contribuyen a que la escasez de humedad se incremente en

Tabla 1. Distribución de frecuencia (en porcentaje) de la precipitación pluvial mensual total (P_p) en el estado de Chiapas, México

Table 1. Frequency distribution (in percentage) of total monthly rainfall (P_p) in the state of Chiapas, Mexico.

P _p	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
mm	----- % -----											
≤ 3	69	80	89	63	1						47	64
3 a 6	20	17	11	36	18					2	29	23
6.1 a 9	11	3		1	41	1	7	1		19	24	13
9.1 a 12					30	13	25	10		44		
>12.1					10	86	68	89	100	35		

dirección norte-sur (Arreola Muñoz, 2019). En contraste, la época lluviosa se intensifica por la incidencia de los vientos alisios y la ocurrencia de los sistemas ciclónicos en el que los gradientes climáticos en la región se atribuyen a diferencias altitudinales y a la dirección de los vientos (Díaz Hernández *et al.*, 2000), variables que repercuten sobre la vegetación nativa (Alba-López *et al.*, 2003) y en los cultivos agrícolas de la región, en la que la E_T se modifica de manera espacial y temporal, además de ser afectada por factores biofísicos (Hidalgo-Sánchez *et al.*, 2021).

En todos los casos se obtuvo una tendencia lineal positiva ($p < 0.01$) de P_1 o P_2 respecto a P_A , siendo distinta la cantidad de lluvia recibida entre y dentro de las zonas evaluadas. Esta situación hace evidente las diferencias en la pluviosidad del estado, donde la cobertura vegetal es un almacenamiento hídrico y componente del equilibrio hídrico de las cuencas hidrográficas, cuya humedad interceptada es función de la distribución e intensidad de la lluvia y la tasa de evaporación (David *et al.*, 2006). Por tales razones, el agua almacenada en el dosel vegetativo influye en el ciclo hidrológico ya que una

