

Zonificación agroecológica del *Coffea arabica* en el municipio Atoyac de Álvarez, Guerrero, México

Recibido: 4 de mayo de 2015. Aceptado en versión final: 29 de enero de 2016.
Versión en línea (pre-print): 1 de abril de 2016.

Humberto Antonio González González*

José Ramón Hernández Santana**

Resumen. Las zonas agroecológicas del *Coffea arabica* son aquellas que presentan las condiciones y características del potencial biofísico favorables para su producción con óptimos rendimientos. El análisis de las condiciones geomorfológicas, del régimen hidrotérmico y de la cobertura edáfica en el municipio Atoyac de Álvarez, estado de Guerrero, México, y su representación cartográfica, mediante plataformas SIG, permitió identificar las áreas con potencialidades diferenciadas para el cultivo del *Coffea arabica* con vistas al establecimiento de su zonificación agroecológica. El enfoque sistémico y el procesamiento automatizado de la información propició la identificación de las áreas con potencial óptimo, medio, bajo y muy bajo. Los potenciales con una aptitud natural óptima se localizan en las zonas de montañas bajas, entre 1 100 a 1 500 msnm, con pendientes entre 1.1° hasta 18°, considerándose pendientes

suaves y moderadas; con precipitaciones entre los 1 500 a 2 000 mm, en zonas semicálidas con espectro térmico de 18 °C a 22 °C y sobre suelos Acrisoles y con una clave jerarquizada Ah+Bh+Hh/2, con unidad primaria Acrisol. En el municipio la superficie de potenciales óptimos alcanza las 7 163.47 ha; la de medio, las 28 143.75 ha; la de bajo, las 62 130.65 ha, y la de potencial muy bajo unas 58 411.38 ha. Por su contenido, este enfoque y metodología pueden ser implementados en cualquier marco geográfico, adecuándose a las escalas cartográficas y evaluando las distintas apreciaciones agroecológicas, como aportación a las políticas y decisiones gubernamentales o empresariales para la planeación y el fomento de las áreas cafetaleras.

Palabras claves: zonificación agroecológica, *Coffea arabica*, potenciales físico-geográficos, estado de Guerrero, México.

* Unidad Académica de Ciencias en Desarrollo Regional, Universidad Autónoma de Guerrero, México. Email: hgonzalez02@yahoo.com

** Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México, D. F. Email: santana@igg.unam.mx, hernandezsantanajr@hotmail.com

Cómo citar:

González G., H. A. y J. R. Hernández S. (2016), "Zonificación agroecológica del *Coffea arabica* en el municipio Atoyac de Álvarez, Guerrero, México", *Investigaciones Geográficas, Boletín*, núm. 90, Instituto de Geografía, UNAM, México, pp. 105-118, dx.doi.org/10.14350/rig.49329.

Agroecological zoning of *Coffea arabica* in the Atoyac de Álvarez municipality, Guerrero state, México

Abstract. Costa Grande, the largest coffee-producing region in the state of Guerrero, is where the lowest yields are obtained at the state level: An average 249 kg per ha, according to Sagarpa *et al.* (2011). This may be due not only to the low plant density in the area (approximately 1 274 plants per hectare), but also to the lack of chemical fertilization. It is estimated that chemical fertilizers are applied to only 0.2% of the coffee plants, and only 3% of them benefit from the manure added to the soil. With the aim to establish agro-ecological areas for *Coffea arabica* (*i.e.*, those with the most favorable agricultural conditions and the highest biophysical potential for optimum yields) a territorial survey was carried out in the municipality of Atoyac de Álvarez, Guerrero analyzing geomorphological, hydrothermal and edaphic maps based on GIS platforms. Six map sheets at a scale of 1:50 000 (INEGI, 2009) were employed so as to cover the entire area of study. On these maps the altitude, inclination, climate (temperature, rainfall) and soil types that were compatible with the agronomic requirements of *Coffea Arabica* were identified and marked out. Rainfall, temperature and soil type data were obtained from maps at a scale of 1:250 000 (INEGI, 2009) transformed from vector to raster formats so as to facilitate automated processing. For the morphometric evaluation of the relief, a digital elevation model was built with measurements at each 20 m so as to obtain an hypsometric gradient of 100 m and the classification of inclination into four classes: 0.1° to 18° (32%), 18.1° to 25° (33-47%), 25.1° to 40° (48-84%), and over 40° (> 84%). Central to the agro-ecological zoning of coffee is the concept of agro-ecological potential, as the set of quantitative and qualitative requirements on the natural environment conducive to the proper development of the

coffee plant. The relationships between the different variables and the determination of their potentials, as well as the physical-geographical zoning of *Coffea Arabica*, depended on the reclassification of selected variables and their spatial analysis based on GIS using the software ILWIS 3.31 with a view to obtaining an integrated natural potential model. Agro-ecological areas with optimal, medium, low and very low potentials for the production of this variety of coffee were defined. Optimal areas are located at moderate-to-weak mountain slopes (1.1° to 18°) with Acrisols (hierarchical key Ah+Bh+Hh/2) in semi-warm climates (18 ° to 22 °C) with a rainfall regime between 1 500 and 2,000 mm and at an altitude between 1,100 and 1 500 m. They extend over an area of 7 163.47 ha. Medium-potential areas cover 28 143.75 ha, low-potential areas 62 130.65 ha, and very-low potential areas 58 411.38 ha. This agro-ecological zoning of *Coffea arabica* is a valuable technical instrument based on national and international experiences and information on the natural conditions prevalent in the municipality of Atoyac de Alvarez. The updating of a database on geomorphological, climatic and soil conditions will help to devise strategies for the achievement of higher crop yields. This approach and methodology can be implemented in any geographical setting with the necessary map scales adjustments and evaluation of the local agro-ecological features. It has the potential to contribute to government and business initiatives alike for the planning and management of coffee areas of their promotion.

Keywords: Agro-ecological zoning, *Coffea arabica*, physical-geographical potential, Guerrero, Mexico.

INTRODUCCIÓN

El café es un producto agrícola de gran relevancia mundial; ocupa el segundo lugar en la comercialización global, solo detrás del petróleo (Pineda y Suárez, 2014). Lo cultivan 20 millones de productores en 56 países y México ocupa el séptimo lugar en este rubro, después de Brasil, Vietnam, Colombia, Indonesia, India y Etiopía, con una participación en los últimos años de poco más de 4 millones de sacos (SAGARPA, 2011b), distribuidos en quince estados, de los cuales Chiapas, Veracruz, Oaxaca, Puebla, Guerrero e Hidalgo son los principales productores. La superficie de cultivo es superior a las 680 000 ha, distribuidas en 58 regiones y 404 municipios, lo que genera numerosos empleos y constituye la principal fuente

de ingresos de muchos pequeños productores y de 17 grupos indígenas del país (SAGARPA, 2011b).

En México el cultivo del café está localizado en las montañas de las vertientes del Océano Pacífico y del Golfo de México (SAGARPA, 2005), desde los 100 hasta casi los 2 000 msnm. Sin embargo, la zona óptima para su desarrollo y producción se ubica entre los 700 a 1 300 msnm (Fundación PRODUCE, 2003). Por su distribución altitudinal, el 21.5% de las plantaciones se ubica hasta los 600 msnm; de 600 a 900 msnm, el 43.5%; y el 35% restante son parcelas por encima de los 900 msnm (SAGARPA, 2005).

