



## VARIACIÓN ESPACIAL DE LA ETo PARA EL MUNICIPIO DE MARTÍNEZ DE LA TORRE, VERACRUZ, ESTIMADA MEDIANTE CINCO MÉTODOS EMPÍRICOS

**Augusto Omar Villa Camacho**<sup>1\*</sup>; **Ronald Ernesto Ontiveros Capurata**<sup>2</sup>; **Raúl Berdeja Arbeu**<sup>3</sup>; **Alberto González Sánchez**<sup>1\*</sup>; **José Antonio Quevedo Tiznado**<sup>1</sup>; **Fabiel Vázquez Cruz**<sup>3</sup>; **Enrique Mejía Campos**<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Posgrado en tecnología y ciencias del agua. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Paseo Cuauhnáhuac Núm. 8532. 62550. Jiutepec, Morelos, México.

omarvilla.bw@gmail.com - (231) 1321126 (\*Autor de correspondencia)

<sup>2</sup>Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT). Paseo Cuauhnáhuac Núm. 8532. 62550. Jiutepec, Morelos, México.

<sup>3</sup>Facultad de Ingeniería Agrohidráulica. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Av. Universidad s/n, Ciudad San Juan Acateno. 73965 Teziutlán, Puebla, México.

### Resumen

La evapotranspiración de referencia (ETo) es una de las variables más importantes para la programación del riego de cultivos agrícolas, su estimación precisa y oportuna ayuda a mejorar la gestión del agua en la agricultura con lo que se mejora el rendimiento de los cultivos. Los métodos más utilizados para su estimación requieren de datos climáticos que muchas veces no están disponibles. En este sentido, este trabajo tuvo como objetivo determinar la evapotranspiración de referencia (ETo) mediante cinco métodos empíricos y su variación espacial para el municipio de Martínez de la Torre, Veracruz. Para esto se utilizaron datos de 11 estaciones meteorológicas cercanas al municipio para un periodo de 2000 – 2015 y cinco métodos empíricos para estimación de ETo (Hargreaves, Turc, Thornthwaite, Malmstrom, Droogers). Los resultados se compararon con el método Penman-Monteith modificado por la FAO (PMMF), mediante indicadores estadísticos y se elaboraron mapas de superficie mediante interpolación espacial. Los valores promedios mensuales de ETo oscilaron de 1.5 a 5.5 mm·día<sup>-1</sup> para los meses de enero y junio respectivamente. Los valores máximos se presentaron en las zonas con menor altitud y mínimos en zonas altas. El método Thornthwaite presentó un menor sesgo respecto a PMMF ( $R^2= 0.94$ , CME = 0.33 y EM = 0.13 mm·día<sup>-1</sup>) por lo que se concluye que es adecuado para estimar la variabilidad espacio temporal de la ETo en zonas con información meteorológica limitada como es el caso del municipio de Martínez de la Torre, Veracruz.

**Palabras claves:** Evapotranspiración de referencia, Penman-Monteith, requerimiento hídrico.



## Introducción

La evapotranspiración (ET) es un componente importante en los modelos de balance hídrico y la programación del riego (Fisher y Pringle, 2013). La programación del riego se ha definido durante mucho tiempo como una técnica para mejorar la gestión del agua aplicada en la agricultura la cual ayuda a mejorar los recursos hídricos y el rendimiento de los cultivos. La demanda de evapotranspiración del medio ambiente se estima en función de las condiciones climáticas y, a menudo, se estima como la evapotranspiración de un cultivo de pasto de referencia teórico (ET<sub>o</sub>), con el cultivo definido como una superficie uniforme de pasto en crecimiento activo, que da sombra completamente al suelo y sin falta de agua (Doorenbos y Pruitt, 1977).

Se han propuesto muchos métodos para estimar ET<sub>o</sub> basados en datos meteorológicos, y van desde relaciones empíricas desarrolladas localmente hasta modelos de transferencia de energía (Allen et al., 1998). Si bien el método FAO-56 se ha convertido en el estándar en todo el mundo para estimar ET<sub>o</sub>, es un método complejo que requiere varios parámetros meteorológicos, incluida la temperatura del aire, la humedad, la radiación solar y la velocidad del viento, que deben medirse en condiciones estrictas de instrumentación, ubicación y mantenimiento.

A menudo, las limitaciones (incluidas las financieras, de personal, de instrumentación y de mantenimiento) hacen que los datos meteorológicos necesarios para usar el método FAO-56 no estén disponibles, y se deben usar métodos alternativos. Si bien no hay consenso sobre el método más apropiado para usar cuando los datos requeridos no están disponibles (Itier et al., 1996), Allen et al. (1998), recomiendan dos métodos. El primer método consiste en utilizar un conjunto reducido de datos meteorológicos, estimar los parámetros meteorológicos faltantes y relacionarlo con el segundo método estándar FAO-56.

