

Zonificación agroclimática del cultivo de café en Aragua, Venezuela: un enfoque basado en sensores satelitales y evaluación multicriterio

Agroclimatic zoning of coffee cultivation in Aragua, Venezuela: a satellite sensors and multicriteria assessment-based approach

Oscar Abarca

Laboratorio de Geomática. Instituto de Ingeniería Agrícola. Facultad de Agronomía. Universidad Central de Venezuela, Apdo. 4563. Maracay, 2101-A. Venezuela

RESUMEN

El objetivo de este estudio fue realizar una zonificación agroclimática del cultivo de café (*Coffea arabica* L.) en el estado Aragua, Venezuela, mediante una Evaluación Multicriterio (EMC), a través del Proceso de Jerarquía Analítica, con Combinación Lineal Ponderada de criterios. Como criterios restrictivos se consideraron los cuerpos de agua y las poligonales urbanas, y como criterios condicionantes se incluyeron la elevación y la pendiente del terreno, como factores topográficos, y la temperatura, precipitación, radiación solar, humedad relativa, déficit hídrico anual y número de meses secos al año, como factores climáticos. Para determinar el déficit hídrico y los meses secos, se realizó un balance hídrico climático espacialmente distribuido, a partir de los Modelos Digitales de Elevación (MDE), generados con los factores climáticos. Todas las variables topoclimáticas fueron obtenidas de sensores satelitales o por ajuste estadístico entre datos satelitales y observaciones de estaciones climáticas. Los requerimientos agroclimáticos del cultivo se ajustaron a funciones de adaptabilidad (funciones de pertenencia a conjuntos difusos), las cuales fueron construidas mediante consideraciones teóricas y

ABSTRACT

The objective of this study was to carry out an agroclimatic zoning of coffee cultivation (*Coffea arabica* L.) in the state of Aragua, Venezuela, through a Multi-Criteria Evaluation (MCE), through the Analytical Hierarchy Process, with a Weighted Linear Combination of criteria. Restrictive criteria were considered water bodies and urban polygons, and conditioning criteria included elevation and slope of the terrain, as topographic factors, and temperature, precipitation, solar radiation, relative humidity, annual water deficit and number of dry months per year, as climatic factors. To determine the water deficit and the dry months, a spatially distributed climatic water balance was carried out, based on the Digital Elevation Models (DEM), generated with climatic factors. All topo-climatic variables were obtained from satellite sensors or by statistical adjustment between satellite data and observations of climatic stations. The agroclimatic requirements of the crop were adjusted to adaptability functions (Fuzzy sets membership functions), which were constructed through theoretical considerations and by the characterization of the coffee farms in the country

Autor de correspondencia: Oscar Abarca
E-mail: abarca.ide@gmail.com; Telf: +58 04140537242

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-6450-8703>

Recepción: 06-01-2025

Aceptado: 14-06-2025

Publicado: julio, 2025

<https://doi.org/10.63327/RFA/V51.1.2025.03>

Esta Revista se publica bajo el auspicio del Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico, UCV

por la caracterización de las fincas cafetaleras del país y del área de estudio. Los criterios se estandarizaron y se ponderaron para obtener, como resultado de la EMC, el mapa de zonificación, con una escala continua de aptitud. El mapa fue categorizado con fines de facilitar su interpretación, a clases discretas de aptitud. Para validar el resultado, se superpuso al mapa de zonificación, las fincas cafetaleras geo-referenciadas del área de estudio, determinándose que cerca del 70% de estas se ubican efectivamente en zonas calificadas como aptas, desde débilmente aptas, hasta muy fuertemente aptas, asumiendo la premisa de que estas plantaciones tradicionalmente están ubicadas en áreas aptas, dada su producción histórica continua. El 15% están ubicadas en zonas no aptas y 15% restante en la zona intermedia.

Palabras clave: Aptitud de la Tierra, Combinación Lineal Ponderada, Conjuntos Difusos, Proceso de Jerarquía Analítica, Sistemas de Información Geográfica, Teledetección Espacial.

INTRODUCCIÓN

El cultivo de café en Venezuela ha experimentado un incipiente crecimiento en los últimos años, impulsado, entre otras razones, por el vertiginoso desarrollo de la cultura del café, de los cafés de especialidad y la gastronomía ligada a este rubro, lo que ha incrementado las expectativas de demanda y precios en los agricultores. De acuerdo a las cifras de la FAO, el país pasó de una superficie cosechada, en 2018, de 149 536 ha, a 160 408 ha, en 2022 (FAOSTAT, 2024). Además, se han renovado plantaciones y se ha incrementado la producción, que pasó de 58 188 ton, en 2018, a 67 160 ton, en 2023, esta última cifra según la Asociación Venezolana de la Industria de la Caficultura (ASICAF, 2023). La importancia del rubro no solo radica en la producción de un bien de consumo masivo, a nivel nacional e internacional, sino también por los aportes de los cafetales en servicios ecosistémicos (Farreras, 2024; Farfán, 2010; Farfán y Jaramillo, 2009; Wintgens, 2004).

Este incremento de la frontera agrícola cafetalera, y la creciente demanda de tierras y expectativas de inversión, amerita la planificación del desarrollo y gestión del rubro, partiendo de la localización de tierras óptimas, que aseguren la productividad con sostenibilidad, la calidad del producto demandado en el mercado actual del

and the study area. The criteria were standardized and weighted to obtain, as a result of the MCE, the zoning map, with a continuous scale of aptitude. The map was categorized for ease of interpretation, to discrete classes of aptitude. To validate the result, the geo-referenced coffee farms of the study area were superimposed on the zoning map, determining that about 70% of these are effectively located in areas classified as suitable, from weakly suitable, to very strongly suitable, assuming the premise that these plantations are traditionally located in suitable areas, given their continuous historical production. 15% are located in unsuitable areas and the remaining 15% in the intermediate zone.

Key words: Analytical Hierarchy Process, Fuzzy Sets, Geographic Information Systems, Land Suitability, Spatial Remote Sensing, Weighted Linear Combination.

café y la prestación satisfactoria de los servicios ecosistémicos propios de la modalidad productiva considerada, con plantaciones de *Coffea arabica* L. bajo sombra. Así mismo, el escenario del cambio climático-calentamiento global, requiere la definición de estrategias de manejo agronómico, para la adaptación del cultivo, y su zonificación, para la posible migración, en los casos requeridos, a zonas de mayor aptitud. De acuerdo a FAO (FAO, 1996), la zonificación agroecológica (ZAE) separa áreas con similares potencialidades y limitaciones para el desarrollo, definiendo esas zonas en base a combinaciones de suelo, fisiografía y características climáticas. La zonificación agroclimática (ZAC) es un planteamiento restringido de la ZAE, ya que solo toma en cuenta variables climáticas y algunos aspectos del relieve relacionados con el clima. En regiones con limitada disponibilidad de información, este planteamiento puede ser apropiado, para la definición de zonas de aptitud con fines de planificación (Silva y Sevilla, 2024; Lorençone *et al.*, 2023; Tram *et al.*, 2023; De Lima *et al.*, 2022).

Otras metodologías, como la Evaluación de Tierras (FAO, 1976), ampliamente utilizada en el país con fines de planificación, la Zonificación Agro-Ecológica (AEZ) (FAO, 1996) o los sistemas de modelaje de cultivos, tierras y aguas, como el CROPWAT (FAO, 2025), instrumentalizado a partir de Allen *et al.* (1998) y FAO (1979), ALES (Rossiter y Van Wambeke, 1997), CropSyst (Stöckle

et al., 2003), DSSAT (DSSAT, 2025), y otros, tienen requerimientos de información edafológica, climática o socio-económica, limitadamente disponible a nivel global del área de estudio, y son más complejos de implementar. Los resultados de la ZAC con EMC pueden ser complementados con modelos predictivos de planificación estratégica (Godet, 2007), que incorporen escenarios climáticos regionales y sistemas de control de pronósticos (Hansen *et al.*, 2006; Hansen, 2005), para la retroalimentación de los modelos. Sin embargo, la metodología aquí propuesta, intenta dinamizar el proceso de zonificación de otra manera, no con escenarios climáticos o agroecológicos contrastantes, sino con la definición de niveles de aptitud que varíen continuamente en el espacio, a través de las funciones de adaptabilidad del cultivo, lo que permitiría la selección de las tierras en función al nivel de aptitud deseado, asociado a un nivel predeterminado de riesgo implícito.

En estudios previos sobre zonificación agroclimática y adaptabilidad de cultivos en Venezuela, se han utilizado metodologías similares para evaluar la aptitud del suelo y el clima en distintas regiones del país. Olivares y Hernández (2019) desarrollaron un enfoque de sectorización ecoterritorial para la producción sostenible de papa en Carabobo, utilizando criterios agroclimáticos y edáficos en un análisis de aptitud territorial. De manera similar, Olivares y Hernández (2020) aplicaron técnicas multivariadas para evaluar la aptitud agrícola de los suelos en la misma región, permitiendo una clasificación detallada de áreas óptimas para diferentes cultivos. Otros estudios han explorado la adaptabilidad eco-territorial de cultivos como tomate (Olivares *et al.*, 2020) y maíz (Olivares-Campos *et al.*, 2018a) en Carabobo, utilizando modelos de zonificación basados en información climática y geoespacial. Asimismo, la identificación de zonas potenciales para la producción de cebolla (Olivares-Campos *et al.*, 2018b) y el desarrollo de un calendario de siembra agrícola (Hernández *et al.*, 2017) han reforzado la importancia de la planificación agroclimática para mejorar la sostenibilidad del sector agrícola.

La disponibilidad de información climática, sin embargo, también constituye una limitante para la zonificación de cultivos, en áreas con escasa cobertura espacial y temporal de estaciones meteorológicas. Una alternativa como fuente de información lo constituye las plataformas servidoras de datos climáticos, basados

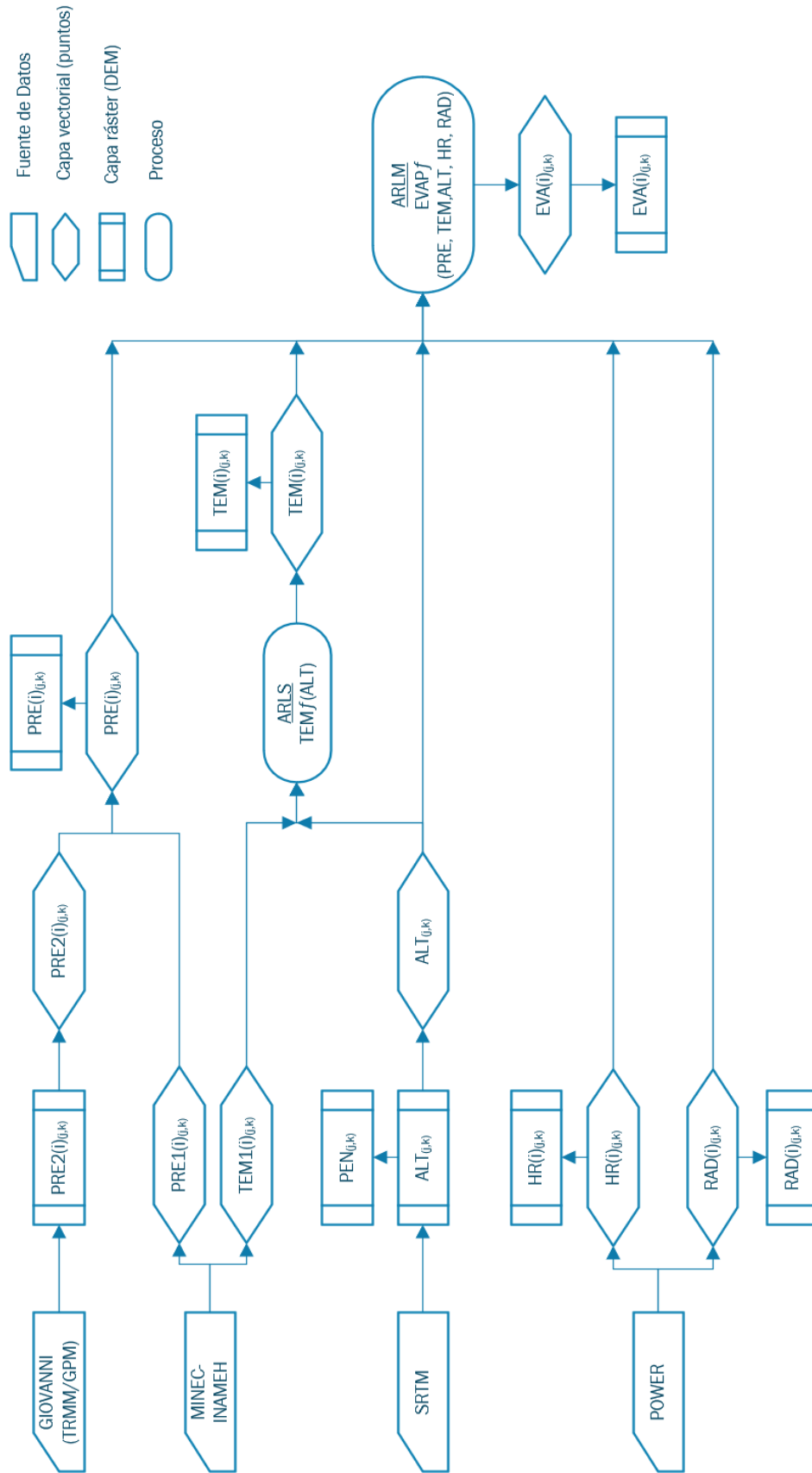
en las mediciones de los sensores de la constelación de satélites meteorológicos, que disponen de series de tiempo de datos meteorológicos y de flujo de energía solar. El uso de los sensores satelitales como fuente de información climática es una metodología relevante en el contexto de la relativamente baja disponibilidad de esta información en el área de estudio, que tiene una densidad de $195 \text{ km}^2 \cdot \text{estación}^{-1}$, para precipitación, y $3385 \text{ km}^2 \cdot \text{estación}^{-1}$ para el resto de variables climáticas (Rodríguez *et al.*, 2006).

Cada variable climática pertinente, así como la información topográfica complementaria, constituyen criterios a evaluar para la ZAC, por tanto, se requieren herramientas potentes que permitan el análisis cuantitativo de series de datos con distribución espacial y temporal. Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) han incorporado herramientas de apoyo a la toma de decisiones, como la Evaluación Multicriterio (EMC), lo que permite abordar estos problemas de asignación de recursos (zonificación) (Eastman, 2024a, b). La mayor parte de estos criterios topo-climáticos o capas de información, son continuos, por lo que se plantea un enfoque de análisis que genera una escala continua de aptitud, en contraposición a los enfoques determinísticos o Booleanos (apto/no apto). Todas las localizaciones del espacio estudiado con este enfoque tienen un valor que representa su grado de aptitud, bajo una concepción “difusa” (fuzzy) del objetivo. A su vez cada criterio tiene una escala de adaptabilidad (función de membresía) que viene dada por las características fisiológicas y genéticas del *Coffea arabica* L. y por su región de producción.

En este estudio se pretende determinar la zonificación agroclimática del *Coffea arabica* L. en el estado Aragua, Venezuela, mediante la EMC de variables topográficas y climáticas, de tal manera que se pueda dar respuesta a la siguiente pregunta de investigación: ¿puede la ZAC orientar la definición de estrategias de adaptación del cultivo o la migración a zonas de mayor aptitud, ante futuros escenarios climáticos, de ordenamiento territorial o de desarrollo de nuevas áreas?

