

Artículo Científico / Scientific Article

Evapotranspiración de referencia en julio y agosto en las microcuencas El Abundante y Guaraquiche, Jocotán, Guatemala

Reference evapotranspiration in July and August in El Abundante and Guaraquiche micro-watersheds, Jocotán, Guatemala

Erick Leonel Salvatierra¹

¹Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala

Dirección para recibir correspondencia: salvatierra.el@gmail.com
Recibido: 03/09/2025 Revisión: 22/10/2025 Aceptado: 29/12/2025

Resumen

Se analizó la evapotranspiración de referencia (ET_o) de julio y agosto, meses asociados con la canícula, en las microcuencas El Abundante y Guaraquiche, Jocotán, Chiquimula, corredor seco de Guatemala. Se utilizó FAO Penman-Monteith en CROPWAT con registros de temperatura máxima y mínima, humedad relativa, viento e insolación de La Fragua, Camotán y La Unión. El 2.8 % de datos faltantes se estimó por media aritmética; los posibles atípicos se identificaron por rango intercuartílico y se revisó su coherencia climática. Se interpoló mediante IDW con tres estaciones y potencia 2. La ET_o en las zonas alta, media y baja fue de 4.7, 4.9 y 5.0 mm/día en julio y 4.8, 5.0 y 5.1 mm/día en agosto, respectivamente. Los ajustes lineales tuvieron pendientes positivas, mayores en agosto, y coeficientes de determinación de 0.034–0.227, con alcance descriptivo. La baja densidad de estaciones limita la representatividad local. Los resultados aportan una referencia histórica para la gestión hídrica y la consideración del riesgo de déficit futuro de estas microcuencas, sin predecirlo ni determinar láminas de riego.

Palabras clave: Evapotranspiración de referencia, interpolación IDW, demanda evaporativa, variación temporal, gestión hídrica, isopletas.

Abstract

Reference evapotranspiration (ET_o) was analyzed for July and August, months associated with the midsummer dry spell, in the El Abundante and Guaraquiche micro-watersheds, Jocotán, Chiquimula, Guatemala's dry corridor. FAO Penman-Monteith in CROPWAT was applied to maximum and minimum temperature, relative humidity, wind, and sunshine records from La Fragua, Camotán, and La Unión. Missing data (2.8%) was estimated by arithmetic means; potential outliers were identified by interquartile range and reviewed for climatic consistency. IDW interpolation used three stations and a power of 2. ET_o in the upper, middle, and lower zones were 4.7, 4.9, and 5.0 mm/day in July and 4.8, 5.0, and 5.1 mm/day in August, respectively. Linear fits had positive slopes, higher in August, and coefficients of determination of 0.034–0.227, supporting descriptive interpretation. Low station density limits local representativeness. Results provide a historical reference for water management and consideration of future deficit risk in these basins, without predicting such deficits or determining irrigation depths.

Keywords: Reference evapotranspiration, IDW interpolation, evaporative demand, temporal variation, water management, isopleths.



Introducción

La evapotranspiración de referencia (ET_o) expresa la pérdida de agua por evaporación y transpiración de una superficie de referencia bajo condiciones climáticas determinadas. Integra el efecto de la radiación solar, la temperatura del aire, la humedad y el viento, y constituye un indicador fundamental para estimar la demanda atmosférica de agua y planificar el riego (Allen et al., 2006).

Las microcuencas de los ríos El Abundante y Guaraquiche, con superficies de 16.1 y 19 km², respectivamente, se localizan en la región VIII del municipio de Jocotán, Chiquimula, dentro del corredor seco de Guatemala. Sus ríos permanentes abastecen el riego de parcelas de granos básicos en comunidades del pueblo maya Ch'orti', cuyos medios de vida dependen en gran medida de la agricultura de subsistencia y del acceso al agua.

Como antecedente regional, el informe de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO] (2016) describe la vulnerabilidad de los productores a pequeña escala y las comunidades rurales del Corredor Seco centroamericano ante la sequía asociada a El Niño de 2015–2016. La reducción de la producción agropecuaria se relaciona con la pérdida de medios de vida, la disminución de la diversidad alimentaria y de la ingesta energética, el aumento del riesgo de desnutrición y la migración. Estos antecedentes refieren la importancia del agua para la producción de alimentos.

El informe de Acción Contra el Hambre [ACF] (2010) vincula el hambre estacional en el Corredor Seco de Guatemala con la reducción de las reservas familiares de granos antes de la cosecha, la falta de ingresos regulares y la vulnerabilidad de los medios de vida rurales.

Como antecedente regional, Calvo-Solano et al. (2018, p. 699), a partir de informes de Acción Contra el Hambre, recopilan para 2009 daños de entre 50 % y 100 % en cultivos de maíz, frijol y sorgo en numerosas áreas del Corredor Seco de Guatemala, Honduras y Nicaragua, asociados con la reducción de las lluvias, cuyo mayor déficit se presentó durante julio, agosto y septiembre. La disponibilidad de información agroclimática es, por tanto, esencial para identificar

zonas vulnerables y orientar medidas de adaptación. La seguridad hídrica se vincula con los Objetivos de Desarrollo Sostenible como marco para la toma de decisiones (Paris, 2020).

El uso racional del agua de riego es un componente central de la gestión integrada del recurso hídrico, pues la agricultura concentra aproximadamente el 70 % de las extracciones mundiales de agua dulce (FAO, 2013). En este contexto, la ET_o caracteriza la demanda evaporativa de referencia y constituye un insumo agroclimático para la gestión del riego. Los requerimientos hídricos de los cultivos y la programación del riego corresponden a un ámbito específico que involucra coeficientes de cultivo, precipitación efectiva, suelo y eficiencia del sistema. Esta distinción delimita el aporte de la investigación, cuya información resulta relevante para las comunidades que administran acueductos o buscan fortalecer su resiliencia frente a eventos climáticos adversos.

En este estudio, la ET_o se estimó mediante el método FAO Penman-Monteith en CROPWAT a partir de registros meteorológicos diarios de Camotán, La Unión y La Fragua, para caracterizar julio y agosto durante los periodos disponibles de cada estación. El procesamiento incluyó la estimación de datos faltantes mediante media aritmética y la identificación y revisión de posibles valores atípicos mediante el rango intercuartílico. La distribución espacial se representó mediante interpolación por distancia inversa ponderada (IDW), con las tres estaciones disponibles y potencia 2. Este procedimiento pondera los valores estimados de ET_o según su distancia al punto de interpolación y permite aproximar la variable en ubicaciones sin estaciones meteorológicas (Shepard, 1968).

Los mapas de isopletras generados representan una aproximación espacial de la demanda evaporativa de referencia y permiten orientar la gestión de las fuentes superficiales destinadas a la agricultura. Su utilidad se sitúa en el ámbito agroclimático, relacionado con la planificación del riego y el uso del agua (Allen et al., 2006), sin determinar requerimientos hídricos específicos ni demostrar una mejora en la eficiencia de los sistemas. La evapotranspiración también interviene en los balances hídricos del suelo y en la interpretación de su almacenamiento de agua (Santos et al., 2018),

ámbitos distintos del producto espacial obtenido en esta investigación.

