

DOI: 10.24850/j-tyca-2026-01-05

Artículos

Balance hídrico en regiones cafeteras mediante el déficit de evaporación

Water balance in coffee-growing regions through evaporation deficit

Fernando Reyes-González¹, ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-6493-3642>

Arturo Galvis-Spinola², ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-3112-3674>

Teresa Marcela Hernández-Mendoza³, ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-3763-2554>

Juan José Almaraz-Suárez⁴, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2696-2684>

Alejandro Alarcón⁵, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7212-7751>

¹Colegio de Postgraduados, Postgrado en Edafología, Texcoco, México, frg_58@hotmail.com

²Colegio de Postgraduados, Postgrado en Edafología, Texcoco, México, galvis@colpos.mx

³Universidad Autónoma Chapingo, Departamento de Irrigación, Texcoco, México, thernandezm@chapingo.mx

⁴Colegio de Postgraduados, Postgrado en Edafología, Texcoco, México, jalmaraz@hotmail.com

⁵Colegio de Postgraduados, Postgrado en Edafología, Texcoco, México, aalarconcp@gmail.com

Autor para correspondencia: Arturo Galvis-Spinola, galvis@colpos.mx

Resumen

La zonificación del área cafetera mexicana se realiza de forma geográfica, pero dada la diversidad climática de esta, dicha clasificación difícilmente capta la homogeneidad ambiental y no representa las condiciones adaptativas del cultivo. Con la evapotranspiración se pretende identificar la salida de humedad regional y, aunque es aceptada por la academia, es estimada y la calidad de la información generada depende de la capacidad predictiva del algoritmo o de la eficiencia del modelo empleados. Por ello, se propuso un indicador evaluativo del balance hídrico (B_H) del área cafetera de Oaxaca, Puebla y Veracruz, con los periodos húmedos y secos definidos por su pluviosidad. Se colectaron datos mensuales de precipitación y evaporación del área estudiada (1921-2018), cuyo cociente se denominó "déficit de evaporación (D_E)" ($D_E > 1.0$: exceso, $D_E < 1.0$: déficit). La estación húmeda (P_H = junio: septiembre) y seca (P_S = noviembre: abril) fueron delimitadas con P_H ; el mes más lluvioso anual se concretó con zonas con pluviosidad homogénea (P_{P6} = junio, P_{P7} = julio, P_{P8} = agosto, P_{P9} = septiembre); con el cálculo del D_E y su modificación, el D_{EP1} (cociente del D_E en P_S vs. D_E anual y su relación con el D_E en enero) se delimitaron zonas con humedad homogénea, y se validó D_{EPH} con la tendencia en P_S y el cálculo del D_E por mes y sitio específicos. D_{EP1} es un índice climático que detecta variaciones temporales y espaciales del B_H de áreas cafeteras ($R^2 = 0.92$), y

contribuirá a gestionar los recursos hídricos y evaluar la adaptación ambiental del cultivo.

Palabras clave: lluvia, evaporación, zonas climáticas, evapotranspiración, cafetal, México.

Abstract

Mexican coffee-growing area is zoned geographically, but given its climatic diversity, this classification hardly captures environmental homogeneity and does not represent the adaptive conditions of the crop. Evapotranspiration is intended to identify the regional moisture output and, although it is accepted by academia, it is estimated, and the quality of the information generated depends on the predictive capacity of the algorithm or the efficiency of the model used. Therefore, an evaluative indicator of the water balance (B_H) of the coffee-growing area of Oaxaca, Puebla and Veracruz was proposed with the wet and dry periods defined by their rainfall. Monthly precipitation and evaporation data were collected from the area studied, whose quotient was called "evaporation deficit (D_E)" ($D_E > 1.0$: excess, $D_E < 1.0$: deficit). The wet season (P_H = June-September) and dry season (P_S = November-April) were delimited, with P_H ; and the rainiest month of the year, areas with homogeneous rainfall were delimited (P_{P6} = June, P_{P7} = July, P_{P8} = August, P_{P9} = September); with the calculation of the D_E and its modification, the D_{EP1} (quotient of the D_E in P_S vs. annual D_E and its relation to the D_E in January) areas with homogeneous humidity were delimited and D_{EPH} was validated with the trend in P_S , and the calculation of the D_E by month and specific site. D_{EP1} is a climatic index that detects temporal and spatial variations in the B_H

of coffee-growing areas ($R^2 = 0.92$) and will contribute to managing water resources and evaluating the environmental adaptation of the crop.

Keywords: Rainfall, evaporation, climatic zones, evapotranspiration, coffee growing, Mexico.

Recibido: 11/11/2024

Aceptado: 22/04/2025

Publicado *ahead of print*: 25/06/2025

Versión final: 01/01/2026

Introducción

México se sitúa en el undécimo lugar de países exportadores de café a nivel mundial, con el envío de 177.3 mil toneladas de café verde en el ciclo 2021-2022 (ICO, 2024), mientras que la producción nacional fue de 1.06 millones de toneladas de café cereza en 699.5 mil hectáreas, distribuidas en 14 estados en el ciclo 2023-2024 (SIAP, 2024). En dichas entidades, los ambientes de producción son diferentes y se pueden estudiar con el análisis del clima; asimismo, es posible identificar zonas con condiciones ambientales homogéneas (Bunn, Läderach, Pérez-Jimenez, Montagnon, & Schilling, 2015) para apoyar la toma de decisiones en la planeación agrícola y prevenir efectos adversos en la producción del mismo sector (Lara-Estrada, Rasche, & Schneider, 2017).

La irregularidad de la ocurrencia de la precipitación afecta el crecimiento y desarrollo de las plantaciones, fomenta la incidencia de plagas y enfermedades, y restringe su productividad (Weldemichael & Teferi, 2019). La precipitación y su estacionalidad han sido valoradas

como los factores climáticos más importantes, tanto es así que en el periodo 1979-2013 en Etiopía, ambas variables tuvieron 55 y 17 % de relevancia, respectivamente, para determinar el éxito del cultivo de café (Chalchissa, Diga, & Tolossa, 2022); sin embargo, se ha determinado que en tres cuartas partes del mundo no se pueden detectar cambios en la aridez, pues no muestran patrones sólidos a esa escala (Greve *et al.*, 2014).

En Tanzania, tras el estudio del efecto del calentamiento global, se determinó que incluso bajo un sistema de producción agroforestal, para 2100 se reduciría en 91 % el área apta para el cultivo, por la disminución en 100 mm de la precipitación y el aumento de la temperatura mínima en 1 °C (Cassamo *et al.*, 2023). En Zimbabue se estima que para 2050 la precipitación acumulada entre junio y agosto será el factor más importante para delimitar áreas aptas para el cultivo (Chemura, Kutwayo, Chidoko, & Mahoya, 2016), mientras que el pronóstico para Martinica al 2100 señala que la precipitación condicionará la producción de café si supera los 3 000 mm anuales (Claude, 2016).

En cuanto a México y Guatemala, se cree que el área cultivable de café se reducirá en 29 y 19 %, respectivamente, para 2050, por efecto de la baja de la precipitación (de 1 670 a 1 600 mm año⁻¹) y el aumento en 2 °C de la temperatura máxima (Ovalle-Rivera, Läderach, Bunn, Obersteiner, & Schroth, 2015).

De acuerdo con el estudio de Ruelas-Monjardín, Nava-Tablada, Cervantes y Barradas (2014), se plantea que hay un cambio en la pluviosidad en regiones cafeteras de Veracruz, pues se detectó la reducción de la precipitación a razón de 1.7 mm año⁻¹, después de evaluar el periodo 1948-2008. En Tanzania ocurrió lo contrario, porque con la influencia de los fenómenos El Niño-Oscilación del Sur (ENOS) y el Dipolo

del Océano Índico (DOI) se ocasionó un incremento de 22.7 mm año⁻¹ en la lluvia, incluso se recorrió el mes más lluvioso de abril a mayo en el periodo 2001-2019 (Wagner, Jassogne, Price, Jones, & Preziosi, 2021). De esta variable, se espera que haya una disminución de 70 mm en Centroamérica (Ovalle-Rivera *et al.*, 2015), y del 5.6 al 28.7 % en Zimbabue para 2050 (Chemura *et al.*, 2016); mientras que en Veracruz habrá una disminución del 5.5 % entre 2050 y 2080 (Granados-Ramírez, Barrios, De-la-Paz, & Peña-Manjarrez, 2014), considerando la reducción de hasta 700 mm para 2100 (Esperón-Rodríguez, Bonifacio-Bautista, & Barradas, 2016) y del 10 % para finales del siglo XXI (Brigido, Nikolskii, Terrazas, & Herrera, 2015).