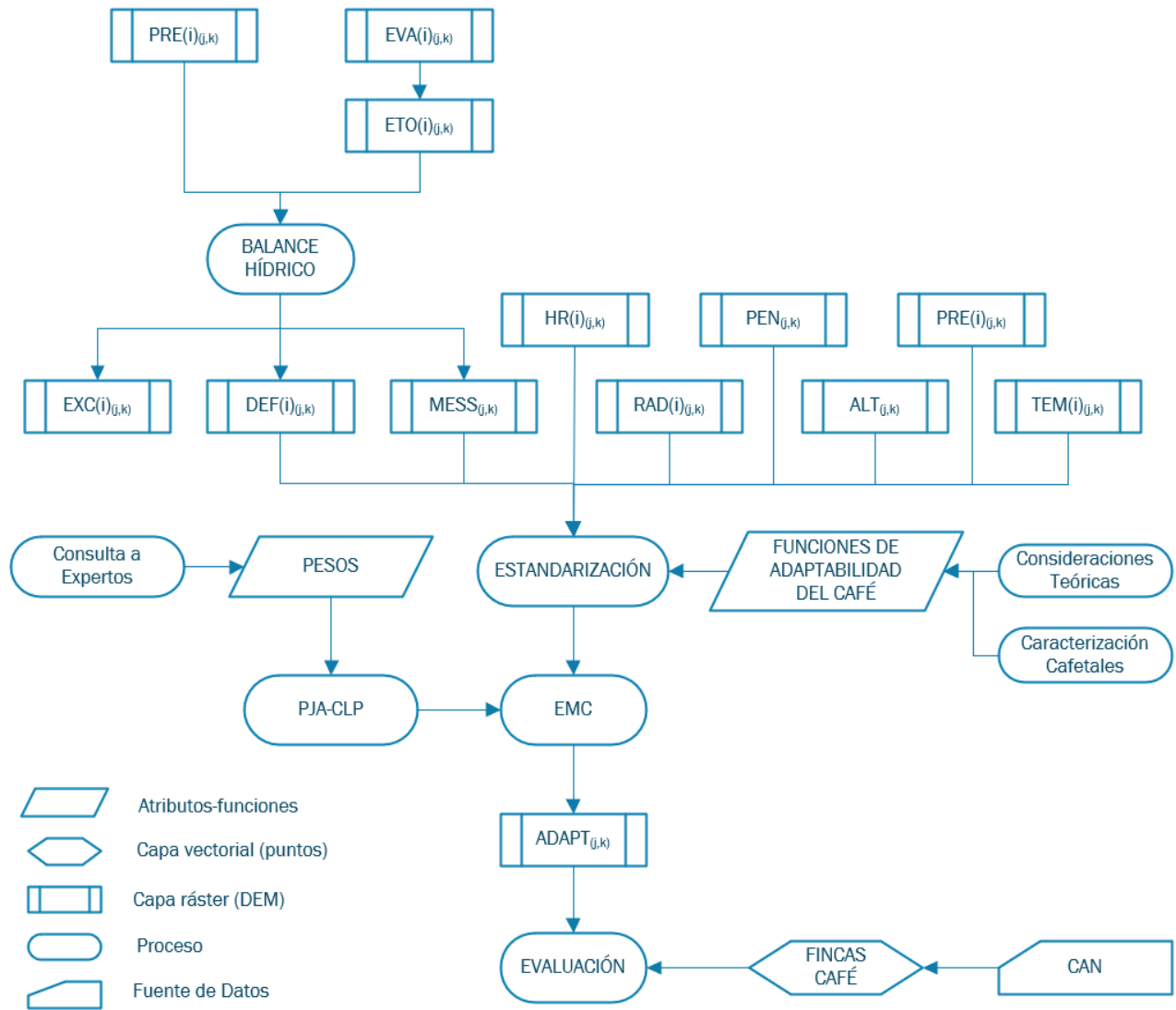
MATERIALES Y MÉTODOS

Para el desarrollo de la investigación se realizó la secuencia metodológica esquematizada en las Figuras 1 y 2 y que se describe a continuación:



Leyenda: PRE2: Precip. satelital; PRE1: Precip. estaciones; PRE: Precip. satelital + estaciones; TEM1: Temperatura estaciones; TEM: Temperatura modelada; PEN: Pendientes del terreno; HR: Humedad relativa satelital; RAD: Radiación solar satelital; ARLS: Análisis de regresión lineal simple; ARLM: Análisis de regresión lineal múltiple; EVA: Evaporación modelada; i, es el mes del año; j y k, son la fila y columna respectivas de la celda de los mapas ráster o las coordenadas Este, Norte de los puntos en los mapas vector.

Figura 1. Esquema metodológico para la definición de los criterios topo-climáticos.



Legenda: PRE: Modelo Digital de Elevación (MDE) de precipitación; EVA: MDE de evaporación; ETO: MDE de evapotranspiración del cultivo de referencia; EXC: MDE de excedentes de humedad del suelo; DEF: MDE de déficits de humedad del suelo; MESS: MDE del número de meses secos al año; HR: MDE de humedad relativa; RAD: MDE de radiación solar; PEN: MDE de pendientes del terreno; ALT: Modelo Digital del Terreno (MDT); TEM: MDE de temperatura; EMC: Evaluación Multi-Criterio; PJA: Proceso de Jerarquías Analíticas; CLP: Combinación Lineal Ponderada de Criterios; ADAPT: MDE de adaptabilidad del cultivo; CAN: Censo Agrícola Nacional; *i*, es el mes del año; *j* y *k*, son la fila y columna respectivas de la celda de los mapas ráster o las coordenadas Este, Norte de los puntos en los mapas vector.

Figura 2. Esquema metodológico para la Evaluación Multicriterio.

1. Recolección de información climática de la red de estaciones del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMEH). Se analizó un marco regional de mayor amplitud que el área de estudio y que incluye los estados Aragua, Carabobo, Miranda, La Guaira y Dto. Capital, así como partes de Anzoátegui, Guárico, Yaracuy y Portuguesa (Figura 3). La red de estaciones estudiadas en esta región incluye registros promedios mensuales de 360 estaciones de precipitación, 34 de temperatura, 33 de evaporación, 16 de Humedad Relativa, 10 de velocidad del viento, 11 de insolación y 8 de radiación solar (Landaeta, 2019; Abarca, 2010; MINAMB, 2008).
2. Recolección de datos climáticos de dos plataformas servidoras de datos meteorológicos. La plataforma **GIOVANNI** (**Geospatial Interactive Online Visualization AND aNalysis Infrastructure**), de la NASA (NASA, 2023a), proporciona servicios web para acceder, visualizar, analizar y descargar diferentes tipos de datos geofísicos y atmosféricos procedentes de sensores remotos. En el caso de la variable precipitación, esta plataforma gestiona los datos de dos misiones que incorporan constelaciones de satélites meteorológicos por cooperación internacional, la **Tropical Rainfall Measurement Mission** (TRMM) y el **Global Precipitation**

Measurement (GPM). La fuente utilizada para la descarga de la variable precipitación es TRMM-3B43_v7 (1998-2019). Los datos descargados tienen una resolución espacial de $0,25^\circ \times 0,25^\circ$. La otra plataforma es **POWER** (**Prediction Of Worldwide Energy Resources**) (NASA, 2023b), que proporciona series de datos meteorológicos y de radiación solar, procedentes de los sensores satelitales CERES, a bordo de los satélites EOS-Terra, EOS-Aqua, S-NPP y NOAA-20, así como del modelaje climático. Esta última plataforma se utilizó para obtener datos de Radiación Solar, Temperatura, Humedad Relativa (HR) y Velocidad del Viento. Los datos descargados tienen una resolución espacial de $0,5^\circ \times 0,625^\circ$. En la plataforma POWER, el sistema global de reanálisis de observaciones espaciales MERRA-2 (NASA, 2024), promedia los valores medidos por el sensor (CERES), en la celda, y suministra la información para el punto o región de coordenadas solicitado (Figura 4).

3. Integración de los datos satelitales vectorizados (puntos), con la red de puntos de las estaciones climáticas, para completar la región de análisis en sectores sin estaciones o para cubrir variables climáticas sin datos. Para la variable precipitación, se sumaron los puntos satelitales del área correspondiente al occidente del área de estudio,

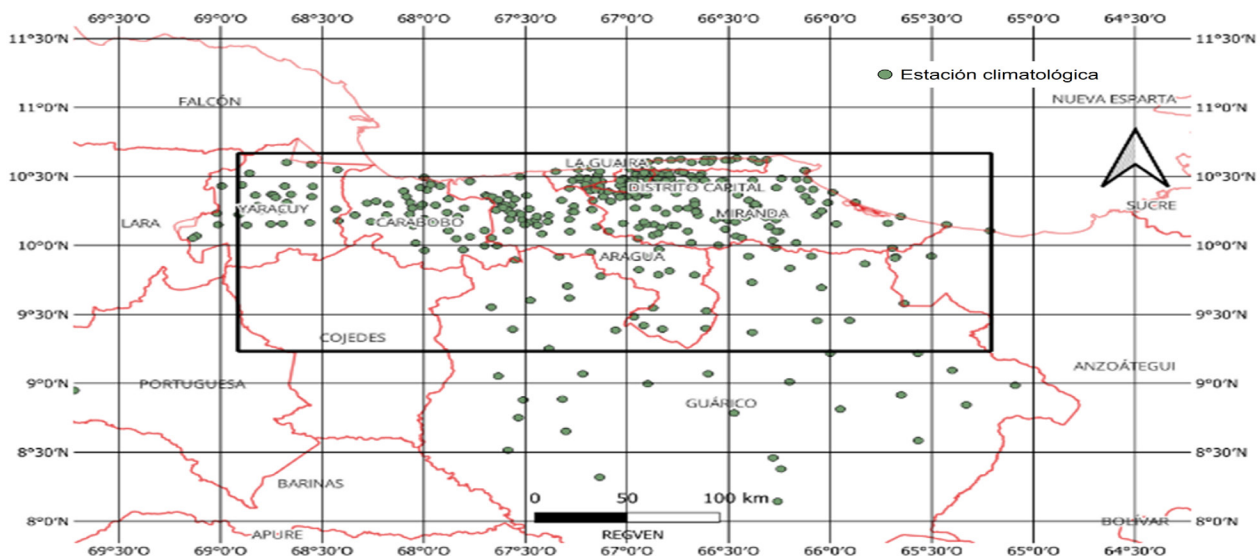


Figura 3. Delimitación del área de análisis climático y puntos correspondientes a la red de estaciones meteorológicas de la región.

así como del Mar Caribe, donde no se disponía de suficiente información de campo, con los puntos de las estaciones de observación terrestre, para densificar la información en el sector regional del análisis climático y elaborar el Modelo Digital de Elevación (MDE) correspondiente. Para esto se adicionaron ambas capas con QGIS (QGIS, 2024).

4. Incremento de la densidad de puntos de Temperatura y Evaporación, mediante la estimación de datos de estas variables en estaciones existentes, con información de otras variables predictoras. Para ello se realizaron análisis de regresión lineal simple (temperatura vs. altitud) y regresión lineal múltiple (evaporación vs. altitud-temperatura-precipitación-humedad relativa-radiación).

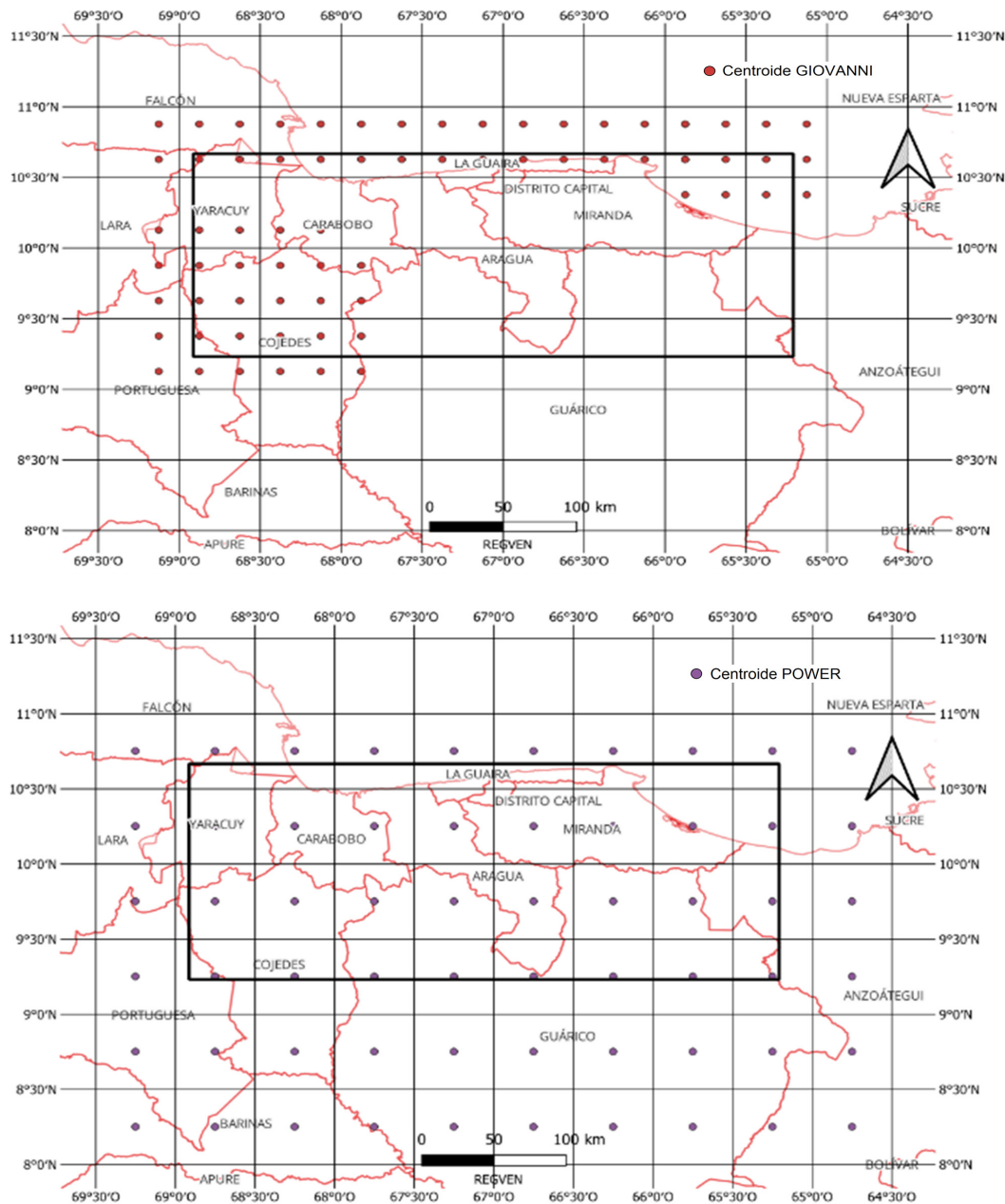
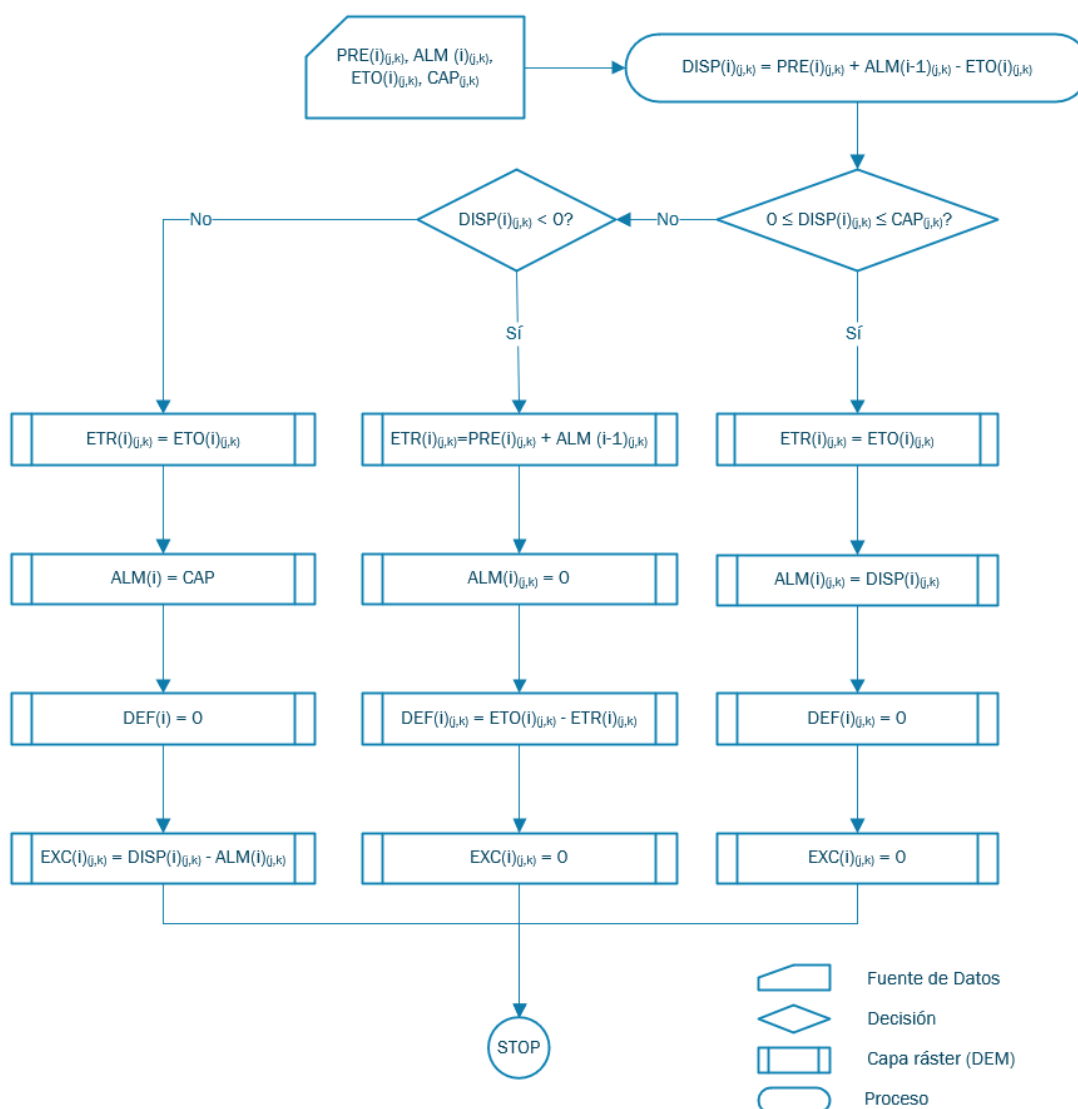