Bautista et al. (2009) mencionan que otros métodos solo contemplan la temperatura, como, por ejemplo, Thornthwaite (1948) y Hargreaves (Hargreaves, 1985). Estos métodos tienen la ventaja de requerir pocos datos meteorológicos, que muchas veces son difíciles de conseguir para grandes superficies. Sin embargo, su uso está limitado a climas similares a aquellos en los que se desarrollaron (Xu y Singh, 2000; Xu y Chen, 2005) por lo que su aplicación puede resultar en errores significativos cuando los resultados se extrapolan a otras áreas climáticas (Hounam, 1971). Por lo tanto, se hace necesario desarrollar procedimientos para realizar ajustes regionales y temporales de otros métodos para obtener las mejores estimaciones de ET<sub>o</sub> (Rosenberg *et al.*, 1983; Borges y Mendiondo, 2007).

En este contexto, este trabajo tiene como objetivo determinar la evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>) mediante cinco métodos empíricos y su variación espacial para el municipio de Martínez de la Torre, Veracruz. Cuyos resultados servirán de base para contar con estimaciones de requerimientos hídricos de cultivos de la zona de estudio como cítricos (limón y tangerinas) y planificar mejor los calendarios de riego.

## Materiales y Métodos

### Área de estudio

El experimento se realizó en el municipio de Martínez de la Torre, Veracruz, en el rancho 'San Antonio' con 120 metros de altitud, entre los paralelos 19° 58' y 20° 17' de latitud norte; los meridianos 96° 56' y 97° 10' de longitud oeste. El lugar presenta un clima clasificado como A (m) W" (e), caracterizado como clima cálido húmedo, con lluvias todo el año, temperatura anual de 26 °C y precipitación anual de 1,626 mm (SIEGVER, 2021) (figura 1).

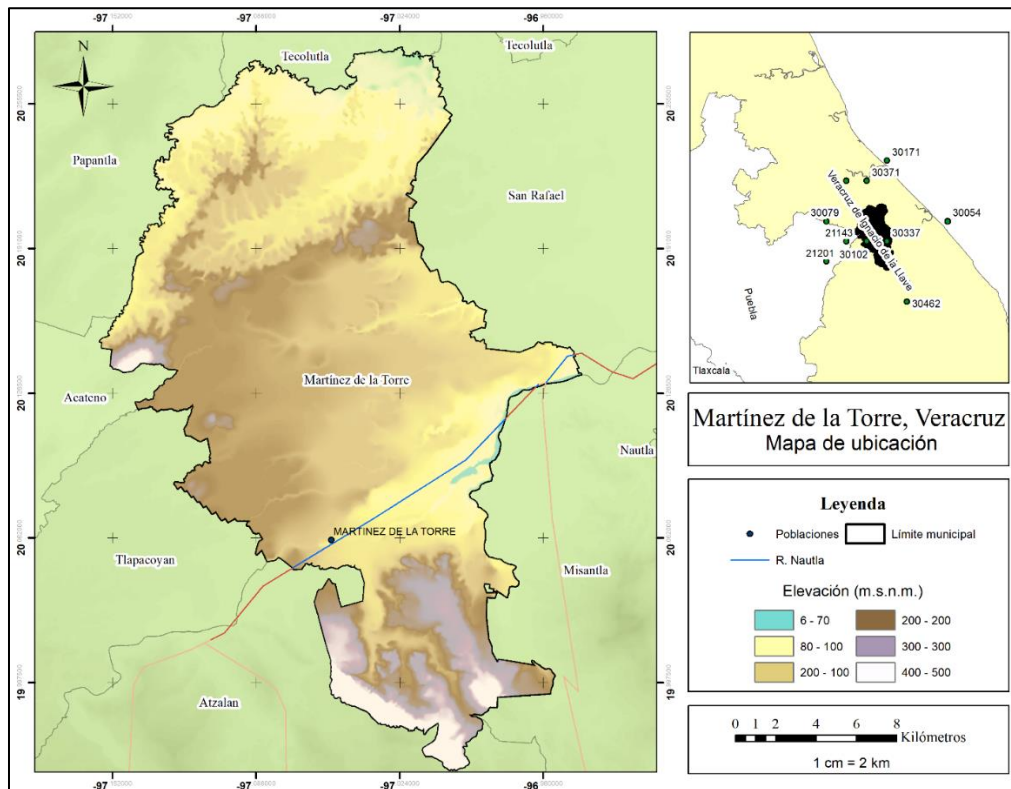


Figura 1. Ubicación del área de estudio.

En el municipio de Martínez de la Torre, Veracruz, el principal cultivo sembrado es maíz de grano con una superficie de 500 mil ha, caña de azúcar con 307 mil ha, sin embargo, es el principal productor de cítricos con una superficie de 236 mil ha. De las cuales tan solo están destinadas para riego 7 mil ha de maíz de grano, 98 mil ha de caña de azúcar y 10 mil ha de cítricos (SIAP, 2021).

## Información meteorológica y análisis de calidad de datos

Los valores diarios de temperatura y precipitación se obtuvieron de 11 estaciones meteorológicas administradas por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) (CONAGUA-SMN, 2022) para el periodo 2000 - 2015 (cuadro 1).

