








Selección de tierras para el cultivo de café en zonas con información escasa: análisis espacial del territorio y conocimiento local

Land selection for coffee cultivation in areas with limited information: territory spatial analysis and local knowledge

Dante López-Carmona¹ ,
Ángeles Gallegos¹ ,
David Jesús Palma-López² ,
Gustavo Martín-Morales¹ ,
Montserrat Barragán-Maravilla¹ ,
Gabriel Hernández-Vallecillo¹ ,
Francisco Bautista^{1*} 

¹Centro de Investigación en Geografía Ambiental, Universidad Nacional Autónoma de México, Antigua Carretera a Pátzcuaro No. 8701, Col. Ex-Hacienda de San José de La Huerta, CP. 58190. Morelia, Michoacán, México.

²Colegio de Postgraduados, Campus Tabasco. Periférico Carlos A. Molina S/N Heroica Cárdenas CP. 86500. Tabasco, México.

* Autor de correspondencia:
leptosol@ciga.unam.mx

Artículo científico

Recibido: 17 de septiembre 2019

Aceptado: 12 de febrero 2021

Como citar: López-Carmona DA, Gallegos A, Palma-López DJ, Martín-Morales G, Barragán-Maravilla M, Hernández-Vallecillo G, Bautista F (2021) Selección de tierras para el cultivo de café en zonas con información escasa: análisis espacial del territorio y conocimiento local. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios* 8(1): e2419. DOI: 10.19136/era.a8n1.2419

RESUMEN. La mayoría de los suelos de la Mixteca Alta presentan altos niveles de degradación. Una estrategia para su manejo y conservación es a través de integrar el conocimiento local y el análisis espacial para delimitar zonas aptas para la producción de café. El objetivo fue evaluar la aptitud de las tierras para cultivar café en la Mixteca Alta, del estado de Oaxaca considerando el conocimiento local y sistemas de información geográfica. Se desarrolló un modelo de aptitud de tierras para el cultivo de café con base en el análisis de la altitud, la inclinación de la pendiente y el suelo. Los cafetales no aptos se localizan en las zonas con menor altitud, la cuales también fueron las más cálidas y con la mayor presencia de roya. También la altitud del terreno mayor a 2 200 msnm no es apta para el cultivo del café debido a la presencia de heladas. La inclinación de la pendiente del terreno mayor a 80° no es apta para el cultivo del café. Las tierras muy aptas ocupan solo 258.1 ha; las aptas 2 030.4 ha; las medianamente aptas 3 162.3 ha; marginalmente aptas ocupan 2 558.8 ha; y las no aptas 5 123.9 ha. Las tierras aptas para el cultivo del café tienen suelos profundos con texturas franco-arcillo-arenosas y un espesor de hojarasca promedio de 5 cm. Este trabajo puede servir de referencia para la evaluación de tierras en zonas con escasas de información geográfica del medio físico.

Palabras clave: Relieve, clima, suelos, zonificación agroecológica, manejo.

ABSTRACT. Most of the soils of the Mixteca Alta show high levels of degradation. A strategy for its management and conservation is through integrating local knowledge and spatial analysis to delimit areas suitable for coffee production. The objective was to evaluate the aptitude of the lands to grow coffee in the Mixteca Alta, Oaxaca State, considering local knowledge and geographic information systems. A land suitability model for coffee cultivation was developed based on the analysis of the altitude, the steepness of the slope and the soil. The unsuitable coffee plantations are located in the areas with the lowest altitude, which were also the warmest and with the highest presence of rust. Also, the altitude of the land higher than 2200 meters above sea level is not suitable for growing coffee due to the presence of frost. The slope of the land greater than 80° is not suitable for growing coffee. The very suitable lands occupy only 258.1 ha; the suitable 2 030.4 ha; the moderately suitable 3 162.3 ha; marginally suitable occupy 2 558.8 ha; and the unsuitable 5 123.9 ha. Land suitable for growing coffee have deep soils with loamy-clay-sandy textures and an average leaf thickness of 5 cm. This work can serve as a reference for land evaluation in areas with scarce geographic information on the physical environment.

Key words: Relief, weather, soils, Agroecological zoning, management.

INTRODUCCIÓN

El estado de Oaxaca es de gran importancia debido a la alta biodiversidad que alberga, por ejemplo, las 9 130 especies de plantas vasculares con un alto porcentaje de endemismos (García-Mendoza *et al.* 2004). Particularmente, la Mixteca Alta de Oaxaca cuenta con gran diversidad de rocas metamórficas, volcánicas y sedimentarias (Ferrusquía-Villafranca 1999); de formas de relieve (Hernández *et al.* 2009); y de suelos (García-Calderón *et al.* 2006) todo lo cual suma para que esta zona sea declarada como geoparque mundial (Rosado-González y Ramírez-Miguel 2017, Palacio *et al.* 2019). Lo complejo del relieve, la diversidad de rocas y la falta de accesos en la Mixteca Alta ha ocasionado que los mapas de suelos no se tengan a escalas de detalle (mayores a 1:50 000), ni los de climas, con lo cual muy pocos esfuerzos han sido encaminados hacia la evaluación de la tierra para usos específicos, lo que ha provocado la degradación del ambiente (Palacio-Prieto *et al.* 2016).

Por otro lado, el cultivo de café bajo sombra es una estrategia productiva para reducir la degradación ambiental en la Mixteca Alta. En los agroecosistemas de café bajo sombra se utilizan diversas especies de árboles nativos junto con otros cultivos arbóreos y herbáceos; lo que permite la conservación de servicios ecosistémicos como: mayor diversidad de alimentos para la familia, disminución de la erosión del suelo y la conservación biológica (Jha *et al.* 2014, Machado *et al.* 2020). El café se desarrolla principalmente en climas cálidos húmedos y subhúmedos, en altitudes entre los 600 y 2 000 msnm, con temperaturas medias entre los 17 °C y los 25 °C (Läderach *et al.* 2017). Mientras que temperaturas superiores a 25 °C pueden provocar disminución del uso eficiente del agua; pérdida en la calidad física y química de la fruta; y aborto de las flores (Da Silva-Angelo *et al.* 2019). En cuanto a la precipitación pluvial, el intervalo óptimo reportado es de 1 600 a 1 800 mm, con mínimo de 1 000 mm y un máximo de 3 000 mm (Mora 2008, Guerrero-Carrera *et al.* 2020). La topografía del terreno es un indicador de la susceptibilidad a erosión y en sistemas de producción de café

puede limitar el desarrollo de las labores culturales, demeritar las propiedades del suelo o promover la aparición de enfermedades en las plantas de café (Avelino *et al.* 2007, García *et al.* 2014).

Los cafecultores de la Mixteca Alta no cuentan con los mapas de suelo, clima, rocas ni de relieve, pero tiene más de cinco décadas de experiencia en el cultivo del café, así como conocimiento sobre el medio físico y biológico en el que se desarrollan (Perez-Rodriguez y Anderson 2013). También se han percatado de una relación inversamente proporcional entre la temperatura y la altitud, la cual determina el éxito o no del cultivo del café (Liebig *et al.* 2019). Los mapas del territorio sobre los elementos del medio físico, en este caso, de altitud asociada al clima; de la inclinación de la pendiente como limitante de las labores culturales; y de la profundidad del suelo proporcionan una base clave para el análisis de la aptitud de la tierra para el cultivo de café.

La promoción del cultivo de café es una estrategia para el mantenimiento y restauración de los recursos naturales, sin embargo es necesaria la elección apropiada de las tierras para su producción, ya sea por reconversión productiva o por apertura de nuevas tierras; pero en lugares aptos, evitando así despilfarro de recursos y la degradación ambiental (Toledo y Moguel 2012). Por lo anterior, el objetivo del trabajo fue realizar el análisis espacial del terreno para la identificación de las clases de aptitud para el cultivo de café arábigo en la Mixteca Alta de Oaxaca, México, utilizando el conocimiento tradicional de los campesinos, modelos digitales del terreno y sistemas de información geográfica.