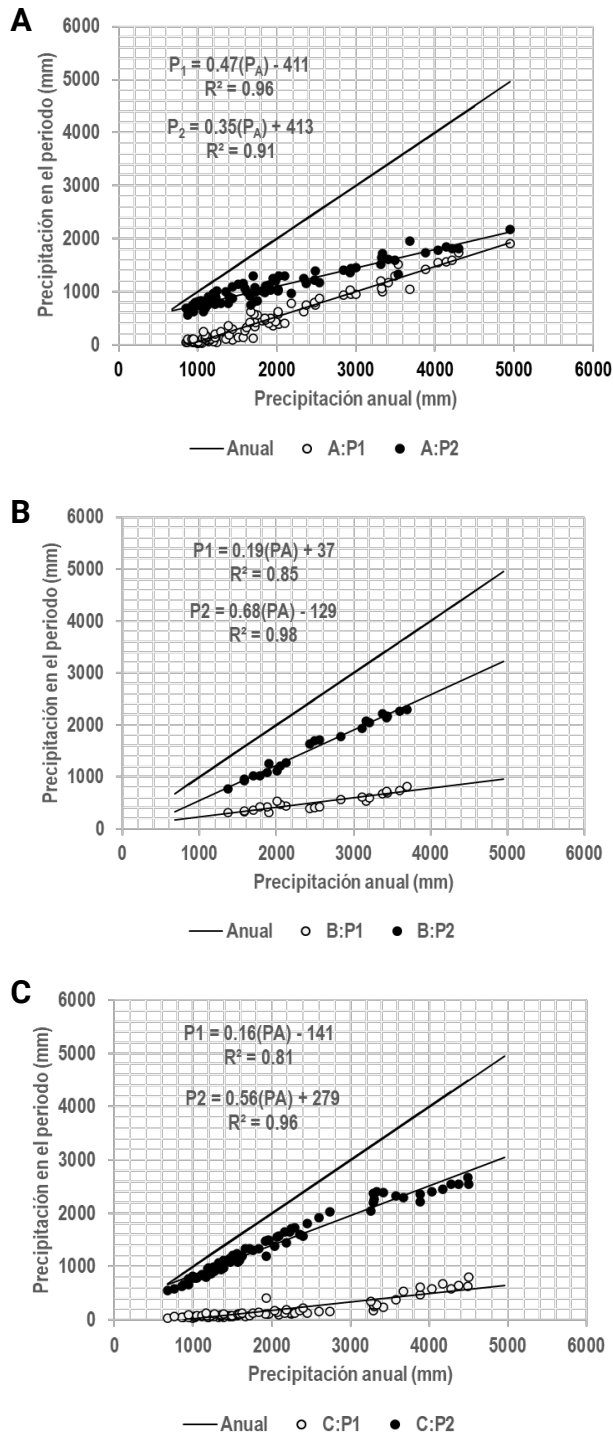


Figura 2. Relación entre la precipitación anual (P_A) y la captada en dos periodos distintos: noviembre a abril (P_1) y junio a septiembre (P_2) en las subprovincias fisiográficas de Chiapas, México. A: Altos de Chiapas, Llanuras y Pantanos Tabasqueños, Sierras del Norte de Chiapas; B: Sierras Bajas del Petén y Sierra Lacandona; C: Depresión Central de Chiapas, Llanura Costera de Chiapas y Guatemala, Llanura del istmo, Sierras del Sur de Chiapas y Volcanes de Centroamérica.
 Figure 2. Relationship between annual precipitation (AP) and precipitation in two different periods: November to April (P_1) and June to September (P_2) in the physiographic subprovinces of Chiapas, Mexico. A: Chiapas Highlands, Tabasco Plains and Swamps, Northern Chiapas Mountains; B: Low Mountains of the Petén and Lacandon Jungle; C: Central Depression of Chiapas, Coastal Plain of Chiapas and Guatemala, Isthmus Plain, Southern Chiapas Mountains, and Central American Volcanoes.

proporción de la lluvia es interceptada por la vegetación y su evaporación ejerce un efecto negativo en el consumo de agua por las plantas (Baïamonte, 2021). La P_p promedio en P_1 en la zona A es de 450 mm, en la B 506 mm y 176 mm en la C, lo que representa 64%, 55% y 77% del volumen captado en cada sitio, respectivamente. En referencia a la P_p promedio en P_2 , la zona A recibe 1047 mm, la B 1572 mm y 2020 mm en la C que abarca 62%, 45% y 78% de la P_p recibida, respectivamente. Es importante hacer notar que aquí la idea no es detectar superficies homogéneas en P_p , sino ubicar regiones similares en cuanto a la distribución geográfica de la lluvia en el estado (Figura 3).

Con la idea de depurar este análisis climático, se incluyó la variación proporcional del déficit de evaporación (D_E) respecto al D_E anual entre noviembre y abril (D_{EP1}), que son los meses de menor pluviosidad (M), agrupando previamente los datos según la ubicación de las estaciones climáticas mostradas en la figura en discusión:

Zona A	$D_{EP1} = 0.145(M)^2 + 0.31(M)$	$R^2 = 0.95$ $p < 0.01$
Zona B	$D_{EP1} = 0.057(M)^2 + 0.07(M)$	$R^2 = 0.90$ $p < 0.01$
Zona C	$D_{EP1} = 0.015(M)^2 + 0.43(M)$	$R^2 = 0.88$ $p < 0.01$