Para la identificación de las áreas adecuadas para este cultivo se consideran fundamentales la profundidad efectiva, la textura y la estructura del suelo, el nivel de erosión, el contenido de materia

orgánica y de salinidad, y su nivel de pedregosidad. Desde el punto de vista geomorfológico, siempre debe evaluarse la altitud sobre el nivel del mar (msnm) y los valores de inclinación de las laderas. Soto *et al.* (2001) estiman que la radiación solar, la temperatura, la lluvia en cantidad y distribución a través del año, la altitud y el fotoperiodo son factores determinantes para el crecimiento y la producción. Otros autores, como Valencia (1988), consideran que la temperatura y la lluvia son los factores más influyentes.

Un elemento morfométrico importante del relieve es la pendiente, pues su acentuación hace extremadamente difíciles las labores, ocurriendo erosión de los suelos y reducción de rendimientos, e incluso intensos procesos de remoción en masa (Cortés, 2011). Cuando la pendiente es igual o menor a 18°, se puede plantar con cualquier densidad, mientras en pendientes superiores a 18° solo se siembra con densidades medias, utilizando medidas de conservación de suelos (Soto *et al.*, 2001).

El cafeto, aún cuando es tolerante a un amplio espectro de condiciones ecológicas, requiere un determinado régimen hidrotérmico para su desarrollo, definido según diferentes criterios. Según Coste (1968), las precipitaciones por debajo de los 1 000 mm, pero bien distribuidas, determinan un carácter aleatorio y una producción fluctuante; Carvajal (1972) considera los 1 000 mm como mínimo absoluto y Pérez (1989) plantea que por encima de los 3 000 mm aparecen correlaciones negativas respecto a la cosecha. El rango de precipitaciones óptimas para el café varía desde los 1 000 a los 3 000 mm (Maestri y Barros, 1981), soportando incluso épocas no muy prolongadas de sequía (Maestri y Barros, 1981; Vega, 1995; López, 2011), aunque diferentes estudios ubican rangos óptimos variables, que van desde los 1 600 a 1 800 mm anuales hasta un rango más complejo de 1 800 a 2 800 mm (Vega, 1995).

Las temperaturas no deben sobrepasar ciertos rangos para evitar la marchites de la flores y que se inhiba el crecimiento de la planta, debiendo oscilar entre 16 °C y 28 °C, siendo óptima a 24 °C (Soto *et al.*, 1998), aunque Peña (1987) considera al intervalo entre los 16 °C y los 22 °C, como el mejor para el desarrollo productivo del cafeto, y según la DGCA

del Ministerio de Agricultura del Perú (DGCA, s/f), entre 18 °C y 22 °C. Según Pérez (1989), para la especie *arabica*, el promedio oscila entre 12 °C y 21 °C, mientras Ortolani (1968) plantea que los índices térmicos medios más adecuados para el café están entre 19 °C y 21 °C, y que temperaturas superiores o inferiores reducen la producción. Otros autores, como Osti-Nava (1953) y Guindel (1962), señalan que la temperatura promedio debe fluctuar entre 20 °C y 26 °C; Vega (1995) sugiere el intervalo térmico más favorable entre 17 °C y 23 °C, con una oscilación diaria máxima de 10 °C, la mínima media entre 15 a 17 °C y la máxima media entre 25 a 27 °C, y para Maestri y Barrios (1981) el óptimo está entre los 18 y los 21 °C.

Los suelos en condiciones de pendiente abrupta no favorecen el cultivo, pues presentan problemas con la erosión hídrica y reducen la fertilidad del suelo (Cabezas, 1999), por lo que la pendiente no debe presentar un declive superior al 50% (26.5°) para que se faciliten las labores agronómicas (Arango, 2007). Se sugieren suelos ondulados, que posean pendientes menores al 40% (21°) (Zuviria y Valenzuela, 1994). Por otra parte, los suelos cafetaleros requieren ser profundos, permeables, friables y de buena textura (Vega, 1995; Alulima, 2012), y los suelos arenosos, sueltos, que no retienen humedad, no son adecuados, así como tampoco los suelos compactos, arcillosos y de escaso drenaje (Rojas, 1987; López, 2011). Se considera dentro de los requerimientos agroecológicos para el café que la textura sea media, con buena estructura y alta cantidad de macro y microporos (Küpper, 1981). Además, el contenido de materia orgánica en el suelo debe estar entre 2 y 4%, y el pH entre 4.5 y 5.5 (DGCA, s/f).

Es conocido que para lograr un adecuado crecimiento y producción de los cultivos es imprescindible tener en cuenta las condiciones agroecológicas de la región (Soto *et al.*, 1998). En este sentido, los trabajos de zonificación agroecológica revisten gran importancia, pues contribuyen a una adecuada planeación de la agricultura de plantaciones y de cultivos menores, garantizando las potencialidades productivas y los mejores rendimientos de las cosechas.

El objetivo central del presente trabajo se enfoca en la elaboración de la zonificación agroecológica

de *Coffea arabica* en el municipio Atoyac de Álvarez, estado de Guerrero, a partir del análisis de las características de sus condiciones geomorfológicas (altitud y pendientes), climáticas (precipitación y temperatura media anual) y edafológicas (textura, profundidad efectiva y pH del suelo) para su desarrollo, como aportación a las políticas y decisiones municipales y estatales de planeación y fomento de las áreas cafetaleras.

ZONIFICACION AGROECOLÓGICA: ALGUNOS ANTECEDENTES

Zonificar la tierra con fines de planificación del uso de los recursos rurales, consiste en separar áreas con similares potencialidades y limitaciones para el desarrollo (FAO, 1997). En este sentido, en 1978, se desarrolló el proyecto *Zonas Agroecológicas* (ZAE) como primer ejercicio en la aplicación de la evaluación de tierras a una escala continental. La metodología usada fue innovadora para caracterizar extensiones de tierra por medio de información cuantificada de clima, suelos y otros factores físicos, que se utilizan para predecir la productividad potencial de los cultivos, lo que permite identificar unidades geográficas con potencial ecológico para su evaluación (Espinosa y Roquera, 2007), también mediante el establecimiento de tipologías (Gabriel, 2003).

Las zonas agroecológicas se definen como aquellas que tienen combinaciones similares de clima y características de suelo, y el mismo potencial biofísico para la producción agrícola, presentando un rango específico de limitaciones y potencialidades para el uso de tierras (FAO, 1997). De acuerdo con este criterio, la zonificación agroecológica se entiende como la delimitación cartográfica de la capacidad natural para determinado cultivo, de acuerdo con las características agroclimáticas y fisio-edáficas de cada zona y a las necesidades de dicho cultivo a determinadas condiciones ambientales (FAO, 1997), así como, a “su capacidad de conservación del potencial productivo del área” (Benacchio, 1984).

La metodología desarrollada por la FAO para estos fines fue diseñada e implementada para sis-

temas automatizados de procesamiento de datos, dado que la naturaleza de su análisis implica la combinación de capas de información espacial para la definición de zonas, y se soporta en plataformas de Sistemas de Información Geográfica (SIG) (FAO, 1997). El nivel de detalle con que se define una zona depende de la escala del estudio y, en ocasiones, de la capacidad del equipamiento para el procesamiento de los datos.

Los principales intentos de zonificaciones del cultivo de *Coffea arabica* se han desarrollado considerando variables climáticas e hídricas. Ortolani (1968) realizó estudios en Brasil sobre la viabilidad del café, a pleno sol, en la zona de Espírito Santo, clasificando las áreas en aptas, marginales e inadecuadas, basándose en levantamientos climáticos. Fueron tomadas las siguientes consideraciones: a) Aptas, con temperatura media anual entre 18 y 22 °C, con deficiencias hídricas menores de 150 mm; b) Marginales, con isotermas anuales mayores de 22 °C; c) Marginales, con isotermas anuales mayores de 22 °C, con deficiencias hídricas superiores a 150 mm y d) Inadecuadas, por carencia térmica, con temperaturas medias anuales inferiores a 17 °C.