También se realizó una prueba de calidad mediante el paquete CLIMATOL desarrollado para el programa R. Para determinar el método de Penman - Monteith (PMMF), se utilizó el método de cálculo de datos faltantes descrita por Allen et al. (1998).

**Cuadro 1.** Estaciones meteorológicas.

Clave	Nombre	Latitud	Longitud	Altura
21143	SAN JOSE ACATENO	688194	2223564	114
21201	LAS MARGARITAS	677849	2212384	2422
30055	EL REMOLINO (CFE)	687833	2256775	119
30079	JOLOAPAN (CFE)	677623	2234524	47
30371	GUTIERREZ ZAMORA II	698271	2256893	20
30171	TECOLUTLA	708574	2268088	7
30102	MARTINEZ DE LA TORRE (DGE)	698652	2223680	89
30337	LIBERTAD	709111	2223802	59
30108	MISANTLA	719847	2201787	310
30054	EL RAUDAL	740336	2235280	10
30462	TENOCHTILAN	719985	2190716	892

Los valores faltantes se estimaron mediante el método de interpolación inverso de la distancia ponderada (IDW, por sus siglas en inglés), según la ecuación 1 (Shepard, 1968):

$$Z_p = \frac{\sum_{i=1}^n \left( \frac{Z_i}{d_i^p} \right)}{\sum_{i=1}^n \left( \frac{1}{d_i^p} \right)} \quad (1)$$

donde  $Z_p$  es el valor estimado para el punto,  $n$  es el número de puntos utilizados en la interpolación,  $Z_i$  es la observación meteorológica conocida,  $d_i$  es la distancia entre estaciones (m) y  $p$  es la potencia que está en función del grado de ondulación del terreno: 1 para plano y 2 para abrupto.

## Métodos empíricos para calcular evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>)

De todos los métodos empíricos disponibles se seleccionaron aquellos más adecuados a la disponibilidad de datos meteorológicos en la zona de estudio. En el cuadro 2 se presentan los métodos empíricos utilizados para el cálculo de la ET<sub>o</sub>, que son: Hargreaves (Hg), Turc (Tc), Thornthwaite (Th), Malmstrom (Mm) y Hargreaves modificado por Droogers (Dg) que fueron comparados contra el método Penman - Monteith PMMF considerado como estándar.

**Cuadro 2.** Métodos empleados para cálculo de ETo.

Mét.	Ecuación	Referencia
Hg	$ET_o = 0.023(0.408)(T_m + 17.8)(T_{max} - T_{min})^{0.5} Ra$	Hargreaves 1985
Tc	$ET_o = a * C * (R_G + b) * \left(\frac{T_m}{T_m + 15}\right)$	Turc 1961
Th	$ET_o = 16 d \left(\frac{10T_m}{I}\right)^a$	Thornthwaite 1948
Mm	$ET_o = 4.09 * 6.11 \exp\left(\frac{17.27T_m}{237.3 + T_m}\right)$	Malmstrom 1969
Dg	$ET_o = 0.0013 * 0.408 Ra (T_{avg} + 17)(TD - 0.0123P)^{0.76}$	Droogers 2002
PMMF	$ET_o = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T_m + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)}$	FAO-56

Para la implementación de los métodos de ETo, se requirió diferentes variables las cuales se describen a continuación: Tmn, es temperatura mínima (°C); Tmx, es temperatura máxima (°C); Tm, temperatura media (°C); Tavg promedio de temperaturas(°C); TD rango de temperatura (°C) P; Precipitación (mm/mes); a y b, constantes empíricas; C, constante dependiente de humedad relativa, ø, radiación global [MJ/m2 día]; Rs, radiación solar [MJ/m2 día]; Ra, radiación extraterrestre [MJ/m2 día]; Rn, radiación neta (MJ/ m2 día); G, flujo calórico (MJ/ m2 día) ;p, porcentaje medio anual de horas diurnas; d, número de días por mes; I, índice de calor anual; γ, Constante psicrométrica (kPa/ °C); Δ, pendiente de la curva de tensión de vapor saturado (kPa/ °C); u2, velocidad del viento a 2 m de altura (m/s); es – ea, déficit de tensión de vapor (kPa).

### Análisis estadístico

Los indicadores estadísticos considerados para evaluar la precisión de los métodos empíricos comparado con el método estándar (PMMF) fueron: coeficiente de determinación (R<sup>2</sup>), la raíz cuadrada del error cuadrático medio (CME) y el error medio (EM), calculados mediante las siguientes ecuaciones (2,3 y 4), según lo recomienda Djaman (2019):

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^N (a_i - \bar{a})(t_i - \bar{t})]^2}{[\sum_{i=1}^N (a_i - \bar{a})^2] [\sum_{i=1}^N (t_i - \bar{t})^2]} \quad (2)$$

$$CME = \left(\frac{\sum_{i=1}^N (a_i - t_i)^2}{N}\right)^{1/2} \quad (3)$$

$$EM = \left( \frac{\sum_{i=1}^N (a_i - t_i)}{N} \right) \quad (4)$$

Donde  $a_i$  es el dato estimado por el método,  $t_i$  es el método estándar PMMF,  $a$  es el promedio de los datos estimados por el método,  $t$  es el promedio del método estándar PMMF y  $N$  es el número total de observaciones (Alexandris *et al.*, 2006; Tabari, 2010; Cervantes *et al.*, 2012).