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción de la zona de estudio

La Mixteca Alta del estado de Oaxaca se localiza en la provincia fisiográfica de la Sierra Madre del Sur, específicamente en la subprovincia fisiográfica de la Cordillera Costera del Sur. La superficie geográfica estudiada fue de 131.34 km², en un gradiente altitudinal de 831 a 3 122 msnm. El trabajo de campo se realizó en cafetales de las localidades de Caballo Rucio, Guadalupe Buenavista y Reyes

Llano Grande, en el municipio de Santa María Yucuhí; y en las comunidades de Yucunino de Guerreo y, Unión y Progreso del municipio de Santiago Nuyoo, ambos municipios del distrito de Tlaxiaco, Oaxaca (Figura 1).

En la zona de estudio predominan las geoformas: 1) sierras de laderas moderadas con disección fluvial severa; 2) lomeríos y depresiones kársticas con acumulación residual de circulación fluvial subterránea; y 3) planicies kársticas. El relieve fue labrado sobre rocas extrusivas, intrusivas y metamórficas con un estilo estructural de bloques y sobre rocas sedimentarias con un estilo estructural de bloques y plegadas; donde se desarrolla un relieve kárstico (Palacio-Prieto *et al.* 2016, Figueroa-Jáuregui *et al.* 2018).

Los climas presentes son cálido húmedo y templado húmedo, ambos con lluvias en verano. De acuerdo con los datos de la estación meteorológica de Santa María Yucuhí del Servicio Meteorológico Nacional, la temperatura promedio anual es de 20.24 °C, mientras que las temperaturas máximas y mínimas promedio son de 25.35 y 15.15 °C, respectivamente. La precipitación promedio anual es de 1 894 mm, y el periodo de lluvias va de mayo a octubre. De acuerdo con el mapa edafológico desarrollado por la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO 2001), en Santa María Yucuhí y Santiago Nuyoo las unidades de suelos dominantes son Regosol, Litosol (Leptosols) y Feozem (Phaeozems). La precipitación se presenta entre los meses de abril y octubre, con siete meses de lluvia continua para la agricultura de temporal, de los cuales, de mayo a octubre la lluvia supera la evapotranspiración (Figura 2a). En la zona de estudio hay cuatro meses hiper-húmedos (junio, julio, agosto y septiembre), dos húmedos (mayo y octubre), un mes subhúmedo seco (abril) y el resto de los meses son semiáridos (noviembre a marzo) (Figura 2b).

La mayoría de la población pertenece al grupo indígena mixteco. Los mixtecos o *Nuu savi* (pueblo de lluvia o gente de lluvia) son un grupo étnico con aproximadamente 6 048 habitantes cuya principal actividad económica es la agricultura tradicional de

maíz, frijol, chile, calabaza y café (Balkansky *et al.* 2009).

Estrategia de estudio

Se utilizó una estrategia de estudio en dos vías. La primera vía fue espacial a escala 1:50 000 considerando el relieve y el clima por la relación entre la altitud y la temperatura media, partiendo del conocimiento local de los campesinos cafecultores. La combinación entre técnicas geoespaciales con el conocimiento local de los productores es una estrategia que permite identificar las zonas aptas para el cultivo de café (Bautista *et al.* 2018). La segunda vía fue a nivel de parcela describiendo perfiles de suelos en 28 parcelas de cultivo de café arábigo (Figura 3).

Evaluación de la aptitud del terreno para el cultivo del café a escala 1:50 000

Con base en el modelo digital de elevación (MTD), con resolución espacial de 15 m tomado del Continuo de Elevaciones Mexicano del Instituto Nacional de Estadística y Geografía, se realizó la modelación de la altitud del relieve en el software ArcGIS 10.6. El análisis agroclimático se elaboró con base en datos de 1960 al 2000 de la estación meteorológica de Santa María Yucuhí. En el software Clic-MD 3.0 se depuró la información de la estación meteorológica y se calculó el índice de humedad mensual y la longitud de periodo de crecimiento (evapotranspiración vs precipitación) con base en la metodología sugerida por la FAO (2006).

También, se delimitaron los pisos térmicos (isotermas) con base en la correlación entre los datos de altitud y de la temperatura media anual de las estaciones meteorológicas cercanas al área de estudio (12231, 20094, 20232, 20130 y 20299). Para conocer los valores de correlación se aplicó una línea de tendencia a la ecuación del gráfico de dispersión. Como resultado se obtuvo una relación inversamente proporcional, cuando disminuye la altitud aumenta la temperatura, con un coeficiente de correlación de $R^2 = 0.73$. Posteriormente, este modelo fue aplicado a MTD mediante la siguiente ecuación: $Tem.Med = -0.0056 * "MTD" + 29.1$ °C.

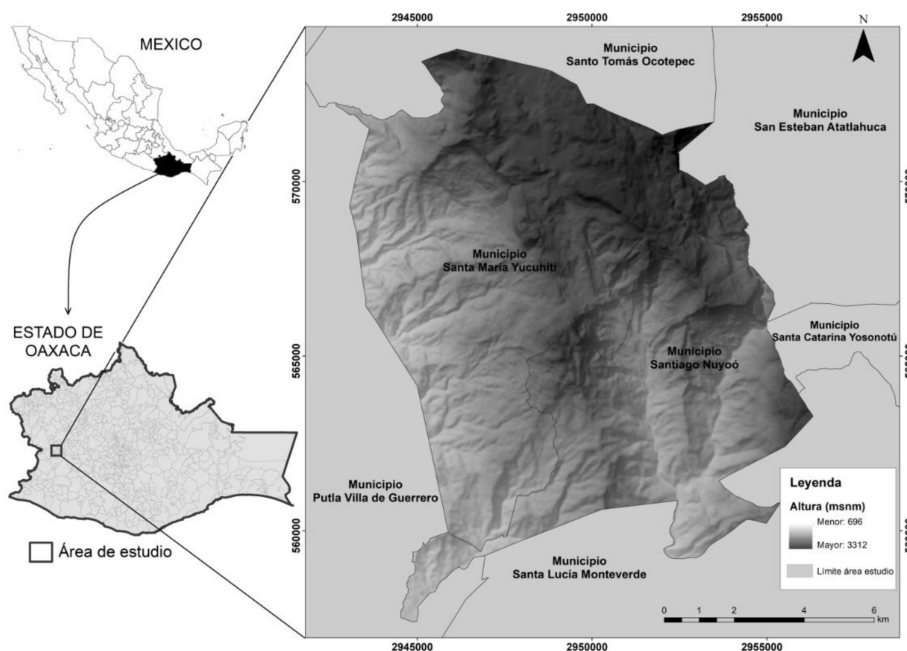


Figura 1. Ubicación de la zona de estudio.