En el caso del *Coffea arabica* en Cuba, Suárez Venero *et al.* (2006) zonificaron las montañas de Nipe-Sagua-Baracoa, al oriente del país, evidenciando el significado de la distribución anual de las precipitaciones por encima de los 1 500 mm; mientras que González (2000) y González *et al.* (2001) consideraron los parámetros de profundidad efectiva del suelo y la precipitación para determinar las zonas de potenciales agroecológicos favorables al café, en el municipio Manicaragua, en Cuba central, arrojando que las zonas con potencial óptimo, con rendimientos de 2.57 t/ha, presentan precipitaciones entre 1 800-2 200 mm, con una profundidad efectiva del suelo mayor de 60 cm, en pendientes menores de 30% (16.7°), con temperatura entre 19 y 25 °C, localizados en montañas bajas (300 a 900 msnm). En este sentido, las potencialidades pluviales se corresponden con los ulteriores criterios de Suárez Venero *et al.* (2006).

En otros estudios, González (2006) y Garea *et al.* (2008) consideraron los parámetros de pro-

fundidad efectiva del suelo, precipitación, temperatura, altitud, pendiente, contenido de materia orgánica y grado de erosión, alcanzando valores óptimos similares.

ÁREA DE ESTUDIO

La zona cafetalera de Guerrero corresponde a una de las pocas selvas tropicales en el mundo con altitudes de más de 1 000 msnm, donde el café bajo sombra se ha adaptado favorablemente. A su vez, la salud de los microambientes de la selva alta y las condiciones rústicas de producción de café, la existencia de 42 000 ha de fincas a más de 900 msnm y la adaptación de variedades, que aportan calidad en taza (typica y bourbon), revelan el potencial del estado para producir café de alta calidad (SAGARPA, 2008).

El área de estudio está constituida por 36 ejidos y bienes comunales, ubicados dentro del municipio

de Atoyac de Álvarez (Figura 1), y se localiza entre los 17° 04' y 17° 34', de latitud norte, y los 100° 05' y 100° 34', de longitud oeste, conformando los municipios de la región Costa Grande de Guerrero. Posee una superficie de 155 845 ha; limitando al norte con los municipios Tecpan de Galeana, San Miguel Totolapan y General Heliodoro Castillo; al este con Coyuca de Benítez y Benito Juárez; al sur con los municipios de Coyuca de Benítez y Benito Juárez y al oeste con los municipios de Benito Juárez y Tecpan de Galeana.

El café en el estado de Guerrero se cultiva a lo largo de la Sierra Madre del Sur y se extiende paralelamente a la costa del Pacífico, con una anchura promedio de 100 km, la cual recorre el estado de Guerrero en toda su longitud (SAGARPA, 2011b), y constituye una de las cuatro zonas cafetaleras del país (SAGARPA, 2011a). Atoyac de Álvarez es su principal centro cafetalero con 21 753.2 hectáreas de cultivo y una producción de 30 018.2 toneladas en 2007 (SAGARPA, 2011c).

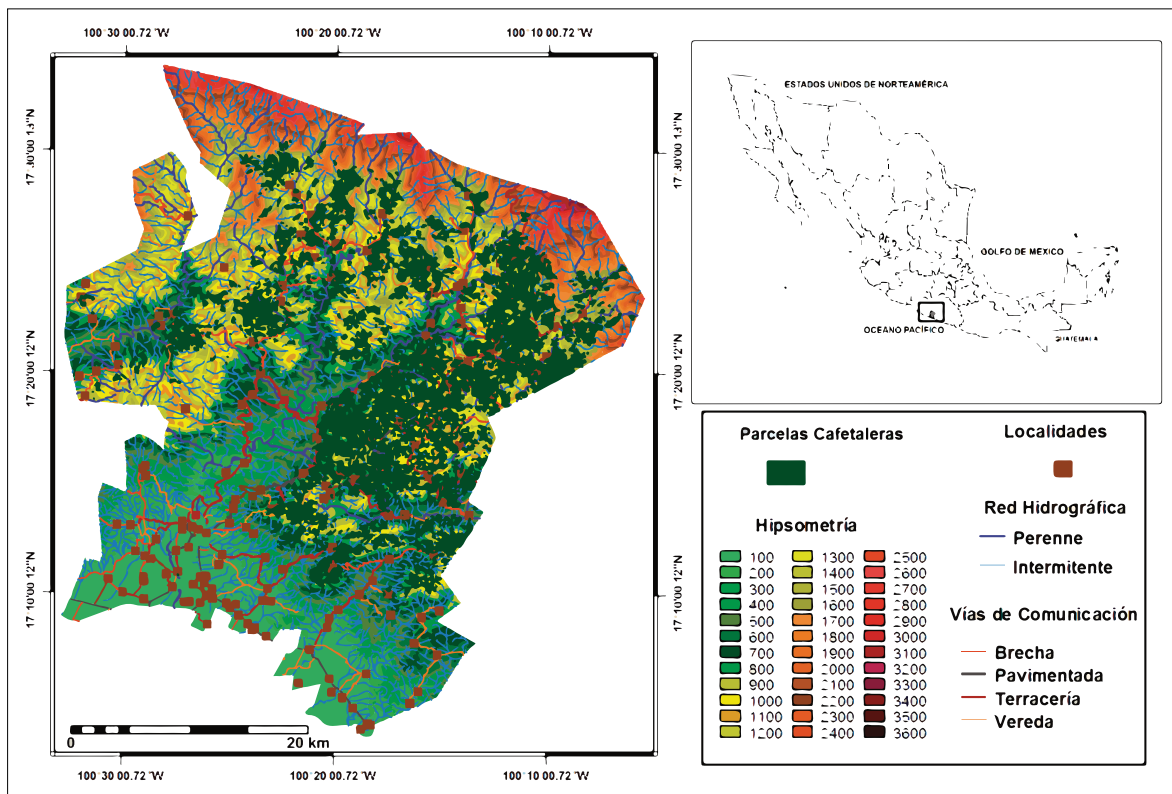


Figura 1. Área de estudio: municipio Atoyac de Álvarez, Guerrero, México (INEGI, 2009).

Dentro de las principales actividades económicas del área se encuentran las agrícolas, con predominio del cultivo del café y del coco, así como maíz, frijol, chile, jitomate, sandía, pepino y ajonjolí. La actividad pecuaria está constituida por ganado bovino criollo, porcino, ovino, caprino y equino. Actualmente, en su cobertura vegetal sobresalen el bosque mesófilo de montaña, el bosque de pino, el bosque de encino, el bosque mixto de encino-pino, la selva baja caducifolia, la selva mediana subcaducifolia, la selva mediana subperennifolia y vegetación hidrófila de tular.

MATERIALES Y MÉTODOS

Materiales topográficos y físico-geográficos

Para la zonificación agroecológica fueron empleadas seis hojas cartográficas, a escala 1:50 000 (INEGI, 2009): Las Habillas (e14c25), La Primavera (e14c26), San Andrés de la Cruz (e14c35), El Paraíso (e14c36), Tecpan de Galeana (e14c45) y Coyuca de Benítez (e14c46), que cubren toda el área en estudio.

De acuerdo con los requisitos agronómicos del *Coffea Arabica*, se seleccionaron variables físico-geográficas como el relieve (altitud sobre el nivel del mar y la pendiente en grados), el clima (precipitación y temperatura) y la edafología (tipos de suelos). Los datos de precipitación, temperatura y edafología se obtuvieron de la cartografía de INEGI (2009), a una escala 1:250 000; transformándose de formato vectorial a raster para facilitar el procesamiento automatizado mientras que para la evaluación morfométrica del relieve se partió del modelo digital de elevación, elaborado con una equidistancia de 20 m, facilitando un gradiente hipsométrico cada 100 m y la clasificación de pendientes en cuatro clases: 0.1° a 18° (32 %), 18.1° a 25° (33-47%), 25.1° a 40° (48-84%) y mayores de 40° (> 84%).