Figura 4. Delimitación del área de análisis climático y puntos correspondientes a los centroides de referencia de las variables climáticas satelitales de las plataformas GIOVANNI y POWER.

5. Recolección de datos topográficos de la Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), desde la plataforma EarthExplorer (USGS, 2023), para obtener MDE del terreno, con 3" de arco de resolución (30 m) y extracción del mapa de pendientes, con el software QGIS (QGIS, 2024).
6. Interpolación de MDE para cada variable climática (red de puntos), a la resolución espacial del MDE del terreno, mediante la herramienta de análisis ráster, Cubic Spline, del software QGIS.
7. Elaboración del Balance Hídrico Climatológico, espacialmente distribuido, para el área específica de estudio, con la finalidad de incorporar el criterio Déficit Hídrico en la evaluación (Allen *et al.*, 2006; Grassi, Sf; Ramírez, *et al.*, 2010a).

En la Figura 5 se esquematiza el procedimiento metodológico para la elaboración del balance hídrico.



Leyenda: PRE: Precipitación media mensual; ALM: Almacenamiento de humedad del suelo; ETC: Evapotranspiración del cultivo; CAP: Capacidad máxima de almacenamiento de humedad del suelo; DISP: Disponibilidad de agua; ETR: Evapotranspiración real; DEF: Déficit de humedad del suelo; EXC: Excedente de humedad del suelo; i: Mes del año climático; j: Fila del mapa ráster; k: Columna del mapa ráster.

Figura 5. Balance hidrológico climatológico, con distribución temporal mensual (i) y espacial en celdas de tamaño (j,k).

8. Elaboración de “Funciones de Adaptabilidad” del Cafeto, definidas como funciones de membresía a conjuntos difusos (fuzzy) (Eastman, 2024a, b; Romero-Cuellar y Obregón-Neira, 2013; Duran, 2012; Zadeh, 1965). La adaptabilidad del rubro es definida como un conjunto difuso (Fuzzy sets), es decir, sus límites no son nítidos y la transición entre la pertenencia y no pertenencia a un lugar del conjunto, es gradual (Eastman, 2024a, b; Zadeh, 1965). La ubicación de un sitio como apto o no apto, en función a un criterio (como un valor de altitud, por ejemplo), no es exacta, sino que se difumina alrededor de ese valor. Esta pertenencia al conjunto difuso se denomina función de membresía y varía de 0,0 a 1,0. La función más común en la Teoría de Conjuntos Fuzzy es la Sigmoidal y para su implementación requiere la posición a lo largo del eje X de cuatro puntos de control (a, la membresía crece desde 0; b, la membresía llega a 1; c, la membresía, baja desde 1; d, la membresía se hace 0) (Eastman, 2024a, b). La función sigmoidal es calculada con el siguiente algoritmo (Clark University, 2024; Schmucker, 1984):

$$\mu = \cos^2 \alpha \quad \text{Ec. 1}$$

En el caso de una función monótonamente decreciente:

$$\alpha = \frac{x - \text{punto } c}{\text{punto } d - \text{punto } c} * \frac{\pi}{2} ;$$

$$\text{Cuando } x < \text{ punto } c, \mu = 1; \quad \text{Ec.2}$$

En el caso de una función monótonamente creciente:

$$\alpha = \left(1 - \frac{x - \text{punto } a}{\text{punto } b - \text{punto } a} \right) * \frac{\pi}{2} ;$$

$$\text{Cuando } x > \text{ punto } b, \mu = 1; \quad \text{Ec. 3}$$

$X = \{x\}$ X denota el Universo de objetos x (Altitud, Precipitación, Temperatura, Radiación, Pendiente, HR, Déficit hídrico, Meses secos), que definen la Adaptabilidad del café (A).

$X = \{x, \mu\}$ el conjunto difuso A, es un conjunto de pares ordenados de cada objeto x y su grado de pertenencia μ , al conjunto A.

Existen otras funciones, como Lineal, Gamma, J, Gaussiana, etc., pero para las variables topo-climáticas estudiadas, todas las funciones se consideraron sigmoideas (simétricas y monótonamente decrecientes).

Las funciones de adaptabilidad del café se construyeron a partir de funciones sigmoideas de 4 puntos de inflexión. Estos puntos definen los límites estimados de los umbrales de aptitud de cada criterio (óptimo, alto, medio, bajo), los cuales gobiernan la forma de la curva.

9. Los puntos de control (puntos de inflexión de las curvas de las funciones de membresía) fueron determinados por revisión bibliográfica de los parámetros topo-climáticos teóricos de adaptabilidad del café (Jaramillo, 2021; González y Hernández, 2016; Ramírez, 2014; Ruiz *et al.*, 2013; Moreno, 2012; Valencia, 2010; Villers *et al.*, 2009; Pérez-Portilla y Geissert-Kientz, 2006; Jaramillo-Robledo, 2005a,b; Wintgens, 2004; Rojas, 1989; Benacchio, 1982), y por la caracterización topo-climática de las unidades de producción de café (45 455 fincas a nivel nacional y 1 549 en el rectángulo perimetral que cubre el estado Aragua), según el Censo Agrícola Nacional de 1999 (CAN) (CENATEL, 2014). Para esta caracterización, se realizó un análisis de distribución de frecuencias de los atributos topo-climáticos de los puntos correspondientes a las fincas, extraídos de los MDE de cada criterio.

10. Ejecución de la Evaluación Multicriterio (EMC), para el objetivo de Adaptabilidad del Café, utilizando el Proceso de Jerarquías Analíticas para la toma de decisiones (Saaty, 1977; Ceballos y López-Blanco, 2010) y un método de estandarización de las variables continuas, topográficas y climáticas, por Combinación Lineal Ponderada (CLP), implementado por el software TerrSet (Clark University, 2024). En la CLP (Voogd, 1982), los factores condicionantes son combinados aplicando un peso a cada uno y luego sumando los resultados, para generar un mapa de aptitud. La expresión utilizada es la siguiente:

$$A = \sum_{i,j,k=1}^n p_{i,j,k} * c_{i,j,k} \quad \text{Ec. 4}$$

Donde:

A es la aptitud resultante.

$p_{i,j,k}$ es el peso aplicado al condicionante i , en la fila j y columna k , del mapa ráster.

$c_{i,j,k}$ es el valor del criterio condicionante i , en la fila j , columna k .

n es el número total de factores condicionantes, de filas y de columnas, del respectivo MDE.

Para considerar los criterios restrictivos (cuerpos de agua y ciudades), se modifica la ecuación 4, de la siguiente manera:

$$A = \sum_{i,j,k}^n p_{i,j,k} * c_{i,j,k} * \Pi r_{i,j,k} \quad \text{Ec. 5}$$

Donde:

Π es el producto

$r_{i,j,k}$ es el valor del criterio *restrictivo* i , en la fila j , columna k

11. Análisis y validación de los resultados de la EMC, a partir de la superposición de los puntos correspondientes a las fincas cafetaleras tradicionales de la región, disponibles en el CAN (CENATEL, 2014), sobre el mapa resultado de la EMC. Se asume que las fincas tradicionales de café, que son plantaciones de ciclo permanente, en continua producción histórica, deben estar ubicadas en áreas aptas para el cultivo, por tanto, la superposición del mapa vectorial que contiene los puntos correspondientes a esas fincas, sobre el mapa resultado, debería coincidir en las zonas arrojadas como aptas por la EMC. Los puntos ubicados sobre zonas no aptas corresponderían a la incertidumbre en la validación y representan, o bien, fincas que efectivamente vienen produciendo sobre áreas no aptas, con sus respectivos problemas agro-productivos, o bien, zonas en las que ha cambiado la condición climática, reduciendo sus niveles actuales de aptitud, o bien, corresponden a deficiencias en la definición de los límites de los criterios del modelo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Criterios de la EMC

Criterios topo-climáticos derivados de observaciones terrestre y satelitales

Las variables humedad relativa y radiación solar y sus MDE, se obtuvieron directamente de las plataformas satelitales y las variables temperatura y evaporación se estimaron, para toda el área de estudio, con modelos predictivos de regresión. En el Anexo 1 se presenta la lista de estaciones utilizadas para el análisis estadístico y en los Anexos 2 y 3, los análisis de regresión lineal simple, para la temperatura, y regresión lineal múltiple, para la evaporación. Con estos modelos estadísticos se elaboraron los MDE correspondientes. En la Figura 6 se presentan los MDE de los criterios topográficos y climáticos indicados.

Criterios derivados del balance hídrico distribuido

El balance hídrico climatológico permitió conocer los volúmenes de déficits hídricos en el área de estudio, a lo largo del año climático, como un criterio básico para determinar la adaptabilidad del cultivo de café en la zona. En la Figura 7 se presenta la distribución mensual de los déficits a lo largo del año climático.

La síntesis anual de los déficits permitió conocer el número de meses secos del año (meses donde las demandas de agua son mayores a la oferta), en la región de estudio, el cual es un parámetro que define la magnitud y calidad del periodo de floración del café. Ramírez, *et al.* (2010b), refieren cómo un estrés hídrico moderado estimula la iniciación floral y largos periodos de estrés hídrico, siguiendo al periodo lluvioso, son efectivos para el rompimiento de la latencia de las yemas florales en café. Estas dos variables (magnitud del déficit anual y duración del periodo seco) constituyen criterios para definir la adaptabilidad del café. En la Figura 8 se presentan los criterios Déficit Hídrico medio anual y Numero de Meses Secos.

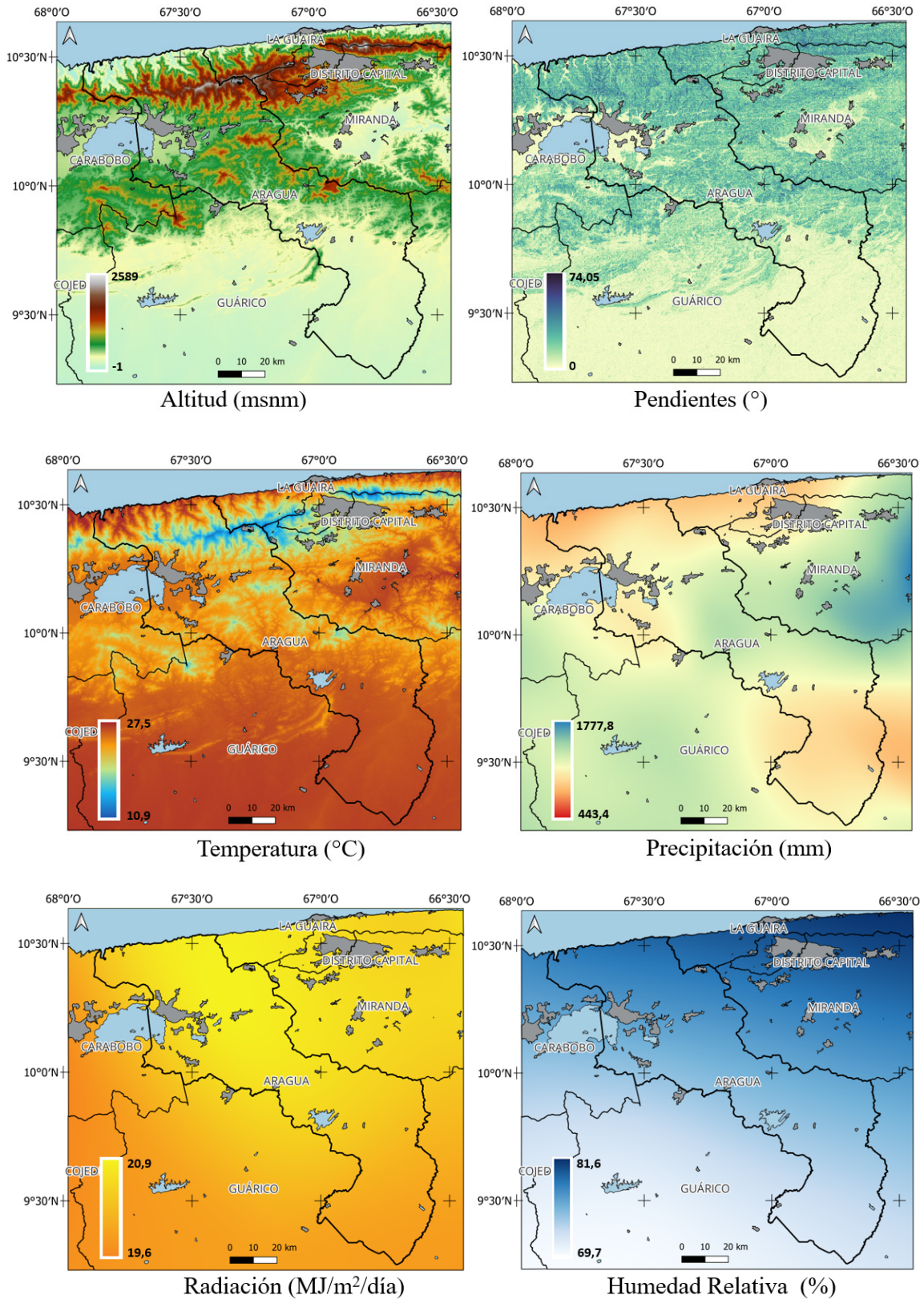


Figura 6. MDE, para las variables topográficas Altitud (msnm) y Pendientes del terreno y para las variables climáticas medias anuales de Temperatura, Precipitación, Radiación solar diaria y Humedad Relativa.