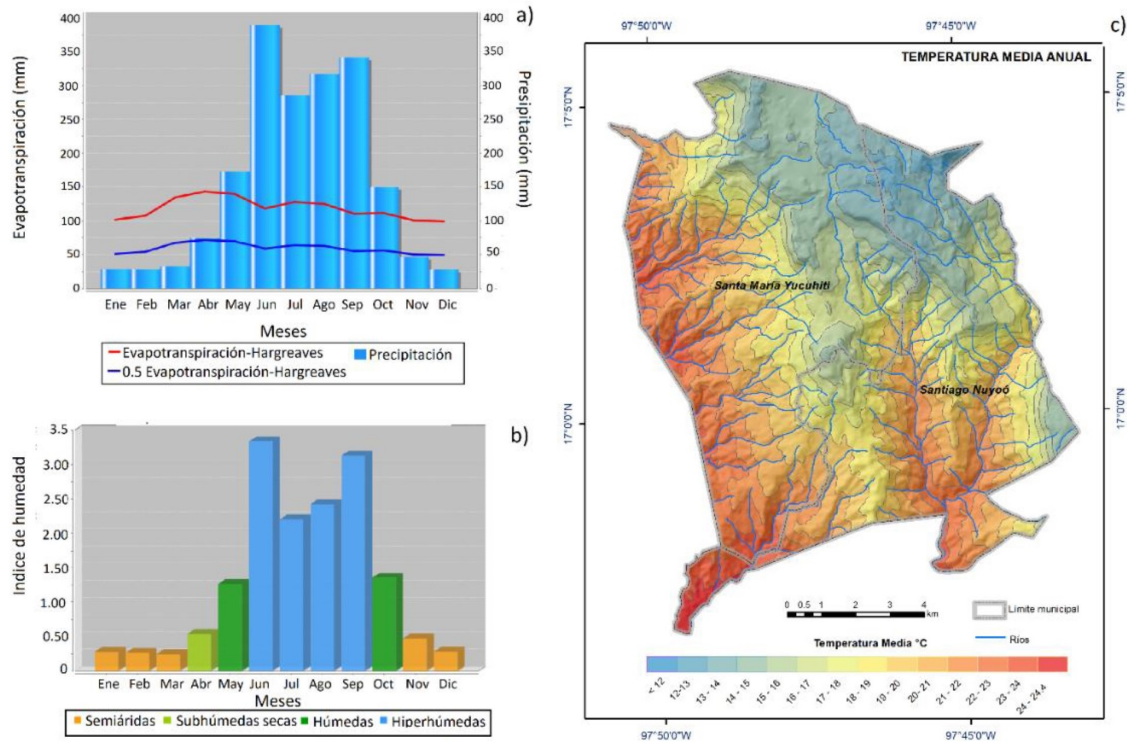


Figura 2. Análisis climático de los municipios de Santa María Yucuhí y Santiago Nuyó. a) índice de humedad; b) evapotranspiración c) isotermas para los municipios de Santiago Nuyó y Santa María Yucuhí.

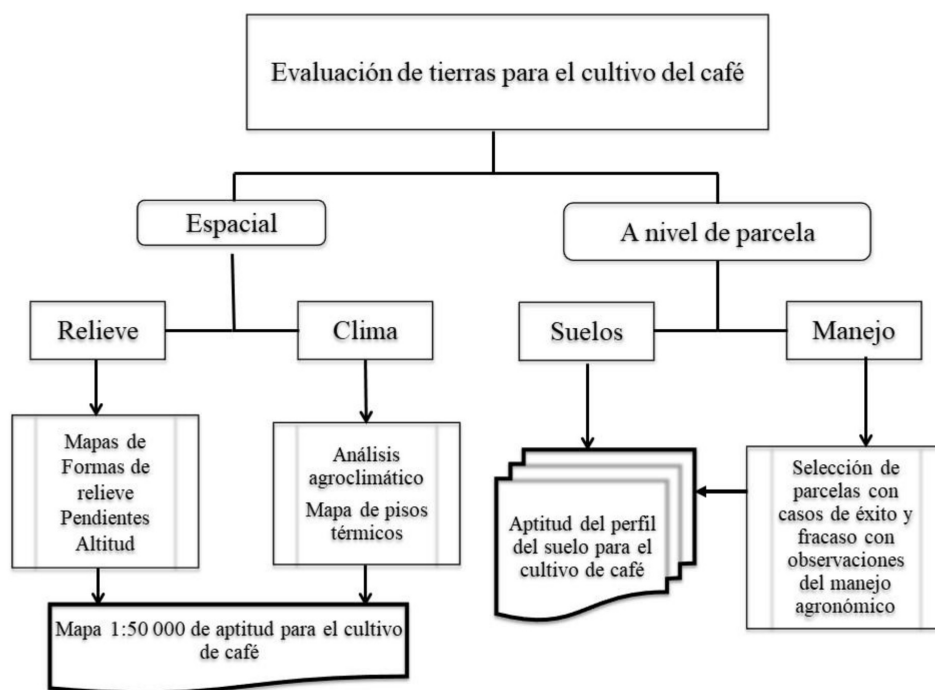


Figura 3. Diagrama de la estrategia de estudio para la evaluación de tierras para el cultivo de café.

Para realizar el modelo de la altitud del terreno (MAT) se definieron cinco clases: muy apto (1601 a 2 000), apto (1 201 a 1 600), medianamente apto (701 a 1 200), marginalmente apto (2 001 a 2 200) y no apto (menor de 700 y mayor de 2 201). Para definir estas clases, los cafeticultores señalaron las zonas con mayor y menor sanidad y productividad de los cafetales. Durante la fase de campo, además del muestreo de suelos, se realizaron recorridos para cruzar la información de los agricultores con las observaciones técnicas. Para luego georreferenciar las zonas para delimitar las clases de aptitud por altitud.

Para el modelo de inclinación de la pendiente del terreno (MPT) se utilizaron cinco clases: muy apto (menor de 20%), apto (21 a 40%), medianamente apto (41 a 60%), marginalmente apto (61 a 80%) y no apto (mayor de 81%). La aptitud tiene que ver con las facilidades del manejo del cafetal, por ejemplo, a mayor pendiente la dificultad de siembra, podas, cosecha y transporte de la producción se incrementa.

El modelo de aptitud de tierras para el cultivo

de café se construyó con base en el cruzamiento de modelos MAT y MPT. Este modelo incluyó cinco niveles o clases de aptitud. La clase fue asignada mediante un análisis espacial con álgebra de mapas y para evitar un sesgo en el cruzamiento de los niveles de aptitud, se utilizó el mismo criterio numérico (5 (muy apto), 4 (apto), 3 (medianamente apto), 2 (marginalmente apto) y 1 (no apto)). El menor valor entre ambos modelos (MAT y MPT) fue el criterio para asignar el nivel de aptitud. Los mapas se elaboraron con el software ArcGIS 10.6.

Evaluación de la aptitud del perfil del suelo para el cultivo del café

Para evaluar la aptitud del suelo para el cultivo de café se usó como base el conocimiento tradicional mixteco y se validó con las propiedades edáficas. Previo a las actividades de campo, se realizó una reunión con cafeticultores de cada municipio para definir los criterios de aptitud, los cuales fueron atribuidos a la productividad (kg de café oro), al manejo y a la sanidad de los cafetales (defo-

liación de cafetos por presencia de roya). Los cafetales se clasificaron de acuerdo con los criterios de los campesinos en: aptos (con presencia de flores durante el mes de marzo y arbustos vigorosos), medianamente aptos (sin flores, pero con follaje en los cafetos), no aptos (plantas con defoliación y sin flores).

En total se describieron 28 perfiles de suelo distribuidos en los tres niveles de aptitud. El número de perfiles se determinó por la uniformidad del terreno con un criterio geográfico. Todos los cafetales muestreados fueron bajo sombra con diferentes combinaciones de pinos, plataneros y árboles frutales como mango, encinos, entre otros. El manejo de todos los cafetales se realiza bajo condiciones de certificación orgánica para la exportación, por lo que no hay aplicación agroquímicos fuera de las normas internacionales.