Métodos

Clasificación de los potenciales físico-geográficos

Para el establecimiento de la zonificación agroecológica del café se parte del concepto de potencial agroecológico, como el conjunto de propiedades

cuantitativas y cualitativas de la oferta natural de la región, favorables para el adecuado desarrollo del cultivo. Se consideraron cuatro potenciales: óptimo, medio, bajo y muy bajo.

Desde el punto de vista geomorfológico, se consideraron las altitudes entre 1 000 y 1 500 msnm, como potenciales óptimos, según la Fundación PRODUCE de Chiapas y el Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey (2003); los medios entre 600 a 900 msnm y entre 1 600 y 1 800 msnm; los bajos entre 400 a 500 msnm y 1 900 a 2 000 msnm; y el resto de los valores altitudinales, como muy bajos (Figura 2), localizadas entre las latitudes de 17° 04' y 17° 34'. Las pendientes con óptimo potencial fluctúan entre 0.1° y 18° (Fundación PRODUCE de Chiapas e Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, 2003); las de potencial medio, entre 18.1° y 25°; las de potencial bajo entre 25.1° hasta 40°; y el resto se consideró como potencial muy bajo (Figura 3).

Para la evaluación del potencial climático se establecieron óptimos entre los 1 500 a 2 000 mm; como medios entre 1 200 a 1 500 mm; como bajos

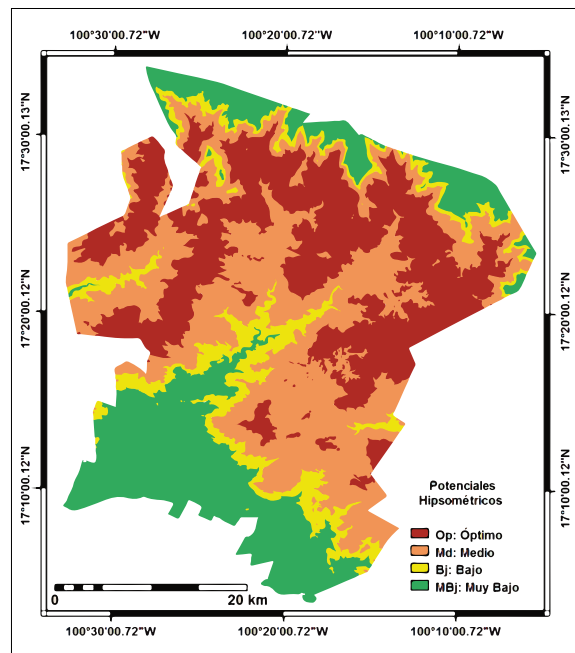


Figura 2. Potenciales hipsométricos para el cultivo del café.

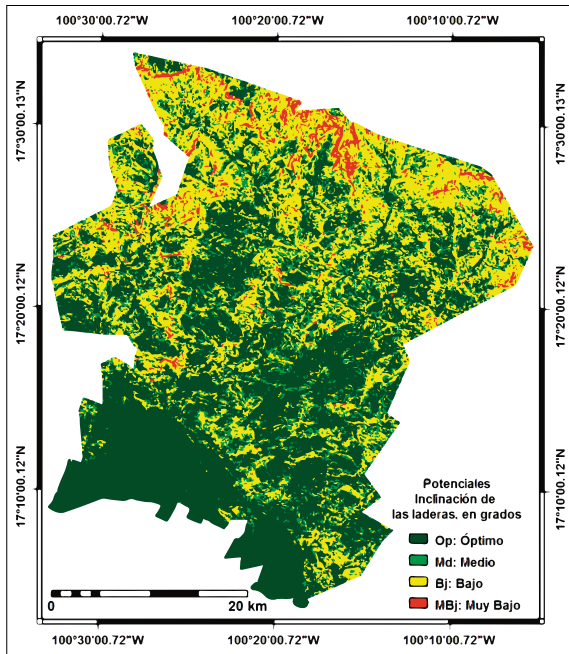


Figura 3. Potenciales de la inclinación de las laderas, en grados.

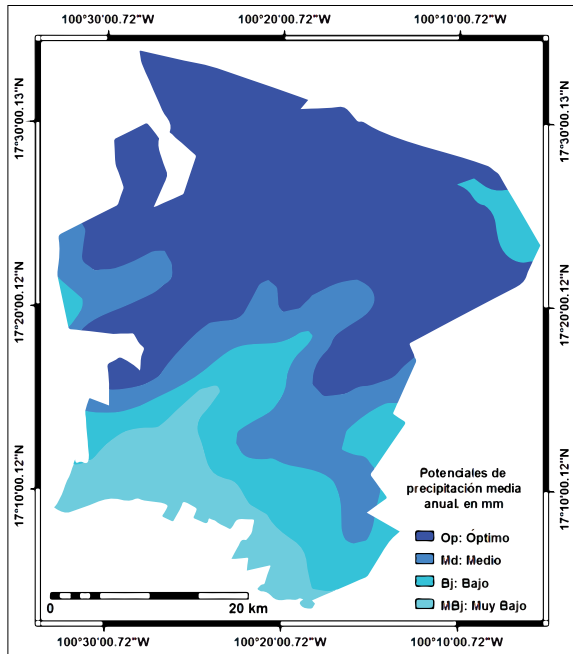


Figura 4. Potenciales de la precipitación media anual, en mm.

de 1 000 a 1 200 mm y de 2 000 a 2 500 mm, y como muy bajo de 800 a 1 000 mm (Figura 4). Al mismo tiempo, se adoptó como potencial óptimo a las zonas con temperaturas de 18 °C a 22 °C; para el medio entre 14 °C a 18 °C y de 22 °C a 24 °C; para el bajo entre los 12 °C a 14 °C y los 24 °C a 26 °C y como muy bajo entre los 26 °C a 28 °C (Figura 5).

La información cartográfica edafológica (INEGI, 2009) fue trabajada sobre dos bases de datos, la primera sobre la composición de los tipos de suelo del área y la segunda sobre las claves de suelos, donde aparecen la unidad primaria que compone esta clave, así como las unidades que aparecen en segundo y tercer lugar, la clase textural, la fase física y la química que componen dicha clave.

Los suelos Acrisoles se estimaron como potencial óptimo, pues poseen en este caso una textura media, con buena retención de agua y de nutrientes, y con una profundidad efectiva aceptable, que permite el establecimiento del cultivo, donde se pueden obtener rendimientos de medios a altos (INEGI, 2008). Los Acrisoles son suelos que ocupan una superficie predominante de 123 872.2 ha, ubi-

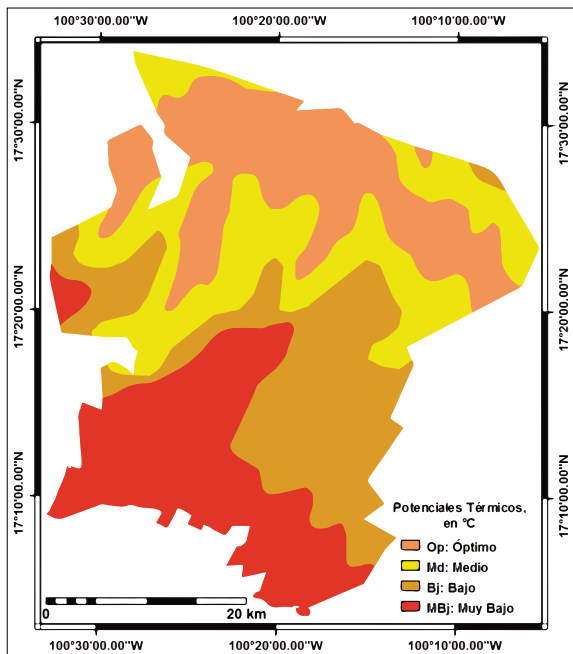


Figura 5. Potenciales térmicos, en °C.