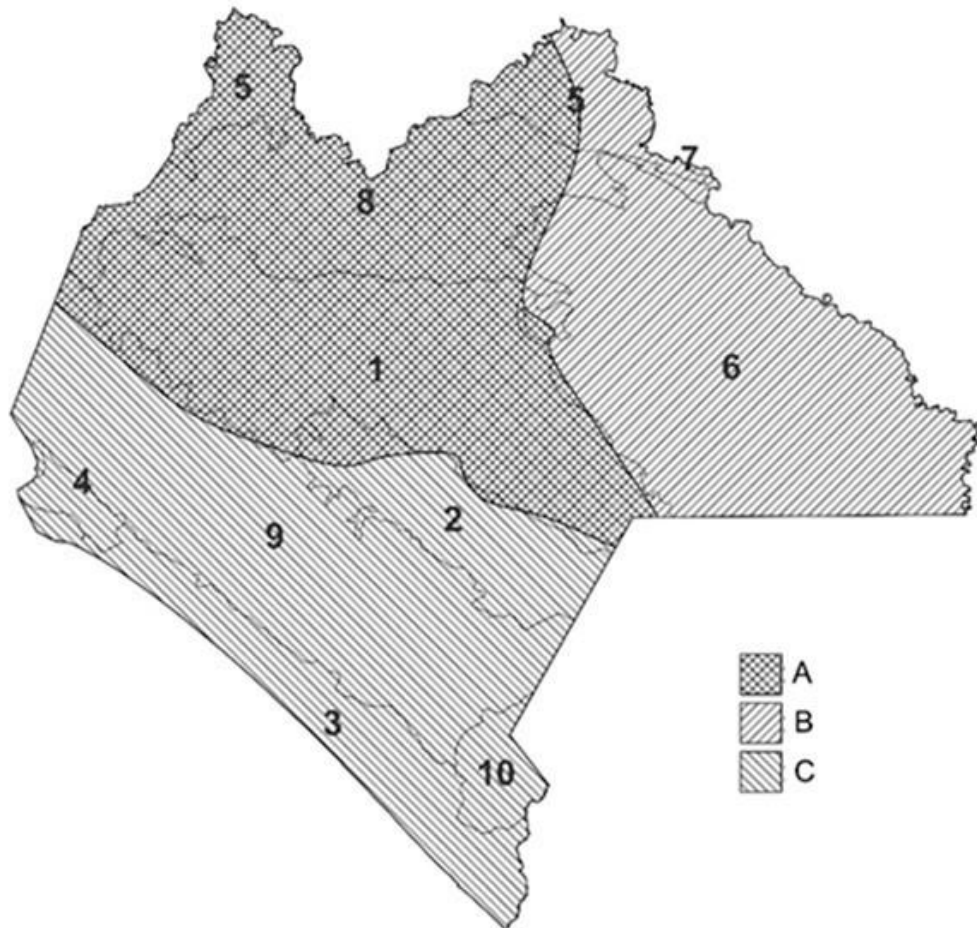


Figura 3. Zonas de diferente pluviosidad en Chiapas, México, de acuerdo con la relación de la precipitación anual (P_A) con la recibida de noviembre a abril (P_1) y de junio a septiembre (P_2). P_A : A= 855 a 4954 mm, B= 1374 a 3693 mm, C: 674 a 4498 mm; P_1 : A= 33 a 1902 mm, B= 313 a 822 mm, C: 33 a 809 mm; P_2 : A= 567 a 2170 mm, B= 774 a 2302 mm, C= 546 a 2665 mm. Los números indican la subprovincia fisiográfica en Chiapas (INEGI, 2001): 1. Altos de Chiapas; 2. Depresión Central de Chiapas; 3. Llanura Costera de Chiapas y Guatemala; 4. Llanura del Istmo; 5. Llanuras y Pantanos Tabasqueños; 6. Sierra Lacandona; 7. Sierras Bajas del Petén; 8. Sierras del Norte de Chiapas; 9. Sierras del Sur de Chiapas; 10. Volcanes de Centroamérica.

Figure 3. Rainfall zones in Chiapas, Mexico, according to the relationship between annual precipitation (P_A), precipitation from November to April (P_1), and precipitation from June to September (P_2). P_A : A= 855 to 4954 mm, B= 1374 to 3693 mm, C= 674 to 4498 mm; P_1 : A= 33 to 1902 mm, B= 313 to 822 mm, C= 33 to 809 mm; P_2 : A= 567 to 2170 mm, B= 774 to 2302 mm, C= 546 to 2665 mm. Numbers indicate the physiographic subprovince in Chiapas (INEGI, 2001): 1. Chiapas Highlands; 2. Central Depression of Chiapas; 3. Coastal Plain of Chiapas and Guatemala; 4. Isthmus Plain; 5. Tabasco Plains and Swamps; 6. Lacandon Jungle; 7. Low Mountains of the Petén; 8. Northern Chiapas Mountains; 9. Southern Chiapas Mountains; 10. Central American Volcanoes.

Subprovincias fisiográficas: Zona A: Los Altos de Chiapas; Llanuras y Pantanos Tabasqueños; Sierras del Norte de Chiapas. Zona B: Sierras Bajas del Petén; Sierra Lacandona. Zona C: Depresión Central de Chiapas; Llanura Costera de Chiapas y Guatemala; Llanura del Istmo; Sierras del Sur de Chiapas; Volcanes de Centroamérica.

La E_v se relaciona con la P_p de manera local y global (Geen *et al.*, 2023), incluyendo a fenómenos meteorológicos eventuales como las tormentas tropicales o ciclones (Li *et al.*, 2015), donde las fuertes lluvias se asocian a diferentes tasas de evaporación que alteran las condiciones climáticas de una región (Sekizawa *et al.*, 2019).