Los perfiles de suelo se describieron de acuerdo con la FAO (2006), considerando el espesor de hojarasca, la profundidad de los horizontes minerales, la textura (al tacto), el volumen de fragmentos gruesos (en porcentaje), la estructura (forma y tamaño de agregados) y las raíces (cantidad y tamaño). La excavación de la calicata se realizó al centro de la parcela en un sitio apartado de los árboles y arbustos. La profundidad dependió de la pendiente del terreno, la dureza del suelo y la presencia de la roca madre. Los datos de la profundidad total del perfil y el espesor de la hojarasca del suelo se analizaron mediante un análisis de medianas con la prueba de Kruskal Wallis en el software R versión 3.4.0, considerando el nivel de aptitud tradicional para el cultivo de café como variable independiente (apto, medianamente apto y no apto).

Se seleccionaron tres perfiles típicos según las clases de aptitud para el cultivo del café para delimitar, mediante un método automatizado de análisis de fotografías digitales, los fragmentos gruesos o pedregosidad, la densidad de raíces y la delineación de los horizontes. Para acentuar las propiedades del perfil se siguió un método de tres pasos: 1) captura y selección de una imagen digital del perfil, 2) extracción de las características del color de la imagen y 3) análisis de las características de textura de la

imagen (Zhang y Hartemink 2019). Las imágenes se capturaron con una cámara Canon Powershot Sx530 de 16 megapíxeles y las imágenes se procesaron con el software MATLAB 9.3.

Se realizaron entrevistas semiestructuradas a los dueños de los cafetales para relacionar las prácticas de manejo, el desarrollo de las fases fenológicas del café y la susceptibilidad climática, además de una descripción general de la sanidad de los cafetales.

RESULTADOS

Aptitud del terreno para el cultivo del café a escala 1:50 000

En la zona de estudio hay una clara relación entre la altitud y la temperatura media. Se registraron las temperaturas más altas (entre 22 y 24 °C) en altitudes bajas; mientras que las temperaturas más bajas (menores a 15 °C) ocurren en las zonas de mayor altitud (Figura 2c). De acuerdo con el MAT (Figura 4a), cerca del 50% del total de la superficie estudiada (131.34 km²) no es apta para el cultivo de café, lo cual está de acuerdo con las observaciones en campo. Por encima de los 2 201 msnm, las bajas temperaturas y las heladas limitan el establecimiento y desarrollo de los cafetales. A menor altitud el incremento de la temperatura favorece la incidencia de enfermedades, principalmente la roya (*Hemileia vastatrix*) y el ojo de gallo (*Mycena citricolor*).

Entre los 1 601 y 2 000 m de altitud se encuentran los cafetales con muy buena aptitud. En estos sistemas se observó baja incidencia de enfermedades, mayor cobertura del follaje e, incluso, flores durante el mes de mayo. En el intervalo altitudinal entre los 1 201 y 1 600 msnm los cafetales se clasifican como aptos debido a menor cobertura del follaje con respecto a los sitios muy aptos, además de que no se observaron cafetos en floración (Figura 4a). Los cafetales medianamente aptos se localizaron entre los 1 004 y 1 200 msnm, en ellos se observó una fuerte defoliación ocasionada principalmente por la roya, pero los sistemas de producción aún son rentables (Figura 4a). Por otro lado, de acuerdo con el modelo MPT, los sitios considerados como muy aptos (menores a 20%) tienen una superficie de solo 18.2 km², pero

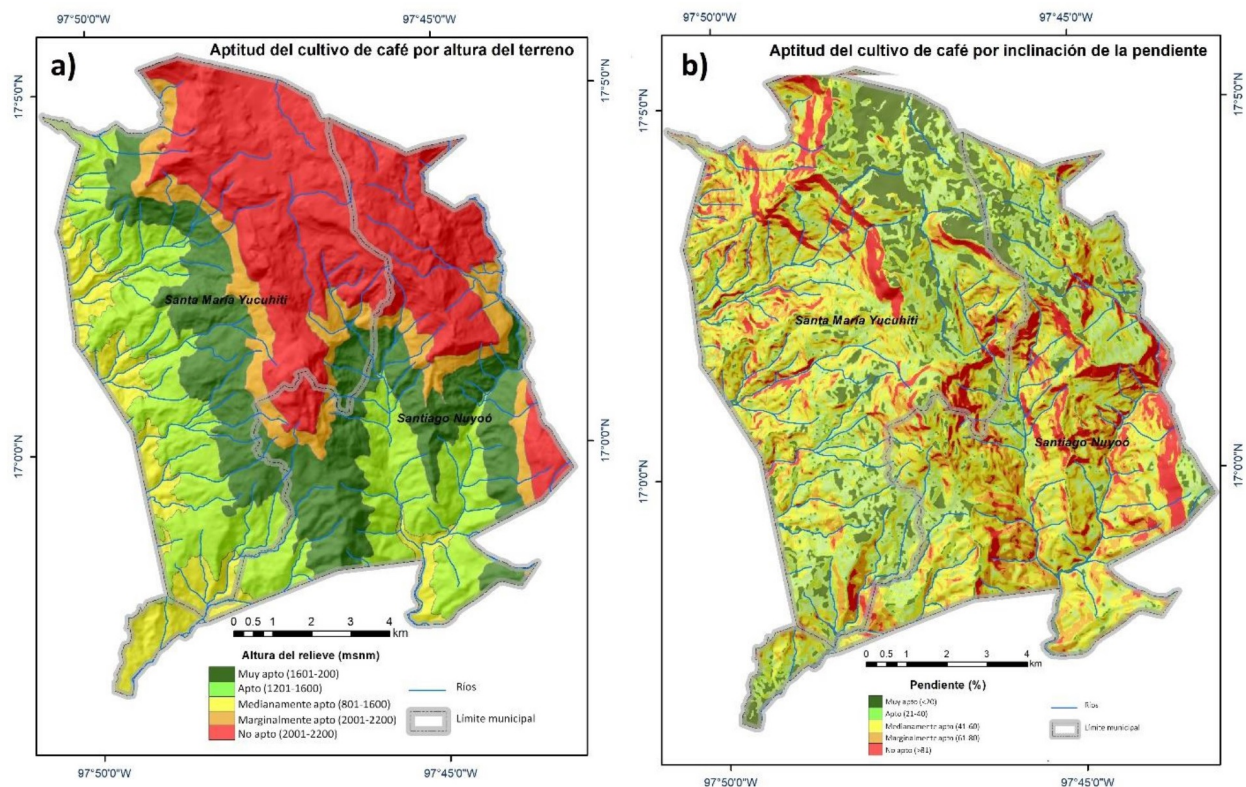


Figura 4. Modelos de la aptitud del suelo para el cultivo de café considerando la altitud y la inclinación de la pendiente.

estos sitios frecuentemente son destinados a la producción de cultivos como maíz y plátano, o bien, para asentamientos humanos (Figura 4b).

Los sitios aptos para el cultivo del café se distribuyen en pendientes entre 20 y 40% (38 km²). En las tierras moderadamente aptas representan 38.1 km² de la superficie, el acceso a la parcela regularmente es caminando y el movimiento dentro de la parcela es limitado. Las tierras marginalmente aptas y no aptas ocupan 23.2 y 4 km² de la superficie, respectivamente. En estas, el acceso es exclusivamente caminando y regularmente el acarreo de la producción hasta las vías de comunicación se realiza con animales de carga. Además, el movimiento dentro de la parcela representa un peligro físico para los cafeticultores debido al riesgo por rodamiento y deslizamiento pendiente abajo (Figura 4b).

El modelo de aptitud para el cultivo de café mostró que las tierras muy aptas ocupan solo 258.1 ha distribuidas principalmente en el municipio de

Santa María Yucuhiti. Las tierras aptas (2 030.4 ha) y medianamente aptas (3 162.3 ha) representan el 39.5% entre ambos municipios. Por su parte, las tierras marginalmente aptas ocupan 2 558.8 ha. Finalmente, el 39% de la superficie (5 123.9 ha) no es apta para el cultivo de café, además, estas tierras están distribuidas principalmente en laderas pronunciadas y al norte de la zona de estudio, donde también hay una limitación climática (Figura 5).