cándose desde los 100 msnm hasta los 2 800 msnm (Figura 6). Se encuentra la subunidad Acrisol húmico, que tiene como característica principal

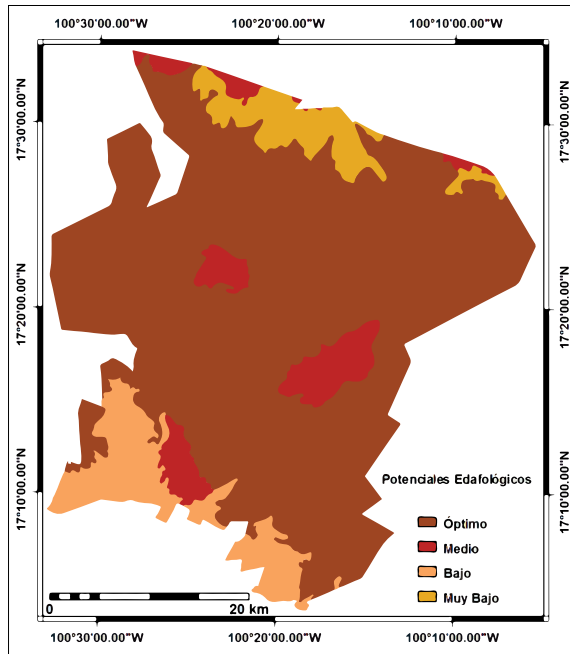


Figura 6. Potenciales edafológicos para el cultivo de *Coffea arabica*.

un alto contenido de materia orgánica en la capa superficial del suelo (INEGI, 2008), o sea en su horizonte úmbrico A (FitzPatrick, 1996).

Los suelos Cambisol se consideraron como potencial medio, pues presentan rendimientos variables, de acuerdo con su localización, y no muestran diferencias significativas entre el suelo y la roca que le dio origen y son moderadamente susceptibles a la erosión (INEGI, 2008). Ocupan una superficie de 10 313.17 ha, desde los 100 msnm hasta los 3 400 msnm, presentando texturas medias y finas.

Los potenciales bajos están representados por los suelos Feozem y Regosol. Los primeros están distribuidos entre los 100 y los 200 msnm, con una superficie de 11 384.10 ha, presentan profundidad muy variable y serios procesos erosivos (INEGI, 2008), mientras los segundos se encuentran entre los 100 y 500 msnm, con una superficie de 1 899.72 ha, siendo suelos pocos desarrollados, pobres en materia orgánica, con pedregosidad y fertilidad variable, lo que hace que tengan poca productividad y presentan una alta susceptibilidad a la erosión.

El potencial muy bajo corresponde al suelo

Litosol, localizado entre los 1 200 y 3 300 msnm, con una superficie de 8 380.04 ha. Son suelos con espesores menores a los 10 cm y descansan sobre un estrato duro y continuo, como roca madre, tepetate o caliche (INEGI, 2008).

Al evaluar la potencialidad de las claves de suelos, se consideraron el suelo primario de la clave jerarquizada y, además, los suelos en segundo y tercer lugares, así como la clase textural, la fase física y química. Como potencial óptimo se adoptó la clave Ah+Bh+Hh/2, referida al suelo Acrisol, que presenta textura media, considerándose suelos francos y, en segundo y tercer orden, a los suelos Cambisol y Feozem. El potencial medio correspondió a la clave Bc+Be+Ao/2, predominando la unidad Cambisol y, en segundo lugar, la unidad Acrisol (Figura 7).

El potencial bajo se correspondió con las claves Bc+Hh+Re/2, Bc+Re+I/2/LP, Bh+Hh/3 y Bh+Ah/3, que pertenecen a la unidad Cambisol. Las unidades en orden a esta unidad primaria son Feozem, Regosol, Litosol y Acrisol. Las claves Hh+Re+Bc/2/n y Hh+Re/2 pertenecen a la unidad primaria de Feozem, presentando como unidades secundarias Regosol y Cambisol, y la clave Re+Hh+Lc/2 a la unidad de Regosol, donde aparecen como segunda y tercera unidades Feozem y Luvisol. Todas estas unidades presentan una clase textural media y fina, que constituyen suelos arcillosos, con mal drenaje, escasa porosidad, duros al secarse, fácilmente inundables. Poseen una fase física lítica profunda, constituida por abundantes rocas, que impiden la penetración de las raíces; también poseen una fase sódica con concentración de sodio, que limita el desarrollo de cultivos.

El potencial muy bajo se ajustó a las claves I+Re+Bc/2 y I+Re/2, que pertenecen a la unidad primaria de Litosol, como segunda unidad aparece la unidad de Regosol y como tercera la Cambisol (Figura 7).

Procesamiento automatizado de la información

La metodología establecida para las relaciones entre las diferentes variables, la determinación de los potenciales físico-geográficos y la zonificación de *Coffea arabica*, se desarrolló con el empleo del SIG, utilizando el software ILWIS v. 3.31 (ITC, 2001), aplicando la reclasificación de las variables selec-

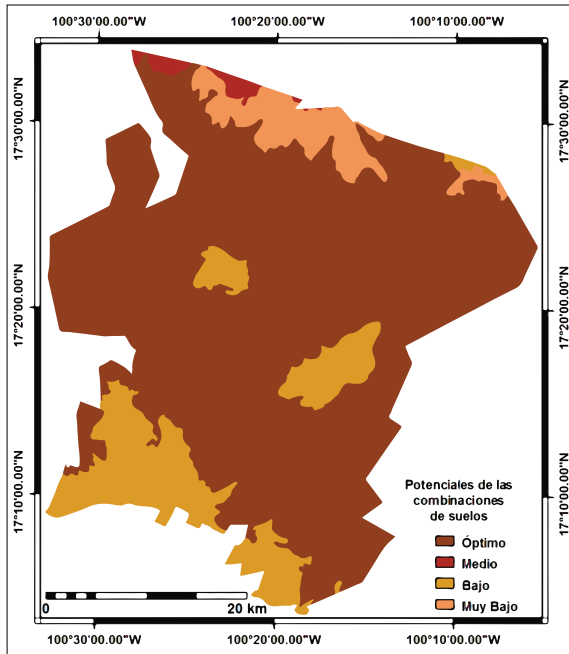


Figura 7. Potenciales de las combinaciones de suelos (claves de asociaciones de suelo).

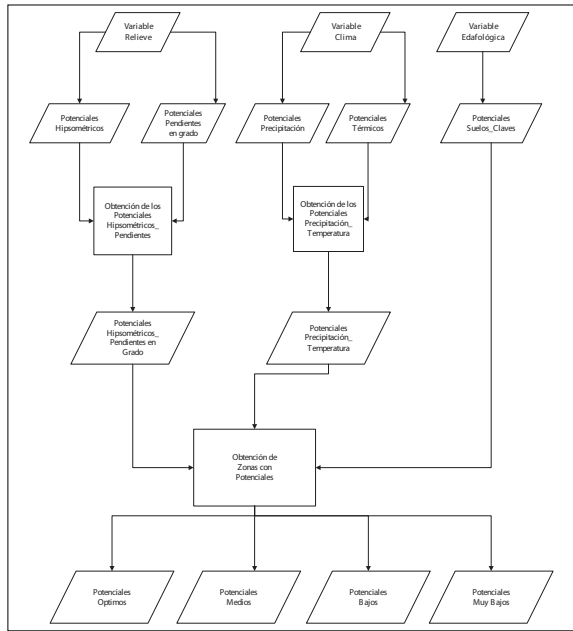


Figura 8. Flujograma de la zonificación agroecológica del *Coffea arabica*.

cionadas y su análisis espacial, con vistas a la construcción del modelo integrado de optimización de los potenciales naturales para el cultivo (Figura 8).