La tendencia entre ambas variables (D_{EP1} y M) hacen evidente las diferencias de humedad en la región en estudio y coincide geográficamente con la pluviosidad en Chiapas (Figura 3), aunque la evaluación de la lluvia y la incorporación del D_e en el análisis sólo hace referencia a los volúmenes totales que se registran durante el estiaje, no esclarece lo que ocurre durante el periodo lluvioso ni tampoco para un mes específico. Por ello, se amplió el período de análisis en comento para conocer la distribución del D_e durante todo el año para apreciar los contrastes que ocurren en la estación seca y la húmeda en el estado. El estiaje es más extremo en la Zona A que en el resto del estado, pero durante la época lluviosa se invierte totalmente dicha condición (Figura 4).

Con las técnicas de regresión empleadas en el presente trabajo se identificaron las variaciones climáticas que ocurren en Chiapas, procedimiento con el que coinciden López-López *et al.* (2023) para evaluar la condición de humedad e incluir índices cuantitativos de tipo porcentual para establecer relaciones entre variables (Mundo-Molina *et al.*, 2021). Con base en este tipo de datos es posible determinar la estación de crecimiento de los cultivos agrícolas y mejorar las prácticas

de manejo (Díaz Hernández *et al.*, 2000).

La variación extrema en la P_p la E_v y sus cambios en la región se asocia a la ocurrencia de fenómenos climáticos globales como El Niño y La Niña, que ocasionan inundaciones o sequías, respectivamente (Arellano-Monterrosas y Ruiz-Meza, 2019), por eso la P_p durante la estación húmeda varía significativamente desde el punto de vista geográfico y en la escala de tiempo en el lapso que ocurre la retroalimentación de P_p -viento- E_v (Sharmila y Hendon, 2020). A su vez, los eventos climatológicos denominados "nortes" son frecuentes en épocas de "frentes fríos" y se asocian con la disminución de la E_v (Hidalgo-Sánchez *et al.*, 2021).

La transformación de los valores del D_e en términos proporcionales al D_e anual para cada estación climática permitió redefinir las zonas climáticas del estado y ubicar geográficamente sitios homogéneos de la distribución del D_e mensual durante todo el año (Figura 5).

Las condiciones fisiográficas de Chiapas muestran gradientes altitudinales que originan diversos tipos de climas, incluso dentro de una misma subcuenca (Mundo-Molina, 2019), lo cual se apreció con claridad en este estudio; sin embargo, la tendencia de la relación de la P_p anual respecto a la captada en los meses de mayor y menor pluviosidad, permitió formar tres grupos por sus similitudes a la escala de trabajo empleada, lo cual es útil para definir qué tanta lluvia se capta y cómo se distribuye en el año, información que se requiere en la planeación agrícola y entender su efecto sobre los ciclos biológicos (Esquivel-Román *et al.*, 2018).

Es importante hacer notar que el análisis aquí presentado hace énfasis en la similitud de la distribución de la humedad en la región y no en los datos puntuales ni absolutos. De hecho, dentro de cada una de las zonas definidas hay variaciones notables en el D_e tanto a nivel mensual como