## Resultados y Discusión

### Análisis de temperaturas y precipitaciones

En la figura 2 se muestran los valores mensuales de temperaturas promedio y precipitaciones en la zona de estudio para el periodo analizado (2000 – 2015), la temperatura máxima promedio osciló en un rango de 23.4 a 32.7 °C con el mínimo en enero y máximo en junio, la temperatura mínima promedio en un rango de 13.7 a 21.5 °C en enero y junio respectivamente. Mientras que la precipitación promedio anual osciló de 59 a 330 mm para los meses de marzo y septiembre.

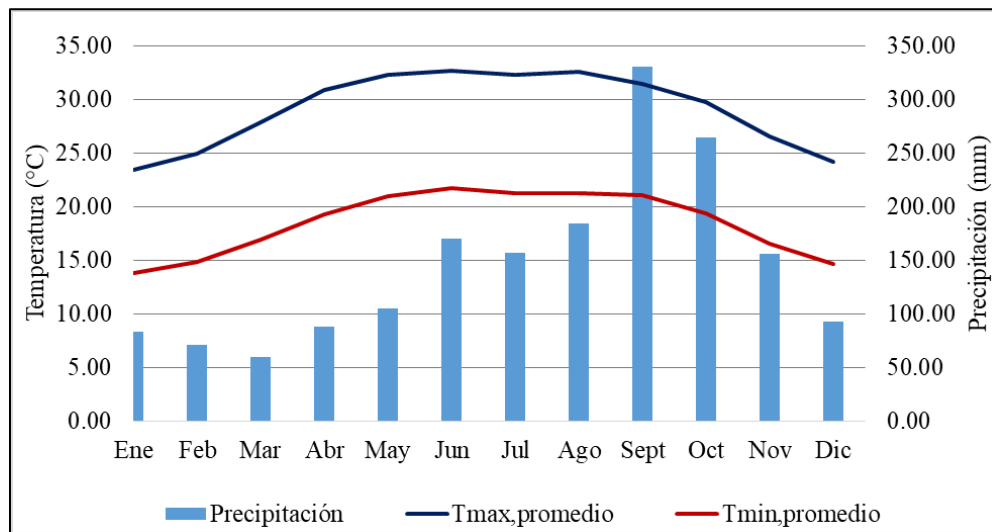
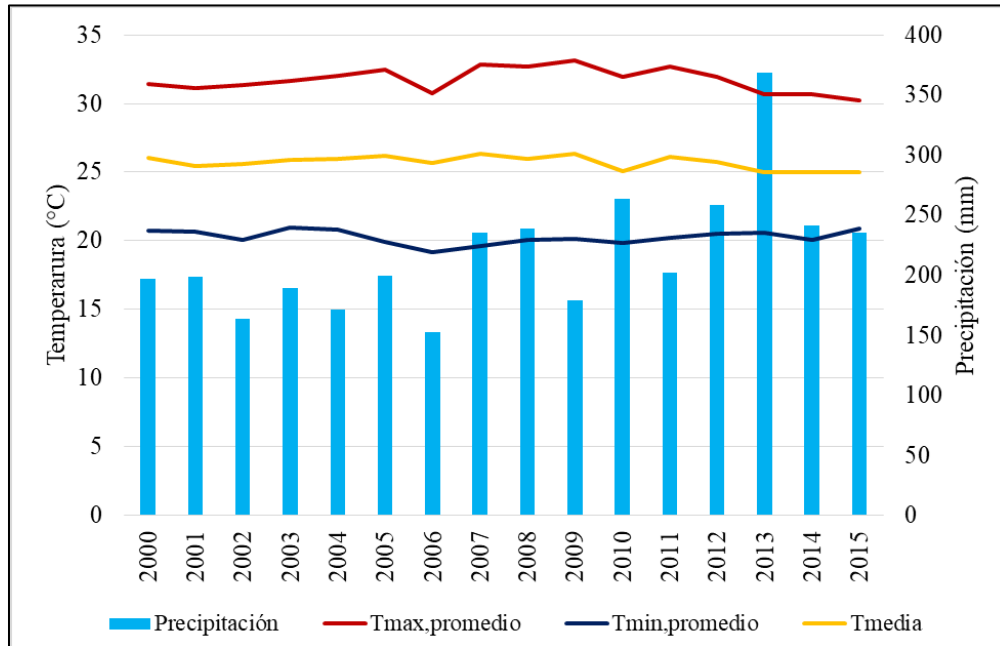


Figura 2. Valores mensuales de temperatura y precipitación (Período 2000 – 2015).

En la figura 3 se muestra la variación temporal de temperatura máxima y mínima anual promedio, así como la precipitación anual acumulada para el periodo 2000 – 2015 considerado como el periodo con mayor consistencia de registros en las estaciones seleccionadas. La temperatura máxima en este periodo se presentó en el año 2007 de 33.2 °C, mientras que la temperatura mínima en el año 2006 con °C.