Cuando se habla de cambio climático, la gestión de las fuentes de agua se relaciona con la continuidad de la producción de alimentos durante las canículas, la conservación de ecosistemas y suelos y la protección de las reservas de agua dulce (Selles, 2019). La información sobre la demanda hídrica aporta contexto a la planificación sostenible del riego (Shah, 2016). En esta investigación, la caracterización histórica de la ETo constituye un punto de partida agroclimático para considerar el riesgo de déficit de agua futuro, sin representar una proyección de ese déficit ni atribuir al cambio climático las variaciones estimadas.

El objetivo general fue caracterizar la variación temporal estimada de la evapotranspiración de referencia durante julio y agosto en las estaciones seleccionadas y aproximar su distribución espacial en las microcuencas de los ríos El Abundante y Guaraquiche. Los objetivos específicos fueron: (i) estimar la ETo a partir de las series meteorológicas de La Fragua, Camotán y La Unión; (ii) representar su distribución espacial mediante mapas de isopletras; y (iii) describir su comportamiento temporal mediante ajustes de regresión lineal durante los respectivos periodos de registro.

Materiales y método

Enfoque metodológico

La investigación adoptó un enfoque cuantitativo para estimar la evapotranspiración de referencia (ETo) mediante el método FAO Penman-Monteith. Se procesaron series meteorológicas históricas de julio y agosto para caracterizar temporalmente la ETo en las estaciones seleccionadas y representar su distribución espacial mediante interpolación por distancia inversa ponderada. El análisis se circunscribió a estos meses; la selección temporal no constituye, por sí sola, una identificación de episodios de canícula en cada año.

Variables

De acuerdo con la publicación 56 de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (Allen et al., 2006), la estimación de la evapotranspiración de referencia mediante el método FAO Penman-Monteith requiere información

meteorológica sobre temperatura del aire, humedad, velocidad del viento y radiación solar o duración de la insolación.

Se obtuvo información histórica de series diarias para julio y agosto, meses en los que, según Orrego León et al. (2022), pueden ocurrir disminuciones parciales o totales de la lluvia. Estos periodos se analizaron por su importancia agrícola durante la canícula; no obstante, la ETo representa la demanda evaporativa atmosférica y no aumenta necesariamente por el déficit de precipitación, sino por la combinación de radiación, temperatura, humedad y viento.

Delimitación de las microcuencas y selección de estaciones meteorológicas

Las microcuencas de los ríos El Abundante y Guaraquiche se delimitaron en el sistema de información geográfica QGIS mediante un modelo digital de elevación ALOS PALSAR, con un tamaño de píxel de 12.5 m × 12.5 m.

Tomando en cuenta la ubicación de las microcuencas, y la ubicación de las estaciones meteorológicas de INSIVUMEH, se priorizaron tres estaciones, siendo La Unión, Camotán y La Fragua.

La Tabla 1 presenta las coordenadas, altitudes y periodos de registro de las estaciones seleccionadas. Camotán se encuentra a 5 km del área de estudio, La Unión a 12 km y La Fragua a 15 km. Esta última se ubica en el río Grande o Jocotán, donde drenan las microcuencas analizadas.

Tabla 1. Estaciones meteorológicas cercanas a las microcuencas objeto de este estudio.

Estación	Latitud	Longitud	Altitud (m.s.n.m)	Registro (años)
La Unión	14.963	-89.291	1000	1990-2020
Camotán	14.820	-89.370	450	1971-2020
La Fragua	14.970	-89.550	210	1971-2020

La selección de las estaciones consideró la proximidad geográfica, la similitud fisiográfica, la disponibilidad de registros climáticos continuos y la cobertura altitudinal respecto al área de estudio.

Obtención y procesamiento de la información

Los registros históricos de las variables meteorológicas se solicitaron al departamento de Investigación y Servicios Climatológicos del Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (INSIVUMEH) y se recibieron en archivos CSV con datos diarios por estación. El procesamiento comprendió la revisión de datos faltantes y posibles valores atípicos, descrita a continuación. Para presentar el comportamiento de julio y agosto de cada año se obtuvieron valores promedio correspondientes a esos meses.

1. Revisión de antecedentes y estudios previos de las microcuencas
2. Solicitud de datos al departamento de Investigación y Servicios Climatológicos del INSIVUMEH
3. Obtención de archivos CSV
4. Aplicación de herramientas de SIG (interpolación)

Se revisaron los datos faltantes en las series diarias de temperatura máxima y mínima, humedad relativa, velocidad del viento y brillo solar (duración de la insolación). Se identificó un 2.8 % de datos faltantes, cuyos valores se estimaron mediante el método de media aritmética.

Los posibles datos atípicos se identificaron mediante diagramas de caja y bigotes y el criterio del rango intercuartílico. Se señalaron los valores situados por debajo del primer cuartil menos 1.5 veces el rango intercuartílico o por encima del tercer cuartil más 1.5 veces dicho rango. Estos registros se revisaron en relación con las condiciones climáticas de la zona; aquellos considerados incoherentes se corrigieron o se excluyeron del análisis.

La extensión temporal de los registros se valoró tomando como referencia la recomendación de emplear series de 20 a 25 años en balances hídricos o estudios climáticos (Sokolov y Chapman, 1981).

Análisis de datos

El comportamiento temporal de la ETo se describió mediante ajustes de regresión lineal para julio y agosto por separado en cada estación, durante sus respectivos periodos de registro. Se presentaron las pendientes y los

coeficientes de determinación para caracterizar la dirección del cambio estimado y la proporción de variabilidad interanual explicada por los ajustes. Su interpretación fue descriptiva y se circunscribió a los periodos analizados.

La Comisión Internacional de Riego y Drenaje y la Organización Meteorológica Mundial recomiendan el método FAO Penman-Monteith para estimar la evapotranspiración de referencia (ETo), según el manual de Allen et al. (2006). Este fue el método utilizado para el cálculo en las estaciones meteorológicas analizadas.

Las variables meteorológicas de cada estación se procesaron en el software CROPWAT, desarrollado por la FAO, para estimar la evapotranspiración de referencia (ETo) mediante el método FAO Penman-Monteith (ecuación 1).

$$ET_o = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 u_2)} \quad (1)$$

Donde:

ETo	Evapotranspiración de referencia (mm/día)
Rn	Radiación neta de la superficie del cultivo (MJ / m ² – día)
Ra	Radiación extraterrestre (mm/día)
G	Flujo de calor del suelo (MJ / m ² – día)
T	Temperatura media del aire (°C)
u ₂	Velocidad del viento (m/s)
e _s	Presión de vapor de saturación (kPa)
e _a	Presión real de vapor (kPa)
e _s – e _a	Déficit de presión de vapor (kPa)
Δ	Pendiente de la curva de presión de vapor (kPa / °C)
γ	Constante psicrométrica (kPa / °C)

El modelo contempla factores importantes basados en la resistencia aerodinámica superficial, siendo los siguientes:

Radiación neta de la superficie del cultivo (Rn)

La radiación neta representa la energía disponible en la superficie del cultivo después de considerar los intercambios de radiación entrante y saliente. Constituye la principal fuente de energía que impulsa los procesos de evaporación y transpiración.