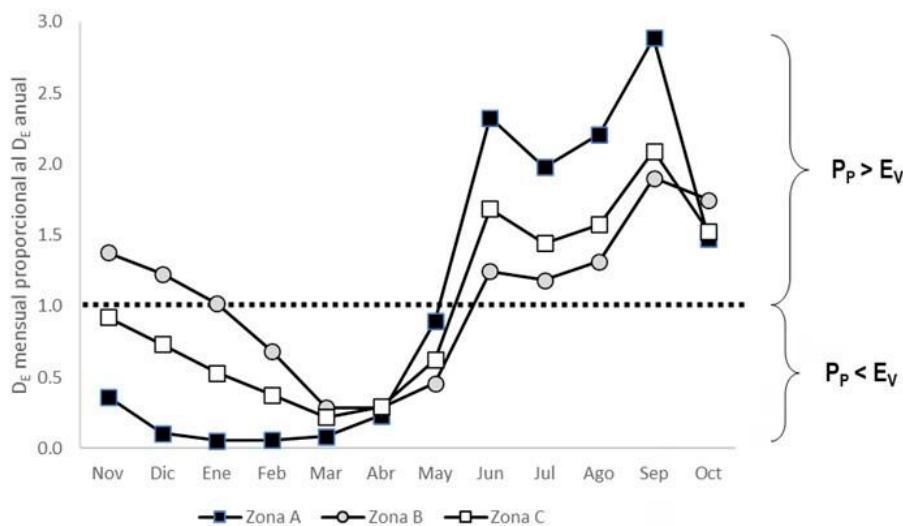
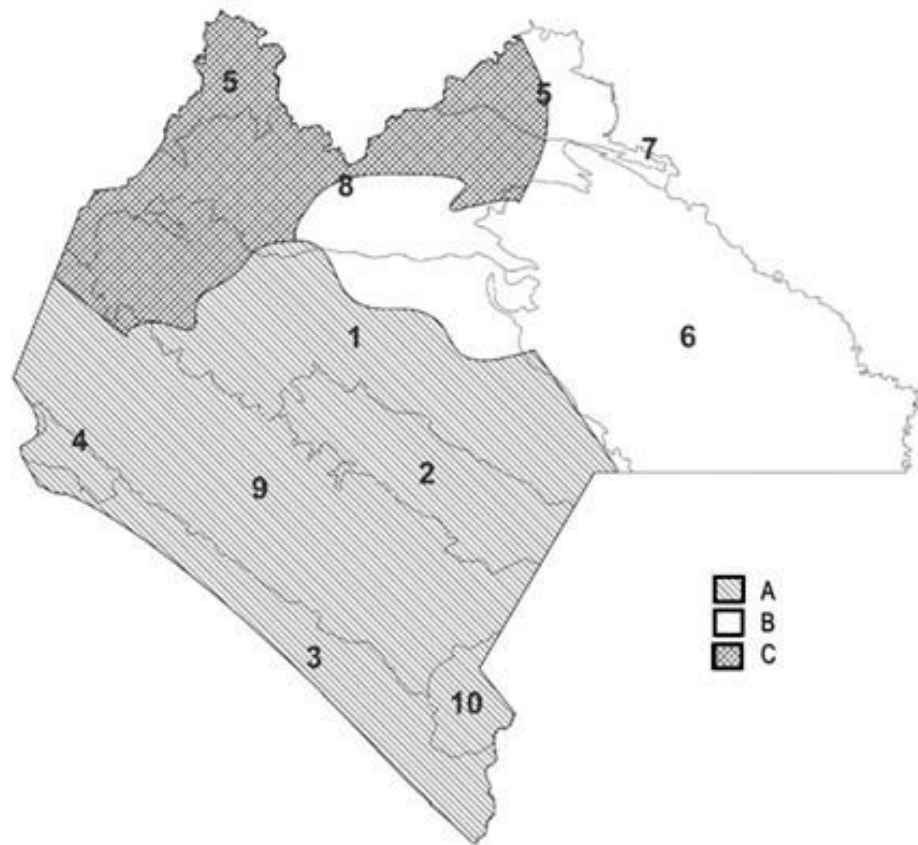


Figura 4. Variación de la proporción del déficit de evaporación (D_e) mensual respecto al anual en el estado de Chiapas, México. P_p = precipitación total mensual; E_v = evaporación total mensual.

Figure 4. Proportion variation of monthly evaporation deficit (D_e) relative to the annual evaporation deficit in the state of Chiapas, Mexico. P_p = total monthly precipitation; E_v = total monthly evaporation.



Zona	Nov.	Dic.	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.
A	0.4	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.9	2.3	2.0	2.2	2.9	1.5
B	1.4	1.2	1.0	0.7	0.3	0.3	0.5	1.2	1.2	1.3	1.9	1.7
C	0.9	0.7	0.5	0.4	0.2	0.3	0.6	1.7	1.4	1.6	2.1	1.5

Figura 5. Proporción del déficit de evaporación mensual respecto al anual por zona en Chiapas, México. Los números en el mapa indican las subprovincias fisiográficas (INEGI, 2001): 1. Altos de Chiapas; 2. Depresión Central de Chiapas; 3. Llanura Costera de Chiapas y Guatemala; 4. Llanura del Istmo; 5. Llanuras y Pantanos Tabasqueños; 6. Sierra Lacandona; 7. Sierras Bajas del Petén; 8. Sierras del Norte de Chiapas; 9. Sierras del Sur de Chiapas; 10. Volcanes de Centroamérica. Figure 5. Proportion of monthly evaporation deficit relative to the annual evaporation deficit by zone in Chiapas, Mexico. Numbers on the map indicate the physiographic subprovinces (INEGI, 2001): 1. Chiapas Highlands; 2. Central Depression of Chiapas; 3. Coastal Plain of Chiapas and Guatemala; 4. Isthmus Plain; 5. Tabasco Plains and Swamps; 6. Lacandon Jungle; 7. Low Mountains of the Petén; 8. Northern Chiapas Mountains; 9. Southern Chiapas Mountains; 10. Central American Volcanoes.