La delimitación de zonas cafeteras en México se ha realizado geográficamente (Guajardo-Panes, Díaz-Padilla, López-Morgado, Hunter, & Hernández-Martínez, 2020) y en otros casos se ha empleado la zonificación agroecológica para determinar áreas aptas para el mismo cultivo. Por ejemplo, en Guerrero se delimitaron áreas con potencial para el cultivo de café con base en la altitud, pendiente del terreno, precipitación, temperatura media y tipo de suelo (González & Hernández, 2016); en Chiapas se hizo un ejercicio similar con las mismas variables (Quiroz-Antunez, Monterroso-Rivas, Calderón-Vega, & Ramírez-García, 2022), pero con distintos rangos; en Veracruz, la zonificación se llevó a cabo con base en técnicas de percepción remota con enfoque sobre sistemas de información geográfica (SIG), clasificación de tierras y conocimiento local (Bautista-Calderon, Gutiérrez-Castorena, Ordaz-Chaparro, Gutiérrez-Castorena, & Cajuste-Bontemps, 2018); en Tabasco se procedió de acuerdo con la propuesta de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, por sus siglas en inglés) de 1981, para las condiciones actuales y el escenario del

calentamiento global, con la ayuda del modelo de trayectorias de concentración representativa (RCP8.5) con cinco variables de clima y seis del suelo (Aceves-Navarro *et al.*, 2018); en Martinica (Pineda & Suárez, 2014), Venezuela (Claude, 2016) y Angola (Baltazar-Silva *et al.*, 2020) se consideraron criterios geomorfológicos, de suelos, climáticos y los requerimientos edafoclimáticos del cultivo integrados en un SIG; en Perú, Salas-López *et al.* (2020) realizaron la zonificación por medio de una estructura jerárquica basada en variables climáticas, edáficas, fisiográficas, socioeconómicas y fitosanitarias.

Los ejemplos anteriores de zonificación implican el análisis de las variables de suelo, clima y cultivo, donde la escasez de datos que sean confiables limita el éxito de este tipo de estudios. Por tales razones, es necesario aprovechar la información existente, como los registros históricos de la precipitación y evaporación. De acuerdo con lo anterior, para evaluar la variabilidad espacial y temporal de la lluvia se han desarrollado propuestas como el índice de precipitación estandarizada (SPI), para categorizar la precipitación observada como una desviación estandarizada con respecto a una función de distribución de probabilidad de la misma lluvia (McKee, Doesken, & Kleist, 1993). En cuanto a la evaporación, Wang-Erlandsson, van der Ent, Gordon y Savenije (2014), al determinar que pocos modelos de la superficie terrestre analizan y evalúan su partición, según el uso de la tierra sin examinar su trayectoria posterior en la atmósfera, desarrollaron el modelo simple de evaporación terrestre a atmósfera (STEAM), el cual es útil para comprender los vínculos entre el uso de la tierra y los recursos hídricos para el seguimiento de la humedad atmosférica.

Por lo anterior, en la presente investigación se propone emplear el cociente entre las entradas de humedad (precipitación) y sus salidas

(evaporación), como un indicador del balance hídrico que denominamos “déficit de evaporación”, para evaluar las condiciones hídricas en todos los municipios cafeteros de Oaxaca, Puebla y Veracruz, México.

Materiales y métodos

Registro de la información

El trabajo se desarrolló con base en la información de 158 estaciones climáticas vigentes (1921-2018), ubicadas en todos los municipios cafeteros de Oaxaca, Puebla y Veracruz, México (Figura 1). De acuerdo con el SIAP (2024), estos tres estados representan el 50 % de la superficie cafetera cultivada del país; aunque las estaciones climáticas no tienen una distribución homogénea en los municipios cafeteros de estudio, son todas con las que se dispone y representan las regiones cafeteras en estudio. De dichas estaciones climáticas se registró su clave, nombre, altitud, coordenadas, años de servicio (Conagua & SMN, 2024) y subprovincia fisiográfica (INEGI, 2001). La información recabada se digitalizó con el uso del *QGIS* (QGIS Development Team, 2024) como sistema de información geográfico, por su eficacia y ser *software* libre. Todos los procedimientos estadísticos se analizaron con el *software R* (R Core Team, 2024).

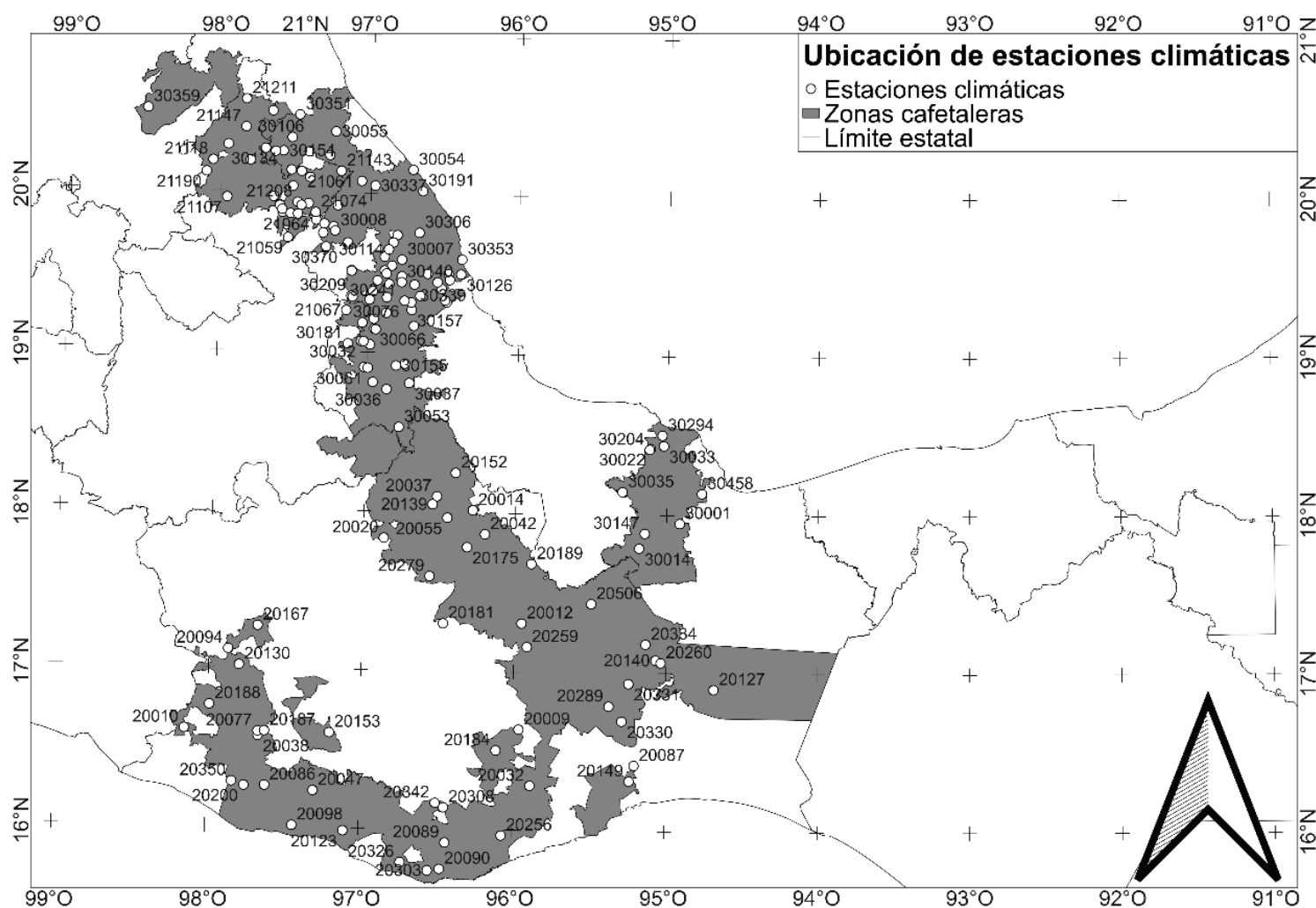


Figura 1. Ubicación y clave de las 158 estaciones climáticas empleadas en el estudio del ambiente en las zonas cafetaleras de los estados de Oaxaca, Puebla y Veracruz, México. Los datos fueron colectados de Conagua y SMN (2024).

Para garantizar la reproducibilidad del estudio, así como evaluar la calidad y confiabilidad de los resultados generados, se realizaron una serie de procedimientos previos, como la presencia de puntos de influencia,

que son valores atípicos o significativamente alejados del resto de los datos por no tener evidencias que sustenten su existencia, ya sea por ser extremadamente altos o bajos respecto al resto de las observaciones. Su influencia desproporcionada en los análisis estadísticos solo distorsiona las medidas de tendencia central (media, mediana) y de dispersión (desviación estándar), y afecta los resultados de los análisis. Se eliminaron los valores atípicos que excedían tres desviaciones estándar de la media, previo a la imputación de dichos valores por interpolación lineal, así como su transformación logarítmica para mejorar la normalidad de su distribución. Se verificó la normalidad de las variables mediante la prueba de Shapiro-Wilk.

Estimación de datos faltantes

Surgen por diversas razones atribuible a errores de medición, pérdida de información o simplemente que no fueron recabados, razón por la cual se deben evaluar para evitar sesgos y obtener resultados confiables. La forma en que se procedió ante tales situaciones fue a través de la imputación: se reemplazaron los valores faltantes por la medida de tendencia central de la variable. Donde fue posible, se emplearon modelos de regresión para predecir los valores faltantes a partir de otras variables, estimando los parámetros del modelo teniendo en cuenta la información sobre los datos faltantes.