Aptitud de los suelos para el cultivo del café a escala de parcela

El análisis de varianza indicó que los suelos aptos para el cultivo de café tienen estadísticamente una mayor profundidad y acumulación de hojarasca que el resto de niveles de aptitud (Figura 6). La profundidad de enraizamiento, estimada como la profundidad del perfil hasta donde se registraron raíces comunes (50-200 raíces) de tipo muy finas, finas y medias, fue en promedio hasta 43, 27 y 22 cm para sue-

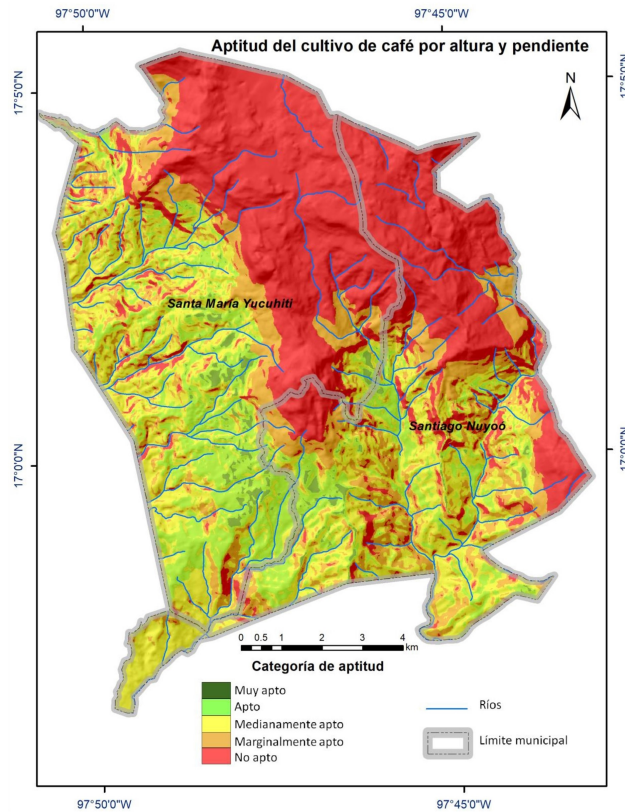


Figura 5. Modelo de aptitud para el cultivo de café con base en el análisis integrado de altitud e inclinación de la pendiente.

los aptos, medianamente aptos y no aptos, respectivamente. La textura del suelo franco arcillo arenosa predominó en los cafetales aptos. El tipo de estructura que domina en todos los sitios cafetaleros es de bloques subangulares; sin embargo, en suelos aptos también se presentaron algunos horizontes superficiales con estructura granular; mientras que en los suelos medianamente aptos y no aptos se presentaron estructuras masivas y en bloques angulares en las partes más profundas del perfil.

En la Figura 7 se muestran imágenes de los perfiles de suelos aptos, medianamente aptos y no aptos. En dicha figura se puede observar que los suelos aptos son más profundos, contienen más grava y raíces más profundas. Así mismo, el porcentaje de fragmentos gruesos fue menor en los suelos aptos para el cultivo del café.

En las parcelas se registró que las plantas de café de la variedad criolla o típica tienen entre 2 y

hasta 50 años de cultivo. Pero también se observó un fuerte recambio de cafetos criollos por variedades como Caturra, Bourbon y Geisha, los cuales son cultivares que presentan tolerancia a la roya. El desarrollo fenológico del café se clasifica en crecimiento vegetativo y reproductivo, los cuales, posterior a la primera floración, se desarrollan simultáneamente durante el resto de su vida productiva.

La fase de crecimiento vegetativo dura desde la germinación de las semillas hasta la primera floración, la cual se da aproximadamente a los 41 meses. En esta etapa, las plantas son susceptibles a morir cuando se presentan periodos prolongados de sequía. Así mismo, las altas temperaturas pueden inducir la presencia de enfermedades fungosas principalmente ocasionadas por roya y ojo de gallo (Figura 8).

El crecimiento reproductivo, inicia a partir de la primera floración, que es cuando las ramas repro-

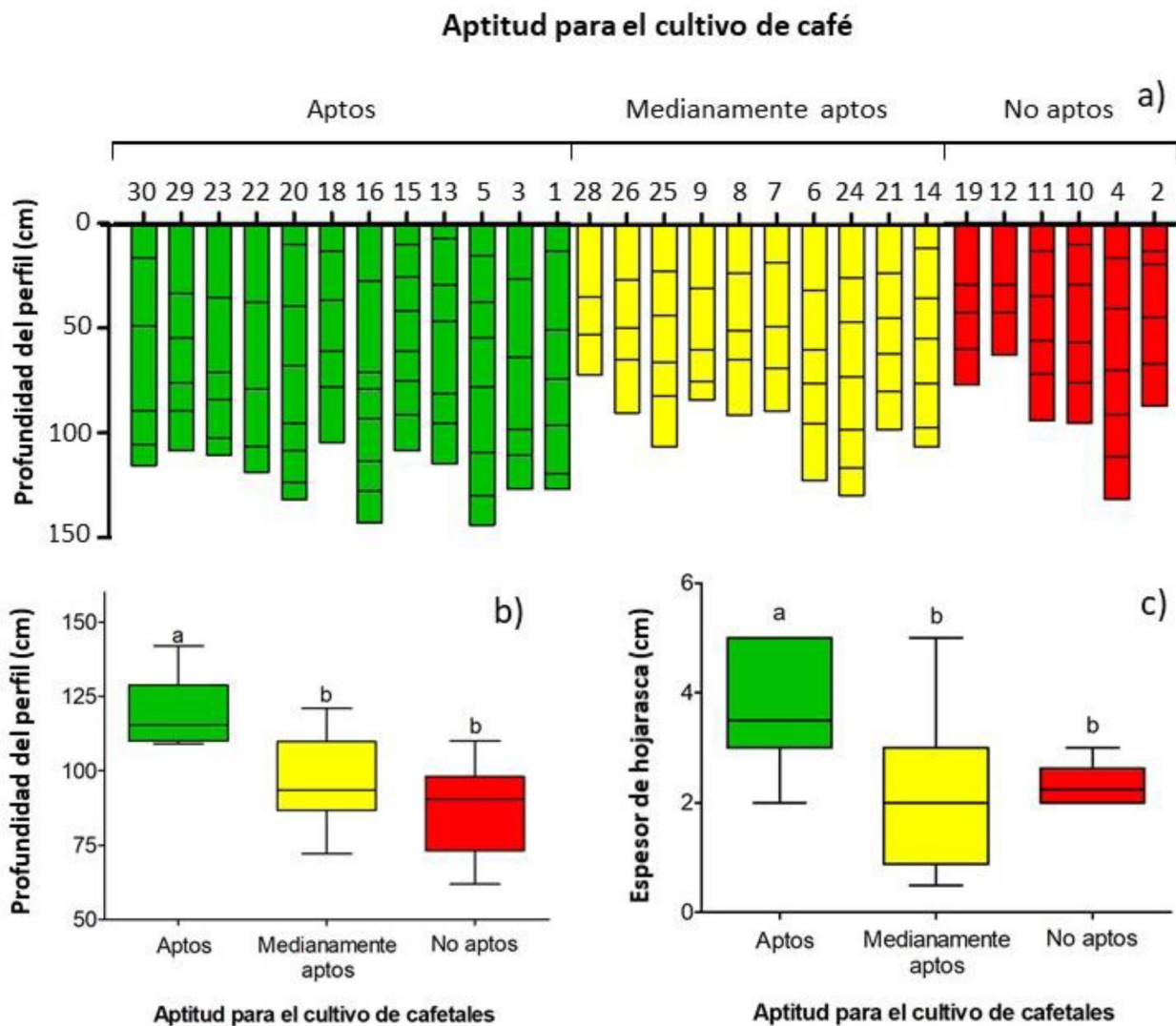


Figura 6. Profundidades de los perfiles de suelo muestreados en cafetales de la Mixteca Alta a); y gráficos del análisis de medianas con la prueba de Kruskal Wallis para la profundidad de perfil b) y espesor de hojarasca c).

ductivas alcanzan al menos el 50% de su capacidad para desarrollar flores. En esta etapa, se presenta la formación de flores, el desarrollo, la maduración y la cosecha del fruto. La productividad de los cafetos depende de una adecuada precipitación entre los meses de mayo a octubre, mientras que la cosecha y la calidad el grano requieren de ausencia de precipitación entre los meses de noviembre a febrero (Figura 8).