anual. Al respecto, si se hace el contraste entre el valor máximo y mínimo del D_E por zona, la diferencia en la zona A es de siete, en la B es de seis y en la C de cuatro veces entre ambos extremos, lo que indica regiones con distinta condición de humedad. A pesar de ello, la tendencia de la distribución del D_E a lo largo del año es similar dentro de cada zona y, desde luego, diferente entre ellas.

La relación del D_E anual con el que ocurre de noviembre a abril en Chiapas hace evidente las diferencias en la condición de humedad que coincide con la pluviosidad en el estado, pero no detecta los cambios que ocurren a través del año. Esto se superó al calcular la proporción del D_E mensual respecto al anual. Los argumentos en comento fortalecen la propuesta de emplear el D_E como indicador del balance de humedad de la zona de estudio y no restringirse exclusivamente a la P_p .

Con el procedimiento propuesto es posible conocer el D_E que ocurre en un mes en particular y sitio específico, para ello, se identifica la zona a la que corresponda la ubicación geográfica de interés, se selecciona el coeficiente del mes deseado (Figura 5) y se multiplica por su D_E anual. La precisión de la evaluación del D_E se hizo a través de la relación entre los valores estimados y los observados (Figura 6).

Los resultados de la validación cruzada mostraron que el modelo presenta un buen desempeño en la predicción del D_E (Zona A: RMSE = 0.216; Zona B: RMSE = 0.065; Zona C: RMSE = 0.415), lo que sugiere que el modelo es robusto, no está sobre ajustado y puede ser una herramienta útil para evaluar el B_H de la región en estudio, que revela patrones espaciales y temporales del D_E en Chiapas y subraya la importancia de considerar la relación entre la P_p y la E_v para comprender la dinámica del B_H en la región.

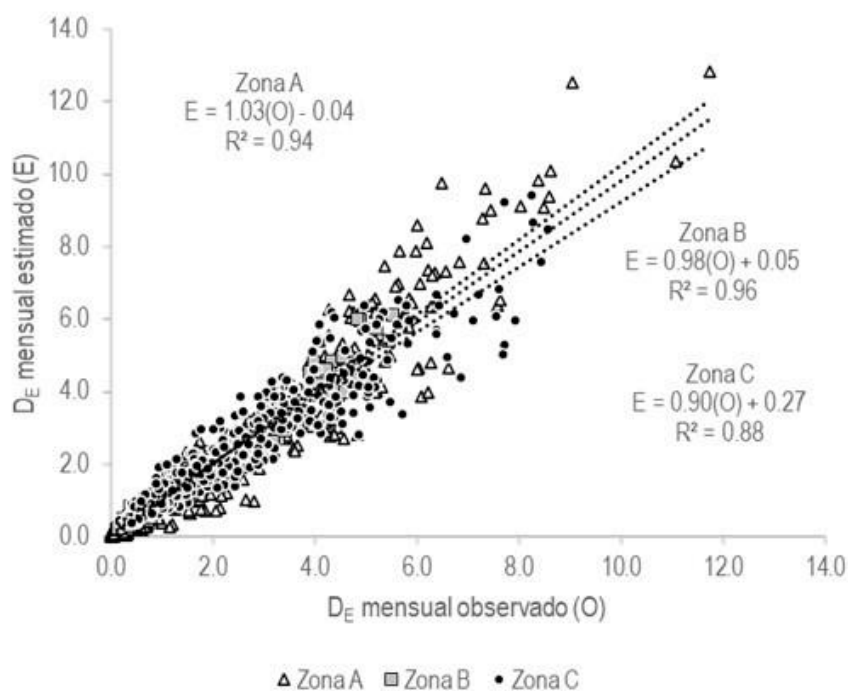


Figura 6. Relación entre el déficit de evaporación (D_E) mensual observado y estimado para cualquier mes del año y ubicación geográfica de las estaciones climáticas en el estado de Chiapas, México.
Figure 6. Relationship between the observed and estimated monthly evaporation deficit (D_E) for any month of the year and the geographic location of the weather stations in the state of Chiapas, Mexico.