Análisis de la información

Las variables consideradas en todos los casos fueron la precipitación pluvial mensual total (P_p), evaporación mensual total (E_v) y el valor anual de ambas variables (1921-2018). El ámbito de exploración de la pluviosidad anual en la región en estudio varió de 423.3 a 5 985.3 mm distribuida mensualmente en distintas cantidades (Tabla 1).

Tabla 1. Distribución de frecuencia (en porcentaje) de la proporción de la lluvia mensual respecto a la total anual en las zonas cafeteras de los estados de Oaxaca, Puebla y Veracruz, México.

Rango (%)	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
	Frecuencia (%)											
< 3	70	78	79	53	4						25	56
3.1-6	29	22	21	47	57					4	47	39
6.1-9	1			1	34	3	3	1		37	25	4
9.1-18					5	63	61	70	38	59	3	
> 18.1						34	36	29	62			
Total	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

La lluvia se distribuye en dos periodos: P_S = de noviembre a abril; P_H = de junio a septiembre, donde $P_S < P_H$ en todos los casos, mientras que la que se presenta en mayo y octubre es de transición a P_H y P_S , respectivamente. En el P_H se observaron diferencias en la ocurrencia del mes más lluvioso, lo que permitió clasificar la zona de acuerdo con dicho criterio. Para verificarlo, se calculó el patrón promedio de cada mes en el

P_H y se correlacionó con el que presenta cada estación climática involucrada.

Como procedimiento alternativo 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): $D_E = P_P/E_V$, como indicador del balance entre entradas y salidas hídricas, ya sea por exceso ($D_E > 1.0$) o déficit ($D_E < 1.0$) de humedad. Se calculó el D_E mensual y anual por estación climática, y para su evaluación se agrupó la información en dos bases de datos como consecuencia del patrón de la distribución de la P_P . Se procedió de dos maneras:

a) Se dio seguimiento a la agrupación del patrón de la P_P que se estableció con base en el mes más lluvioso y definió la tendencia que describe el D_E , lo que se analizó a través de la correlación entre cada estación previo agrupamiento por la pluviosidad de cada mes en P_H y el promedio observado en cada zona.

b) Se promedió el D_E en el P_S para obtener su valor por estación durante dicho periodo y se calculó su proporción respecto al D_E anual (D_{EP1}). Se correlacionó el D_{EP1} con el D_E mensual de cada estación, cuya tendencia en enero fue la relación más estrecha ($r = 0.96$) entre ambas variables en todos los casos. De ahí se eligieron tres rangos del D_{EP1} (< 0.2 ; 0.21 a 0.59 ; > 0.6) para hacer una nueva agrupación de las estaciones de la región en estudio para estimar el D_E mensual de cada estación.

El desarrollo del trabajo se hizo a través de relaciones cuantitativas entre las distintas variables mediante técnicas de regresión, correlación, valores estadísticos básicos como el mínimo, promedio, máximo, desviación estándar y distribución de frecuencias. En el caso de las

regresiones generadas, el modelo $Y = f(x) + e$ representa a una función determinística que incluye el componente aleatorio “e”. Con base en lo mencionado, se evaluó el impacto de la variable independiente (X , tiempo) sobre la dependiente (Y , clima), donde los coeficientes miden el impacto de una variable sobre la otra. La sumatoria de cada error (Y observada, Y estimada) cancelan los errores; en términos estadísticos, la esperanza matemática de los errores es igual a cero. El objetivo es minimizar los errores para estimar b_0 y b_1 para obtener la regresión a través del estimador de mínimos cuadrados ordinarios.

En los modelos de regresión se evaluó la significancia individual de cada variable y la de la ecuación completa. En el primer caso se analizaron las variables una por una a través de su hipótesis nula (H_0):

$$H_0: B(X_i) = 0$$

Si esto ocurre, B no impacta a Y . Su evaluación estadística es: $\text{Prob} > |t| < 0.05$. Esto significa que si la probabilidad del valor absoluto del valor de t estadístico es menor a 0.05 será significativo, en la que t se refiere a la prueba de t de *Student*. Para la significancia conjunta o global:

$$H_0: B(X_1) = B(X_2) = B(X_3) = 0 \text{ y su prueba es: } \text{Prob} F > |F| < 0.05$$

Si se cumple, se está en una significancia global, pero sin percibir la significancia individual de cada variable. Para evitar afectar los resultados se procedió con pruebas como multicolinealidad y heterocedasticidad, donde se correlacionan cada una de las variables

entre sí y se determina el grado de relación entre cada una, ya que de encontrarse en tal situación se incurriría en multicolinealidad, lo que se evaluó mediante el factor de inflación de la varianza (VIF) a través de los siguientes pasos:

- a) Se obtiene la función $X: X_1 = f(X_n)$ donde X_n son las variables independientes.
- b) Se obtiene la R^2 del modelo (en X_1 como variable dependiente).
- c) La VIF de $X_1 = 1/(1 - R^2 \text{ del modelo en } X_1)$.
- d) Regla de decisión: $VIF X_1 > 10$ hay multicolinealidad.
- e) Se retira la variable X_1 del modelo.

La heterocedasticidad se trabajó con el supuesto de Gauss-Markov que considera constante la varianza del error a lo largo de las observaciones. Cuando se cumple, se dice que tiene homocedasticidad:

$$Var(error) = s^2 (constante)$$

De lo contrario, la varianza del error se representará con el modelo:

$$Var(error) = s^2 W (variable)$$

Las decisiones que se toman en los modelos están sujetas al error tipo I y al error tipo II, en el que ambos están relacionados entre sí, porque al tratar de minimizar el error tipo I, se aumenta el error tipo II y viceversa, por lo tanto, siempre se cometen estos errores. Por eso se debe

decidir qué tipo de error se desea minimizar. La hipótesis nula se formula con la idea de ser rechazada y la alternativa no. Las hipótesis se pusieron a prueba a través de la recolección de los datos y el cálculo de los promedios para aceptar o rechazar el planteamiento, según haya sido el caso.

Resultados

El periodo lluvioso en la región que comprenden los tres estados ocurre entre junio y septiembre, pero su patrón difiere cuando se trata de destacar el mes más lluvioso de la temporada (Figura 2).

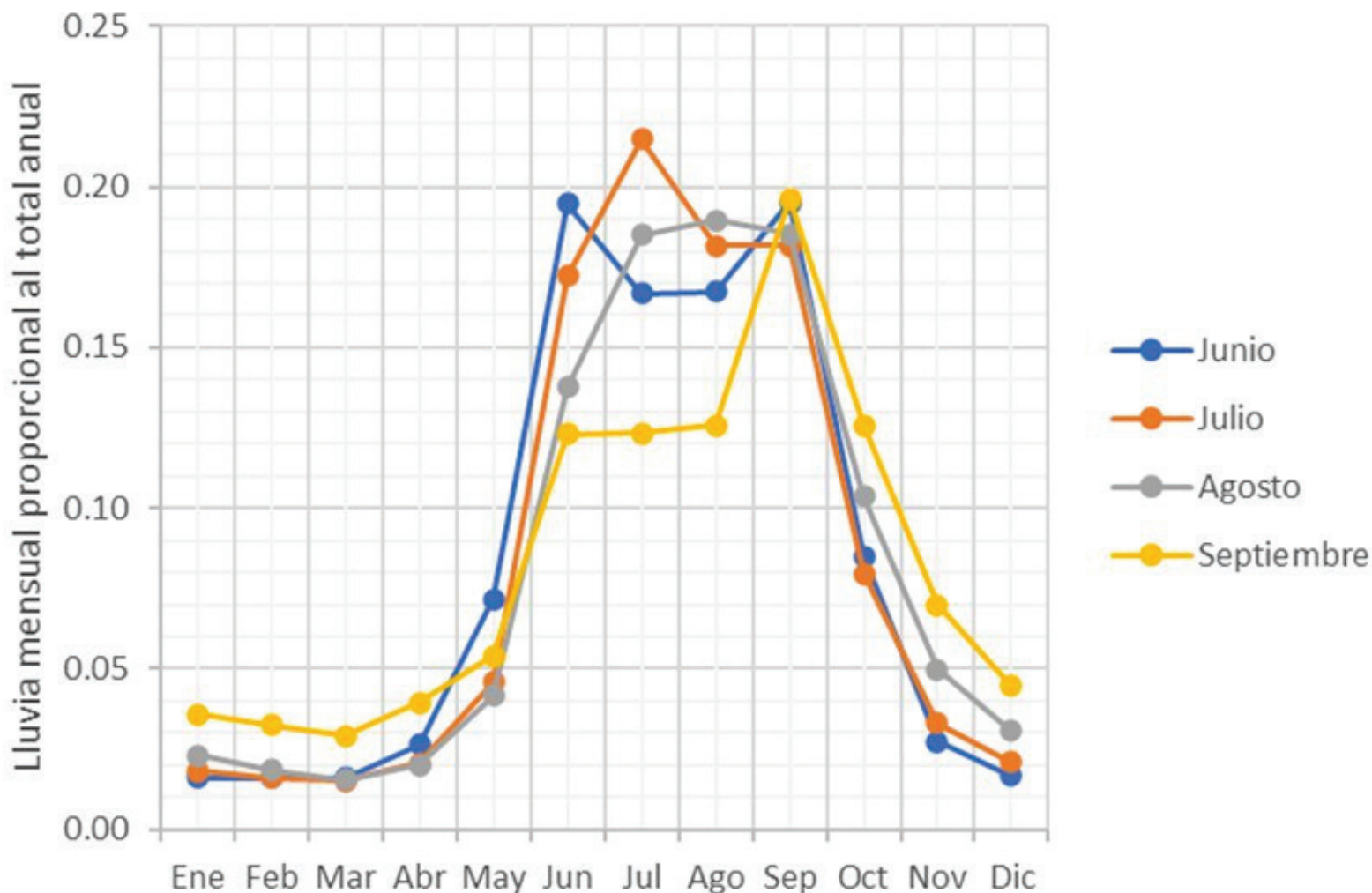


Figura 2. Patrón de lluvias en las zonas cafeteras en Oaxaca, Puebla y Veracruz, México, agrupados por el mes más lluvioso en proporción a la anual.