Radiación extraterrestre (R_a)

La radiación extraterrestre corresponde a la energía solar recibida en el límite superior de la atmósfera terrestre. Sirve como referencia para estimar la energía solar disponible en una ubicación determinada.

Flujo de calor del suelo (G)

El flujo de calor del suelo representa la energía térmica que se almacena o libera desde el suelo durante un periodo de tiempo, influyendo en el balance energético del sistema suelo-planta-atmósfera.

Presión de vapor de saturación (e_s)

Es la máxima cantidad de vapor de agua que puede contener el aire a una temperatura específica, reflejando la capacidad potencial de la atmósfera para almacenar humedad.

Presión real de vapor (e_a)

Representa la cantidad efectiva de vapor de agua presente en la atmósfera en un momento determinado y permite describir el estado de humedad del aire.

Déficit de presión de vapor ($e_s - e_a$)

Indica la capacidad de la atmósfera para absorber agua adicional mediante evaporación y transpiración. Valores altos reflejan condiciones más secas y mayor demanda evaporativa.

Pendiente de la curva de presión de vapor (Δ)

Expresa la sensibilidad de la presión de vapor de saturación ante cambios en la temperatura del aire y describe cómo varía la capacidad atmosférica para contener vapor de agua.

Constante psicrométrica (γ)

Es un parámetro físico que relaciona las propiedades térmicas del aire con su contenido de humedad y permite integrar los procesos de transferencia de calor y vapor de agua.

Mapa de Isopletas

Para conocer los valores de ETo en las cuencas de estudio se implementó el método de interpolación IDW (Ponderación de Distancia Inversa) a través del software QGIS; como datos de entrada se plotearon las coordenadas UTM (Universal Transversal de Mercator,

zona 16) de las estaciones meteorológicas y el valor promedio de ETo (mm/día) para cada mes.

El método IDW se seleccionó considerando la disponibilidad limitada de estaciones meteorológicas para representar la variación espacial de la ETo. Navarrete Álvarez y López (2019) lo describen como una técnica exacta y determinística basada en la ponderación por distancia: las localizaciones más próximas al punto de estimación reciben mayor peso. En este estudio se utilizaron las tres estaciones disponibles.

Los mismos autores plantean que el modelo permite estimar el valor desconocido de una variable, en este caso la ETo representado por $Z(j)$ a partir del valor de la misma variable en localizaciones cercanas, separadas a una distancia d . Para estimar el valor de la variable en un punto no muestral $Z(j)$, el IDW utiliza la siguiente ecuación:

$$Z(j) = \sum_{i=1}^N \lambda_i * Z(i) \quad (2)$$

Donde: λ_i (con valores entre 0 y 1) es la función de ponderación de los N puntos muestrales (estaciones meteorológicas) i que intervienen en el cálculo de la distancia al punto no muestral $Z(j)$ a partir de los puntos conocidos $Z(i)$ (ETo en la estación meteorológica i) que van a ser ponderados según la distancia (d_{ij}) que los separa (ecuación 3).

$$\lambda_i = (d_{ij}^{-p}) / \sum_{i=1}^N d_{ij}^{-p} \quad (3)$$

El uso de la función inversa de la distancia implica dar menos peso relativo a los puntos más alejados de j , y viceversa. El peso o ponderación del valor del atributo en los puntos vecinos λ_i , se atenúa en función de la distancia según un exponente p que indica la rapidez con que decrece el peso de un punto dado.

El uso de exponentes elevados implica dar menos peso relativo a estaciones meteorológicas más alejados del valor a interpolar así cuanto más alta es esta potencia más influyen los puntos próximos y menos los alejados.

La distancia entre cada estación meteorológica y el punto de estimación se utilizó para calcular los pesos de la interpolación IDW mediante la distancia euclídea.

$$d(ij) = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad (4)$$

Donde: $(x_i, y_i, Z(i))$, corresponde a las coordenadas y el valor de ETo registrado siendo Z la variable observada en los puntos i con localización espacial (x_i, y_i) cercana al punto no muestral $Z(j)$. Mientras que $(x_j, y_j, Z(j))$, corresponde a los puntos donde se estima la ETo.

Los datos de entrada para la interpolación fueron las coordenadas de cada estación meteorológica y los valores de evapotranspiración de referencia (ETo) estimados a partir de sus registros meteorológicos. Con estos datos se generó una superficie continua para representar la distribución espacial estimada de la ETo en el área de estudio.

La interpolación IDW se configuró para utilizar las tres estaciones meteorológicas disponibles ($N = 3$), sin restringir el conjunto de vecinos, con un exponente de potencia $p = 2$. Esta configuración asigna mayor peso a las estaciones más próximas al punto de estimación. Camotán fue la estación más cercana al área de estudio.

La elección de los valores de p y N durante el proceso de interpolación se obtiene mediante el método de validación cruzada, en función del error cuadrático medio (ECM), siendo este la raíz cuadrada de la diferencia media entre el valor estimado del atributo medido y su valor real al cuadrado.

$$ECM = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\hat{Z}_{(i)} - Z_{(i)})^2}{N}} \quad (5)$$

Siendo $\hat{Z}_{(i)}$ el valor esperado o predicho por el interpolador para el punto i , y $Z_{(i)}$ el valor real de la variable medida.

Es importante mencionar que el proceso matemático o proceso de interpolación se realizó en el software QGIS calculando la ponderación en función de la distancia, la distancia euclidiana entre puntos y la estimación de valores en ubicaciones no muestreadas; como salida el software brinda un archivo en formato

Tiff y ráster para el área geográfica de interés, determinando las curvas o puntos con igual valor de ETo a un intervalo de 0.1 mm/día, representado en un mapa de isopletras.

El IDW estima valores mediante la ponderación inversa de la distancia a localizaciones con valores conocidos (Navarrete Álvarez y López, 2019).

La escasa densidad de estaciones meteorológicas limita la representatividad espacial de la interpolación. Por ello, los resultados se interpretan como una aproximación general al patrón espacial de la ETo. La correspondencia observada con el rango altitudinal se considera descriptiva y no constituye, por sí sola, una validación de la interpolación ni demuestra un efecto de la altitud sobre la variable.