Con el procedimiento aquí descrito es posible conocer la distribución mensual del D_E , por lo que si se adopta fortalecerá la toma de decisiones para coadyuvar a mejorar las condiciones agrícolas y ambientales. Por lo anterior, es notorio que la humedad en el estado no debe considerarse constante porque varía en espacio y tiempo, situación que imposibilita establecer zonas homogéneas en la captación de lluvia, lo cual no es la idea de este estudio, sino definir áreas similares en cuanto a su distribución.

CONCLUSIONES

En este estudio se evaluó el D_E como indicador del B_H en el estado de Chiapas, México. Los resultados obtenidos permiten concluir que el D_E es una herramienta útil para identificar zonas y épocas del año con mayor riesgo de estrés hídrico o exceso de humedad. La distribución espacial del D_E en Chiapas presenta una alta variabilidad, lo que refleja la complejidad de los procesos hidrometeorológicos en la región. Los modelos desarrollados para estimar el D_E mensual mostraron un buen desempeño, lo que sugiere que pueden ser utilizados como una herramienta de apoyo para la toma de decisiones en la gestión de recursos hídricos. Estos hallazgos permiten identificar áreas vulnerables a sequía e inundaciones, optimizar el uso del agua en la agricultura y otros sectores e informar las políticas públicas relacionadas con la gestión de recursos hídricos. Sin embargo, es importante reconocer como limitaciones del estudio que la calidad de los datos climáticos podría afectar la precisión de los resultados,

el estudio se centró en una escala temporal y espacial específica, por lo que los datos pueden no ser generalizables a otras regiones o períodos de tiempo. Futuras investigaciones podrían enfocarse a establecer el efecto del cambio climático sobre la distribución espacial y temporal del D_E , así como su relación con la productividad agrícola.

CONFLICTOS DE INTERÉS

Los autores declaran la no existencia de conflicto de interés.

REFERENCES

- Alba-López, M.P., González-Espinosa, M., Ramírez-Marcial, N. y Castillo-Santiago, M.Á. 2003. Determining the distribution of *Pinus* ssp. in the Central Highlands of Chiapas, Mexico. *Botanical Sciences*. 73: 7–15. <https://doi.org/10.17129/botsci.1675>
- Arellano-Monterrosas, J.L. y Ruiz-Meza, L.E. 2019. Variabilidad climática y eventos extremos en la cuenca del río Zanatenco, Chiapas. *Tecnología y Ciencias del Agua*. 10: 249–274. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2019-03-10>
- Arreola Muñoz, A.V. 2019. Variabilidad y cambio climático regionalizado en Chiapas. *Diversidad*. 16: 44–54. <https://www.idesmac.org/revistas/index.php/diversidad/article/view/66>
- Baiamonte, G. 2021. Simplified Interception/Evaporation Model. *Hydrology*. 8: 99. <https://doi.org/10.3390/hydrology8030099>
- CONAGUA. Comisión Nacional del Agua. Información climatológica del estado de Chiapas. [Consultado 24 Abril 2024] 2024. Disponible en: <https://smn.conagua.gob.mx/es/informacion-climatologica-por-estado?estado=chis>.