Finalmente, se observó mayor incidencia de la roya en los sitios más cálidos, mientras que las

parcelas con mayor sanidad se localizaron en los cafetales con mayor altitud. Este aspecto es muy importante debido a que la principal limitante actual para mantener la producción de café es la sanidad de los cafetales.

DISCUSIÓN

La complejidad del relieve en la Mixteca Alta limita el desarrollo de estrategias de manejo sustentable de las tierras, por esta razón el

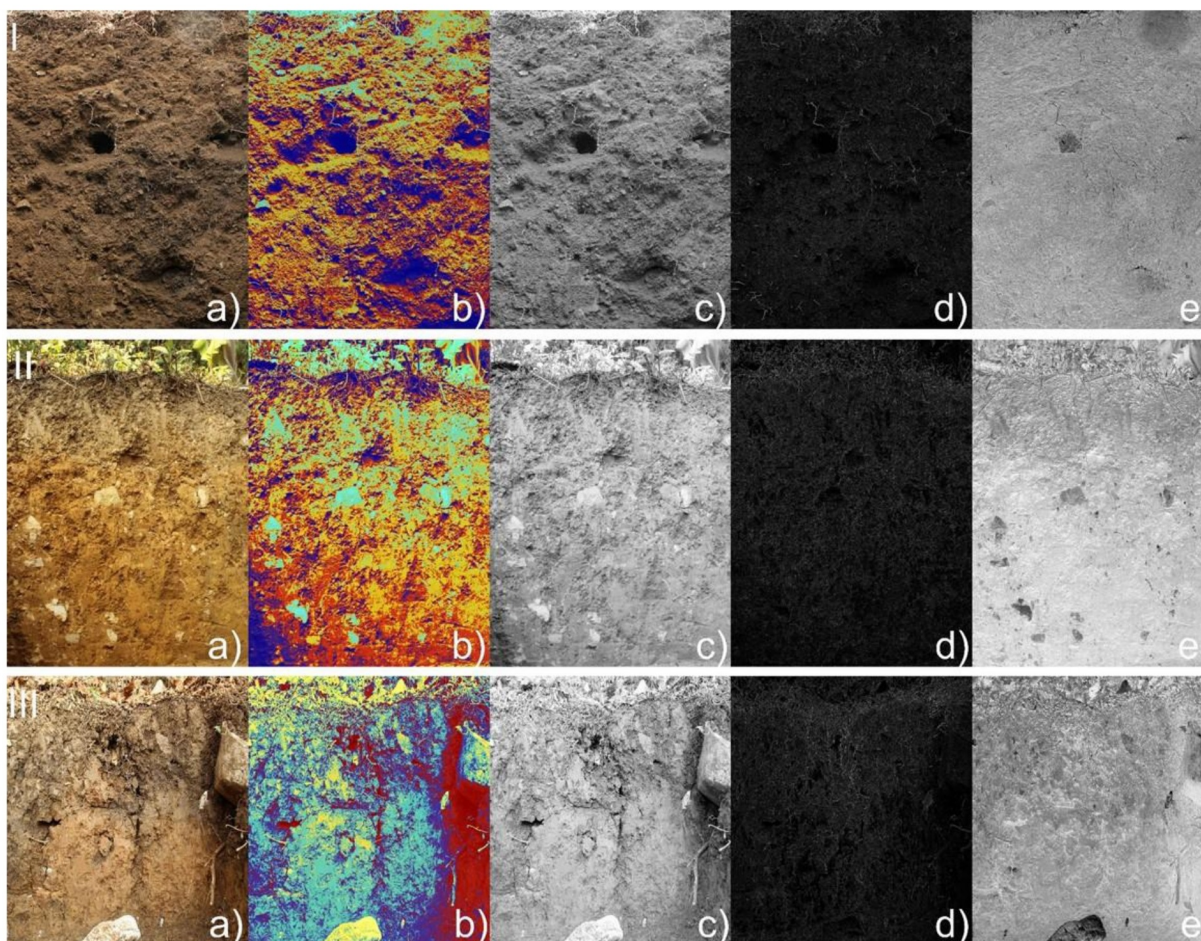


Figura 7. Análisis del volumen de fragmentos grueso, la profundidad y el enraizamiento a lo largo del perfil de tres niveles de aptitud de los perfiles del suelo para el cultivo del café. Las imágenes muestran verticalmente se muestran los suelos I = Apto; II = Medianamente apto; III No apto. Horizontalmente el procesamiento de color HSV y CIE La*a*b muestran el análisis de: imagen original a), la textura b), la pedregosidad c); las raíces d) y la textura en blanco y negro e).

mantenimiento de los sistemas de producción de café es una estrategia que permite la conservación de las funciones ambientales de estos agroecosistemas y del patrimonio biocultural mixteco (Cerdea *et al.* 2017, Fernández y Méndez 2019). Por lo que los resultados presentados son un primer acercamiento para identificar las zonas de cultivo de café en tierras aptas con base en el análisis de la altitud, inclinación de la pendiente del terreno y el perfil de suelo.

Aptitud del terreno para el cultivo del café a escala 1:50 000

El desarrollo de la cafecultura en la Mixteca Alta está determinado principalmente por el clima

(Cerdea *et al.* 2017, Bautista *et al.* 2018) y la temperatura media, factores con los que se tiene una estrecha relación inversamente proporcional con la altitud, por lo que esta es clave para identificar las mejores tierras para el cultivo del café. La susceptibilidad de las plantas a las heladas limita el cultivo de café en altitudes superiores a los 2 000 m, aunque es posible encontrar cafetales marginalmente aptos en un intervalo altitudinal entre los 2 001 y los 2 200 m. Los cafetales localizados por debajo de los 1 600 msnm, presentan condiciones medianamente aptas de éxito, debido a las altas temperaturas y su asociación con la incidencia de enfermedades fúngicas. El intervalo en que se distribuye la cafecultura en la






Susceptibilidad climática	Duración de la fase (meses)	Etapas Fenológicas		
Muerte por sequía	3	Crecimiento vegetativo	Germinación y semillero	
	16 (20)		Plántula	
Mayor incidencia de roya por altas temperaturas en temporada de secas	21 (41)	Crecimiento del cafeto juvenil		
Reducción del crecimiento de las ramas de floración por falta de precipitación	12 (53)	Crecimiento de ramas reproductivas		
Reducción de la cantidad de flores y su viabilidad por falta de precipitación en los meses de mayo y junio	3 (56)	Primera floración		
Reducción del rendimiento y calidad del café por poca precipitación en los meses de julio-octubre	8 (64)	Crecimiento del fruto		
Pudrición de la cereza y reducción de la calidad del café por presencia de lluvias en noviembre-enero	3 (67)	Cosecha del fruto		

Figura 8. Desarrollo fenológico del café y su susceptibilidad climática.

zona de estudio coincide con otros reportes, pero estos no presentan una clasificación de la aptitud para el cultivo de café por intervalos altitudinales (Avelino *et al.* 2007, Cerda *et al.* 2017). Por ejemplo, en Nicaragua el intervalo óptimo para la producción de café va de los 800 a los 1 400 msnm (Jonsson *et al.* 2015).