Resultados

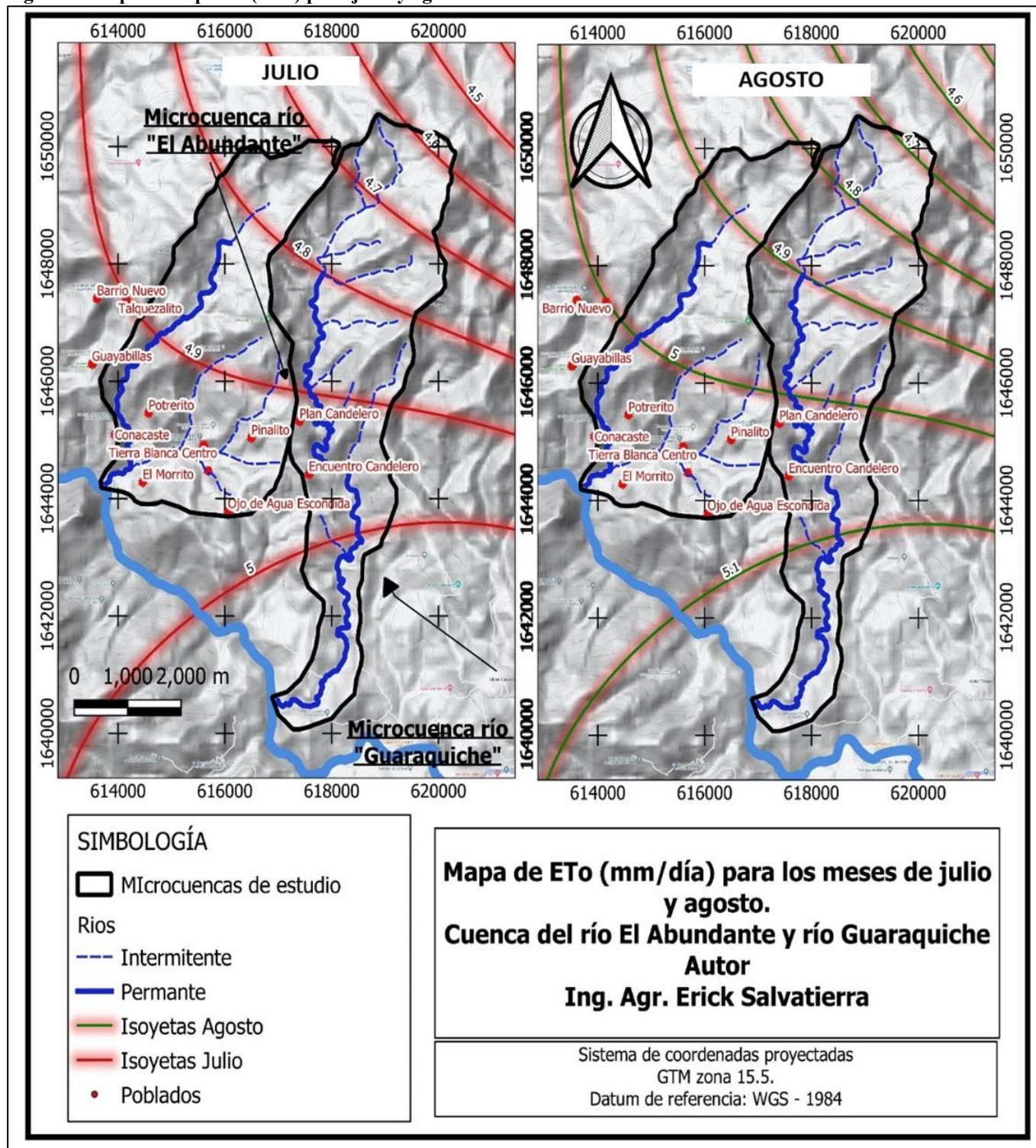
La Figura 1 presenta la distribución espacial estimada de la evapotranspiración de referencia (ETo), expresada en milímetros por día, para julio y agosto en las microcuencas de los ríos El Abundante y Guaraquiche. Las isopletras representan curvas de igual ETo. El mapa integra información topográfica y la red hidrográfica para contextualizar la variabilidad espacial de la demanda atmosférica de agua dentro del área de estudio.

El cuadrante izquierdo de la Figura 1 corresponde a julio. Las isopletras presentan valores estimados entre 4.7 y 5.0 mm/día, con magnitudes mayores hacia los sectores sur y suroeste de las microcuencas. Esta variación corresponde al gradiente espacial representado para el mes.

Las menores magnitudes estimadas se localizan en las zonas de mayor altitud del noreste del área de estudio. Los valores más elevados se concentran en los sectores de menor elevación asociados a las partes media y baja de las microcuencas. Esta distribución describe una correspondencia espacial con el relieve, pero no demuestra por sí sola su influencia sobre la ETo.

El panel derecho de la Figura 1 corresponde a agosto y presenta un patrón espacial similar al de julio. Las magnitudes estimadas son ligeramente mayores y alcanzan aproximadamente 5.1 mm/día en algunos sectores.

Figura 1. Mapa de isopletras (ETo) para julio y agosto en las microcuencas de estudio.



En agosto, las magnitudes estimadas de ETo aumentan espacialmente desde el noreste hacia el suroeste y son mayores en los sectores de menor elevación. Este patrón describe la correspondencia de la demanda evaporativa de referencia con la localización de esos sectores dentro de la superficie interpolada.

La superposición de la red hidrográfica permanente e intermitente, los límites de las microcuencas y la ubicación de los principales centros poblados permite situar la distribución estimada de la ETo respecto a los cursos de agua y los asentamientos.

La representación espacial obtenida caracteriza la demanda evaporativa de referencia estimada en el territorio de estudio.

La Tabla 2 presenta los valores estimados de evapotranspiración de referencia (ETo), expresados en mm/día, correspondientes a julio y agosto de cada año. Los datos abarcan 1971–2020 para La Fragua y Camotán, y 1991–2020 para La Unión, según los valores consignados en la tabla.

Tabla 2. Valores de ETo (mm/día) de cada año para julio y agosto de cada estación meteorológica.

AÑO	La Fragua		Camotán		La Unión	
	Julio	Agosto	Julio	Agosto	Julio	Agosto
1971	5.4	5.2	5.3	5.3		
1972	5.0	5.2	5.4	5.5		
1973	5.0	5.0	4.8	4.9		
1974	5.2	5.1	5.3	5.5		
1975	5.6	5.5	5.3	5.0		
1976	5.1	5.8	5.1	5.5		
1977	6.1	5.6	5.4	5.5		
1978	5.3	5.7	4.9	4.9		
1979	5.4	4.9	5.5	4.9		
1980	5.4	4.8	5.3	5.1		
1981	4.7	4.7	4.7	4.8		
1982	5.1	5.2	5.2	5.4		
1983	4.4	5.4	4.6	5.1		
1984	4.8	4.6	4.9	4.7		
1985	5.1	5.2	5.1	4.5		
1986	5.4	5.6	5.1	5.0		
1987	4.5	5.6	5.2	5.4		
1988	5.1	4.4	5.1	4.7		