- David, J.S., Valente, F. y Gash, J.H. 2006. Evaporation of intercepted rainfall. En: *Encyclopedia of Hydrological Sciences*. M.G. Anderson (ed.), pp 627–634. John Wiley, Chichester, U. K., <https://doi.org/10.1002/0470848944.hsa046>
- Derardja, B., Khadra, R., Abdelmoneim, A.A.A., El-Shirbeny, M.A., Valsamidis, T., De Pasquale, V., Deflorio, A.M. y Volden, E. 2024. Advancements in remote sensing for evapotranspiration estimation: a comprehensive review of temperature-based models. *Remote Sensing*. 16:1927. <https://doi.org/10.3390/rs16111927>
- Díaz Hernández, B.M., Plascencia Vargas, H., Arteaga Ramírez, R. y Vázquez Peña, M.A. 2000. Estudio y zonificación agroclimáticos en la región Los Altos de Chiapas, México. *Investigaciones geográficas*. 42: 7–27. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-46112000000200002&lng=es&tlng=es
- Esquivel-Román, A., Callejas-Chavero, A. y Villegas-Guzmán, G.A. 2018. Relación de la temporalidad (estiaje y lluvias) con la riqueza y abundancia de arañas saltarinas (Araneae: Salticidae) en cinco localidades de San Luis Potosí. *Acarología y Aracnología*. 2: 448–475.
- Evetts, S.R., Schwartz, R.C., Casanova, J.J. y Heng, L.K. 2012. Soil water sensing for water balance, ET and WUE. *Agricultural Water Management*, 104:1–9. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2011.12.002>
- Geen, R., Pietschnig, M., Agrawal, S., Dey, D., Lambert, H. y Vallis, G.K. 2023. The relationship between model biases in East Asian summer monsoon rainfall and land evaporation. *Advances in Atmospheric Sciences*. 1–14. <https://doi.org/10.1007/s00376-023-2297-1>
- Hidalgo-Sánchez, M., Ángeles-Pérez, G., Yépez, E.A., Plascencia-Escalante, F.O., Delgado-Balbuena, J. y González-Martínez, T.M. 2021. Evapotranspiración e intercambio de energía en un bosque templado de México. *Tecnología y Ciencias del Agua*. 12: 490–537. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2021-02-11>
- INEGI. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Conjunto de datos vectoriales fisiográficos. Continuo Nacional serie I. Subprovincias fisiográficas. [Consultado 18 Mayo 2024] 2001. Disponible en: <https://www.inegi.org.mx/temas/fisiografia/#Descargas>.
- QGIS Development Team. 2023. QGIS Geographic Information System version 3.28.7 <https://qgis.org/es/site/>
- Li, Q., Wang, Y. y Duan, Y. 2015. Impacts of evaporation of rainwater on tropical cyclone structure and intensity-A revisit. *Journal of the Atmospheric Sciences*. 72: 1323–1345, <https://doi.org/10.1175/JAS-D-14-0224.1>
- López-López, C., Exebio-García, A.A., Flores-Velázquez, J. y Juárez Márquez, A.E. 2023. Índice de estrés hídrico (IEH) e índice de servicio del riego (ISR) en función de la huella hídrica de los cultivos en los módulos de riego en México. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*. 7: 11303–11331. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v7i2.6214
- Mundo-Molina, M.D. 2019. Discusión a la nota técnica “Índices de cambio climático en la cuenca del Río Grande, Chiapas, México” de Figueroa-Gallegos, J.A. 2017. 8: 137-143. *Tecnología y Ciencias del Agua*. 10: 283–292. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2019-06-d1>
- Mundo-Molina, M.D., Godínez-Gutiérrez, E., Pérez-Díaz, J. y Hernández-Cruz, D. 2021. Detecting climate change in using extreme data from two surface weather stations: Case study Valle of Comitán and La Esperanza, Chiapas, México. *Journal of Water Resource and Protection*. 13: 1061–1075. <https://doi.org/10.4236/jwarp.2021.1312057>
- R Core Team. 2020. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>
- Ruiz-Ortega, F.J., Clemente, E., Martínez-Rebollar, A. y Flores-Prieto, J.J. 2024. An evolutionary parsimonious approach to estimate daily reference evapotranspiration. *Scientific Reports*. 14(1):6736. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-56770-3>
- Sekizawa, S., Miyasaka, T., Nakamura, H., Shimpo, A., Takemura, K. y Maeda, S. 2019. Anomalous moisture transport and oceanic evaporation during a torrential rainfall event over western Japan in early July 2018. *SOLA 15A*. 25-30. <https://doi.org/10.2151/sola.15A-005>
- Sharmila, S. y Hendon, H.H. 2020. Mechanisms of multiyear variations of Northern Australia wet-season rainfall. *Scientific Reports*. 10 :5086. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-61482-5>
- Villalobos-Cano, O., Santellano-Estrada, E., Stringam, B.L., Grover, K. y Esparza-Vela, E. 2024. Estimating water use efficiency for major crops in Chihuahua, Mexico: crop yield function models vs. evapotranspiration. *Sustainability*. 16:1851. <https://doi.org/10.3390/su16051851>
- Wanniarachchi, S. y Sarukkalgige, R.A. 2022. A review on evapotranspiration estimation in agricultural water management: Past, Present, and Future. *Hydrology*. 9(7), 123. <https://doi.org/10.3390/hydrology9070123>