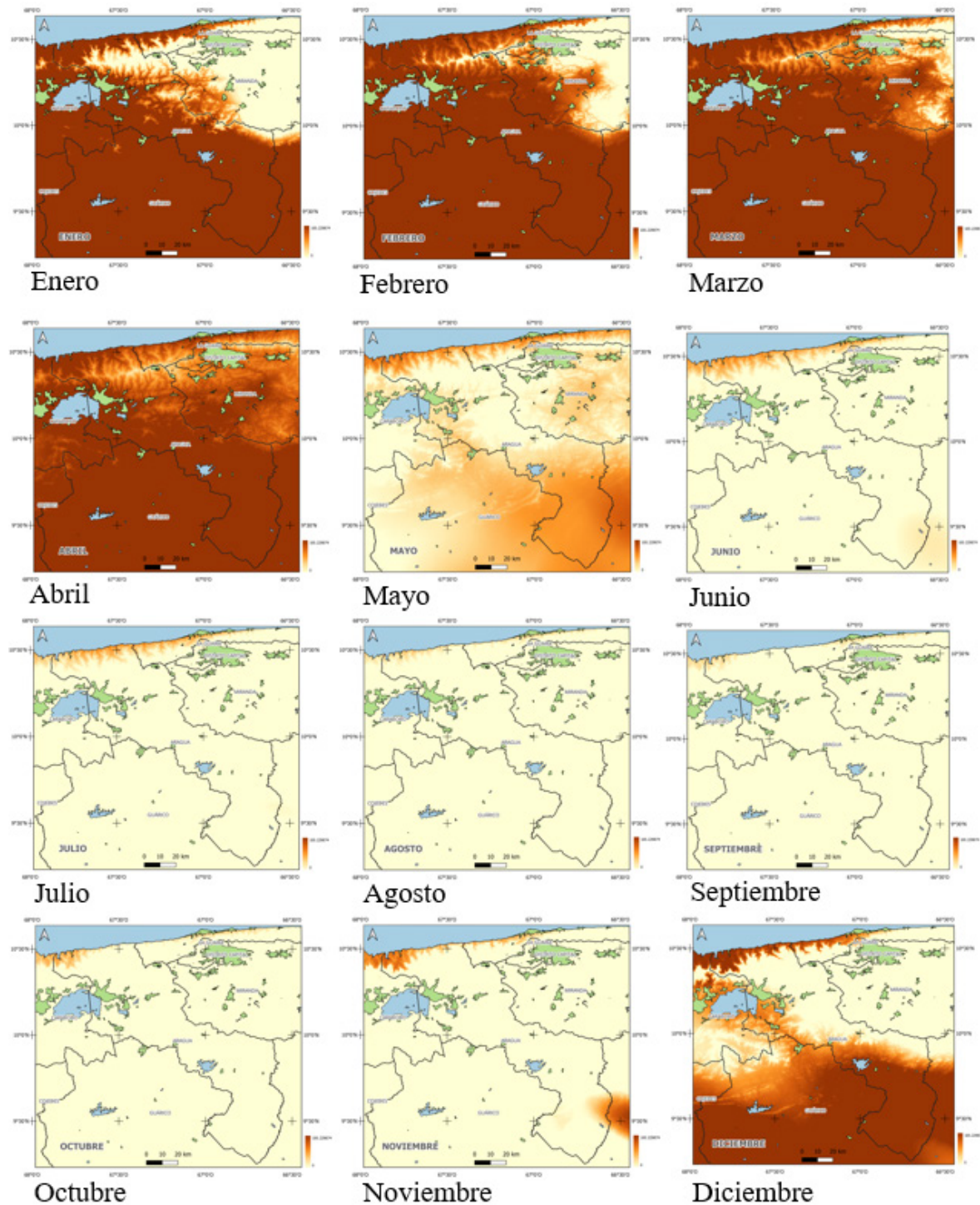


Figura 7. Variación del Déficit hídrico medio mensual a lo largo del año. Los tonos claros son bajos niveles de déficit que se incrementan hasta tonos oscuros de alto déficit.

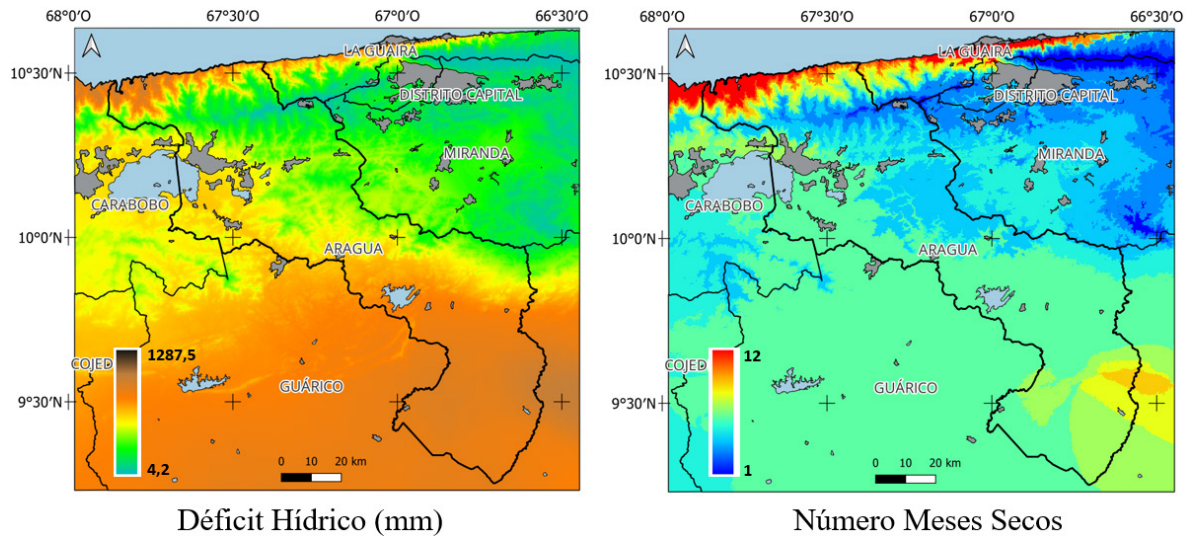


Figura 8. Déficit hídrico medio anual (mm) y Número de meses secos al año.

Estandarización de criterios

Las funciones de adaptabilidad del cultivo, requeridas para la estandarización de los criterios de evaluación, se construyeron a partir de la definición de los puntos de inflexión de curvas sigmoideas de adaptabilidad del rubro a cada criterio. Estos puntos se determinaron por la combinación de consideraciones teóricas del rubro, con la caracterización de las fincas cafetaleras existentes del área de estudio:

Consideraciones teóricas de adaptabilidad del *Coffea arabica* L.

Diversos autores establecen rangos óptimos, altos, moderados, bajos y marginales, de los parámetros topo-climáticos y edáficos para la adaptabilidad del café. Para la especie *Coffea arabica* L. en particular, Wintgens (2004), plantea que el rango óptimo de temperatura media anual está entre 18-20°C; un rango de adaptabilidad alto, por debajo y por encima del óptimo, se ubica entre 16-18 y 20-22°C respectivamente; moderado, entre 15-16 y 22-24°C; y de baja adaptabilidad, entre 14-15 y 24-26°C. Para la precipitación, este autor establece el rango óptimo, entre 1400-1800 mm; alto, entre 1200-1400 y 1800-2000 mm; moderado, entre 1000-1200 y 2000-2200 mm; bajo, entre 800-1000 y >2200 mm. La longitud del periodo seco óptima está entre 2-3 meses; alta, entre 1-2 y 3-4

meses; moderada, entre 0-1 y 4-5 meses; baja, entre 5-6 meses. Para el caso de la HR, el valor óptimo está entre 50-60%; alto, entre 40-50 y 60-70%; moderado, entre 30-40 y 70-80%; bajo, entre 20-30 y 80-90%. Para la pendiente del terreno, el rango óptimo varía entre 0-4%; alto, de 4-8%; moderado, de 8-16%; bajo, de 16-30%; muy bajo, pero frecuente, de 30-50%.

En relación a la altitud, autores como González y Hernández (2016), establecen el rango óptimo entre 1000-1500 msnm; medio, entre 600-1000 y 1500-1900 msnm; bajo, entre 400-600 y 1900-2100 msnm; muy bajo, <400 y >2100 msnm. Además de las implicaciones agroecológicas y climáticas de la altitud, este criterio también tiene incidencias jurídicas, ya que está asociado a consideraciones de calidad. En el caso de la normativa venezolana sobre café de especialidad (COVENIN, 2017), el Café Gourmet debe ser cosechado a una altitud de por lo menos 600 msnm, lo que constituye una consideración socio-económica de la aptitud de las tierras.

Caracterización topo-climática de los cafetales de Venezuela y del área de estudio

A partir de los datos georeferenciados del Censo Agrícola Nacional (CAN) (CENATEL, 2014), y los DEM topo-climáticos elaborados, se realizó la caracterización topográfica de las fincas de café del

país (45 455, según el CAN de 1999), determinando que el 85% de estas se ubican a altitudes entre 600 y 1 600 msnm, con una altitud promedio de 1 131 msnm, máximo de 3 273, mínimo de 4 y desviación estándar de 350. ¹ (Figura 9).

En relación a la pendiente, se realizó el análisis de frecuencias sobre el recuadro regional que incluye al estado Aragua (1 549 fincas, según el CAN de

1999). Determinándose que 85% de estas tienen pendientes entre 2 y 22°, el promedio es de 13,83°, máximo de 87,08°, mínimo de 0,34° y desviación estándar de 8° (Figura 10).

Este análisis también se realizó con las variables climáticas del área de estudio y se sintetiza en el Cuadro 1.

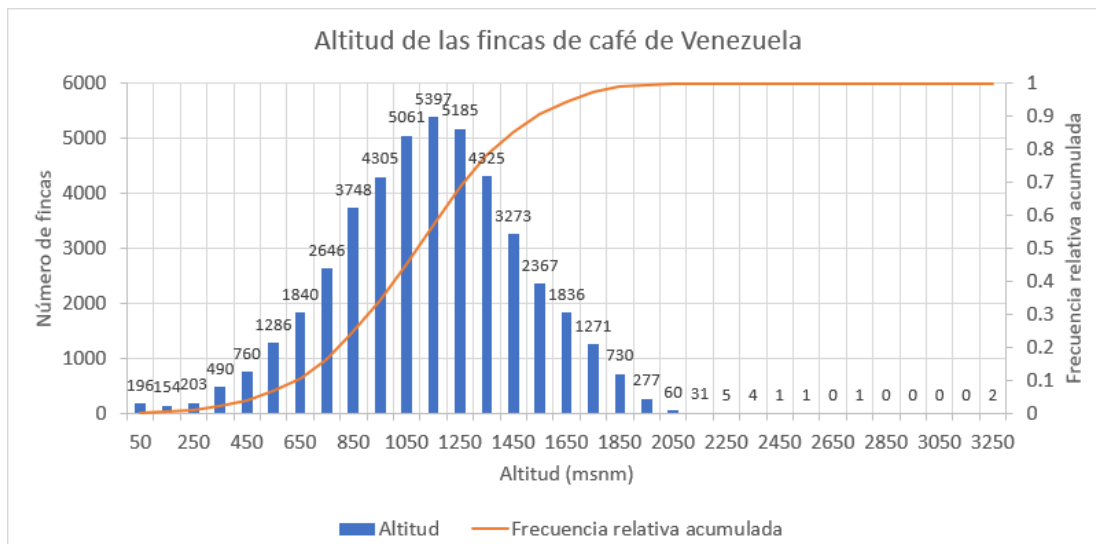


Figura 9. Distribución de frecuencias de la Altitud de las fincas de café de Venezuela.

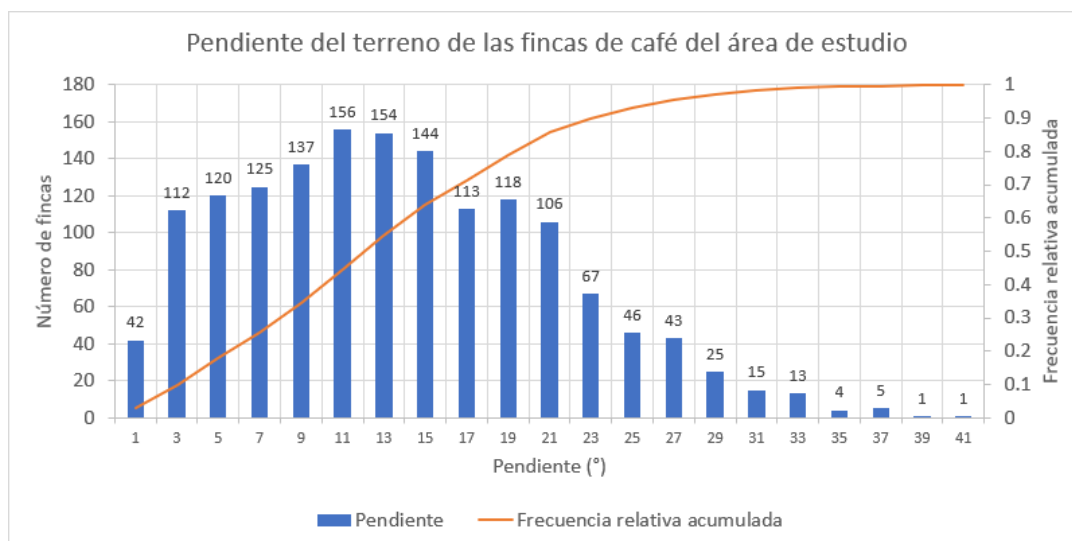


Figura 10. Distribución de frecuencias de la Pendiente del terreno de las fincas de café del área de estudio.

¹La altitud y la pendiente corresponden al punto de coordenadas que representa a la finca, según el CAN, y que se ubica en la puerta de acceso a la unidad de producción. respectiva.

Cuadro 1. Caracterización climática de fincas de café del área de estudio.

Criterio	Valor en 85% de fincas	Promedio	Máximo	Mínimo	Desv. Est.
Temperatura (°)	17,50 - 24,50	21,54	27,40	15,44	2,31
Precipitación (mm)	950,00 - 1400,00	1195,40	1998,98	847,16	160,31
Radiación solar (MJ/m ² /día)	18,65 - 20,90	19,71	21,10	18,62	0,89
Humedad Relativa (%)	74,25 - 79,50	76,45	80,96	71,87	1,80
Déficit Hídrico (mm)	125,00 - 525,00	335,58	885,79	36,61	144,92
Meses secos	2 - 5	4,5	12	1	1,51

La caracterización topo-climática descrita de las fincas cafetaleras y los umbrales críticos definidos teóricamente por diversos autores para el *Coffea arabica* L. (Jaramillo, 2021; COVENIN, 2017; González y Hernández, 2016; Ramírez, 2014; Ruiz *et al.*, 2013; Moreno, 2012; Valencia, 2010; Villers *et al.*, 2009; Pérez-Portilla y Geissert-Kientz, 2006; Jaramillo-Robledo, 2005a, b; Wintgens, 2004; Rojas, 1989; Benacchio, 1982), permitió elaborar las curvas de adaptabilidad del rubro que se presentan en la Figura 11.

EMC por Combinación Lineal Ponderada (CLP) de criterios condicionantes difusos y restricciones Booleanas

Los criterios tipo restricción considerados en este estudio fueron los cuerpos de agua y las poligonales urbanas. Estas áreas fueron descartadas, como utilizables para el cultivo de café, por lo que se reclasificaron a celdas no aptas, aquellas dentro de estos polígonos (0), y aptas (1), aquellas fuera de ellos. Las Áreas Bajo Régimen de Administración Especial (ABRAEs) no se consideraron (básicamente, Parques Nacionales y Monumentos Naturales), a pesar de su carácter restrictivo, porque en ellos se desarrolla algún tipo de actividad productiva con café y cacao (Actividades Permitidas y Restringidas en las Zonas de Uso Especial), (INPARQUES, 1995; 1993) y existen fincas productivas dentro del perímetro de esas áreas.