La prueba de correlación detectó que cada estación agrupada según el mes más lluvioso en el P_2 fue la correcta, pues para junio, julio, agosto y septiembre se tuvo un coeficiente de correlación mayor o igual a 0.9 en 100, 100, 95 y 98 %, respectivamente, de las estaciones climáticas evaluadas. La distribución geográfica de la precipitación pluvial basada en

el patrón descrito por el mes más lluvioso de la temporada se presenta en la Figura 3.

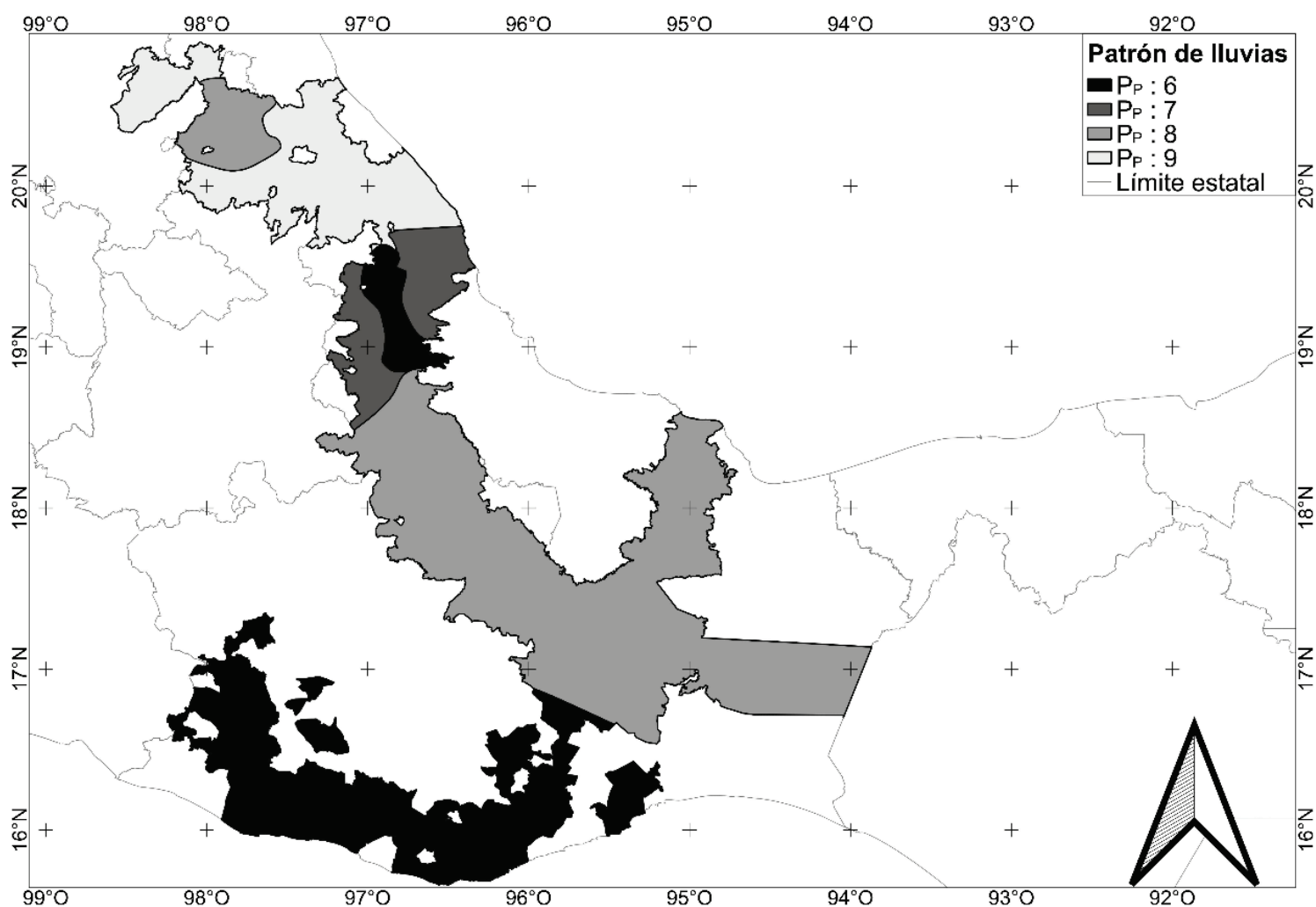


Figura 3. Patrón de lluvias en las zonas cafeteras de Oaxaca, Puebla y Veracruz, México, de acuerdo con el mes más lluvioso de la temporada.

El análisis del D_E se realizó con el mismo criterio de agrupación que se llevó a cabo para el caso de la precipitación pluvial, en el que se apreciaron cuatro zonas con una tendencia cuadrática durante los meses menos lluviosos (noviembre a abril) y diferente magnitud (Figura 4).

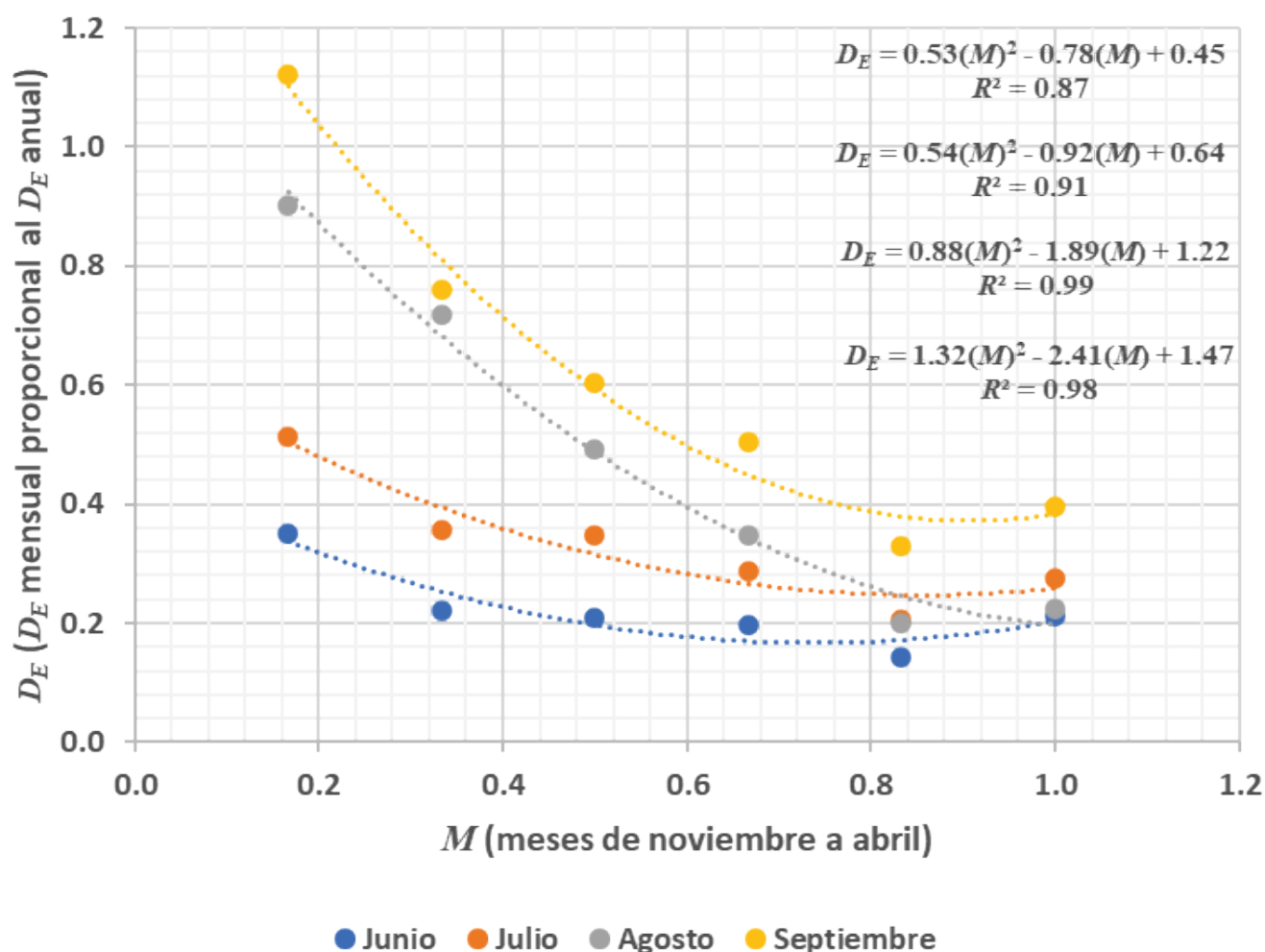


Figura 4. Variación del déficit de evaporación (D_E) durante los meses menos lluviosos en las zonas cafeteras de Oaxaca, Puebla y Veracruz, México, agrupados con base en el mes más lluvioso de la temporada; M es la codificación de los meses iniciando en noviembre y cada uno en proporción al número 6.