1989	5.5	5.2	4.5	4.6		
1990	4.9	5.4	4.9	5.2		
1991	5.0	5.1	4.9	4.9	3.9	3.5
1992	4.8	5.0	5.0	5.2	3.5	4.0
1993	4.7	4.8	5.0	4.8	3.5	3.2
1994	5.5	5.2	5.5	5.3	3.7	3.9
1995	5.0	4.7	5.4	5.3	3.7	4.2
1996	4.8	4.8	5.1	5.1	3.5	3.6
1997	5.0	5.5	5.4	5.6	4.1	4.3
1998	5.0	5.2	5.4	5.7	4.0	3.9
1999	4.6	5.1	5.0	5.2	3.5	3.8
2000	6.4	5.3	5.5	5.1	3.4	3.2
2001	6.0	5.9	5.3	5.6	3.6	3.6
2002	5.4	6.0	5.3	5.6	3.9	3.9
2003	5.8	6.0	5.0	5.6	3.4	3.3
2004	5.3	6.1	5.2	5.7	4.0	3.8
2005	4.7	5.6	5.0	5.2	3.9	4.0
2006	4.6	5.7	5.1	5.7	3.6	4.4
2007	4.9	4.7	5.4	5.2	4.6	4.5
2008	4.7	5.1	4.7	5.1	4.2	4.3
2009	5.6	5.6	5.2	5.2	4.1	3.9
2010	4.6	4.5	5.0	4.5	4.2	3.9
2011	5.0	5.4	4.9	5.3	3.9	4.3
2012	6.1	5.3	5.2	5.2	3.9	4.4
2013	5.4	5.8	5.0	5.5	3.8	4.0
2014	6.3	6.4	5.5	5.9	3.7	4.2
2015	6.3	7.0	5.6	6.0	3.8	4.1
2016	6.9	5.9	5.4	5.5	3.9	4.0
2017	5.5	5.5	5.2	4.9	3.6	4.0
2018	6.9	6.7	6.0	5.8	3.9	3.8
2019	6.9	6.6	5.6	5.5	4.2	4.4
2020	5.8	5.8	4.7	4.7	4.2	4.2
Media	5.3	5.4	5.2	5.2	3.8	3.9
P90.	6.3	6	5.5	5.7	4.2	4.4

Las medias consignadas en la tabla 2 fueron de 5.3 y 5.4 mm/día en La Fragua, de 5.2 mm/día en ambos meses en Camotán y de 3.8 y 3.9 mm/día en La Unión, para julio y agosto, respectivamente.

El percentil 90 consignado en la tabla 2 fue de 6.3 y 6 mm/día en La Fragua, de 5.5 y 5.7 mm/día en

Camotán y de 4.2 y 4.4 mm/día en La Unión, para julio y agosto, respectivamente.

La tabla 3 resume los valores máximos, mínimos y promedio de ETo estimados para julio y agosto durante los periodos analizados.

Tabla 3. Valores máximos, mínimos y promedio de ETo (mm/día) para julio y agosto por estación.

Estación	Valores extremos	ETo (mm/día)	
		Julio	Agosto
La Fragua	Máximo	6.9	7.0
	Promedio	5.3	5.4
	Mínimo	4.4	4.4
Camotán	Máximo	6.0	6.0
	Promedio	5.2	5.2
	Mínimo	4.5	4.5
La Unión	Máximo	4.6	4.5
	Promedio	3.8	3.9
	Mínimo	3.4	3.2

Comportamiento histórico de la ETo

A través de gráficas se evidencia el comportamiento de la ETo durante un análisis histórico en función de los registros de cada estación meteorológica.

Los coeficientes de determinación mostrados en las gráficas oscilaron entre 0,034 y 0,227, según la tabla 4, por lo que los ajustes lineales explican una proporción reducida de la variabilidad interanual observada. En consecuencia, las pendientes obtenidas se interpretan de manera descriptiva dentro de los periodos analizados.

Las Figuras 2, 3 y 4 muestran la variación temporal de la ETo durante julio y agosto en las estaciones meteorológicas de La Fragua, Camotán y La Unión, respectivamente. Los ajustes de regresión lineal presentaron pendientes positivas en ambos meses para las tres estaciones.

La Fragua presentó pendientes de 0,0177 y 0,0184 mm/día por año para julio y agosto, respectivamente; Camotán presentó pendientes de 0,0037 y 0,0068 mm/día por año; y La Unión, de 0,0132 y 0,0191 mm/día por año, respectivamente.

Tabla 4. Ecuaciones de regresión lineal y coeficientes de determinación de la ETo para julio y agosto por estación.

Estación	Ecuación de regresión lineal		Coeficiente de determinación R ²	
	Julio	Agosto	Julio	Agosto
La Fragua	$y = 0.0177x + 4.8795$	$y = 0.0184x + 4.9308$	0.167	0.227
Camotán	$y = 0.0037x + 5.0649$	$y = 0.0068x + 5.0442$	0.034	0.076
La Unión	$y = 0.0132x + 3.6276$	$y = 0.0191x + 3.6467$	0.161	0.227

Figura 2. Valores estimados de ETo para julio y agosto y ajustes de regresión lineal en la estación La Fragua.

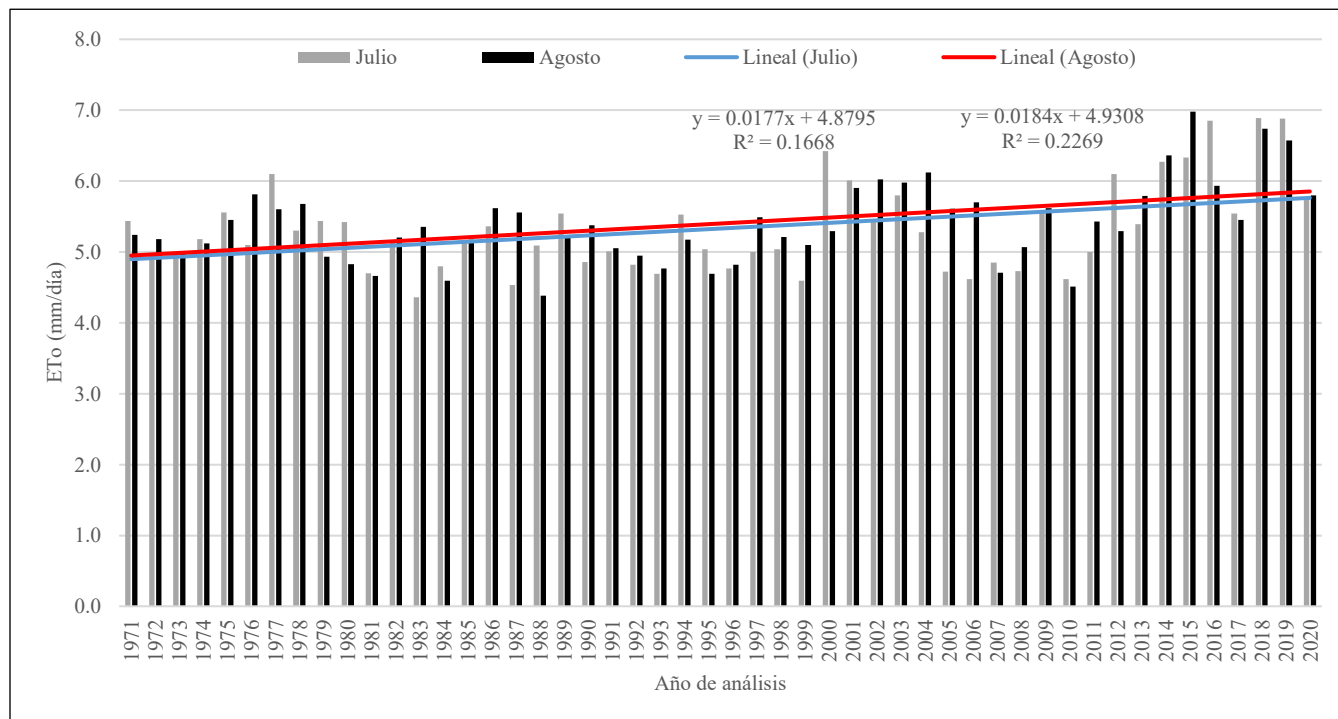


Figura 3. Valores estimados de ETo para julio y agosto y ajustes de regresión lineal en la estación Camotán.