En futuros trabajos, es necesario determinar si existe efecto del cambio climático sobre la distribución de la aptitud de las tierras, así como de la incidencia de plagas. En este sentido, hay reportes que mencionan una modificación de las zonas productivas en otras regiones de México y Latinoamérica por efecto del cambio climático (García L. *et al.* 2014,

Läderach *et al.* 2017). De hecho, en la zona de estudio, los campesinos reconocen que la incidencia de la roya está asociada a la altitud; y que, en sitios marginalmente aptos, cada vez es más frecuente el cultivo de café usando pinos y encinos como árboles de sombra. De este modo, con el aumento de las temperaturas máximas y mínimas, es posible que la distribución de la zona cafetalera en la Mixteca Alta se redistribuya a zonas con mayor altitud.

El clima está estrechamente ligado a la incidencia de plagas en los sistemas de café bajo sombra (Jonsson *et al.* 2015). La estrategia de manejo para la roya más utilizada a nivel mundial, es el recambio de plantas criollas por variedades resistentes (Talhinhas *et al.* 2017). Pero el éxito de esta estrategia también está ligado a la adaptación de las nuevas variedades a las condiciones de relieve, clima, suelo y manejo. En este sentido, en la zona de estudio se están introduciendo las variedades Geisha, Bourbon y Caturra para reducir la incidencia de roya. Estos cultivares han sido probados con éxito en algunas zonas cafetaleras de Veracruz, Chiapas y partes de Centro y Sudamérica; pero estas zonas climáticas son más húmedas hasta por 1000 mm de precipitación (Borjas-Ventura *et al.* 2020, Oscco *et al.* 2020). Por otro lado, las etapas fenológicas de floración y cosecha se presentan en los meses de secas, mientras que el crecimiento del fruto durante el periodo de lluvias. Esta adecuación de las etapas fenológicas a las condiciones climáticas es muy importante, ya que los elementos climáticos tienen efecto sobre el crecimiento, producción y calidad del café (Silva *et al.* 2019).

El cambio climático puede modificar las zonas de cultivo de café debido a cambios en el régimen de lluvias, temperaturas debido a su relación con la incidencia de plagas y enfermedades (Gay *et al.* 2006, Läderach *et al.* 2017). Al respecto, los resultados aquí presentados incluyen una caracterización fenológica relacionada con la susceptibilidad climática, la cual puede ayudar a identificar los efectos del cambio climático sobre el crecimiento y producción de café en la Mixteca Alta. Además puede contribuir a identificar y generar estrategias productivas para las zonas más susceptibles, y para las

nuevas zonas idóneas para el cultivo de café.

La mayor frecuencia de eventos meteorológicos extremos, así como el cambio del clima afectarán la producción de café, por lo que será necesario ampliar y/o mantener las zonas productivas, no solo en la Mixteca Alta, sino en todas las regiones cafetaleras del mundo (Moreira *et al.* 2018). Un buen manejo y selección de los árboles de sombra para el café puede ser una estrategia útil en el mantenimiento de un microclima adecuado para los cafetos y para mantener el control de plagas (Nesper *et al.* 2019). Debido a que la roya es la principal plaga limitante de la producción de café en la zona de estudio, se sabe que una mayor incidencia de esta enfermedad se presenta en cafetales con una amplia cobertura del dosel (Jonsson *et al.* 2015), por lo que se deben experimentar con diversos tipos de cobertura y cantidad de sombreado, tanto para la regulación microclimática como para el aporte de hojarasca al suelo (Läderach *et al.* 2017). La inclinación de la pendiente del terreno define la vulnerabilidad de un sitio a la erosión y determina la carga de trabajo y el aumento del riesgo de accidentes (Avelino *et al.* 2007). Por lo que las pendientes bajas son las más aptas para el cultivo del café, pero como son utilizadas para la siembra de otros cultivos, las pendientes medias son las más utilizadas para el cultivo del café.

El modelo de inclinación de la pendiente del terreno (MPT) para el cultivo del café, propuesto, puede ser extremo al declarar que es posible cultivar café en inclinaciones de la pendiente del terreno entre 61 a 80%, que corresponden a la clase de marginalmente apta. En otras investigaciones se han reportado como tierras marginalmente aptas para el cultivo del café con inclinaciones de la pendiente mayores a 31% (Ochoa *et al.* 2017, Hidayat *et al.* 2020). Pero bajo las condiciones del estudio, estas inclinaciones de la pendiente del terreno están siendo utilizadas, a pesar de la dificultad de trabajar y al mayor riesgo de accidentes. Por lo que es importante implementar prácticas de conservación que permita mantener las funciones ambientales del suelo (Bautista *et al.* 2016a, Gallegos *et al.* 2019). Es necesario considerar que la producción de café en la Mixteca Alta está inmersa en un paisaje

montañoso, con asentamientos humanos dispersos que sobreviven del aprovechamiento de los recursos naturales. Por lo que el modelo de aptitud para el cultivo de café permite la delimitación de zonas agroecológicas óptimas para su cultivo (zonas muy aptas y medianamente aptas), y para la conservación y restauración de los recursos naturales (zonas no aptas para el cultivo de café, pero adecuadas para la conservación de los bosques). También es importante que en las zonas de cultivo con pendientes pronunciadas se implementen estrategias de conservación de suelo y agua. Algunas tecnologías que se pueden adaptar a los cafetales son las terrazas y barreras con cercos vivos implementadas en curvas a nivel. Además, un manejo adecuado del sombreado, del arreglo espacial vertical y horizontal de los árboles y del sotobosque también puede ayudar a proteger el suelo de la erosión y proteger la biodiversidad (Perez-Rodríguez y Anderson 2013).

Aptitud de los suelos para el cultivo del café

Los suelos aptos para el cultivo de café en la Mixteca Alta tuvieron profundidades mayores a 1.1 m, además, el suelo más somero tuvo 0.62 m, mientras que el más profundo 1.43 m. Si bien, la profundidad de enraizamiento del café puede llegar hasta 1.5 m o más, la mayoría de las raíces de absorción de las plantas de café se localizan en los primeros 20 cm del suelo (Gómez-González *et al.* 2018) con un máximo de 40 cm de profundidad (Partelli *et al.* 2014). Sin embargo, en este sentido se debe tener en cuenta que, en sistemas agroforestales, como el caso del café con árboles de sombra, se requiere que las raíces de los árboles de sombra no compitan con las del cultivo principal, por esta razón es preferible que los nuevos cultivos se hagan en suelos profundos. Además, la densidad y distribución del sistema radical depende de las propiedades del perfil del suelo, siendo los suelos porosos, con texturas franco arcillosas, estructura granular y un alto contenido de materia orgánica, los más aptos para el cultivo de café (Gómez-González *et al.* 2018). El promedio de la profundidad de enraizamiento de los cafetales no aptos fue el menor de todos los niveles de aptitud (22 cm). Esto es atribuido a que los suelos no aptos pre-

sentaron texturas arcillosas y estructuras masivas o en bloques angulares en los horizontes subsuperficiales. Estas condiciones favorecen la compactación del suelo, dificultan el enraizamiento y, consecuentemente, reducen la productividad del agroecosistema (Gómez-González *et al.* 2018).