Al agrupar las estaciones con base en el mes de mayor pluviosidad de la temporada, se obtuvo una tendencia cuadrática en todos los casos; sin embargo, al correlacionar esto con el D_E registrado en las estaciones climáticas ubicadas en cada zona se obtuvieron los siguientes parámetros: junio, $r > 0.95$ en 95 % de los casos; julio, $r > 0.95$ en 100 %; agosto, $r < 0.95$ en 39 %; septiembre, $r < 0.95$ en 49 %, lo que indica que el D_E en la región en estudio no se distribuye de manera similar a la precipitación. Como alternativa, se empleó el indicador D_{EP1} (cociente del D_E en P_S vs. D_E anual) y su relación con el D_E en enero, con el cual se generaron tres rangos del D_{EP1} (< 0.2 ; 0.4 ; > 0.6), que se emplearon como criterio para agrupar las estaciones climáticas de la región (Tabla 2) y su tendencia en P_S (Figura 5).

Tabla 2. Proporción del déficit de evaporación mensual (D_{EM}) respecto al anual (D_{EA}), agrupado por el cociente del D_{EM}/D_{EA} en el periodo de noviembre a abril (D_{EP1}) en las zonas cafeteras de Oaxaca, Puebla y Veracruz, México.

D_{EP1}	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
< 0.2	0.10	0.10	0.07	0.13	0.64	2.47	2.31	2.45	2.94	1.11	0.26	0.11
0.21-0.59	0.42	0.34	0.23	0.29	0.50	1.65	1.89	1.77	2.41	1.32	0.73	0.49
> 0.6	0.72	0.56	0.35	0.39	0.47	1.13	1.29	1.31	2.23	1.65	1.21	0.98

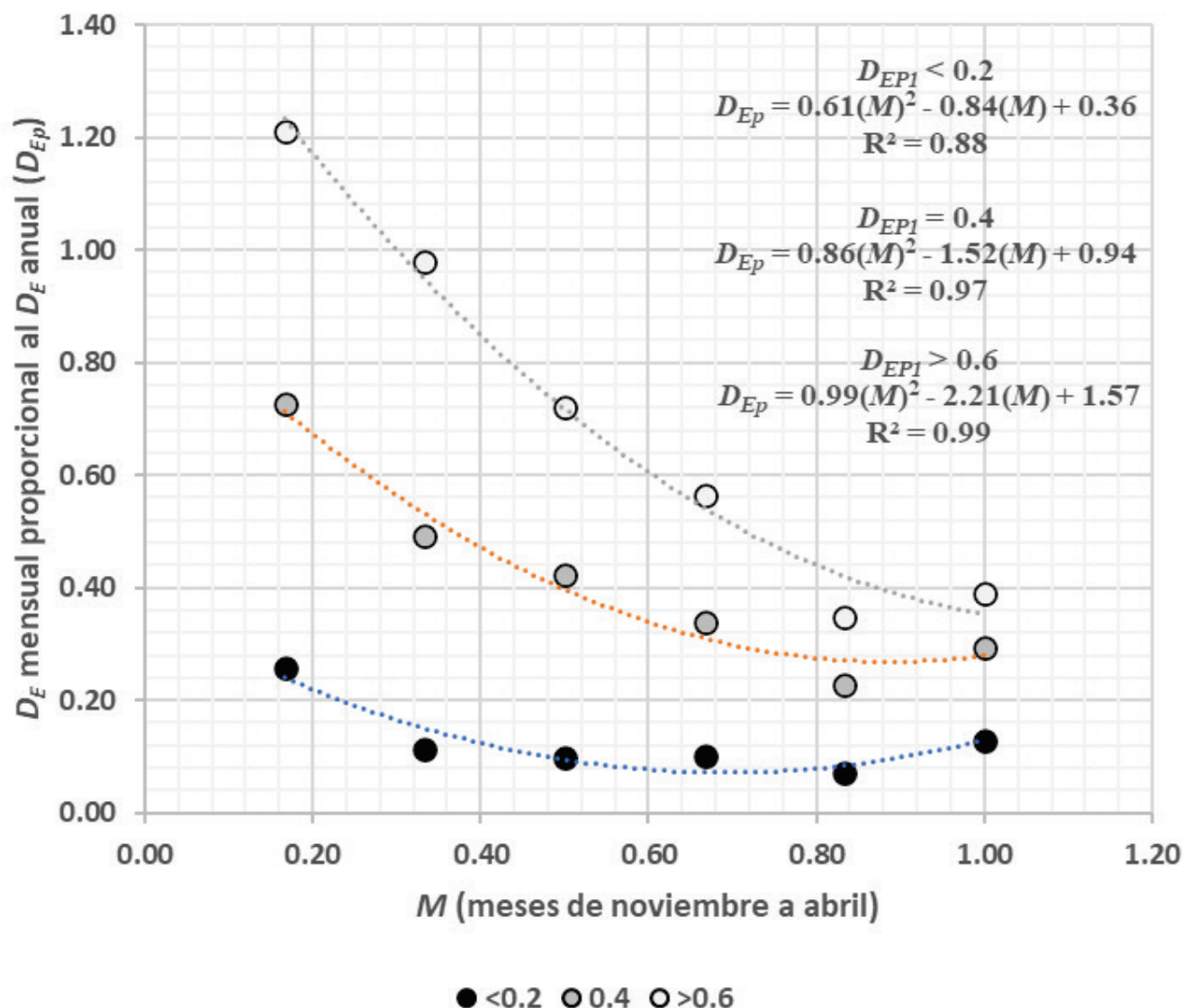


Figura 5. Variación del déficit de evaporación (D_E) entre noviembre y abril en las zonas cafeteras de Oaxaca, Puebla y Veracruz, México, agrupados con base en el cociente del D_E mensual de dicho periodo y el D_E anual (D_{EP1}); M : codificación de los meses iniciando en noviembre y cada uno en proporción al número 6.

Con base en la agrupación presentada en la figura en discusión, se elaboró el mapa que muestra la distribución geográfica de los cambios en el D_E que ocurre en la región en estudio (Figura 6).