En contraposición a los criterios tipo restricción Booleana (dura), los criterios tipo factor condicionante, son de carácter continuo (suave),

y definen un grado de aptitud que va desde 0,0 hasta 1,0 (en este estudio se utilizó una escala en Byte, que va desde 0 hasta 255). Los factores condicionantes considerados fueron: altitud, pendiente, precipitación, temperatura, radiación solar, humedad relativa, déficit hídrico anual y número de meses secos. Estos criterios están cartografiados en los MDE, en unidades variadas (msnm, grados, mm, °C, MJ/m²/día, %) (Figuras 6 y 8), por lo que se tienen que estandarizar a la escala en Byte indicada, considerando la Función de membresía de cada criterio (Figura 11), de acuerdo a las ecuaciones 1, 2 y 3, implementadas por TerrSet (Clark University, 2024). En las Figuras 12 y 13 se presentan cada uno de los criterios condicionantes estandarizados.

Los criterios condicionantes (Ecuación 4 y 5), se estandarizaron con las funciones de membresía descritas anteriormente (Figura 11), ahora se requiere determinar los pesos de los factores (Ec. 4 y 5). Para la determinación de los pesos se utilizó una técnica de comparación por pares denominada Proceso de Jerarquías Analíticas (Saaty, 1977). Los pesos se obtienen del autovector principal de una matriz recíproca cuadrada de comparaciones por pares entre criterios. Las comparaciones establecen la importancia relativa entre dos criterios, en relación al objetivo planteado, en este caso adaptabilidad del cultivo de café. Los puntajes se asignan sobre una escala categórica de 9 puntos, de acuerdo al Cuadro 2. Esta escala, (Saaty 1977, 2008), permite comparar pares de criterios, tangibles o intangibles, con un solo número, sin una unidad o un origen, el cual es específico para cada situación, definiendo las prioridades en el par de criterios. Se elaboró la matriz

de comparación por pares, por consulta a expertos y revisión bibliográfica. El autovector principal de esta matriz se calculó mediante el software TerrSet (Clark University, 2024). La matriz y el autovector se presentan en el Cuadro 3. La matriz tiene una tasa de consistencia de 0,07. Este valor, indica la probabilidad de que los puntajes de la matriz se generen aleatoriamente. Según Saaty (1977), valores mayores a 0,10 deben ser re-evaluados.

Para culminar la EMC se efectuó la agregación de los criterios. Los criterios condicionantes estandarizados se multiplican por su peso, celda por celda, de acuerdo a la Ecuación 4, y luego los resultados se suman. Este producto, posteriormente se multiplicó por los criterios tipo restricción (cuerpos de agua y ciudades), según la Ecuación 5, para obtener el mapa final de aptitud para el cultivo de café en el estado Aragua. En la Figura 14 se presenta el mapa final resultante de la EMC.

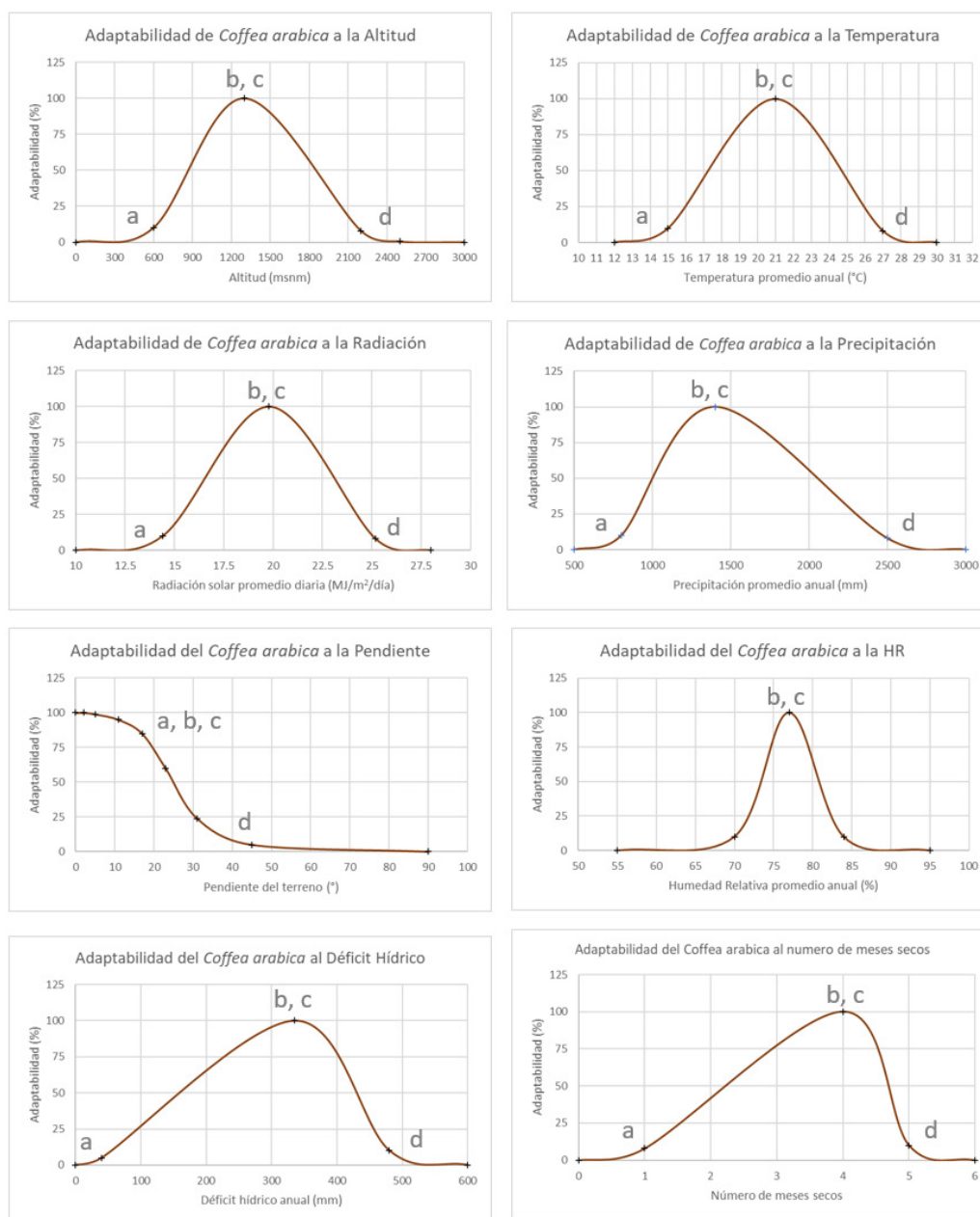
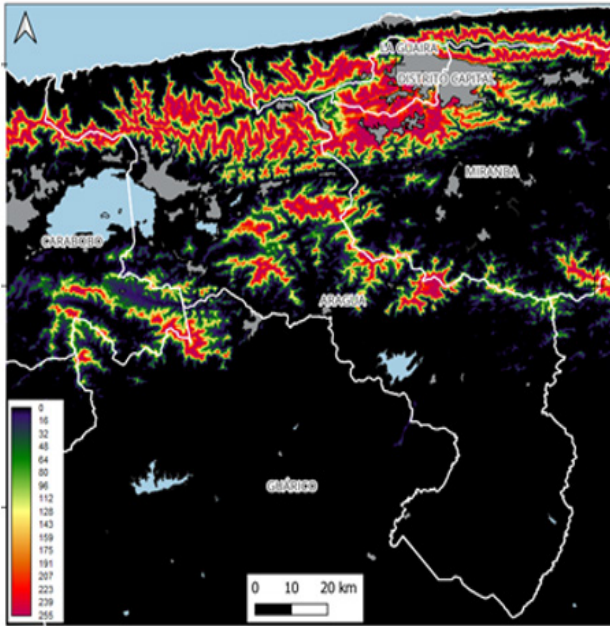
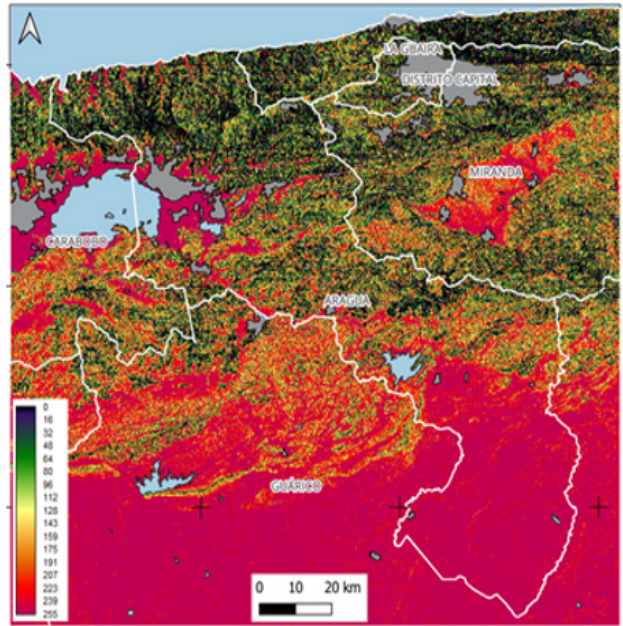


Figura 11. Funciones de adaptabilidad (membresía a conjuntos fuzzy) del *Coffea arabica* L. en el estado Aragua, Venezuela.

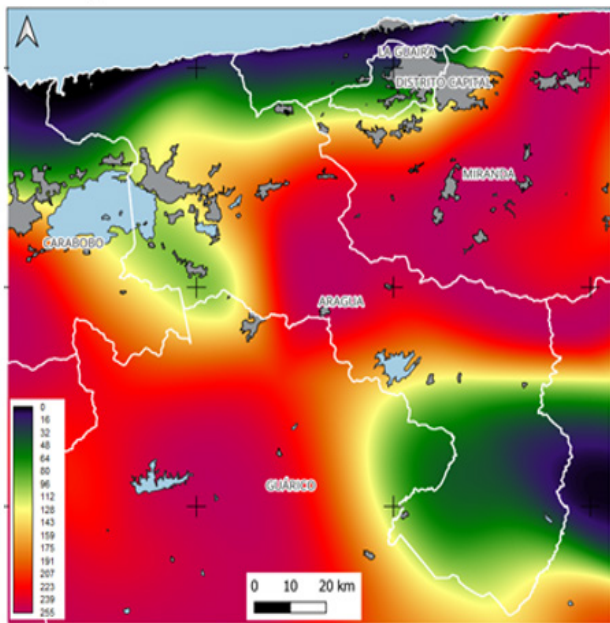
Altitud



Pendientes



Temperatura



Precipitación

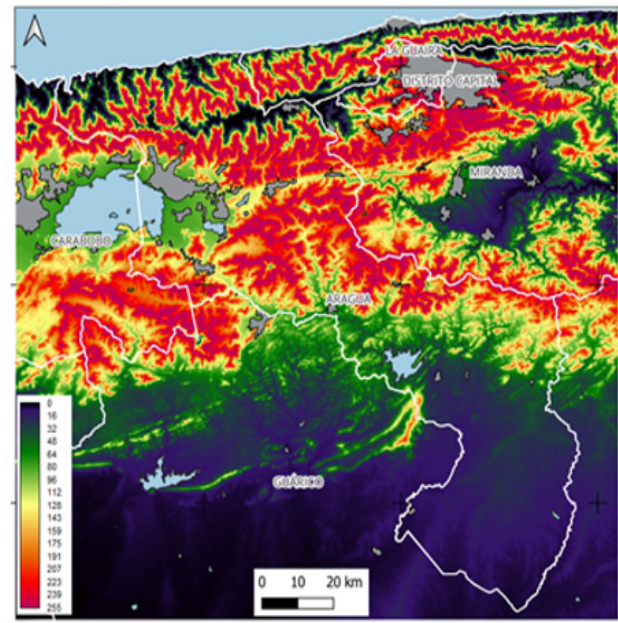
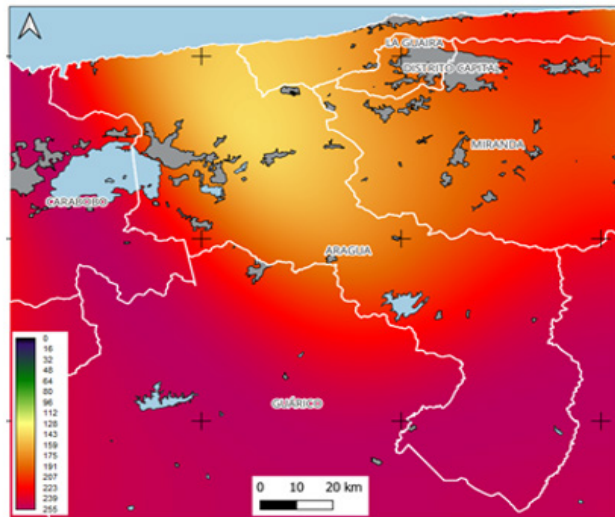


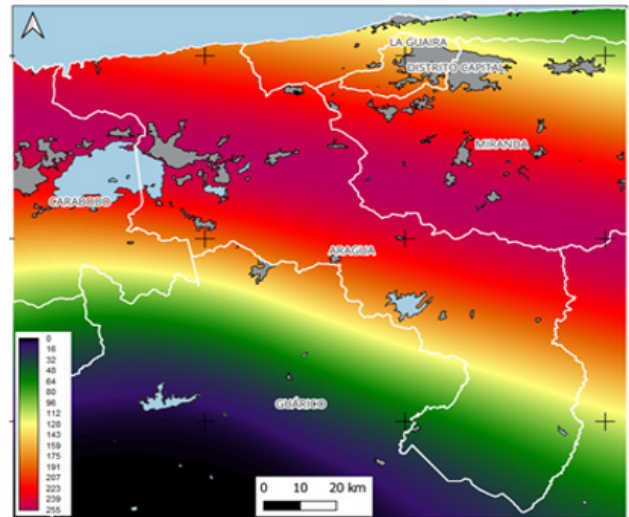
Figura 12. Estandarización de los criterios Topo-Climáticos (altitud, pendientes, temperatura y precipitación), de acuerdo a las funciones de adaptabilidad del café.

Nota: Los valores de la escala representan niveles de adaptabilidad al criterio correspondiente (tono oscuro, desde 0: mínima adaptabilidad; tonos rojos, hasta 255: máxima adaptabilidad).

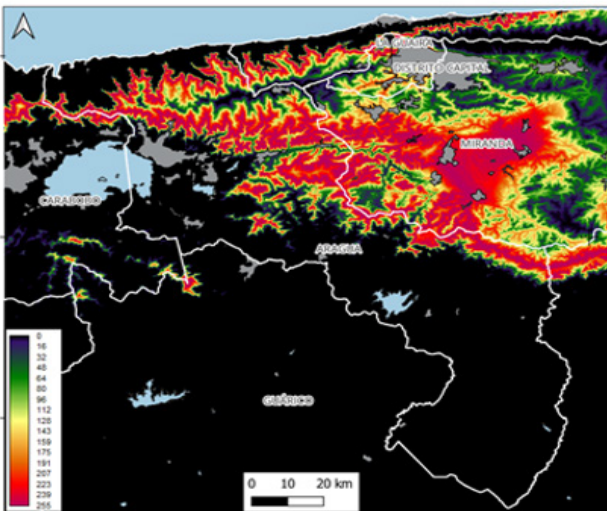
Radiación Solar



Humedad Relativa



Déficit Hídrico Anual



Número de Meses Secos

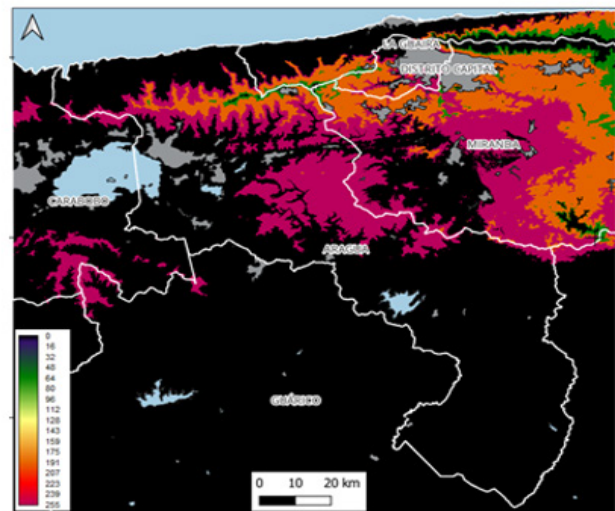


Figura 13. Estandarización de los criterios Topo-Climáticos (radiación solar, humedad relativa, déficit hídrico y número de meses secos), de acuerdo a las funciones de adaptabilidad del café.