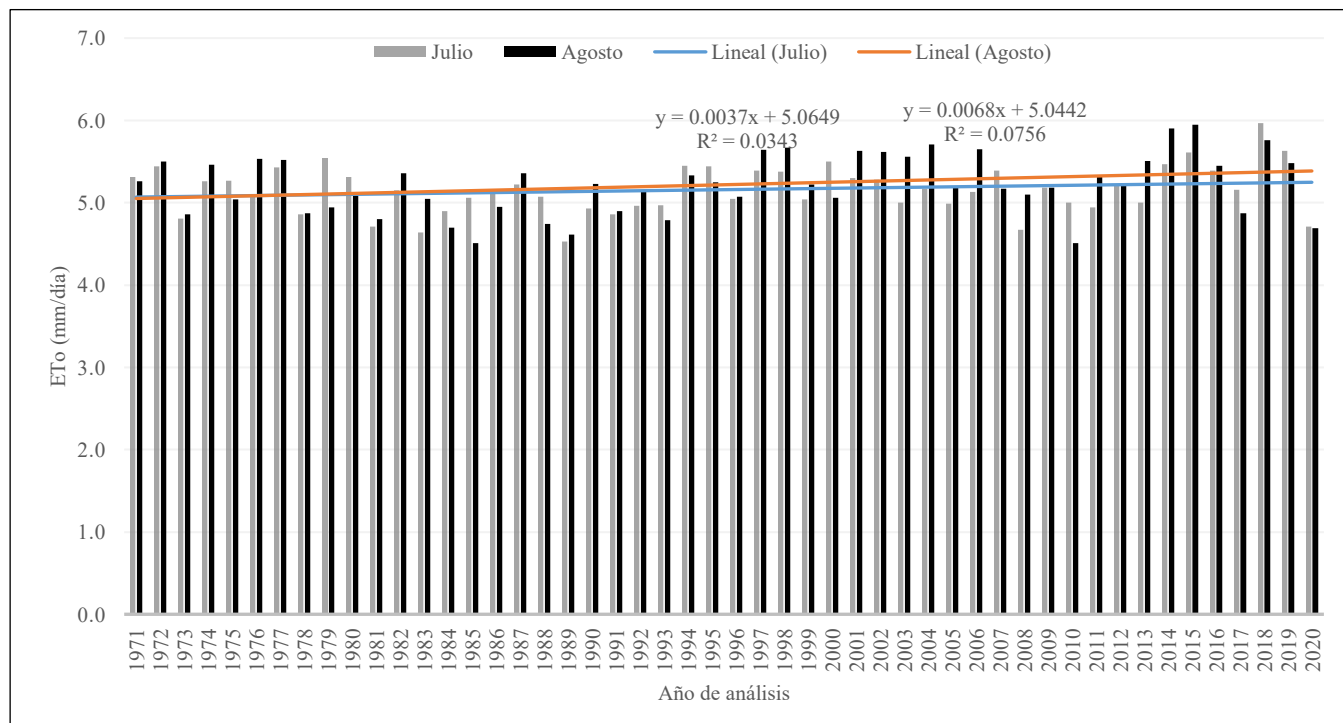
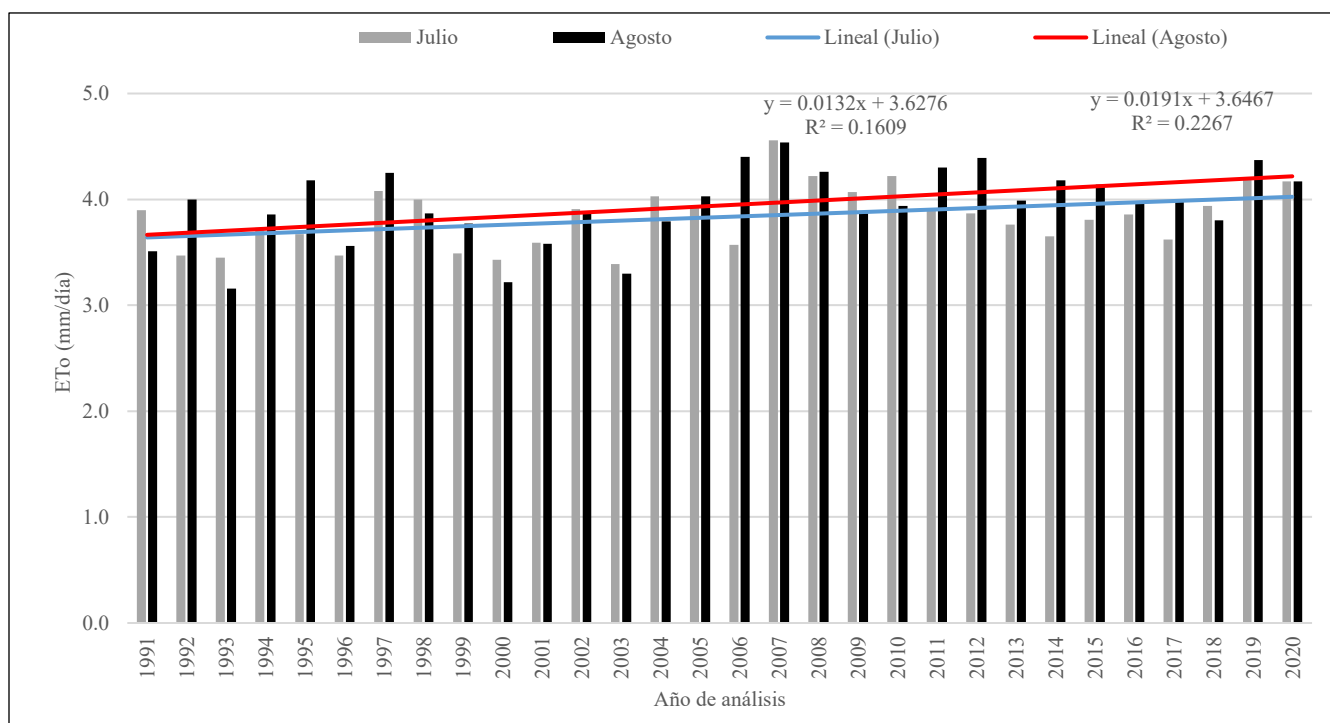


Figura 4. Valores estimados de ETo para julio y agosto y ajustes de regresión lineal en la estación La Unión.



Las tres estaciones presentan pendientes positivas en sus ajustes de regresión lineal. Según la tabla 5, los cambios estimados de ETo en Camotán fueron de 0.19 mm/día para julio y 0.34 mm/día para agosto durante el periodo analizado, con una magnitud mayor en agosto.

En las tres estaciones, las pendientes de los ajustes lineales fueron mayores en agosto que en julio.