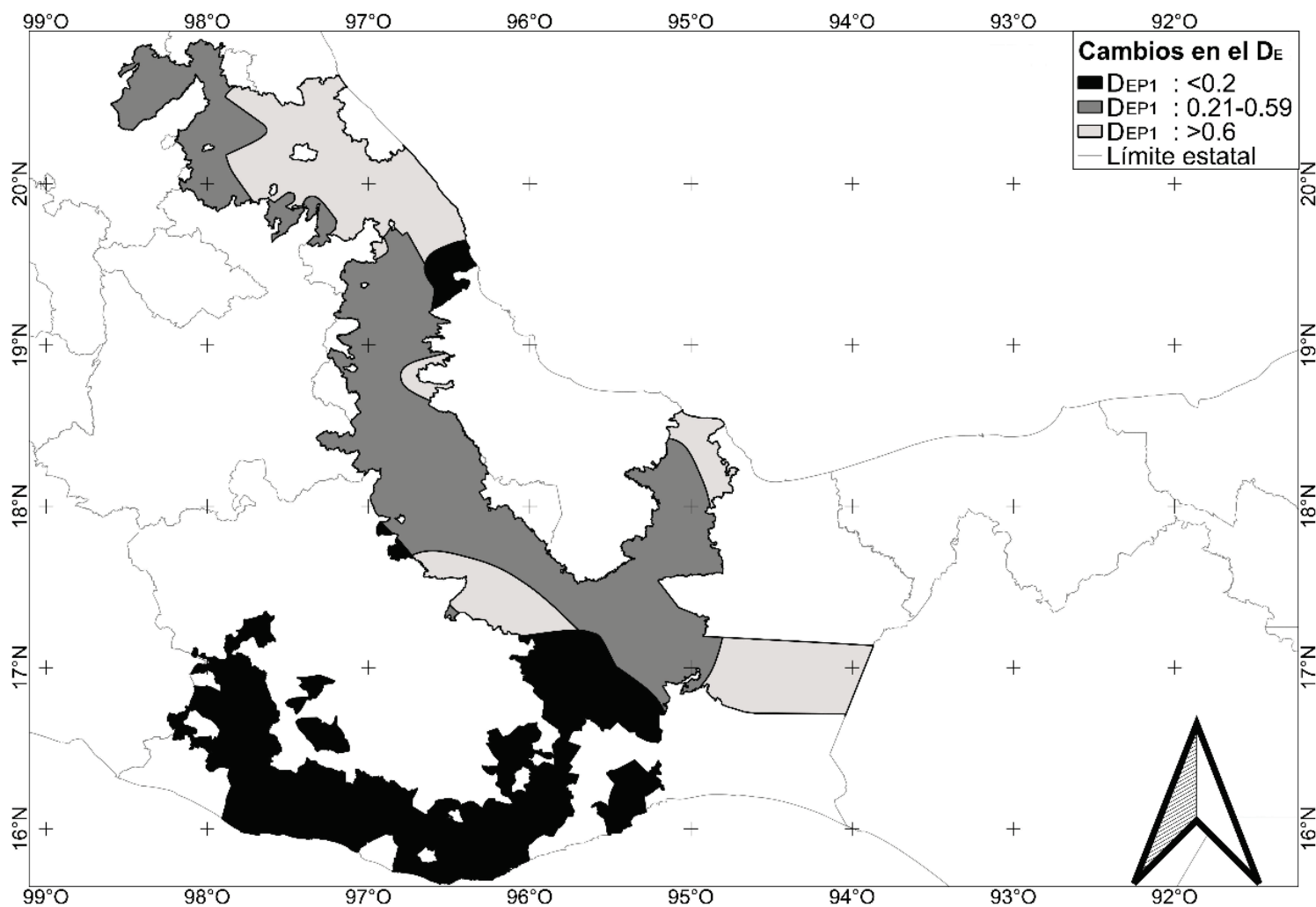


Figura 6. Distribución geográfica del cociente entre el déficit de evaporación (D_E) mensual de noviembre a abril y el anual (D_{EP1}) en las zonas cafeteras de los estados de Oaxaca, Puebla y Veracruz, México.

Cuando se desee conocer el D_E para un mes en particular y sitio específico en cualquiera de las áreas cafeteras en Oaxaca, Puebla o Veracruz, solo se requiere saber el D_E anual y la ubicación geográfica de interés (Figura 6). Así, se multiplica el D_E anual del sitio de interés por el coeficiente de la Tabla 2, según el D_{EP1} (Tabla 2) y el mes deseado. La correlación del D_E mensual estimado respecto al D_E mensual observado por estación climática se presenta en la Figura 7.

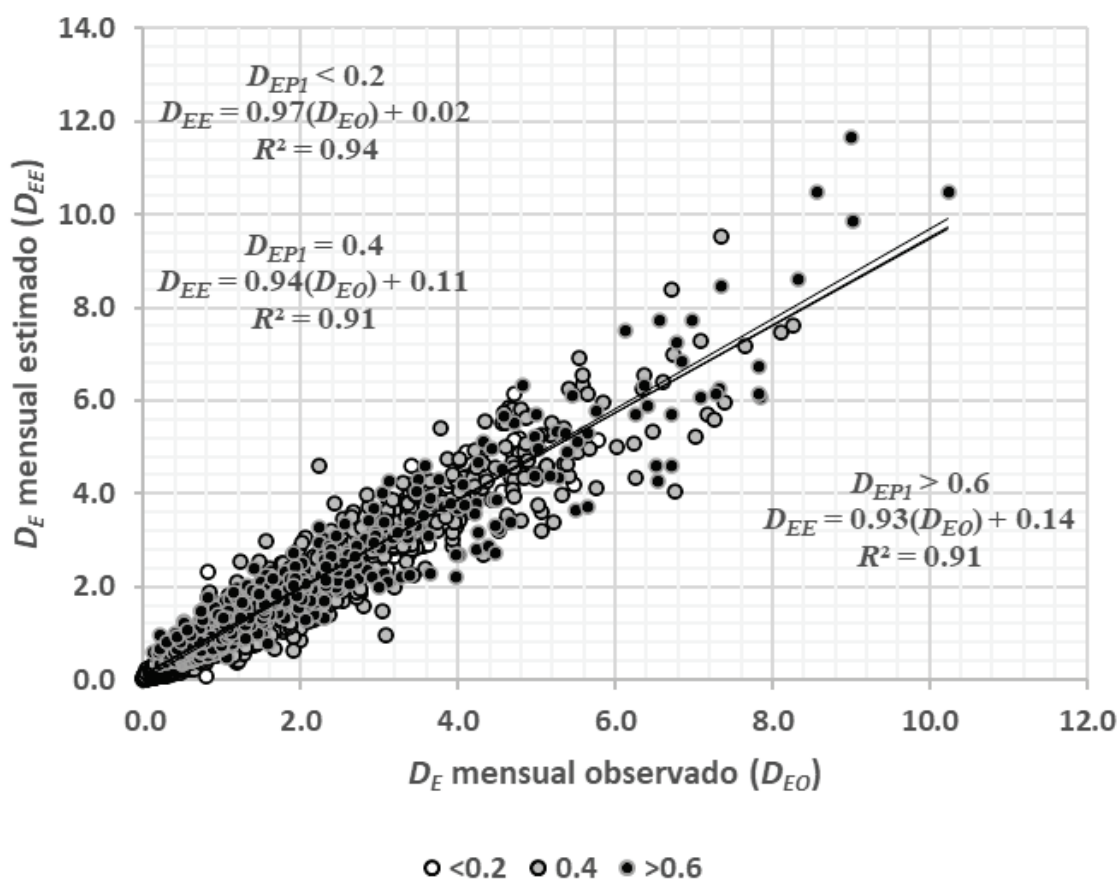


Figura 7. Relación entre el déficit de evaporación (D_E) mensual estimado y el observado, previa agrupación de las estaciones climáticas de acuerdo con el indicador D_{EP1} (cociente del D_E del periodo de noviembre a abril (P_S) y el D_E anual, y su relación con el D_E en enero).

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 para el cultivo. Por lo anterior, es notorio que la humedad en el estado no debe considerarse constante, pues 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.

Discusión

El objetivo principal de este estudio fue proponer y evaluar un indicador del balance hídrico del área cafetera de Oaxaca, Puebla y Veracruz, México, a través del déficit de evaporación, que es el cociente de la relación precipitación/evaporación (P/E). Los resultados muestran que la estación húmeda en la región de estudio se extiende de junio a septiembre, mientras que la estación seca abarca de noviembre a abril, con mayo y octubre como meses de transición. Además, se encontró que septiembre es, en general, el mes más lluvioso. En esta sección, se discutirán tales hallazgos, en el contexto de la literatura existente, se analizarán las limitaciones del estudio y se propondrán direcciones para futuras investigaciones.

Duración de las estaciones húmeda y seca

En el presente estudio, la estación húmeda, de junio a septiembre, coincide parcialmente con lo reportado por Murray-Tortarolo (2021), quien encontró una estación húmeda de junio a noviembre a nivel

nacional en México (1951-2017). Sin embargo, es más corta que la reportada por De Jesús, Breña-Naranjo, Pedrozo-Acuña y Alcocer-Yamanaka (2016) (mayo a noviembre, 1998-2013, a nivel nacional), y por Muñoz-Villers, Geris, Alvarado-Barrientos, Holwerda y Dawson (2020) (mayo a octubre, 1971-2000, en Veracruz). Estas diferencias podrían deberse a variaciones regionales en el clima, a los diferentes periodos de tiempo analizados y a la metodología empleada para definir la estación húmeda (p. ej., umbrales de precipitación, balance hídrico). En cuanto a la estación seca (noviembre a abril), los resultados son consistentes con los de Muñoz-Villers *et al.* (2020), para Veracruz, pero difieren ligeramente de los de Murray-Tortarolo (2021), y De Jesús *et al.* (2016), quienes reportan una estación seca de diciembre a mayo y de diciembre a abril, respectivamente. Estas variaciones en la duración de las estaciones resaltan la complejidad del régimen de lluvias en México y la necesidad de estudios a escala regional.

Mes más lluvioso

El hallazgo de que septiembre es, en general, el mes más lluvioso en el área de estudio coincide con lo reportado por Fernández y Trejo (2020), para Valles Centrales, Oaxaca (2007-2013). Sin embargo, difiere de lo observado en la Sierra Norte de Puebla, donde el mes más lluvioso varía según la ubicación geográfica, siendo julio, agosto o septiembre (Castelán-Vega, Tamariz-Flores, Linares-Fleites, & Cruz-Montalvo, 2014); y como ejemplo a nivel global, con lo encontrado en Tanzania, donde el mes más lluvioso se desplazó de abril a mayo en un periodo de 18 años (2001-2019) (Wagner *et al.*, 2021). Esta heterogeneidad en el mes de máxima precipitación subraya la influencia de factores locales, como la

topografía y proximidad a cuerpos de agua, al igual que la altitud en la distribución temporal de las lluvias.