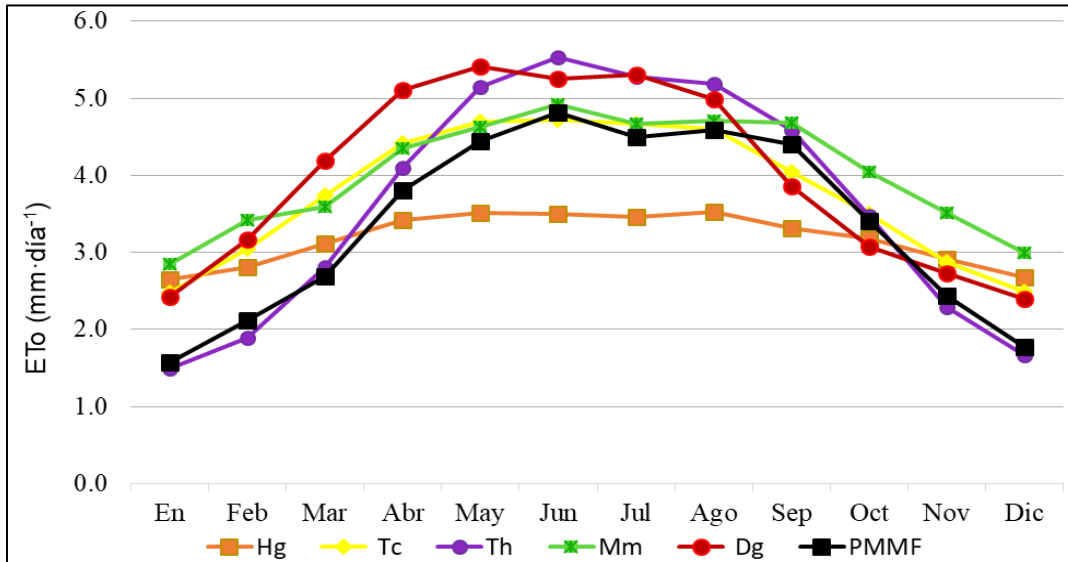


**Figura 3.** Temperatura promedio y precipitación anuales acumulada (Periodo 2000 – 2015).

En cuanto a la precipitación anual acumulada para este periodo, el valor máximo fue de 368 mm (año 2013), mientras que la mínima precipitación acumulada fue de 152 mm en 2006.

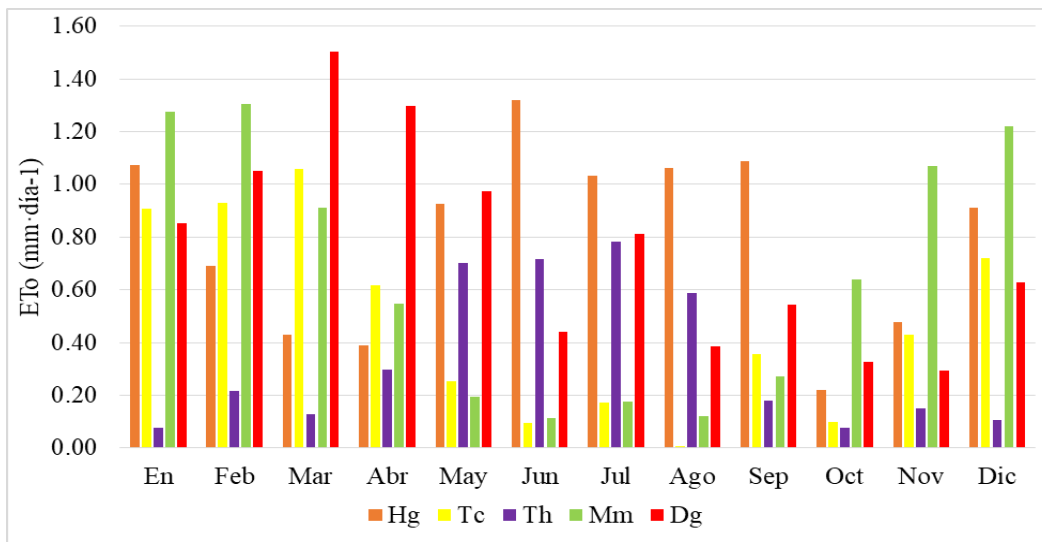
### Evapotranspiración de referencia (ETo)

La Figura 4 muestra los resultados promedio mensuales de la ETo, estimada con los diferentes métodos empíricos. Se observa un comportamiento monomodal con un valor mínimo en el mes de enero ( $1.5$  a  $2.9$   $\text{mm}\cdot\text{día}^{-1}$ ) y un valor máximo en el mes de junio ( $3.5$  a  $5.5$   $\text{mm}\cdot\text{día}^{-1}$ ). Cinco métodos (Hg, Tc, Th, Mm y Dg) sobrestiman a PMMF la mayor parte del año con valores promedios que varían de  $2.36$  a  $4.56$   $\text{mm}\cdot\text{día}^{-1}$  mientras que el método Hg presenta valores menores en los meses de enero, febrero, noviembre y diciembre, mientras que mayores en los meses de mayo y agosto. El método que presenta menores diferencias con respecto a PMMF es Th en los meses de enero – abril (entre  $0.08$  a  $0.3$   $\text{mm}\cdot\text{día}^{-1}$ ) y en los meses de septiembre - diciembre con valores que van desde  $0.18$  a  $0.10$   $\text{mm}\cdot\text{día}^{-1}$ .