RESULTADOS Y DISCUSION

Los requerimientos agroecológicos óptimos, adoptados para el cultivo del café y su identificación en el área, fueron los niveles hipsométricos (altitudes entre 1 000 y 1 500 msnm), las pendientes (menos de 18°), las precipitaciones medias anuales (entre 1 500 y 2 000 mm), las temperaturas (entre 18 a 22 °C) y las unidades de suelos Acrisoles (con textura media, profundidad mayor a 100 cm). Su procesamiento y representación espacial permitieron evaluar las tres componentes para la zonificación agroecológica del café: geomorfológica, climática y edafológica.

La zonificación agroecológica del *Coffea arabica* se alcanzó mediante la sobreposición espacial de los potenciales del relieve, en función de la hipsometría y de la inclinación de las laderas (Tabla 1, Figura 9); del régimen hidrotérmico (Tabla 2,

Figura 10) y de claves de suelos (Tabla 3). Finalmente, el resultado de este proceso permitió identificar las zonas agroecológicas según sus condiciones de potenciales óptimos, medios, bajos y muy bajos (Figura 11).

De acuerdo con el nivel de tecnología aplicado por los productores y los rendimientos máximos y mínimos alcanzados según los diagnósticos, se pueden distinguir: tecnología baja (menos de 5 Qq), media (5-10 Qq) y tecnología alta (más de 10 Qq) (SAGARPA, 2011a). Los potenciales fisco-geográficos para el desarrollo del café mostraron áreas con potenciales óptimos en 7 163.47 ha (5% del área); con potenciales medios en 28 143.75 ha (18%); con potenciales bajos en 62 130.65 ha (40%) y muy bajos en 58 411.38 ha (37%).

La región de la Costa Grande es la de mayor importancia, considerando la superficie registrada con café en el padrón cafetalero; sin embargo, es la región donde las plantaciones presentan los menores rendimientos, con un promedio de 2.49 q/ha. De acuerdo con SAGARPA (2011), esto puede deberse principalmente a la baja densidad de población por hectárea, aproximadamente 1 274 plantas,

Tabla 1. Superficie, en hectáreas, de las potencialidades geomorfológicas (hipsometría y pendientes) y su espectro de combinaciones para el cultivo del café.

Potenciales hipsométricos	Potenciales de pendientes	Combinaciones espaciales entre los potenciales hipsométrico y de pendiente	Potenciales entre hipsometría y pendiente	Superficie (en ha)
Óptimo	Óptimo	Óptimo * Óptimo	Óptimo	17 551.95
Óptimo	Medio	Óptimo * Medio	Medio	24 443.68
Óptimo	Bajo	Óptimo * Bajo	Bajo	64 13.28
Óptimo	Muy Bajo	Óptimo * Muy Bajo	Muy Bajo	24 267.10
Medio	Óptimo	Medio * Óptimo	Medio	12 314.08
Medio	Medio	Medio * Medio	Medio	13 677.67
Medio	Bajo	Medio * Bajo	Bajo	3 879.77
Medio	Muy Bajo	Medio * Muy Bajo	Muy Bajo	3 947.25
Bajo	Óptimo	Bajo * Óptimo	Bajo	14 137.21
Bajo	Medio	Bajo * Medio	Bajo	14 453.76
Bajo	Bajo	Bajo * Bajo	Bajo	4 863.53
Bajo	Muy Bajo	Bajo * Muy Bajo	Muy Bajo	5 675.37
Muy Bajo	Óptimo	Muy Bajo * Óptimo	Muy Bajo	3 045.08
Muy Bajo	Medio	Muy Bajo * Medio	Muy Bajo	3 145.78
Muy Bajo	Bajo	MBj * Bj	Muy Bajo	1 352.30
Muy Bajo	Muy Bajo	MBj * MBj	Muy Bajo	2 683.75

Tabla 2. Superficie en hectáreas de las potencialidades climáticas (temperatura y precipitaciones) y su espectro de combinaciones para el desarrollo cafetalero.

Potenciales de precipitación	Potenciales de temperatura	Combinaciones espaciales entre los potenciales de precipitación y temperatura	Potenciales entre precipitación y temperatura	Superficie (en ha)
Óptimo	Óptimo	Óptimo * Óptimo	Óptimo	38 503.98
Óptimo	Medio	Op * Md	Medio	35 850.25
Óptimo	Bajo	Óptimo * Bajo	Bajo	9 992.53
Óptimo	Muy Bajo	Óptimo * Muy Bajo	Muy Bajo	102.20
Medio	Medio	Medio * Medio	Medio	420.37
Medio	Bajo	Medio * Bj	Bajo	22 678.46
Medio	Muy Bajo	Md * Muy Bajo	Muy Bajo	5 023.28
Bajo	Óptimo	Bajo * Óptimo	Bajo	101.11
Bajo	Medio	Bajo * Medio	Bajo	2 578.93
Bajo	Bajo	Bajo * Bajo	Bajo	7 242.00
Bajo	Muy Bajo	Bajo * Muy Bajo	Muy Bajo	16 676.97
Muy Bajo	Muy Bajo	Muy Bajo * Muy Bajo	Muy Bajo	16 681.50

pero también a la falta de fertilización química, en donde 99.8% no aplica fertilizante y únicamente 3% incorpora abono orgánico al suelo.

La zonificación agroecológica presentada contribuye al reordenamiento de las áreas cafetaleras, en función de las potencialidades para el cultivo y

de la optimización del uso del suelo, propiciando alcanzar mejores rendimientos por hectárea. No obstante, la implementación demanda de un levantamiento, a nivel catastral, de las plantaciones del café en los ejidos, con el fin de establecer las nuevas plantaciones en las zonas agroecológicas óp-

Tabla 3. Potenciales agroecológicos finales para el cultivo del cafeto, producto de las combinaciones entre las variables geomorfológica, climática y edafológica.

Potencialidades climático-geomorfológico	Potencialidades edafológicas	Combinaciones espaciales entre los potenciales climático-geomorfológico y edafológico	Potenciales de la zonificación agroecológica	Superficie (en ha)
Óptimo	Óptimo	Óptimo * Óptimo	Óptimo	7 163.47
Óptimo	Bajo	Óptimo * Bajo	Bajo	175.01
Óptimo	Muy Bajo	Óptimo * Muy Bajo	Muy Bajo	118.19
Muy Bajo	Óptimo	Muy Bajo * Óptimo	Muy Bajo	32 465.43
Muy Bajo	Medio	Muy Bajo * Medio	Muy Bajo	1 508.92
Muy Bajo	Bajo	Muy Bajo * Bajo	Muy Bajo	16 056.99
Muy Bajo	Muy Bajo	Muy Bajo * Muy Bajo	Muy Bajo	5 145.45
Bajo	Óptimo	Bajo * Óptimo	Bajo	56 099.57
Bajo	Bajo	Bajo * Bajo	Bajo	4 431.84
Bajo	Muy Bajo	Bajo * Muy Bajo	Muy Bajo	2 333.46
Medio	Óptimo	Medio * Óptimo	Medio	28 143.75
Medio	Bajo	Medio * Bajo	Bajo	1 424.23
Medio	Muy Bajo	Medio * Muy Bajo	Muy Bajo	782.94

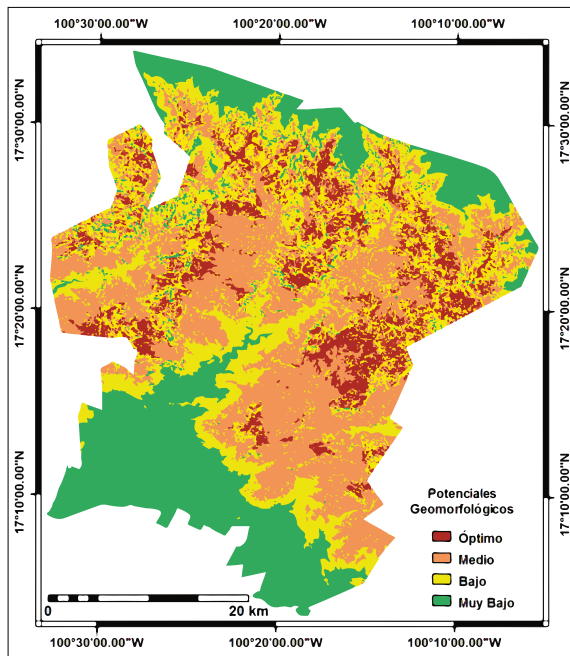


Figura 9. Potenciales geomorfológicos.