Tabla 5. Pendientes de los ajustes lineales de ETo y cambios estimados durante los periodos analizados, por estación y mes.

Estación	Pendiente (mm/día por año)		Cambio estimado (mm/día)	
	Julio	Agosto	Julio	Agosto
La Fragua	0.018	0.018	0.89	0.92
Camotán	0.004	0.007	0.19	0.34
La Unión	0.013	0.019	0.40	0.57

Discusión de resultados

El mapa de isopletras mostró una correspondencia espacial entre la ETo estimada y los sectores altitudinales de las microcuencas, con valores de 4.7 mm/día, 4.9 mm/día y 5 mm/día para la parte alta, media y baja durante julio. En agosto, los valores fueron ligeramente mayores: 4.8 mm/día, 5 mm/día y 5.1 mm/día, respectivamente. Esta representación describe la distribución interpolada de la variable, sin establecer la altitud como causa principal de las diferencias.

Este estudio consideró aldeas y caseríos donde se encuentran establecidos sistemas de riego. La ETo estimada en las aldeas en estudio fue de 4.9 mm/día y 5.0 mm/día para julio y agosto, respectivamente. Estos valores caracterizan la demanda evaporativa de referencia; las diferencias entre las zonas de las cuencas no equivalen por sí solas diferencias en los requerimientos hídricos de los cultivos.

El maíz es el cultivo más importante de la región como medio de subsistencia y autoconsumo. Durante

julio y agosto se encuentra en las fases fenológicas de desarrollo y de formación y llenado de grano, lo que da relevancia agrícola a la disponibilidad de agua en estos meses. La ETo estimada aporta una referencia de la demanda evaporativa para considerar esa preocupación; los resultados no cuantifican efectos de sequías sobre la productividad ni determinan el diseño o la administración del riego.

Los valores de ETo constituyen una referencia agroclimática para la estimación de los requerimientos hídricos de los cultivos, pero no equivalen por sí solos a la lámina de riego. El alcance de los resultados se limita a la demanda evaporativa de referencia y no comprende las necesidades de riego de cada parcela, que dependen del coeficiente de cultivo, la precipitación efectiva, la eficiencia del sistema, las propiedades del suelo y el balance hídrico.

Las medias de la tabla 2 fueron de 5.3 y 5.4 mm/día en La Fragua, de 5.2 mm/día en ambos meses en Camotán y de 3.8 y 3.9 mm/día en La Unión, para julio y agosto, respectivamente. Estas diferencias corresponden a los periodos de registro de cada estación; la cobertura temporal desigual limita su interpretación como contrastes exclusivamente espaciales.

Los resultados presentados en la tabla 2 describen diferencias en la demanda atmosférica de agua entre estaciones. Su interpretación se circunscribe a los valores de ETo estimados y a los periodos de registro de cada estación; no permite separar la contribución de la temperatura, la radiación solar y la humedad relativa a dichas diferencias.

Como antecedente regional, Santos et al. (2018, p. 29) reportan una evapotranspiración potencial acumulada de 491 mm entre mayo y agosto en su estudio del balance hídrico superficial de la cuenca del río Atulapa, Esquipulas, Chiquimula. Al dividir ese acumulado entre los 123 días del periodo se obtiene una equivalencia aproximada de 4 mm/día. Esta cifra aporta contexto regional, aunque corresponde a una variable y un periodo distintos de la ETo de julio y agosto estimada en esta investigación.

El trabajo de Thornthwaite (1948) constituye un antecedente histórico del concepto de evapotranspiración potencial y de su aplicación a la clasificación climática; se distingue de la formulación

de evapotranspiración de referencia empleada en este estudio.

Santos et al. (2018) calculan la evapotranspiración potencial mediante Thornthwaite y emplean el modelo de Thornthwaite y Mather para el balance hídrico del suelo, implementado en Python dentro de ArcGIS. La proximidad numérica de sus resultados con los de La Unión se interpreta como una semejanza entre magnitudes.

Llanes-Cárdenas et al. (2014) reportan valores máximos de evapotranspiración de referencia de 5.38 mm/día en mayo en la estación Casa Blanca y de 5.21 mm/día en junio en la estación Ruiz Cortines, en Sinaloa, México, calculados mediante el método de Hargreaves y Samani. Estas magnitudes son próximas a las medias de La Fragua y aportan un antecedente internacional; las diferencias de método, meses y ubicación limitan su comparabilidad directa con la ETo estimada en este estudio.

La tabla 3 resume los máximos históricos de ETo estimados: La Fragua alcanzó 6.9 mm/día en julio y 7 mm/día en agosto; Camotán, hasta 6 mm/día; y La Unión, 4.6 mm/día en julio y 4.5 mm/día en agosto. Estos valores describen el extremo superior de las series analizadas, sin identificar por sí solos episodios de sequía o canícula prolongada ni determinar los tiempos de riego.

La diferencia entre los máximos históricos y los promedios muestra que una media no representa toda la variabilidad de la demanda evaporativa de referencia. Estos estadísticos aportan una referencia para la planificación del riego.

Los coeficientes de determinación (R^2) indican que los ajustes lineales explican una proporción reducida de la variabilidad interanual. Las pendientes positivas describen un aumento estimado de la ETo dentro de los periodos analizados, no un incremento sostenido de todos los valores de las series ni la contribución específica de otros factores climáticos.

Según la tabla 5, los cambios estimados de ETo en Camotán fueron de 0.19 mm/día para julio y 0.34 mm/día para agosto. En La Fragua, los cambios estimados fueron mayores: 0.89 mm/día y 0.92 mm/día para julio y agosto, respectivamente. Estas magnitudes resumen el cambio derivado de los ajustes durante los periodos analizados.

Las pendientes positivas indican un aumento estimado de la ETo durante los periodos analizados, particularmente en La Fragua. El alcance descriptivo de los ajustes limita la interpretación de estos cambios: los resultados no permiten atribuirlos al cambio climático ni distinguirlos de efectos asociados con la ubicación, la instrumentación, el entorno de las estaciones o la disponibilidad de datos.

Desde el punto de vista de la gestión hídrica de las microcuencas, las pendientes positivas, mayores en agosto, aportan una referencia sobre el aumento estimado de la demanda evaporativa durante los periodos históricos analizados. Este hallazgo constituye un punto de partida agroclimático para considerar el riesgo de déficit de agua futuro en la planificación agrícola.

En conjunto, la caracterización temporal en las estaciones y la aproximación espacial mediante IDW con las tres estaciones disponibles y potencia 2 constituyen un insumo agroclimático para contextualizar la gestión hídrica de las microcuencas. La escasa densidad de estaciones limita la representatividad local del patrón estimado. El aporte para la seguridad hídrica y los medios de vida rurales consiste en ofrecer una referencia histórica para contextualizar decisiones sobre eficiencia del riego, mantenimiento preventivo y adaptación, sin determinar medidas operativas específicas ni evaluar su eficacia.