Influencia de fenómenos climáticos

A diferencia de otros estudios que han encontrado una asociación significativa entre fenómenos como ENOS, ODP, OMA y la variabilidad de la precipitación (Alvarez-Olguin & Escalante-Sandoval, 2017; Park, Byrne, & Böhnelt, 2017), en el caso de la presente investigación, dichos fenómenos no mostraron una incidencia significativa en las variables estudiadas. Esto podría deberse a que el estudio se enfocó en una región específica, mientras que los efectos de estos fenómenos pueden ser más evidentes a escalas mayores, además de que las condiciones topográficas podrían estar enmascarando la influencia de tales fenómenos, razón por la cual el cociente P/E podría ser menos sensible a estos fenómenos que la precipitación total, por ejemplo.

Relación precipitación-evaporación

Aunque no fue el foco principal del estudio, se utilizaron datos de evaporación medidos, no estimados. La relación entre la precipitación y evaporación es crucial para entender el balance hídrico en la región. La evaporación promedio durante la estación húmeda fue de 470 mm, mientras que durante la estación seca fue de 620 mm. Estudios previos, como los de David, Valente y Gash (2006), y Baiamonte (2021), resaltan la importancia de la cobertura vegetal en la interceptación de la lluvia y la evaporación, y cómo esto influye en el ciclo hidrológico. La variación extrema de la lluvia y la evaporación, como se ha observado en otras

regiones (Arellano-Monterrosas & Ruiz-Meza, 2019; Sharmila & Hendon, 2020), también podría estar presente en nuestra área de estudio, aunque se requiere más investigación para confirmarlo. Estos valores de evaporación, en particular durante la estación seca, sugieren una alta demanda evaporativa en la región, lo que podría tener implicaciones para la disponibilidad de agua para el cultivo de café, en línea con lo señalado en estudios previos.

Limitaciones del estudio

Se reconoce que este estudio tiene ciertas limitaciones. El uso de datos mensuales podría haber enmascarado variaciones en la precipitación a escalas de tiempo más cortas, como eventos de lluvia intensa de corta duración. La distribución heterogénea de las estaciones climáticas, con una mayor concentración en Puebla (una estación cada 250 km²) y una menor en Oaxaca (una estación cada 907 km²), podría haber introducido un sesgo en la representación del régimen de lluvias en la región.

En resumen, este trabajo detectó que en la región de estudio la estación húmeda se extiende de junio a septiembre; la estación seca de noviembre a abril, y septiembre es el mes más lluvioso. Estos hallazgos, si bien muestran algunas similitudes con estudios previos a nivel nacional y regional, también revelan diferencias importantes en la duración de las estaciones y en el mes de máxima precipitación, lo que subraya la complejidad del régimen de lluvias en el país y la influencia de factores locales. A pesar de no encontrar una relación significativa entre los fenómenos climáticos de gran escala y las variables estudiadas, el presente estudio contribuye a una mejor comprensión del régimen de lluvias en la zona cafetera de Oaxaca, Puebla y Veracruz, lo cual es

relevante para la planificación agrícola y la gestión de recursos hídricos. Futuras investigaciones deberían enfocarse en entender la influencia de la microtopografía en la distribución de la precipitación, evaluar el impacto del cambio climático en el régimen de lluvias de la región a largo plazo y validar la utilidad del indicador déficit de evaporación que se propone como herramienta para la toma de decisiones en el manejo del cultivo de café.

Conclusiones

Se analizó la variabilidad espacial y temporal de las condiciones climáticas relacionadas con el B_H en los principales estados cafeteros de México (Oaxaca, Puebla y Veracruz), en los que se identificaron las zonas y épocas con exceso y déficit de humedad ambiental a través de la creación de un indicador del B_H , que se denominó déficit de evaporación (D_E), para lo cual se propuso una metodología para su cálculo y otra para estimar su valor mensual a partir del dato anual de la precipitación y evaporación.

Con base en el análisis de los cambios en el D_E se identificaron zonas homogéneas en términos de dicho indicador y con ello se evaluó el B_H para cualquier punto de la región evaluada. A través del cálculo del D_E se detectaron áreas con diferencias significativas atribuidas a su capacidad para captar la humedad y, a partir de ello, se delimitaron zonas con excesos importantes durante los periodos lluviosos, así como aquellas donde las temporadas de estiaje pueden ser críticas para la productividad agrícola en general y la caficultura en particular.

Esta investigación contribuye con el conocimiento de las condiciones ambientales que se vinculan con la relación entre las entradas (precipitación) y salidas (evaporación) de agua en las principales áreas

cafeteras del país a través del empleo del D_E para que se pueda sustituir el dato de la evapotranspiración (E_T), pues esta propuesta da la certeza de trabajar con valores generados a partir de datos medidos y vinculados con el B_H , mientras que para obtener la E_T es indispensable estimarla, con toda la incertidumbre que se crea sobre la validez de la información que se emplea, lo que es relevante para la gestión de los recursos hídricos, la planificación agrícola y la evaluación sobre las condiciones climáticas de la zona de interés.

En la región de estudio, que representa los municipios cafeteros de Oaxaca, Puebla y Veracruz, la estación húmeda (P_2) ocurre de junio a septiembre y la seca (P_1) de noviembre a abril. Se distinguieron cuatro zonas con pluviosidad homogénea (P_{P6} = junio, P_{P7} = julio, P_{P8} = agosto, P_{P9} = septiembre) en la región, y corresponden a la ocurrencia de la estación seca (P_1) y el mes más lluvioso. También se distinguieron tres zonas con humedad homogénea determinadas con el índice D_{EP1} ($D_{EP1} < 0.2$; $D_{EP1} = 0.4$; $D_{EP1} > 0.6$). El déficit de evaporación modificado (D_{EP1}) es un índice climático que fue capaz de evaluar el B_H de la región estudiada y detecta variaciones de este. Para conocer el D_E de un mes particular y sitio específico en la región cafetera, se requiere saber el D_E anual y la ubicación geográfica de interés (Figura 6), se multiplica el D_E anual del sitio de interés por el coeficiente de la Tabla 2, según el D_{EP1} (Tabla 2) y el mes deseado.

Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (Conahcyt), y al Colegio de Postgraduados.

Referencias

- Aceves-Navarro, L. A., Rivera-Hernández, B., López-Castañeda, A., Palma-López, D. J., González-Mancillas, R., & Juárez-López, J. F. (2018). Áreas potenciales y vulnerabilidad del cultivo de café tipo robusta (*Coffea canephora* P.) al cambio climático en el estado de Tabasco, México. *Nova Scientia*, 10(20), 369-396. DOI: <https://doi.org/10.21640/ns.v10i20.1379>
- Alvarez-Olguin, G., & Escalante-Sandoval, C. (2017). Modes of variability of annual and seasonal rainfall in Mexico. *Journal of the American Water Resources Association*, 53(1), 144-157. DOI: <https://doi.org/10.1111/1752-1688.12488>
- Arellano-Monterrosas, J. L., & Ruiz-Meza, L. E. (2019). Variabilidad climática y eventos extremos en la cuenca del río Zanatenco, Chiapas. *Tecnología y ciencias del agua*, 10(3), 249-274. DOI: <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2019-03-10>
- Baiamonte, G. (2021). Simplified interception/evaporation model. *Hydrology*, 8(3), 99. DOI: <https://doi.org/10.3390/hydrology8030099>
- Baltazar-Silva, D. F., Morejón-García, M., Díaz-Pita, A., De Almeida, F. M., Da Costa-Neta, J. F., & Gonçalves, V. (2020). Caracterización agroclimática de la provincia Uigé, Angola en función del desarrollo del Café Robusta. *Cultivos Tropicales*, 41(1), e01. Recuperado de <https://www.redalyc.org/journal/1932/193263199001/html/>

- Bautista-Calderon, E. A., Gutiérrez-Castorena, E. V., Ordaz-Chaparro, V. M., Gutiérrez-Castorena, M., & Cajuste-Bontemps, L. (2018). Sistemas agroforestales de café en Veracruz, México: identificación y cuantificación espacial usando SIG, percepción remota y conocimiento local. *Terra Latinoamericana*, 36(3), 261-273. DOI: <https://doi.org/10.28940/terra.v36i3.350>
- Brigido, J. G., Nikolskii, I., Terrazas, L., & Herrera, S. S. (2015). Estimación del impacto del cambio climático sobre fertilidad del suelo y productividad de café en Veracruz, México. *Tecnología y ciencias del agua*, 6(4), 101-116. Recuperado de <https://www.revistatyca.org.mx/index.php/tyca/article/view/1182>
- Bunn, C., Läderach, P., Pérez-Jimenez, J. G., Montagnon, C., & Schilling, T. (2015). Multiclass classification of agro-ecological zones for Arabica coffee: an improved understanding of the impacts of climate change. *PLoS One*, 10(10), e0140490. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0140490>
- Cassamo, C. T., Draper, D., Romeiras, M. M., Marques, I., Chiulele, R., Rodrigues, M., Stalmans, M., Partelli, F. L., Ribeiro-Barros, A., & Ramalho, J. C. (2023). Impact of climate changes in the suitable areas for *Coffea arabica* L. production in Mozambique: Agroforestry as an alternative management system to strengthen crop sustainability. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 346, 108341. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2022.108341>