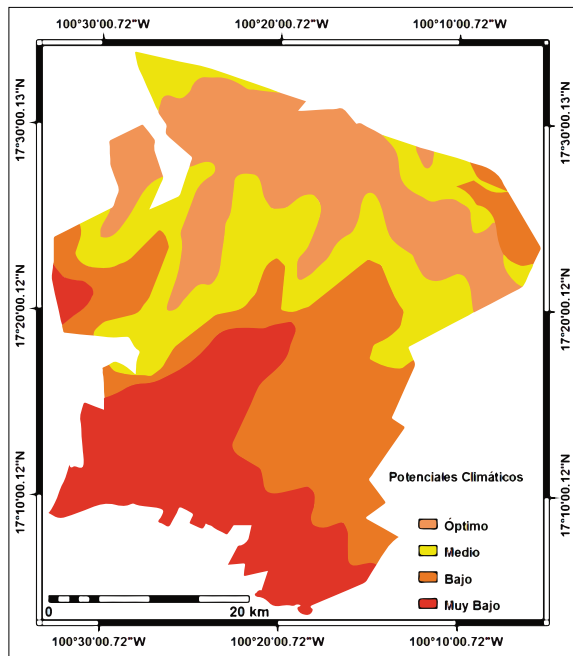


Figura 10. Potenciales climáticos.

timas y revalorar, sobre la base de los rendimientos por hectárea, la sustitución o no de las plantaciones añejas improductivas o el cambio de uso del suelo, debido a la incompatibilidad de las características biofísicas con las demandas naturales del fomento del *Coffea arabica*.

Por otra parte, la diferenciación de las zonas agroecológicas para el cultivo de esta especie posibilita la identificación de aquellas áreas donde el empobrecimiento del suelo demanda de una fertilización priorizada que contribuya al aumento de la productividad con tasas aceptables de ren-

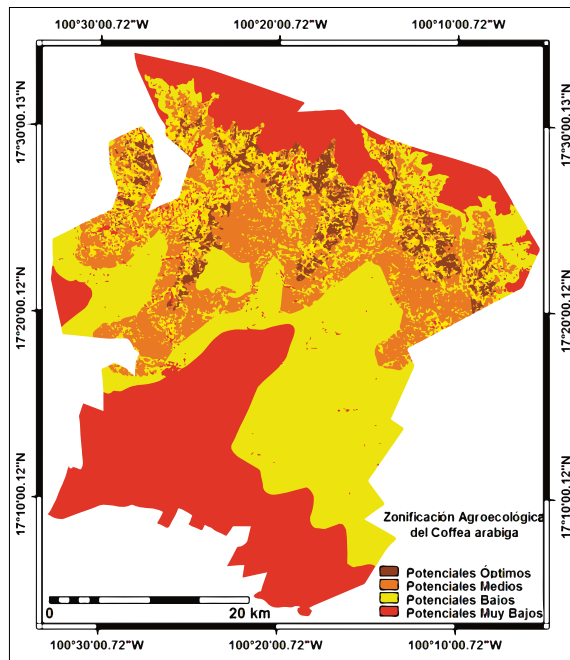


Figura 11. Zonificación agroecológica del *Coffea arabica*.

tabilidad de las cosechas. Este aspecto es esencial para el desarrollo municipal y estatal, sumido a lo largo de su historia en una continua crisis social y económica, agravada en el presente.

CONCLUSIONES

La presente zonificación agroecológica del *Coffea arabica* es un valioso instrumento de carácter técnico, basado en experiencias nacionales e internacionales, y en la información sobre las condiciones naturales existentes en el municipio guerrerense de Atoyac de Álvarez.

La metodología consideró las principales variables para el desarrollo del cultivo, como las condiciones geomorfológicas, el régimen hidrotérmico medio anual, y los agrupamientos de suelos, lo que ofrece solidez holística a los resultados.

Los diagnósticos realizados en esta región cafetalera revelan la existencia de plantaciones viejas, de empobrecimiento de la cobertura edáfica y de escasez hídrica, de ausencia de asistencia técnica, de surgimiento de problemas fitosanitarios, la falta de insumos agrotécnicos y débil infraestructura

carretera, lo que se traduce en plantaciones de baja productividad. Los resultados de esta zonificación agroecológica indiscutiblemente contribuyen a los procesos de optimización del uso de suelo y, en especial, al fomento de las plantaciones cafetaleras, requiriendo además del consenso de todos los actores sociales para su implementación como modelo de desarrollo.

La existencia de bases de datos geomorfológicos, climáticos y edafológicos permitirá establecer estrategias certeras para alcanzar mayores rendimientos de las cosechas, en función de la zonificación agroecológica propuesta. La implementación del ILWIS, v. 3.31, como herramienta de análisis espacial, contribuyó al proceso automatizado de evaluación de las potencialidades naturales para el fomento del café y su zonificación agroecológica local. Por su contenido, este enfoque y metodología pueden ser implementados en cualquier marco geográfico, adecuándose a las escalas cartográficas y evaluando las distintas apreciaciones agroecológicas.

REFERENCIAS

- Alarcó López, A. (2011), Modelo de gestión productiva para el cultivo del Café (*Coffea arabica*) en el Sur de Ecuador, tesis de Ingeniería, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid.
- Alulima Cornejo, M. V. (2012), Alternativas agroecológicas para el manejo del café (*coffea arabica*), tesis de licenciatura, Universidad de Cuenca, Ecuador, 106 p.
- Arango Argoti, M. A. (2007), Zonificación agroecológica del café en Puerto Rico y análisis estructural y de composición de especies arbóreas presentes en el agroecosistema cafetero, tesis de Maestría, Universidad de Puerto Rico, Mayagüez.
- Arias Calizaya, J. L., (2013), Zonificación agroecológica del cultivo de orégano (*origanum vulgare*) en el distrito de Tarata provincia de Tarata, tesis de Ingeniería, Tacna, Perú, p. 8.
- Benacchio, S. (1984), Zonificación agroecológica de cultivos en áreas bajas del trópico húmedo de Venezuela, *Simposio do Trópico Umido*, Pará, Brasil, pp. 2-17.
- Cabezas, E. N. (1999), *Calidad del Coffea arabica bajo sombra de Erythrina poeppigiana a diferentes elevaciones en Costa Rica*, CATIE, Turrialba.
- Carvajal, J. F. (1972), *Cafeto-cultivo y fertilización*, Berna, Instituto Internacional de la Potasa, 141 p.