Conclusiones

El mapa de isopletras generado mediante IDW sitúa la ETo en valores cercanos a 5.0 mm/día durante julio y agosto en el área de estudio. Esta aproximación espacial está limitada por la interpolación a partir de tres estaciones externas a las microcuencas y caracteriza la demanda evaporativa de referencia, no los requerimientos hídricos específicos ni la programación del riego. El percentil 90 de Camotán para agosto, de 5.7 mm/día, describe un nivel alto dentro de su serie histórica y no constituye por sí solo un valor de diseño hidráulico.

En las tres estaciones analizadas, los ajustes lineales de la ETo presentaron pendientes positivas para julio y agosto durante sus respectivos periodos de registro, con pendientes mayores en agosto. Este comportamiento indica un aumento estimado de la demanda evaporativa de referencia y constituye un punto de partida

agroclimático para considerar el riesgo de déficit de agua a futuro en la planificación agrícola y la gestión integrada del recurso hídrico de las microcuencas. Los ajustes explican una proporción reducida de la variabilidad interanual, por lo que esta interpretación tiene alcance descriptivo: no representa una predicción del déficit futuro ni una atribución de los cambios al cambio climático. Su aporte a la seguridad hídrica y los medios de vida rurales consiste en ofrecer una referencia histórica para generar una base de las decisiones sobre eficiencia del riego, mantenimiento preventivo de la infraestructura y adaptación, sin determinar medidas operativas específicas.

En conjunto, la caracterización temporal en las estaciones y la aproximación espacial en las microcuencas durante julio y agosto constituyen el principal aporte agroclimático del estudio. Este aporte corresponde a la demanda evaporativa de referencia, no a la determinación de requerimientos hídricos específicos ni a la evaluación de la programación del riego en función de las características de los cultivos, la precipitación efectiva, los suelos, la eficiencia de aplicación y la disponibilidad de agua.

La disponibilidad limitada de datos meteorológicos internos a las microcuencas restringe la representatividad local de las estimaciones. Asimismo, la información disponible sobre las características físicas y las constantes de humedad de los suelos limita la interpretación de los resultados en relación con el almacenamiento de agua y las condiciones hídricas de las parcelas. Estas restricciones delimitan el alcance agroclimático del estudio.

Financiamiento

Este trabajo fue financiado con recursos propios del autor.

Conflicto de interés

El autor declara no tener ningún tipo de conflicto de interés que pudiera haber influido en esta investigación.

Agradecimiento

El autor desea patentizar su agradecimiento al M.Sc. David Juárez Quim y al M.Sc. Juan Carlos Fuentes por sus aportes y orientación en la elaboración y revisión de este artículo, también al equipo docente de ERIS por el

crecimiento profesional que han incentivado en mi persona.

Cómo citar este documento

Salvatierra, E.L (2025). Evapotranspiración de referencia en julio y agosto en las microcuencas El Abundante y Guaraquiche, Jocotán. *Agua, Saneamiento & Ambiente*, 20(1), 1–15. <https://doi.org/10.36829/08ASA.v20i1.1632>

Consentimiento informado

No aplica.

Contribuciones de autor

Conceptualización, tabulación, análisis de campo y análisis de gabinete, escritura: ELS.

Referencias

- Acción Contra El Hambre [ACF] (2010). La estacionalidad de la desnutrición en el Corredor Seco de Guatemala. Quinto informe de seguimiento. <http://bvssan.incap.int/local/cambio-climatico/ESTACIONALIDAD-DESNUTRICION-CORREDOR-SECO.pdf>
- Calvo-Solano, O. D., Quesada-Hernández, L., Hidalgo, H., & Gotlieb, Y. (2018). Impactos de las sequías en el sector agropecuario del Corredor Seco Centroamericano. *Agronomía Mesoamericana*, 29(3), 695–709. <https://doi.org/10.15517/ma.v29i3.30828>
- Llanes-Cárdenas, O., Norzagaray-Campos, M., & Muñoz-Sevilla, N. P. (2014). Determinación de la evapotranspiración potencial ETP y de referencia ETO como indicador del balance hídrico del corazón agrícola de México. *Revista Científica JUYAANIA*, 2(1), 119–129. https://www.researchgate.net/publication/291347654_DETERMINACION_DE_LA_EVAPOTRANSPIRACION_POTENCIAL_ETP_Y_DE_REFERENCIA_ETO_COMO_INDICADOR_DEL_BALANCE_HIDRICO_DEL_CORAZON_AGRICOLA_DE_MEXICO
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO] (2016). *Informe de situación – Junio 2016. Corredor Seco. América Central*. Repositorio oficial de FAO.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO] (2013). *Afrontar la escasez de agua: un marco de acción para la agricultura y la seguridad alimentaria*. Roma, Italia, 78 p. <https://www.fao.org/3/i3015s/i3015s.pdf>
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (2006). *Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos (Estudio FAO Riego y Drenaje, 56)*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. <http://www.fao.org/3/x0490s/x0490s.pdf>
- Shah, T. (2016). *Aumentando la seguridad hídrica: la clave para la implementación de los Objetivos de Desarrollo Sostenible*. Global Water Partnership. https://www.gwp.org/globalassets/global/toolbox/publications/background-papers/tec22_espanol.pdf
- Navarrete Álvarez, M., & López, A. M. (2019). *Importancia de los espacios comunes: una adaptación de la técnica de interpolación espacial inverse distance weighted (IDW) en la predicción de datos socioeconómicos ausentes. En Abordajes teóricos, impactos externos, políticas públicas y dinámica económica en el desarrollo regional (Vol. I)*. Universidad Nacional Autónoma de México y Asociación Mexicana de Ciencias para el Desarrollo Regional A. C. Repositorio institucional.
- Orrego León, E. A., González Batres, N. C., & Hernández Quevedo, M. P. (2022). La canícula y su comportamiento en Guatemala. *Revista Mesoamericana de Biodiversidad y Cambio Climático–Yu'am*, 6(1), 2–18. <https://revistayuam.com/la-canicula-y-su-comportamiento-en-guatemala/>
- Sokolov, A.A. y Chapman, T.G. (1981). *Métodos de cálculo del balance hídrico. Guía internacional de investigación y métodos*. Instituto de Hidrología de España, UNESCO.
- Santos, G., Faustino, J., Quezada, R., & Indekiu-Rivas, J. M. (2018). Determinación del balance hídrico superficial en el suelo, cuenca río

Atulapa, modelo de Thorntwaite desarrollado en Python, Esquipulas, Chiquimula, Guatemala. *Ciencia, Tecnología y Salud*, 5(1), 25–42.

<https://revistas.usac.edu.gt/index.php/cytes/articulo/view/229>

Selles G. (2019). El riego y cambio climático. Chile. INIA la Platina. *Gestión del recurso hídrico para una agricultura resiliente al cambio climático*. IICA (Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura)

Shepard, D. (1968). A two-dimensional interpolation function for irregularly-spaced data. *ACM National Conference*, 517–524.
<https://doi.org/10.1145/800186.810616>

Thornthwaite, C. W. (1948). An Approach toward a Rational Classification of Climate. *Geographical Review*, 38(1), 55–94.

Paris, M. (2020). *La seguridad hídrica y los Objetivos de Desarrollo Sostenible: manual de capacitación para tomadores de decisión* (Documento técnico del PHI-LAC, 42). Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura.
<https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000374917.locale=es>