Nota: Los valores de la escala representan niveles de adaptabilidad al criterio correspondiente (tono oscuro, desde 0: mínima adaptabilidad; tonos rojos, hasta 255: máxima adaptabilidad).

Evaluación del modelo de aptitud agroclimática

Para evaluar los resultados del modelo de EMC, se superpuso la red de puntos que representan las fincas cafetaleras del CAN de 1999 (CENATEL, 2014), sobre el mapa final de la EMC, cuyo sector

centro-norte se presenta en la Figura 15. Se determinó para cada punto el valor de aptitud correspondiente y con estas cifras se realizó un análisis de frecuencia, Cuadro 4, Figura 16. El 68,12% de las fincas se encuentran por encima del nivel medio de aptitud, siendo categorizadas, desde débilmente aptas, hasta muy fuertemente aptas. El 15,

Cuadro 2. Escala de pesos entre pares de criterios.

Condición del factor	Peso asignado
Sumamente menos importante	1/9
Muy fuertemente menos importante	1/7
Fuertemente menos importante	1/5
Moderadamente menos importante	1/3
Igualmente importante	1
Moderadamente más importante	3
Fuertemente más importante	5
Muy fuertemente más importante	7
Sumamente más importante	9

Cuadro 3. Matriz de comparación por pares de los criterios tipo factor condicionante y vector con los pesos resultantes.

Criterio	Altitud	Temperatura	Radiación	Precipitación	Pendientes	Hum. Relativa	Déficit Hídrico	Meses secos	Criterio	Peso
Altitud	1								Altitud	0,2641
Temperatura	1	1							Temperatura	0,2641
Radiación	1/3	1/3	1						Radiación	0,2008
Precipitación	1/3	1/3	1/7	1					Precipitación	0,0996
Pendientes	1/3	1/3	1/3	1/3	1				Pendientes	0,0740
Hum. Relativa	1/5	1/5	1/3	1/3	1/3	1			Humedad Relativa	0,0431
Déficit Hídrico	1/7	1/7	1/5	1/3	1/3	1	1		Déficit Hídrico	0,0312
Meses secos	1/9	1/9	1/7	1/5	1/3	1/3	1	1	Meses secos	0,0231
									Total	1

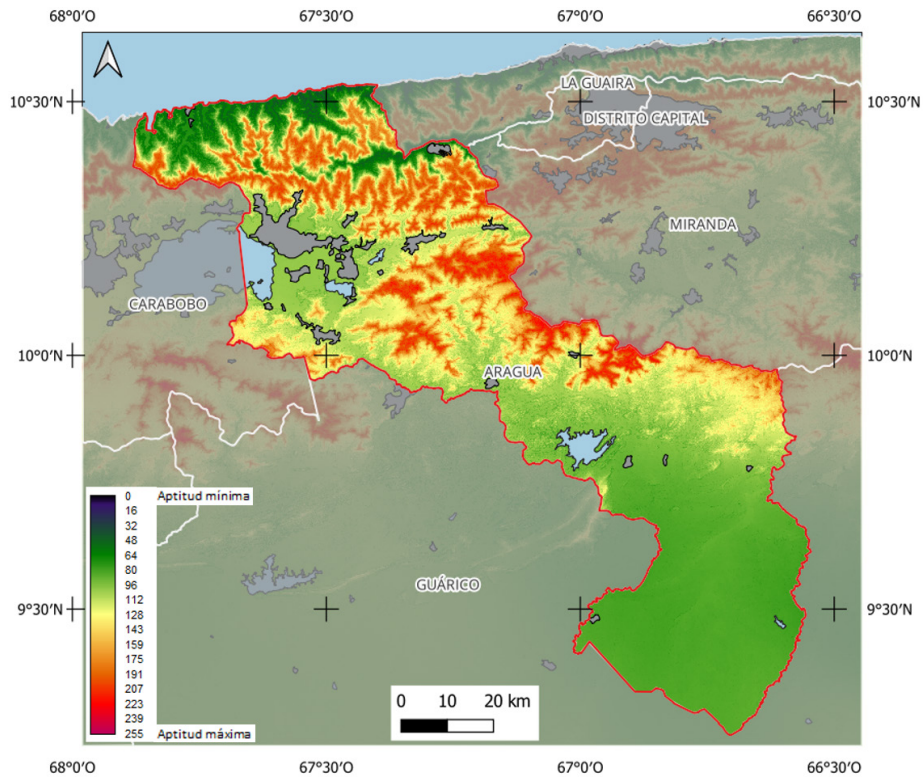


Figura 14. Resultado de la EMC con el mapa de aptitud agroclimática de las tierras del estado Aragua para el cultivo del café.

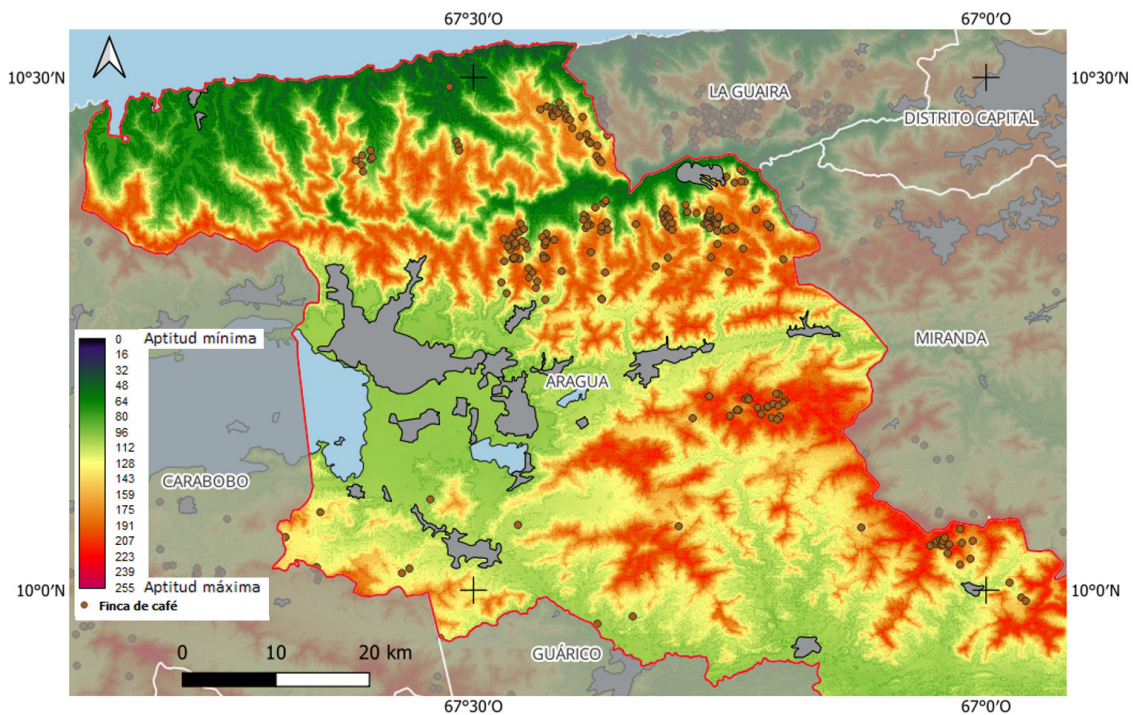
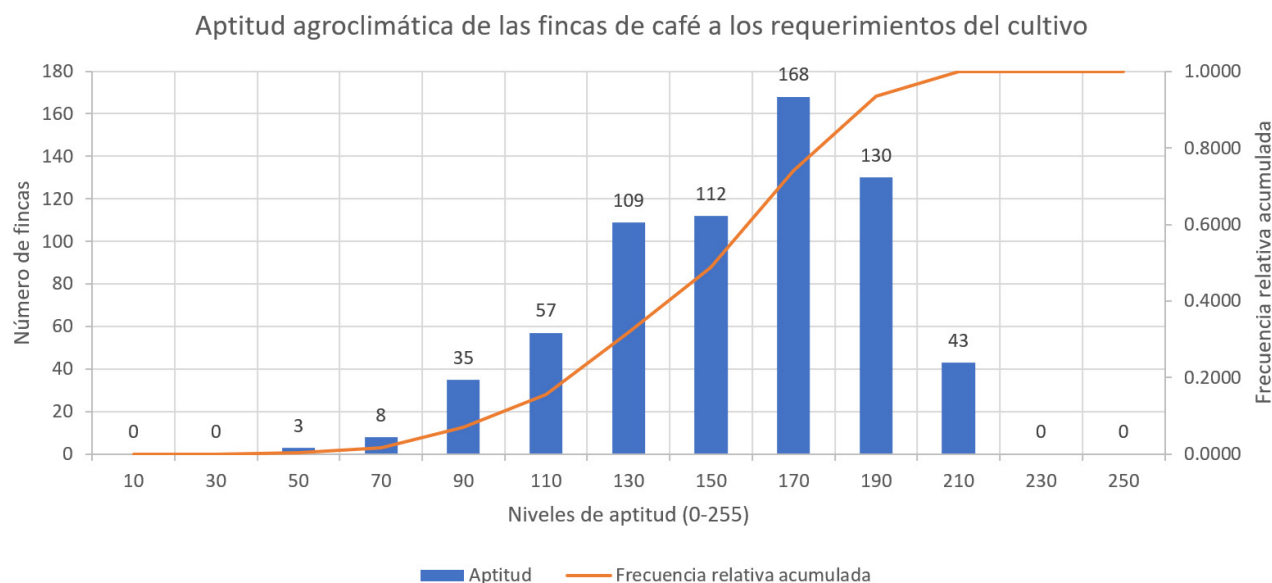


Figura 15. Ampliación del mapa de zonificación agroclimática del cultivo del café en el centro-norte del estado Aragua y superposición de fincas cafetaleras del Censo Agrícola Nacional.

Cuadro 4. Análisis de frecuencia de los niveles de aptitud agroclimática de las fincas de café del área de estudio.

Límite inferior	Límite superior	Centro de clase	Frecuencia absoluta	Frecuencia acumulada	Frecuencia relativa	Frecuencia relativa acumulada	Calificación Cualitativa
0	20	10	0	0	0,0000	0,0000	Absolutamente No Apto
20	40	30	0	0	0,0000	0,0000	Sumamente No Apto
40	60	50	3	3	0,0045	0,0045	Muy Fuertemente No Apto
60	80	70	8	11	0,0120	0,0165	Fuertemente No Apto
80	100	90	35	46	0,0526	0,0692	Moderadamente No Apto
100	120	110	57	103	0,0857	0,1549	Débilmente No Apto
120	140	130	109	212	0,1639	0,3188	Intermedio
140	160	150	112	324	0,1684	0,4872	Débilmente Apto
160	180	170	168	492	0,2526	0,7398	Moderadamente Apto
180	200	190	130	622	0,1955	0,9353	Fuertemente Apto
200	220	210	43	665	0,0647	1,0000	Muy Fuertemente Apto
220	240	230	0	665	0,0000	1,0000	Sumamente Apto
240	260	250	0	665	0,0000	1,0000	Absolutamente Apto
Totales			665		1,0000		

**Figura 16.** Análisis de frecuencia de los niveles de aptitud agroclimática de las fincas de café del área de estudio.

49% se encuentra en zonas evaluadas por el modelo desde débilmente no aptas, hasta muy fuertemente no aptas. El 16,39% se ubica en zonas intermedias entre apto/no apto. En términos de superficie, para estas tres categorías simplificadas, unas 30 177 ha (5,19% de las tierras disponibles en el estado), son consideradas como aptas; 536 512,48 ha son no aptas y 14 772,24 se encuentran en un nivel intermedio.

La existencia de fincas localizadas en zonas catalogadas como no aptas puede indicar que los criterios de adaptabilidad en el modelo (puntos de control de las funciones de adaptabilidad), o algunos de ellos, fueron muy estrictos, o que estas fincas utilizan sistemas de manejo mejorado que permiten superar los límites establecidos para el cultivo. Estas técnicas de manejo pudieran ser: variedades del cultivo más adaptadas, uso de la especie *C. canephora*, riego complementario, sombreado intenso y otras. Un ejemplo de ello lo constituye el campo experimental de FAGRO-UCV (Proyecto Eco-granja), donde se desarrolla una plantación de café a pequeña escala (0,5 ha), en una zona con un nivel de adaptabilidad entre 70 y 75 puntos de la escala (según la EMC), por lo que corresponde a una zona No Apta, sin embargo, allí se están obteniendo rendimientos y calidades satisfactorias, adoptando sistemas de manejo agroecológicos y riego complementario con sistema por goteo y fertirrigación (Abarca, 2021).

El hecho de encontrar 15,49% de fincas, históricamente aptas, en zonas catalogadas como no aptas por la EMC, y el 16,39% en zonas intermedias, pudiera deberse, tanto a estrategias de manejo diferenciadas, como a cambios en la disponibilidad de agua, afectada por los eventos de sequía documentados por Cortez *et al.* (2018), que pueden haber modificado la viabilidad de esas zonas previamente consideradas como aptas. Rodríguez *et al.* (2013) señalaron que la variabilidad interanual de la precipitación puede modificar las condiciones de aptitud agroclimática en una región, lo que sugiere que la zonificación obtenida en este estudio debe ser monitoreada periódicamente para detectar posibles cambios en las condiciones climáticas que puedan afectar la producción cafetalera a mediano y largo plazo.

CONCLUSIONES

Hallazgos

Se determinó que en el estado Aragua existe alrededor de un 5% de tierras con aptitud agroclimática para el cultivo de *C. arabica*, ubicadas en las zonas cafetaleras tradicionales del estado y en otras áreas de las serranías del Litoral y del Interior, con potencial para el cultivo.

Las zonas con aptitud intermedia, pudieran incrementar su potencial, utilizando sistemas de manejo que permitieran superar las limitaciones climáticas, tales como el sombreado, el riego localizado y la gestión agroecológica de insumos y procesos.

La Evaluación Multicriterio (EMC) con los Sistemas de Información Geográfica SIG, para la Zonificación Agroclimática (ZAC) y la Zonificación Agroecológica (ZAE) de cultivos, es una metodología sumamente conveniente dada su alta capacidad para incorporar y procesar múltiples criterios de análisis con distribución espacial, así como por su potencia para modelar los resultados con distintos parámetros de calibración y simulación.

La estandarización de los criterios como funciones matemáticas, permite el ajuste preciso de los requerimientos del cultivo a los criterios ambientales de evaluación. Las curvas de adaptabilidad del cultivo, definidas como funciones de membresía al conjunto difuso de adaptabilidad, determinan los niveles de ajuste del cultivo específico a cada criterio de evaluación, de una manera más real que con umbrales rígidos de adaptabilidad.

Implicaciones prácticas

Los datos de los sensores meteorológicos satelitales permiten suplir el déficit de estaciones terrestres de observación, o suplementar los datos faltantes de las series disponibles o de parámetros no registrados, lo que facilita la elaboración de los MDE de estos parámetros, requeridos en la simulación a través de la EMC, aunque se requiere la calibración de los datos satelitales con los registros de estaciones terrestres.