**Figura 4.** Comportamiento de la evapotranspiración mensual de métodos empíricos con respecto al método de referencia PMMF.

En la figura 5, se muestran las diferencias de los métodos empíricos con respecto al método de referencia PMMF. El método Th presenta menores diferencias en los meses (enero – abril) en un rango de 0.08 a 0.03 mm·día<sup>-1</sup> y en los meses (septiembre – diciembre) con un rango de 0.18 a 0.10 mm·día<sup>-1</sup> con respecto a los demás métodos. Mientras que Mm obtuvo menores diferencias en los meses (mayo – agosto) con un rango de 0.19 a 0.12 mm·día<sup>-1</sup> respectivamente.



**Figura 5.** Diferencias de ETo de 5 métodos de referencia con respecto a PMMF.

### Análisis de regresión lineal



El análisis de regresión lineal (Cuadro 3) de los promedios mensuales de ETo estimados con el método de referencia PMMF y los métodos empíricos muestran que Tc, Th y Mm, tuvieron valores de  $R^2$  por encima del valor mínimo (0.70) reportado por Moriasi et al. (2007), esto indica un buen ajuste con respecto al método estándar para las condiciones climáticas evaluadas. Por otro lado, los métodos Hg y Dg presentaron los valores más bajos de  $R^2$  con 0.63 y 0.57 respectivamente. Los valores de CME oscilaron entre 0.33 y 1.12 mm·día<sup>-1</sup>, mientras que el EM varió de 0.13 a -0.31 mm·día<sup>-1</sup>. Se observa que todos los métodos sobreestimaron al método de referencia y el método más cercano a PMMF fue Th con  $R^2 = 0.94$ , CME = 0.33 mm·día<sup>-1</sup> y EM = 0.13 mm·día<sup>-1</sup>. Los datos obtenidos con el método Th concuerda con lo reportado por Hafeez *et al.* (2020) y Bautista *et al.* (2009), que mencionan que el método Th es una buena alternativa para estimar ETo durante los meses lluviosos.

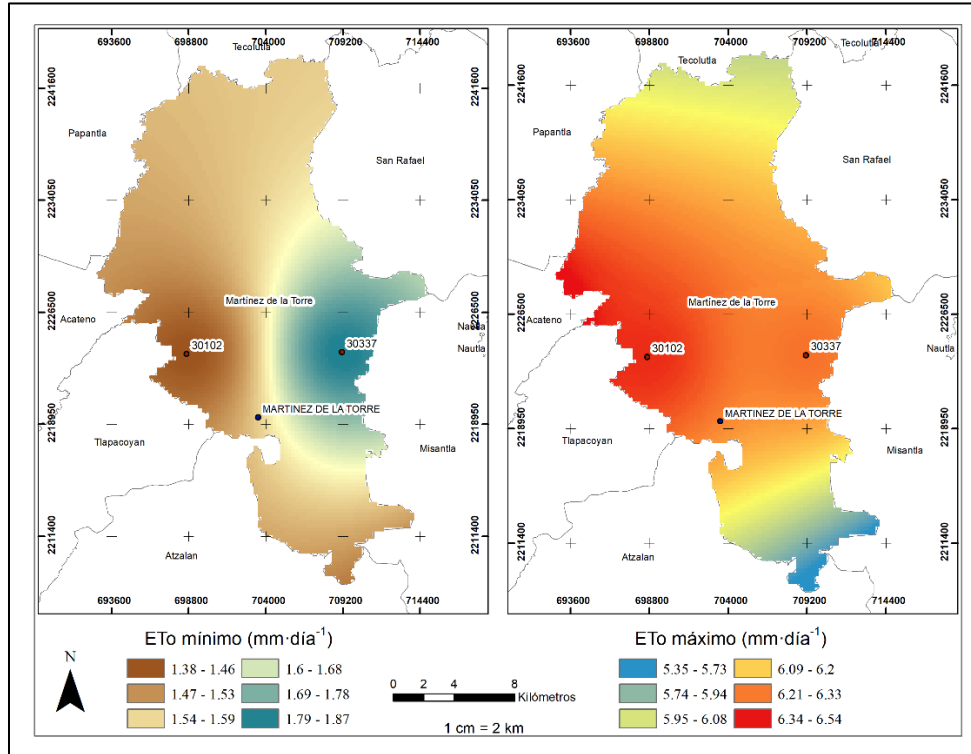
**Cuadro 3.** Resultados de indicadores estadístico para los métodos empíricos.