- Cortés Granado, V. M. (2011), "Agroecología del agrosistema Café (*Coffea Arabica*) y su relación con la erodabilidad de las laderas en el valle de Orosi, Cartago, Costa Rica, *Anuario de Estudios Centroamericanos*, núm. 37.
- Cortéz-Marín, A. L., L. A., Aceves-Navarro, R., Arteaga-Ramírez, M. A., Vázquez-Peña (2005), Zonificación agroecológica para aguacate en la zona central de Venezuela, *TERRA Latinoamericana*, vol. 23, núm. 2, pp. 159-166.
- Espinosa, J. y A., Roquera (2007), "Zonificación agroecológica del cultivo de papa (*Solanum tuberosum*) en las provincias de Bolívar, Cotopaxi, Chimborazo y Tungurahua", *Revista Rumipamba*, vol. 21, núm. 1, pp. 54-56.
- Dirección General de Competitividad Agraria-DGCA (s/f), *Condiciones agroclimáticas del cultivo del café*, Cuartilla No. 07, Ministerio de Agricultura del Perú, Lima. [<http://agroaldia.minag.gob.pe/biblioteca/download/pdf/agroclima/efenologicos/cafe.pdf>: 17 de noviembre de 2015].
- FAO (1997), *Zonificación Agroecológica. Guía general*, Roma, 9-16 p.
- FitzPatrick, E.A. (1996), *Introducción a la Ciencia de los Suelos*, Editorial Trillas, pp. 181-182.
- Fundación PRODUCE de Chiapas e Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey (2003), *Programa Estratégico de Necesidades de Investigación y Transferencia de Tecnología del Estado de Chiapas*, Tuxtla Gutiérrez, 58 p.
- Gabriel, M. J. (2003), *Tipología socioeconómica de las actividades agrícolas*, Instituto Nacional de Ecología, México, D. F., 51 p.
- Garea, E., F., Soto, A., Vantour (2008), "Zonificación agroecológica en condiciones de montaña mediante métodos de análisis espacial", *Revista Internacional de Ciencias de la Tierra*, vol. 127, pp. 36-40.
- González, H. (2000), *Zonificación Agroecológica del Coffea arabica en un Sector del Grupo Orográfico Guamuhaya*, tesis de Maestría, La Habana, 49 p.
- González, H., F., Soto, J. M., Martínez (2001), *Zonificación agroecológica del Coffea arabica en un sector del grupo orográfico Guamuhaya*, Instituto de Geografía Tropical, Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas, La Habana, 16 p.
- González, H. (2006), "Zonificación Agroecológica del *Coffea arabica* en un Sector del Grupo Orográfico Guamuhaya, utilizando los SIG", *Revista Mapping*, vol. 112, pp. 10-12.
- Guindel, I. (1962), "Comportamiento de la planta de café en condiciones semiáridas", *Revista Café*, vol. 4, núm. 14, pp. 61-79.
- INEGI (2008), *Guía para la Interpretación de Cartografía. Edafología*. Guía para la Interpretación de Cartografía, México, D. F., p. 29.
- INEGI (2009), *Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos*, México, D. F.
- ITC (2001), *ILWIS 3.0 Academic, User's Guide*, ed. Enschede, Holanda.
- Jiménez, C, A., V. Vargas Tristán, W. E. Salinas Castillo, M. de J. Aguirre Bortoni, D. Rodríguez Cabrera (2004), "Aptitud agroecológica para el cultivo de la caña de azúcar en el sur de Tamaulipas, México", *Investigaciones Geográficas*, núm. 53, pp. 58-74.
- Küpper, A. (1981), "Factores climáticos e edáficos na cultura cafeeira", en E. Malavolta, T. Yamada y J. A. Guidolin (eds.), *Nutrição e adubação do cafeeiro*, Instituto da Potassa e Fosfato EUA/Instituto Internacional da Potassa (Suiza), Piracicaba, Brasil, pp. 27-54.
- Maestri, M., R., Barros (1981), "Ecofisiología de cultivos tropicales. Café", Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas de la O.E.A., *Publicación Miscelánea*, núm. 288, 50 p. [<http://orton.catie.ac.cr/repdoc/A8480E/A8480E.PDF>: 15 de febrero de 2014].
- Nosti-Nava, J. (1953), *Cacao, café y té*, ed. Salvat, Barcelona, España, 687 p.
- Ortolani, A. A. (1968), *Clima e zoneamiento agroclimático do estado do Espírito Santo*. Plano de diversificado e desenvolvimento agrícola, ASPLAN, II, pp. 241-290.
- Pérez Portilla, E. y Geissert Kientz, D. (2006), "Zonificación Agroecológica de Sistemas Agroforestales: el caso del Café (*Coffea arabica* L.)-Palma Camedor (*Chamaedorea elegans* Mart.)", *Interciencia*, núm. 31, pp. 556-562.
- Pineda Santos, L. D. y Suárez Hernández, J. E. (2014), "Elaboración de un SIG orientado a la zonificación agroecológica de los cultivos", *Ingeniería Agrícola*, vol. 4, núm. 3, pp. 28-32.
- Rojas, O. E. (1987), *Zonificación Agroecológica para el cultivo del Café (Coffea arabica) en Costa Rica*. Programa Cooperativo para la Protección y Modernización de la Caficultura en México, Centro América, Panamá y El Caribe (PROMECAFE), Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA), 39 p.
- SAGARPA (2005), *Plan Rector del Sistema Producto Café en México*, México, D. F.
- SAGARPA (2008), *Agenda de Innovación Tecnológica Guerrero 2008-2011*, Chilpancingo, Guerrero.
- SAGARPA (2011a), *Plan de innovación en la caficultura de México*, México, D. F., 165 p.
- SAGARPA (2011b), *Plan de Innovación de la Caficultura en el estado de Guerrero*, San Luis Acatlán, Guerrero.

- SAGARPA (2011c), *Informe de evaluación de avances logrados entre 2006 y 2011*, Guerrero. [http://www.sagarpa.gob.mx/Delegaciones/guerrero/Documents/Comit%C3%A9%20T%C3%A9cnico%20Estatal%20de%20Evaluaci%C3%B3n/Evaluaci%C3%B3n%202011/INFORME%20BROCA%20DEL%20CAFE.pdf: 15 de abril de 2015].
- Soto, F., A. Vantour, A. Hernández, A. Planas, A. Figueroa, P. Fuentes, T. Tejeda, M. Morales, R. Vázquez, E. Zamora, H. Alfonso, L. Vázquez, P. Caro (2001), "La Zonificación Agroecológica del *Coffea arabica* L. en Cuba. Macizo Montañoso Sagua-Nipe-Baracoa", *Cultivos Tropicales*, vol. 22, núm. 3, pp. 27-51.
- Suárez Venero, G., R. Guarat, Z. Vazquez, A. Vantour, E. Gareta, E. Sánchez (2006), *Zonificación agroecológica de Theobroma cacao*, Lin para el Macizo montañoso Nipe-Sagua-Baracoa, Informe Final del Fórum de Ciencia y Técnica, Centro de Desarrollo de la Montaña, Cuba, 35 p.
- Valencia, G. (1998), "Factores que afectan la productividad del cafeto", en *Manual de nutrición y fertilización del café*, Instituto de la Potasa y el Fósforo (INPOFOS), Quito, 61 p.
- Vega, J. A. (1995), "Zonificación del Cultivo de Café en Costa Rica. Parámetros de Clasificación", *Revista del Instituto de Café de Costa Rica*, núm. 91, p. 6.
- Villa, M., M. A. Inzunza, E. A. Catalán (2001), "Zonificación agroecológica de hortalizas involucrando grados de riesgo", *Terra Latinoamericana*, vol. 19, núm. 1, pp. 1-7.
- Zuviría, M. y C. R. Valenzuela (1994), "Mapping land suitability for coffee with ILWIS", *ITC Journal*, no. 3, pp. 301-307.