El mapa de adaptabilidad del cultivo ofrece una herramienta de decisión clave para los agricultores, inversionistas o planificadores, interesados en la expansión del rubro en el estado o para la migración de cafetales a zonas con mayores expectativas de productividad y calidad.

Los resultados de la EMC y el procedimiento en sí mismo, constituyen opciones metodológicas estratégicas para la adaptación al cambio climático global.

La EMC proporciona una metodología que aporta información cuantitativa para la selección de espacios dirigidos a los cafés de especialidad.

Las prácticas de manejo especial y para certificaciones de sostenibilidad (café agroecológico, orgánico, comercio justo, Rainforest Alliance, Bird-Friendly y otras), permiten ampliar los umbrales de adaptabilidad del cultivo, y pueden ser evaluadas con la metodología de EMC, pero se requiere investigación para cuantificar dicha ampliación.

RECOMENDACIONES

Los puntos de control de las funciones de adaptabilidad de los cultivos, dependen de cada cultivar, de su fisiología y genética, así como de las características de la región de evaluación. Se deben investigar y desarrollar las funciones de adaptabilidad de las distintas especies y variedades de los cultivos a zonificar con EMC, determinando los valores apropiados de los puntos de control y su ajuste a las regiones productivas. En particular se deben investigar los puntos de control de las especies y variedades de café de uso en el país, tanto de *Coffea arabica* como de *Coffea canephora*, para realizar la zonificación de estos rubros con mayor precisión.

Se debe evaluar y calibrar la correspondencia de las series de datos satelitales con relación a las series de datos de estaciones de observación terrestre.

Es necesario una amplia consulta a expertos para definir adecuadamente los pesos de los criterios en la Combinación Lineal Ponderada de la EMC.

Es necesario la actualización del Censo Agrícola Nacional (CAN), con propiedades de

geo-referencia, preferentemente con el levantamiento del parcelario catastral, esto permitiría analizar con precisión los resultados de los mapas de zonificación por EMC, además de todos los beneficios derivados de contar con el sistema catastral nacional.

Se debe integrar la metodología de EMC empleada, con modelos simulación de cultivos que gestionen la predicción climática estacional, para el pronóstico de rendimientos, bajo escenarios tendenciales y contrastantes de cambio climático.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación es financiada por el **FONACIT (Proyecto CFP N° 2024000102)**, como parte de un estudio integral para el desarrollo de un agroecosistema en la cuenca del río Güey, de la Cordillera de La Costa, del estado Aragua, en el cual se está fundando una plantación de café bajo sombra, de piso bajo, y en tal sentido deseo expresar mi profundo agradecimiento a esta institución.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abarca, O. 2021. Diseño espacial y temporal de un agroecosistema de policultivos en un área de Bosque Seco Tropical del centro-norte de Venezuela. Implementación y evaluación bajo el enfoque agroecológico. Fondo Nacional de Ciencia y Tecnología (FONACIT). Informe Técnico Final. Caracas. 50 pp.
- Abarca, O. 2010. Desarrollo de un modelo de geoprosamiento para la valoración productiva y tributaria de tierras agrícolas en Venezuela. Universidad Politécnica de Madrid. Tesis Doctoral. Madrid. 231 p. Disponible en: http://redgeomática.rediris.es/redlatingeo/2010/OSCAR_ABARCA.pd. Consultado: 19/06/2024].
- Allen, R.; L. Pereira; D. Raes; M. Smith. 2006. Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Estudio FAO. Riego y Drenaje 56. Roma. 298 p. Disponible en: <https://www.fao.org/4/x0490s/x0490s.pdf>. [Consultado: 25/10/2024].

- Allen, R.; L. Pereira; D. Raes; M. Smith. 1998. Crop evapotranspiration – Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage. Paper 56. Rome, Italy. Disponible en: [<https://www.fao.org/4/X0490E/X0490E00.htm>]. Consultado: 16/03/2025.
- Asociación Venezolana de la Industria de la Caficultura (ASICAF). 2023. Producción de café aumentó 14% en 2023 pero está por debajo de las proyecciones oficiales. Banca y Negocios. Disponible en: [<https://www.bancaynegocios.com/exclusivo-produccion-de-cafe-aumento-14-en-2023-pero-esta-por-debajo-de-las-proyecciones-oficiales/>]. [Consultado 18/06/2024].
- Benacchio, S. 1982. Algunas exigencias agroecológicas en 58 especies de cultivo con potencial de producción en el trópico americano. FONAIAP. Maracay. 202 p. Disponible en: [https://drive.google.com/file/d/1LVp_wJ-oV4vqxouYG7GwbC77ILNWgnb3/view?usp=drive_link]. [Consultado 11/09/2024].
- Ceballos, A. y J. López-Blanco. 2010. Delimitación de áreas adecuadas para cultivos de alternativa: una evaluación multicriterio-SIG. Tierra Latinoamericana. Vol. 28, No 2, pp 109-118. Disponible en: [<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57316058002>]. [Consultado 18/10/2024].
- Centro Nacional de Teledetección con fines Agrícolas (CENATEL). 2014. Infraestructura de Datos Espaciales (IDE) de CENATEL. Herramienta para la agricultura sustentable en beneficio de la biodiversidad. Fundación Instituto de Ingeniería. V Congreso Venezolano de Diversidad Biológica. 21-26/06/2014. Base de Datos del Censo Agrícola Nacional 1999. (Nota: Existe Base de Datos 2009, pero no estuvo disponible para este estudio).
- Clark University. 2024. Center for Geospatial Analytics. TerrSet. Disponible en: [<https://www.clarku.edu/centers/geospatial-analytics/terrset/>]. [Consultado: 05/12/2024].
- Comisión Venezolana de Normas Industriales (COVENIN). 2017. Café especiales. Covenin 5000:2017. FODENORCA. 5 p. Disponible en: [<https://sigbs.sencamer.gob.ve/cgi-bin/koha/opac-retrieve-file.pl?id=ba1694e2fbd288e99ba54f41e14e2344>]. [Consultado: 12/10/2024].
- Cortez, A.; B. Olivares, B.; R. Parra; D. Lobo; J. Rey; M. Rodríguez. 2018. Descripción de los eventos de sequía meteorológica en localidades de la Cordillera Central, Venezuela. Ciencia, Ingenierías y Aplicaciones, 1 (1): 23-45. Disponible en: [https://www.academia.edu/50586774/Descripci%C3%B3n_de_los_eventos_de_sequ%C3%ADa_meteorol%C3%B3gica_en_localidades_de_la_Cordillera_Central_Venezuela]. Consultado: 19/03/2025.
- De Lima, R.; L. Oliveira-Aparecido; G. Torsoni; A. Chiquitto; J. Moraes; G. Rolim. 2022. Agroclimatic zoning for the incidence of brown eye spot on coffee under climate change scenarios. Theoretical and Applied Climatology, 149(3), 1471-1496. Disponible en [<https://www.researchsquare.com/article/rs-1277245/v1>] Consultado: 09/03/2025.
- DSSAT. 2025. Decision Support System for Agrotechnology Transfer. Disponible en: [<https://dssat.net/>]. Consultado: 17/03/2025.
- Durán, A. 2012. Sistema de control de temperatura ambiente en la producción de alevines, basado en lógica difusa. Universidad Rafael Bellosó Chacín. Maestría en Ingeniería de Control y Automatización de Procesos. Trabajo de Grado. 90 p. Disponible en: [<https://virtual.urbe.edu/tesispub/0094436/>]. [Consultado: 10/11/2024].
- Eastman, R. 2024a. TerrSet liberaGIS. Geospatial Monitoring and Modeling System. Tutorial. Clark University. Worcester, EEUU. 369 p. Disponible en [<https://www.clarku.edu/centers/geospatial-analytics/>]. [Consultado: 05/12/2024].

- Eastman, R. 2024b. TerrSet liberaGIS. Geospatial Monitoring and Modeling System. Manual Clark University. Worcester, EEUU. 340 p. Disponible en <https://www.clarku.edu/centers/geospatial-analytics/>. [Consultado: 05/12/2024].
- Farfán, F. 2010. Café orgánico al sol y bajo sombrío. Una doble posibilidad para la zona cafetera de Colombia. Avances Técnicos CENICAFE No 399. Gerencia Técnica. Programa de Investigación Científica. 8 p. Disponible en: <https://biblioteca.cenicafe.org/bitstream/10778/360/1/avt0399.pdf>. [Consultado: 10/11/2024].
- Farfán, F. y A. Jaramillo. 2009. Sombrío para el cultivo del café según la nubosidad de la región. Avances Técnicos CENICAFE No 379. Gerencia Técnica. Programa de Investigación Científica. 8 p. Disponible en: <https://www.cenicafe.org/es/publications/avt0379.pdf>. [Consultado: 10/11/2024].
- Farreras, J. 2024. El café bajo sombra como Sistema agroforestal. Ediciones de la Universidad Ezequiel Zamora. Colección: Ciencia y Tecnología. 111 p. Disponible en: <http://libreria.unellez.edu.ve/wp-content/uploads/2024/04/El-cafe-bajo-sombra-como-sistema-agroforestal.pdf>. [Consultado: 12/11/2024].
- Food and Agriculture Organization (FAO). 2025. CropWat. Tierras y Aguas. Bases de datos y softwares. Disponible en: <https://www.fao.org/land-water/databases-and-software/cropwat/es/>. Consultado: 16/03/2025.
- Food and Agriculture Organization (FAO). 2024. FAOSTAT. Disponible en: <https://www.fao.org/faostat/es/#data/QCL>. [Consultado: 19/06/2024].
- Food and Agriculture Organization (FAO). 1996. Agro-ecological zoning. Guidelines, FAO Soils Bulletin 73. Soil Resources, Management and Conservation Service, FAO Land and Water Development Division. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy. 78 pp. Disponible en: <https://www.fao.org/4/w2962e/w2962e00.htm>. Consultado: 15/03/2025.
- Food and Agriculture Organization (FAO). 1979. Yield response to water. FAO Irrigation and Drainage Paper 33. Rome, Italy. 193 p. Disponible en: https://www.researchgate.net/profile/Amir-Kassam/publication/259842050_FAO_Irrigation_and_Drainage_Paper_33/links/5f537e04299bf13a31a0c745/FAO-Irrigation-and-Drainage-Paper-33.pdf. Consultado: 16/03/2025.
- Food and Agriculture Organization (FAO). 1976. A framework for land evaluation. FAO Soils Bulletin 32, Rome, Italy: FAO. Disponible en: <https://www.fao.org/4/x5310e/x5310e00.htm>. Consultado: 15/03/2025.
- Godet, M. 2007. Prospectiva Estratégica: Problemas y métodos. Cuadernos LIPSOR No 20. Prospektiker. San Sebastián, España. Disponible en: <https://archivo.cepal.org/pdfs/GuiaProspectiva/Godet2007.pdf>. Consultado: 19/03/2025.
- González, H. y J. Hernández. 2016. Zonificación agroecológica del *Coffea arabica* en el municipio Atoyac de Alvarez, Guerrero, México. Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM. No 90, pp 105- 118. Disponible en: <https://www.investigacionesgeograficas.unam.mx/index.php/rig/article/view/49329>. [Consultado: 06/09/2024].
- Grassi, C. Sf. Diseño y operación del riego por superficie. CIDIAT. Riego y Drenaje RD-36. Mérida, Venezuela. 415 p.
- Hansen, J.; A. Challinor; I. Amor; T. Wheeler; V. Moron. 2006. Translating climate forecast into agricultural terms: advances and challenges. Clim Res. Vol 33:27-51. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/235671002_Translating_climate_forecasts_into_agricultural_terms_Advances_and_challenges. Consultado: 17/03/2025.
- Hansen, J. 2005. Integrating seasonal climate prediction and agricultural models for insights into agricultural practice. Phil. Trans. R. Soc. B. 360: 2037-2047. Disponible en: <file:///C:/Users/oscar/Downloads/Hansen2005-RoyalSociety.pdf>. Consultado: 18/03/2025.

- INPARQUES. 1995. Plan de ordenamiento y reglamento de uso Parque Nacional “Henri Pittier”. Instituto Nacional de Parques. Gaceta Oficial N° 5010 (Extraordinaria) de 24 de noviembre de 1995. Disponible en: <https://es.scribd.com/document/163673401/poru-henri-pittier-pdf>. [Consultado: 06/05/2025].
- INPARQUES. 1993. Plan de ordenamiento y reglamento de uso Parque Nacional “El Ávila”. Instituto Nacional de Parques. Gaceta Oficial N° 4548 (Extraordinaria) de 26 de marzo de 1993. Disponible en: <https://es.scribd.com/document/695695048/Plan-de-Ordenamiento-y-Reglamento-de-Uso-Parque-Nacional-El-Avila>. [Consultado: 06/05/2025].
- Jaramillo, L. 2021. Zonificación agroecológica del cultivo de café (*Coffea arabica* L.) en la provincia de Loja, bajo escenarios de cambio climático. Escuela Superior Politécnica del Litoral. Facultad de Ingeniería Marítima y Ciencias del mar. Proyecto de Titulación. Ecuador. 77 pp. Disponible en: <https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/55448/1/T-6796%20Jaramillo%20Leonardo.pdf>. [Consultado: 07/09/2024].
- Jaramillo-Robledo, A. 2005a. Clima Andino y café en Colombia. CENICAFE. 192 p. Disponible en: <https://biblioteca.cenicafe.org/handle/10778/859>. [Consultado: 06/09/2024].
- Jaramillo-Robledo, A. 2005b. La redistribución de la radiación solar y la lluvia dentro de plantaciones de café (*Coffea arabica* L.). Rev. Acad. Colomb. Cienc. 29 (112): 371-382. 2005. Disponible en: <https://pdfs.semanticscholar.org/d38f/5c15dc883ff5dbde0aebaa300069dcd976e1.pdf>. [Consultado: 07/09/2024].
- Landaeta, L. 2019. Contribución al estudio de la pluviometría del estado Miranda (Venezuela) mediante Sistemas de Información Geográfica. Warisata, Revista de Educación. Vol. 1, No. 3, Septiembre - Diciembre 2019, pp. 146 – 166. Disponible en: <https://revistawarisata.org/index.php/warisata/article/view/72/209>. [Consultado: 06/05/2023].
- Lorençone, J.; L. De Oliveira; P. Lorençone; G. Torsoni, G. 2023. Agricultural zoning of *Coffea arabica* in Brazil for current and future climate scenarios: implications for the coffee industry. Environment, Development and Sustainability, 27(2):4143-4166. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/374723483_Agricultural_zoning_of_Coffea_arabica_in_Brazil_for_current_and_future_climate_scenarios_implications_for_the_coffee_industry]. Consultado: 09/03/2025.
- Moreno, F. 2012. Bases agroecológicas para el desarrollo de la caficultura en el municipio Junín y Córdoba del Estado Táchira-Venezuela. Universidad Internacional de Andalucía. 118 p. Disponible en: <https://dspace.unia.es/handle/10334/2334>. [Consultado: 05/09/2024].
- MINAMB. 2008. Datos mensuales de precipitación. Estaciones meteorológicas de Venezuela. Ministerio del Poder Popular para el Ambiente. Viceministerio del Agua. Dirección General de Cuencas Hidrográficas. Dirección de Hidrología, Meteorología y Ocenología. Disponible en: <file:///C:/Documents%20and%20Settings/julio/Mis%20documentos/Datos%20precipitacion/Estaciones%20en%20txt%20por%20Estados/amazonas.TXT>. [Consultado: 05/02/2010].
- NASA. 2024. Global Modeling and Assimilation Office (GMAO). Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications, Version 2 (MERRA-2). <https://gmao.gsfc.nasa.gov/reanalysis/MERRA-2/>. [Consultado: 10/11/2024].
- NASA. 2023a. Geospatial Interactive Online Visualization ANd aNalysis Infrastructure (GIOVANNI). NASA - EarthDATA. Disponible en: <https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/>. [Consultado: 06/05/2023].
- NASA. 2023b. Prediction Of Worldwide Energy Resources (POWER). Data Access Viewer (DAV). Disponible en: <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>. [Consultado: 06/05/2023].