Método	$R^2$	CME (mm/d <sup>-1</sup> )	EM (mm/d <sup>-1</sup> )
Hg	0.63	1.128	-0.318
Tc	0.74	0.831	0.282
Th	0.94	0.330	0.135
Mm	0.90	0.874	0.544
Dg	0.57	1.107	0.497

$R^2$  = coeficiente de determinación; CME = raíz cuadrada del error cuadrático medio; EM = error medio.

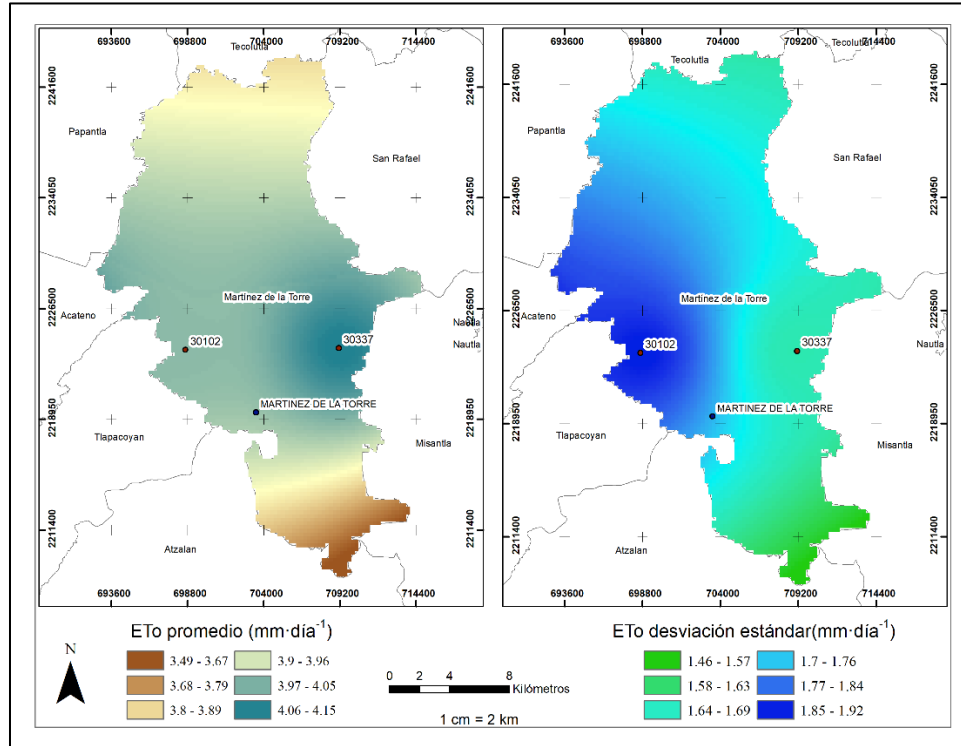
### **Análisis espacial de la ETo**

A partir de interpolación espacial de los valores puntuales de ETo estimados por Th se construyeron mapas de distribución espacial para las zonas donde no se cuenta con información climática (figura 6). Los valores de ETo mínima, se presentaron en un rango de 1.38 a 1.87 mm·día<sup>-1</sup> con un incremento que va desde las partes más altas a las bajas en dirección oeste-este. El valor más bajo de ETo mínima (1.21 mm·día<sup>-1</sup>) se dio en la estación Misantla (clave 30108, a 310 m s. n. m.). Por otra parte, la ETo máxima se presenta en un rango de 5.35 a 6.54 mm·día<sup>-1</sup> con un incremento predominante de las partes altas a las bajas de sur a oeste. El valor más alto de la ETo máxima (7.1 mm·día<sup>-1</sup>) se presentó en la estación San José Acateno (clave 21143, a 114 m s. n. m.).



**Figura 6.** Distribución espacial de los valores mínimos y máximos la evapotranspiración de referencia (ETo) estimada con el método Thornthwaite (periodo 2000-2015).

En la figura 7 se presentan los mapas de valores promedios y desviación estándar, generados a partir de la interpolación espacial de la ETo diaria calculada con el método Th. Los valores de la ETo promedio, se presentaron en un rango de 3.46 a 4,15 mm·día<sup>-1</sup> con un incremento que va desde la zona centro y se extiende la norte y sur. El valor más bajo de la ETo promedio (2.8 mm·día<sup>-1</sup>) se dio en la estación Tenochtitlan (clave 30462, a 892 m s. n. m.), mientras que el valor más alto (4.3 mm·día<sup>-1</sup>) se dio en la estación San José Acateno (clave 21143, a 114 m s. n. m.). Por otra parte, la desviación estándar de ETo se presentó en un rango de 1.46 a 1.92 mm·día<sup>-1</sup> con un incremento predominante de las partes altas a las bajas de sur a oeste. De igual manera el valor más bajo (0.98 mm·día<sup>-1</sup>) se dio en la estación Tenochtitlan (clave 30462, a 892 m s. n. m.), mientras que el valor más alto (2.03 mm·día<sup>-1</sup>) se dio en la estación San José Acateno (clave 21143, a 114 m. s. n. m.).