- Castelán-Vega, R., Tamariz-Flores, V., Linares-Fleites, G., & Cruz-Montalvo, A. (2014). Agresividad de las precipitaciones en la subcuenca del río San Marcos, Puebla, México. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía*, (83), 28-40. DOI: <https://doi.org/10.14350/rig.33480>
- Chalchissa, F. B., Diga, G. M., & Tolossa, A. R. (2022). Modeling the responses of coffee (*Coffea arabica* L.) distribution to current and future climate change in Jimma Zone, Ethiopia. *SAINS TANAH- Journal of Soil Science and Agroclimatology*, 19(1), 19-32. DOI: <https://doi.org/10.20961/stjssa.v19i1.54885>
- Chemura, A., Kutuywayo, D., Chidoko, P., & Mahoya, C. (2016). Bioclimatic modelling of current and projected climatic suitability of coffee (*Coffea arabica*) production in Zimbabwe. *Regional Environmental Change*, 16(2), 473-485. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10113-015-0762-9>
- Claude, J. P. (2016). Environments suitable for the species of the coffee genus in Martinique (the case of *Coffea arabica* typica variety). *International Journal of Recent Research and Review*, 9(2), 21-33. DOI: <https://doi.org/10.18483/ijSci.2235>
- Conagua & SMN, Comisión Nacional del Agua, Servicio Meteorológico Nacional. (2024). *Normales climatológicas por estado*. Recuperado de <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica/normales-climatologicas-por-estado>
- David, J. S., Valente, F., & Gash, J. H. (2006). Evaporation of intercepted rainfall. In: Anderson, M. G. (ed.). *Encyclopedia of Hydrological Sciences* (pp. 627-634). Hoboken, USA: John Wiley. DOI: <https://doi.org/10.1002/0470848944.hsa046>

- De Jesús, A., Breña-Naranjo, J. A., Pedrozo-Acuña, A., & Alcocer-Yamanaka, V. H. (2016). The use of TRMM 3B42 product for drought monitoring in Mexico. *Water*, 8(8), 325. DOI: <https://doi.org/10.3390/w8080325>
- Esperón-Rodríguez, M., Bonifacio-Bautista, M., & Barradas, V. L. (2016). Socio-economic vulnerability to climate change in the central mountainous region of eastern Mexico. *Ambio*, 45(2), 146-160. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13280-015-0690-4>
- Fernández, T., & Trejo, I. (2020). Rainfall interception based on indirect methods: A case study in temperate forests in Oaxaca, Mexico. *Journal of the American Water Resources Association*, 56(4), 712-723. DOI: <https://doi.org/10.1111/1752-1688.12844>
- González, G. H. A., & Hernández, S. J. R. (2016). Zonificación agroecológica del *Coffea arabica* en el municipio Atoyac de Álvarez, Guerrero, México. *Investigaciones Geográficas*, (90), 105-118. DOI: <https://doi.org/10.14350/rig.49329>
- Granados-Ramírez, R., Barrios, M., De-la-Paz, M., & Peña-Manjarrez, V. (2014). Change and climate change in the slope of the Gulf of Mexico: Impacts on coffee production. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 5(3), 473-485. DOI: <https://doi.org/10.29312/remexca.v5i3.951>
- Greve, P., Orlowsky, B., Mueller, B., Sheffield, J., Reichstein, M., & Seneviratne, S. I. (2014). Global assessment of trends in wetting and drying over land. *Nature Geoscience*, 7(10), 716-721. DOI: <https://doi.org/10.1038/ngeo2247>

- Guajardo-Panes, R. A., Díaz-Padilla, G., López-Morgado, R., Hunter, M. R., & Hernández-Martínez, G. (2020). II. Ordenamiento e implementación de un Observatorio cafetalero en la zona centro del estado de Veracruz (OC-ZCEV). En: Esqueda-Esquivel *et al.* (eds.). *Diagnóstico, productividad y ambiente en cafetales: estudios regionales y de caso* (pp. 22-46). México: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, y Centro de Investigación Regional Golfo Centro. Recuperado de <https://red-sam.org/wp-content/uploads/Libro%20tecnico%2039%20-%20Diagnosito,%20productividad%20y%20ambiente%20en%20cafetales.pdf>
- ICO, International Coffee Organization. (2024). *Daily coffee prices*. Recuperado de <https://ico.org/resources/public-market-information/>
- INEGI, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. (2001). *Conjunto de datos vectoriales fisiográficos. Continuo Nacional serie I. Subprovincias fisiográficas*. Recuperado de <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825267599>
- Lara-Estrada, L., Rasche, L., & Schneider, U. A. (2017). Modeling land suitability for *Coffea arabica* L. in Central America. *Environmental Modelling & Software*, 95, 196-209. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.06.028>

- McKee, T. B., Doesken, N. J., & Kleist, J. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales. In: *8th Conference on Applied Climatology* (pp. 179-184). Recuperado de https://www.droughtmanagement.info/literature/AMS_Relationship_Drought_Frequency_Duration_Time_Scales_1993.pdf
- Muñoz-Villers, L. E., Geris, J., Alvarado-Barrientos, M. S., Holwerda, F., & Dawson, T. (2020). Coffee and shade trees show complementary use of soil water in a traditional agroforestry ecosystem. *Hydrology Earth System Sciences*, 24(4), 1649-1668. DOI: <https://doi.org/10.5194/hess-24-1649-2020>
- Murray-Tortarolo, G. N. (2021). Seven decades of climate change across Mexico. *Atmósfera*, 34(2), 217-226. DOI: <https://doi.org/10.20937/ATM.52803>
- Ovalle-Rivera, O., Läderach, P., Bunn, C., Obersteiner, M., & Schroth, G. (2015). Projected shifts in *Coffea arabica* suitability among major global producing regions due to climate change. *PLoS One*, 10(4), e0124155. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0124155>
- Park, J., Byrne, R., & Böhnelt, H. (2017). The combined influence of Pacific decadal oscillation and Atlantic multidecadal oscillation on central Mexico since the early 1600s. *Earth and Planetary Science Letters*, 464, 1-9. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2017.02.013>
- Pineda, S. L. D., & Suárez, H. J. E. (2014). Elaboración de un SIG orientado a la zonificación agroecológica de los cultivos. *Ingeniería Agrícola*, 4(3), 28-32. Recuperado de <https://www.redalyc.org/pdf/5862/586262041005.pdf>
- QGIS Development Team. (2024). *QGIS Geographic Information System*. Recuperado de <https://qgis.org/es/site/>

- Quiroz-Antunez, U. G., Monterroso-Rivas, A. I., Calderón-Vega, M. F., & Ramírez-García, A. G. (2022). Aptitud de los cultivos de café (*Coffea arabica* L.) y cacao (*Theobroma cacao* L.) considerando escenarios de cambio climático. *La Granja. Revista de Ciencias de la Vida*, 36(2), 60-74. DOI: <https://doi.org/10.17163/lgr.n36.2022.05>
- R Core Team. (2024). *R: A language and environment for statistical computing*. Recuperado de <https://www.R-project.org/>
- Ruelas-Monjardín, L. C., Nava-Tablada, M. E., Cervantes, J., & Barradas, V. L. (2014). Importancia ambiental de los agroecosistemas cafetaleros bajo sombra en la zona central montañosa del estado de Veracruz, México. *Madera y Bosques*, 20(3), 27-40. DOI: <https://doi.org/10.21829/myb.2014.203149>
- Salas-López, R., Gómez-Fernández, D., Silva-López, J. O., Rojas-Briceño, N. B., Oliva, M., Terrones-Murga, R. E., Iliquin-Trigoso, D., Barboza-Castillo, E., & Barrena-Gurbillón, M. Á. (2020). Land suitability for coffee (*Coffea arabica*) growing in Amazonas, Peru: Integrated use of AHP, GIS and RS. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9(11), 673. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijgi9110673>
- Sharmila, S., & Hendon, H. H. (2020). Mechanisms of multiyear variations of Northern Australia wet-season rainfall. *Scientific Reports*, 10, 5086. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-020-61482-5>
- SIAP, Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. (2024). *Anuario estadístico de la producción agrícola*. Recuperado de <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>

- Wagner, S., Jassogne, L., Price, E., Jones, M., & Preziosi, R. (2021). Impact of climate change on the production of *Coffea arabica* at Mt. Kilimanjaro, Tanzania. *Agriculture*, 11(1), 53. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture11010053>
- Wang-Erlandsson, L., van der Ent, R. J., Gordon, L. J., & Savenije, H. H. G. (2014). Contrasting roles of interception and transpiration in the hydrological cycle-Part 1: Simple terrestrial evaporation to atmosphere model. *Earth System Dynamics*, 5(2), 441-469. DOI: <https://doi.org/10.5194/esdd-5-203-2014>
- Weldemichael, G., & Teferi, D. (2019). The impact of climate change on coffee (*Coffea arabica* L.) production and genetic resources. *International Journal of Research*, 5(11), 26-34. DOI: <https://doi.org/10.20431/2454-6224.0511004>