- Olivares, B.; R. Hernández, A. Arias; J. Molina; Y. Pereira. 2020. Adaptabilidad eco-territorial del cultivo de tomate para la producción agrícola sostenible em Carabobo, Venezuela. *Idesia*, 38(2). Disponible: [https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-34292020000200095&lng=en&nrm=iso&tlng=en]. Consultado: 10/03/2025.
- Olivares, B. y R. Hernández. 2020. Aplicación de técnicas multivariantes en la aptitude de las tierras agrícolas en Carabobo, Venezuela. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 23(2020):61. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/342055977_Application_of_multivariate_techniques_in_the_agricultural_lands_aptitude_in_Carabobo_Venezuela]. Consultado: 10/03/2025.
- Olivares, B. y R. Hernández. 2019. Sectorización ecoterritorial para la producción agrícola sostenible del cultivo de papa (*Solanum tuberosum* L.) en Carabobo, Venezuela. *Ciencia Y Tecnología Agropecuaria*, 20(2), 323–338. [https://doi.org/10.21930/rcta.vol20_num2_art:1462]. Consultado: 10/03/2025.
- Pérez-Portilla, E. y D. Geissert-Kientz. 2006. Zonificación agroecológica de sistemas agroforestales: el caso Café (*Coffea arabica* L.) – Palma Camedor (*Chamaedorea elegans* Mart.). *Interciencia*, 31 (8): 556-562 p. Disponible en: [<https://www.redalyc.org/pdf/339/33911902.pdf>]. [Consultado: 07/09/2024].
- QGIS. 2024. Un Sistema de Información Geográfica libre y de código abierto. V3.34.8 LTR. Disponible en: [<https://www.qgis.org/es/site/>]. [Consultado: 18/06/2024].
- Ramírez, V. 2014. La fenología del café, una herramienta para apoyar la toma de decisiones. *Avances Técnicos CENICAFE*. No 441. Disponible en: [<https://doi.org/10.38141/10779/0441>]. [Consultado: 10/09/2024].
- Ramírez, V.; A. Jaramillo; J. Arcila. 2010a, Índices para evaluar el estado hídrico en los cafetales. *Cenicafe*, 61(1):55-66. Disponible en: [[https://www.cenicafe.org/es/publications/arc061\(01\)055-066.pdf](https://www.cenicafe.org/es/publications/arc061(01)055-066.pdf)]. [Consultado: 23/10/2024].
- Ramírez, V.; J. Arcila; A. Jaramillo; J. Rendon; G. Cuesta; H. Menza; C. Mejía; D. Montoya; J. Mejía; J. Torres; P. Sánchez; J. Baute; A. Peña. 2010b. Floración del café en Colombia y su relación con la disponibilidad hídrica, térmica y de brillo solar. *Cenicafe*, 61 (2):132-158. Disponible en: [[https://www.cenicafe.org/es/publications/arc061\(02\)132-158.pdf](https://www.cenicafe.org/es/publications/arc061(02)132-158.pdf)]. [Consultado: 23/10/2024].
- Rodríguez, M.; A. Cortez; B. Olivares; J. Rey; R. Parra; D. Lobo. 2013. Análisis espacio temporal de la precipitación del estado Anzoátegui y sus alrededores. *Agronomía Tropical*. Vol 63 (1-2). Disponible en: [https://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0002-192X2013000100006]. Consultado: 19/03/2025.
- Rodríguez, M.; A. Cortez; M. Núñez; F. Ovalles; J. Rey. 2006. Distribución espacial de las redes de estaciones meteorológicas en Venezuela. *INIA Divulga*, mayo-agosto 2006: 23-29. Disponible en: [http://sian.inia.gob.ve/inia_divulga/divulga_08/rid8_rodriguez_23-29.pdf]. [Consultado: 05/10/2024].
- Rojas, O. 1989. Determinación del potencial agroecológico para el cultivo del café (*Coffea arabica*) en Costa Rica. *Turrialba*: Vol. 39, No 3, pp 279-287. Disponible en: [<https://repositorio.catie.ac.cr/bitstream/handle/11554/10710/A0788e03-01.pdf?sequence=1>]. [Consultado: 05/09/2024].
- Romero-Cuellar, J.; N. Obregon-Neira. 2013. Aplicaciones de Sistemas Inteligentes en Ingeniería Agrícola. Editorial Universidad Surcolombiana. 181 p. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/280612940_Aplicaciones_de_Sistemas_Inteligentes_en_Ingenieria_Agricola]. [Consultado: 11/11/2024].
- Rossiter, D. y A. Van Wambeke. 1997. Automated Land Evaluation System ALES. Version 4.65 User`s Manual. Cornell University. Department of Soil, Crop & Atmospheric Sciences. SCAS Teaching Series No T93-2 Rev 6. Ithaca, USA. [https://www.css.cornell.edu/faculty/dgr2/soils/_static/legacy_sw/ales/ALES_V4.65_Manual.pdf]. Consultado: 17/03/2025.

- Ruiz, J.; G. Medina; I. González; H. Flores; G. Ramírez; C. Ortiz; K. Byerly; R. Martínez. 2013. Requerimientos agroecológicos de cultivos. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Libro Técnico No 3. 564 p. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/343047223>. [Consultado: 11/09/2024].
- Saaty, 1977. A scaling method for priorities in hierarchical structures. *J. Math. Psychology*, 15: 234-281. Disponible en: https://superdecisions.com/sd_resources/Paper_ScalingMethod.pdf. Consultado: [Consultado: 15/10/2024].
- Saaty, 2008. Relative Measurement and Its Generalization in Decision Making Why Pairwise Comparisons are Central in Mathematics for the Measurement of Intangible Factors The Analytic Hierarchy/Network Process. *RACSAM Rev. R. Acad. Cien. Serie A. Mat. VOL. 102 (2)*, 2008, pp. 251–318. Disponible en: <https://rac.es/ficheros/doc/00576.PDF>. [Consultado: 15/10/2024].
- Schmucker, K. 1984. Fuzzy sets, natural language, computations, and risk analysis. Computer Science Press. Maryland, EEUU. 192 p.
- Silva, O. y V. Sevilla. 2024. El cambio climático: una gran amenaza para el cultivo del café en el estado Lara. FUSAGRI. Disponible en: https://www.fusagri.com/post/cafe_lara/. Consultado: 09/03/2025.
- Stöckle C.; M. Donatelli; R. Nelson. 2003. CropSyst, a cropping systems simulation model. *Europ. J. Agronomy* 18 (2003): 289-307. Disponible en: <https://citeseerx.ist.psu.edu/t?repid=rep1&type=pdf&doi=5068fd05ada5a9d60ccf98d7f2cbef1733a61040>. Consultado: 18/03/2025.
- Tram, N.; N. Sieng; D. Khoi. 2023. Mapping agro-climatic zone for coffee crop in the Srepok River Basin. In *IOP Conf. Series: Earth and Environment Science*. Vol. 1170 (1), 10 pp. Disponible En: [\[https://www.researchgate.net/publication/370167698_Mapping_agro-climatic_zone_for_coffee_crop_in_the_Srepok_River_Basin\]](https://www.researchgate.net/publication/370167698_Mapping_agro-climatic_zone_for_coffee_crop_in_the_Srepok_River_Basin). Consultado: 10/03/2025.
- USGS. 2023. Earth Explorer. Disponible en: <https://earthexplorer.usgs.gov/>. [Consultado: 08/05/2023].
- Valencia, F. 2010. Café orgánico al sol y bajo sombrío. Una doble posibilidad para la zona cafetera de Colombia. Avances Técnicos 399 CENICAFE. Gerencia Técnica/Programa de Investigación Científica/septiembre 2010. Disponible en: <https://biblioteca.cenicafe.org/bitstream/10778/360/1/avt0399.pdf>. [Consultado: 23/11/2024].
- Villers, L.; N. Arizpe; R. Orellana; C. Conde; J. Hernández. 2009. Impactos del cambio climático en la floración y desarrollo del fruto del café en Veracruz, México. *Interciencia*, Vol. 34, No 5, pp 322-329. Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=33911403004>. [Consultado: 06/09/2024].
- Voogd, H. 1982. Multicriteria evaluation for urban regional planning. Phd Thesis. Delfsche Uitgevers Maatschappij. 388 pp. Disponible en: <https://pure.tue.nl/ws/files/3744610/102252.pdf>. [Consultado: 15/10/2024].
- Wintgens, J. (Ed). 2004. Coffee: Growing, Processing, Sustainable Production. A Guidebook for Growers, Processors, Traders, and Researchers. Wiley-VCH. 976 p.
- Zadeh, L. 1965. Fuzzy Sets. *Information and Control*. 8: 338-353. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S001999586590241X>. [Consultado: 09/11/2024].

ANEXO 1

Estaciones climatológicas seleccionadas para análisis estadístico

SERIAL	ESTACION	Alt (msnm)	LAT (WGS84)	LON (WGS84)
403	Rancho Grande-Regresiva	1076	10.3581	-67.6953
408	Chuao-Pasaguaca	33	10.4914	-67.5279
417	Santa Cruz-Edafológica	448	10.1620	-67.4838
424	La Morita	444	10.2288	-67.5372
426	EE Rancho Grande	1150	10.3494	-67.6846
447	Maracay-CENIAP	465	10.2871	-67.6004
450	EE Samán Mocho	416	10.0996	-67.8805
460	La Pereña	424	10.1810	-67.5767
466	Maracay-Base Aérea Sucre	434	10.2506	-67.6448
468	Gonzalito	452	10.2199	-67.5222
492	Bárbula	520	10.2780	-68.0175
502	Maiquetía	7	10.6000	-66.9500
563	Caracas-La Mariposa	980	10.4087	-66.9269
1343	San Felipe	332	10.3607	-68.7397
1354	Guarabao	269	10.2452	-68.8050
1359	Guataparo-Dique	510	10.1713	-68.0634
1435	Colonia Tovar	1790	10.4090	-67.2846
1436	Agua Fría	1736	10.3916	-67.1804
1475	Embalse Suata	525	10.2131	-67.3866
1483	Casupito	460	10.1433	-67.4411
1486	Santa Cruz de Aragua	446	10.1796	-67.5166
1494	Embalse Taguaiguay	442	10.1436	-67.5040
2299	Guanare-Aeropuerto	164	9.0317	-69.7538
2415	Guanapito	439	9.9145	-66.4036
2552	El Playón	212	9.5413	-66.8736
3220	EE San Nicolás	134	8.8097	-69.8176
3241	Banco de Los Cedros	136	8.9468	-69.7187
3506	Toro Negro	91	8.3778	-66.2417
4500	Cabruta	60	7.6466	-66.2510
4701	Ocumare de La Costa	23	10.4599	-67.7727
5018	EE El Laurel	1247	10.3672	-66.9029
5057	Caracas U.S.B.	1217	10.4155	-66.8819
6336	Naranjal-F.P.	103	10.3640	-68.6544
6361	Valencia-Aeropuerto	436	10.1521	-67.9458
9319	Maracay-Agronomía	443	10.2686	-67.6101
9350	El Cortijo	584	10.0782	-67.4200
9362	EE Bajo Seco	1854	10.4361	-67.2041

ANEXO 2

Análisis de regresión lineal para la variable Temperatura Media Mensual (T), en función de la Altitud (ALT)⁽¹⁾

Mes	Pendiente	Intercepto	Coef. Corr.	Coef. Determ.
	X	I	R	R ²
Enero	-0,0069	26,7447	0,9505	0,9034
Febrero	-0,0071	27,4531	0,9413	0,8861
Marzo	-0,0071	28,2473	0,9269	0,8592
Abril	-0,0065	28,4076	0,9245	0,8547
Mayo	-0,0061	28,1065	0,9413	0,8861
Junio	-0,0061	27,4617	0,9593	0,9202
Julio	-0,0059	27,0218	0,9654	0,9319
Agosto	-0,0059	27,1588	0,9684	0,9379
Septiembre	-0,0061	27,5602	0,9755	0,9515
Octubre	-0,0060	27,3995	0,9457	0,8943
Noviembre	-0,0063	27,2711	0,9460	0,8950
Diciembre	-0,0063	26,5251	0,9127	0,8330
Año	-0,0064	27,4464	0,9609	0,9233

⁽¹⁾: $T_{(i,j,k)} = M_{(i)} * ALT_{(j,k)} + I_{(i)}$. Donde: $T_{(i,j,k)}$, es la Temperatura media mensual en °C; $ALT_{(j,k)}$: es la altitud del terreno en msnm; i , es el mes del año; j y k , son la fila y columna respectivas de la celda de los mapas ráster de altitud y temperatura.

ANEXO 3

Análisis de regresión lineal múltiple para la variable Evaporación Media Mensual (EV), en función de la Altitud (ALT), Temperatura (T), Precipitación (P), Humedad Relativa (HR) y Radiación Solar (RAD)⁽²⁾

Mes	Pendiente					Intercepto			Coef. Corr.		Coef. Determ.	
	X1	X2	X3	X4	X5	I	R	R ²	R	R ²		
Enero	0,0489	14,2568	-0,6146	-2,4876	-3,5009	70,2992	0,9659	0,9329	0,9659	0,9329		
Febrero	0,0397	12,0990	-0,7240	-2,7461	-3,0514	132,7949	0,9554	0,9128	0,9554	0,9128		
Marzo	0,0076	10,5104	-1,4844	-2,1474	5,7295	-1,9135	0,9462	0,8952	0,9462	0,8952		
Abril	-0,0020	6,9161	-0,7659	-3,4486	-4,6998	400,2290	0,9704	0,9416	0,9704	0,9416		
Mayo	-0,0295	3,6402	-0,1672	-2,5458	4,6835	202,3069	0,9302	0,8652	0,9302	0,8652		
Junio	-0,0388	0,7640	-0,1206	-2,0017	3,4346	249,2207	0,8892	0,7906	0,8892	0,7906		
Julio	-0,0262	3,2177	-0,1393	-1,0209	2,0985	142,1555	0,8754	0,7664	0,8754	0,7664		
Agosto	-0,0164	4,2720	-0,0808	-0,8953	1,9433	94,2624	0,8581	0,7363	0,8581	0,7363		
Septiembre	-0,0011	5,9931	0,0053	0,2216	2,8752	-84,8156	0,8344	0,6963	0,8344	0,6963		
Octubre	-0,0139	5,4401	-0,0432	0,7280	3,3230	-101,8071	0,8938	0,7989	0,8938	0,7989		
Noviembre	-0,0164	5,6745	-0,0605	-1,1385	3,8306	34,9459	0,9414	0,8861	0,9414	0,8861		
Diciembre	-0,0102	6,3921	-0,3118	-3,1125	2,5221	210,8759	0,9649	0,9311	0,9649	0,9311		
Año	0,1452	121,9178	-0,1878	-22,7460	21,9692	380,5624	0,9490	0,9005	0,9490	0,9005		

(2): $EV_{(i,j,k)} = X1*ALT_{(i,j)} + X2*T_{(i,j,k)} + X3*P_{(i,j,k)} + X4*HR_{(i,j,k)} + X5*RAD_{(i,j,k)}$. Donde: $EV_{(i,j,k)}$ es la Evaporación media mensual en mm; $P_{(i,j,k)}$ es la Precipitación media mensual en mm; $HR_{(i,j,k)}$ es la Humedad Relativa media mensual en %; $RAD_{(i,j,k)}$ es la Radiación Solar media mensual en MJ/m²/día; i, es el mes del año; j y k, son la fila y columna respectivas de la celda de los mapas ráster de Evaporación, Altitud, Temperatura, Precipitación, Humedad Relativa y Radiación Solar.