**Figura 7.** Distribución espacial de la evapotranspiración de referencia (ETo) promedio y desviación estándar estimada con el método Thornthwaite (periodo 2000-2015).

## Conclusiones

El método Thornthwaite presentó un menor sesgo respecto a PMMF por lo que se concluye que es adecuado para estimar la variabilidad espacio-temporal de la ETo en el municipio de Martínez de la Torre, Veracruz que cuenta con información meteorológica limitada.

La variabilidad espacial de la ETo tiene una relación directa con la altitud, con máximos en las partes bajas y mínimos en las altas, este comportamiento se refleja más en los meses cálidos (junio – agosto)

## Referencias Bibliográficas

Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <http://www.fao.org/3/X0490E/X0490E00.htm>.

Bautista, F., Bautista, D., & Delgado-Carranza, C. (2009). Calibration of the equations of Hargreaves and Thornthwaite to estimate the potential evapotranspiration in semi-



- arid and subhumid tropical climates for regional applications. *Atmósfera*, 22(4), 331-348.
- Bautista, F., Bautista, D., & Delgado-Carranza, C. (2009). Calibration of the equations of Hargreaves and Thornthwaite to estimate the potential evapotranspiration in semi-arid and subhumid tropical climates for regional applications. *Atmósfera*, 22(4), 331-348.
- Borges, A. C., & Mendiando, E. M. (2007). Comparação entre equações empíricas para estimativa da evapotranspiração de referência na Bacia do Rio Jacupiranga. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 11, 293-300.
- Comisión Nacional del Agua – Sistema Meteorológico Nacional (CONAGUA-SMN). (2022, October). Información estadística climatológica. <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/informacionclimatologica/informacion-estadistica-climatologica>.
- Doorenbos, J., & Pruitt, W. O. (1977). Crop water requirements. FAO irrigation and drainage paper 24. Land and Water Development Division, FAO, Rome, 144(1).
- Droogers, P., & Allen, R. G. (2002). Estimating reference evapotranspiration under inaccurate data conditions. *Irrigation and Drainage Systems*, 16, 33-45. <https://doi.org/10.1023/A:1015508322413>.
- Fisher, D. K., & Pringle III, H. C. (2013). Evaluation of alternative methods for estimating reference evapotranspiration. *Agricultural Sciences*, 2013.
- Hafeez, M., Gulshan, A. B., Basit, A., Chattha, Z. A., Khan, A. A., Majeed, M. A., & Tahira, F. (2020). Penman and Thornthwaite Equations for Estimating Reference Evapotranspiration Under Semi-Arid Environment. *Journal of Plant Sciences*, 8(5), 146-151.
- Hargreaves, G. H., & Samani, Z. A. (1985). Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied Engineering in Agriculture*, 1(2), 96-99. <https://doi.org/10.13031/2013.26773>.
- Hounam C. E., 1971. Problems of evaporation assessment in the water balance. Report on WMO/ IHP Projects No. 13, World Meteorological Organization. Geneva, 80 pp.
- Itier, B., Maraux, F., Ruelle, P., & Deumier, J. M. (1996). Applicability and limitations of irrigation scheduling methods and techniques. In ICID FAO workshop on irrigation scheduling, Rome, ITA, 12-13 September 1995 (pp. 19-32).
- Malmström, V. H. (1969). A new approach to the classification of climate. *Journal of Geography*, 68(6), 351-357. <https://doi.org/10.1080/00221346908981131>



- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van-Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., & Veith, T. L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 50(3), 885-900. <http://dx.doi.org/10.13031/2013.23153>.
- Rosenberg, N. J., Blad, B. L., & Verma, S. B. (1983). Evaporation and evapotranspiration. *Microclimate-The Biological Environment*, 209-287.
- SIAP, Servicio de Información y Estadística agroalimentaria y pesquera, (2021): Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA) <http://www.siap.sagarpa.gob.mx>.
- Sistema de Información Estadística y Geográfica del Estado de Veracruz de Ignacio de la Llave (SIEGVER). (2021). SEFIPLAN; Subsecretaría de Planeación. [http://ceieg.veracruz.gob.mx/wp-content/uploads/sites/21/2021/06/MARTINEZ-DE-LA-TORRE\\_2021.pdf](http://ceieg.veracruz.gob.mx/wp-content/uploads/sites/21/2021/06/MARTINEZ-DE-LA-TORRE_2021.pdf).
- Thorntwaite, C. W. (1948). An approach toward a rational classification of climate. *Geographical Review*, 38(1), 5594. <https://doi.org/10.2307/210739>.
- Turc, L. (1961). Evaluation des besoins en eau d'irrigation, évapotranspiration potentielle. *Annales Agronomiques*, 12, 13-49.
- Xu, C. Y., & Chen, D. (2005). Comparison of seven models for estimation of evapotranspiration and groundwater recharge using lysimeter measurement data in Germany. *Hydrological Processes: An International Journal*, 19(18), 3717-3734.
- Xu, C. Y., & Singh, V. P. (2000). Evaluation and generalization of radiation-based methods for calculating evaporation. *Hydrological processes*, 14(2), 339-349.