Los suelos aptos para el cultivo del café tuvieron un mayor espesor de hojarasca (3-5 cm), mientras que los no aptos la menor (0.5-3 cm). Esta diferencia podría estar asociada a una mayor fertilidad de los suelos aptos, debido a mayor acumulación de materia orgánica, asociada con mayor actividad microbiana, mayor mineralización y, por lo tanto, mayor disponibilidad de nutrientes para las plantas (Tully *et al.* 2013, Nesper *et al.* 2019). El manejo de la materia orgánica del suelo en sistemas de producción orgánica es fundamental, debido a que la fertilidad del suelo no puede ser suplementada con fertilizantes químicos (Yageta *et al.* 2019). Además, en la zona cafetalera de la Mixteca Alta no existe una fuente de estiércol cercana que potencialmente pueda ser compostada e incorporada como abono. De este modo, un adecuado manejo de la fertilidad del suelo debe incluir una buena selección de árboles de sombra que aporten al suelo materia orgánica en cantidad y calidad, pero que a su vez compitan poco con el cultivo.

CONCLUSIONES

En la Mixteca Alta de Oaxaca el clima es la principal limitante para la producción de café y se encuentra en relación proporcional con la altitud. El clima cálido húmedo en altitudes bajas, con cafetales muy sombreados, propician una mayor incidencia de la roya. Por otro lado, las heladas en las partes altas también limitan el establecimiento del café. El modelo de aptitud para el cultivo del café propuesto con base en la inclinación de la pendiente del terreno es congruente con la realidad del territorio de la Mixteca Alta del estado de Oaxaca, pero con altos niveles de riesgo de accidentes para los agricultores y con alto riesgo de erosión en la clase Marginalmente apta. Los suelos aptos para el café deben ser profundos, al menos de un 1 m, con texturas francas y una capa

gruesa de hojarasca. Este trabajo puede servir de referencia para la evaluación de tierras para cultivos específicos en zonas con escasas de información geográfica del medio físico.

AGRADECIMIENTOS

A la CONABIO por el financiamiento al proyecto: "Estudio para la delimitación de zonas agroecológicas para el café"; A la DGAPA-UNAM por el financiamiento al proyecto "Generación de modelos de evaluación ambiental del perfil del suelo en zonas volcánicas y de karst" clave -PAPIIT IN209218.

LITERATURA CITADA

- Avelino J, Cabut S, Barboza B, Barquero M, Alfaro R, Esquivel C, Durand J-F, Cilas C (2007) Topography and crop management are key factors for the development of American leaf spot epidemics on coffee in Costa Rica. *Phytopathology* 97: 1532-1542.
- Balkansky AK, De Jesús F, Rivera N, Teresa M, Rodríguez P (2009) Los orígenes de la civilización mixteca. *Arqueología iberoamericana* 2: 25-33.
- Bautista F, Barajas A, Cortés JL, Olivares LD, Gallegos Á, Pérez A (2016a) Los costos ambientales de la pérdida de suelo en la Reserva de la Biosfera Sierra Gorda de Guanajuato. *GEOS* 36: 309-315.
- Bautista F, Pacheco A, Bautista-Hernández D (2016b) Climate change analysis with monthly data (Clic-MD). *Skiu*. Ciudad de México: 57p.
- Bautista E, Gutiérrez E, Ordaz VM, Gutiérrez C, Cajuste L (2018) Sistemas agroforestales de café en Veracruz, México: identificación y cuantificación espacial usando SIG, percepción remota y conocimiento local. *Terra Latinoamericana* 3: 263-273.
- De Beenhouwer M, Aerts R, Honnay O (2013) A global meta-analysis of the biodiversity and ecosystem service benefits of coffee and cacao agroforestry. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 175: 1-7.
- Bocco G, Castillo BS, Orozco-Ramírez Q, Ortega-Iturriaga A (2019) La agricultura en terrazas en la adaptación a la variabilidad climática en la Mixteca Alta, Oaxaca, México. *Journal of Latin American Geography* 18: 141-168.
- Borjas-Ventura R, Alvarado-Huaman L, Castro-Cepero V, Rebaza-Fernández D, Gómez-Pando L, Julca-Otiniano A (2020) Behavior of ten coffee cultivars against *Hemileia vastatrix* in San Ramón (Chanchamayo, Peru). *Agronomy* 10: 1867. Doi: 10.3390/agronomy10121867.
- Canet-Brenes G, Soto-Viquez C, Ocampo-Thomason P, Rivera-Ramírez J, Navarro-Hurtado A, Guatemala-Morales G, Villanueva-Rodríguez S (2016) La situación y tendencias de la producción de café en América Latina y El Caribe. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura-Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco A.C. San José, Costa Rica: 126p.
- Cerda R, Allinne C, Gary C, Tixier P, Harvey CA, Krolczyk L, Mathiot C, Clément E, Aubertot J-N, Avelino J (2017) Effects of shade, altitude and management on multiple ecosystem services in coffee agroecosystems. *European Journal of Agronomy* 82: 308-319.
- CONABIO (2001) Edafología. Escalas 1:250000 y 1:1000000. Ciudad de México, México.
- Cristobal-Acevedo D, Tinoco-Rueda J, Prado-Hernandez J, Hernandez-Acosta E (2019) Soil carbon and nitrogen in tropical montane cloud forest, agroforestry and coffee monoculture systems. *Revista Chapingo serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 25: 169-184. Doi: 10.5154/r.rchscfa.2018.09.070.

- Da Silva-Angelo PC, Ferreira IB, de Carvalho CHS, Matiello JB, Sera GH (2019) Arabica coffee fruits phenology assessed through degree days, precipitation, and solar radiation exposure on a daily basis. *International Journal of Biometeorology* 63: 831-843. Doi: 10.1007/s00484-019-01693-2.
- FAO (2006) Guidelines for soil description. Management Service Information Division FAO. Rome, Italy: 97p.
- Fernandez M, Méndez E (2019) Subsistence under the canopy: Agrobiodiversity's contributions to food and nutrition security amongst coffee communities in Chiapas, Mexico. *Agroecology and Sustainable Food Systems* 43: 579-601.
- Ferrusquía-Villafranca I (1999) Contribución al conocimiento geológico de Oaxaca, México - el área Laollaga-Lachivizá. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología. 103p.
- Figuroa-Jáuregui M de L, Martínez-Menez MR, Ortiz-Solorio CA, Fernández-Reynoso D (2018) Influencia de los factores formadores en las propiedades de los suelos en la Mixteca, Oaxaca, México. *Terra Latinoamericana* 36: 287-299.
- Gallegos Á, López-Carmona D, Bautista F (2019) Quantitative assessment of environmental soil functions in volcanic zones from Mexico using S&E software. *Sustainability* 11: 4552. Doi: 10.3390/su11174552.
- García-Calderón NE, Ibáñez-Huerta A, Alvarez-Arteaga G, Krasilnikov P V, Hernández-Jiménez A (2006) Soil diversity and properties in mountainous subtropical areas, in Sierra Sur de Oaxaca, Mexico. *Canadian Journal of Soil Science* 86: 61-76.
- García-Mendoza AJ, Ordóñez Díaz M de J, Briones-Salas M (2004) Biodiversidad de Oaxaca. Instituto de Biología, UNAM. Fondo Oaxaqueño para la Conservación de la Naturaleza (World Wildfire Fund). Mexico. 605p.
- García LJC, Posada-Suárez H, Läderach P (2014) Recommendations for the regionalizing of coffee cultivation in Colombia: A methodological proposal based on agro-climatic indices. *PLoS ONE* 9: e113510. Doi: 10.1371/journal.pone.0113510.
- Gay C, Estrada F, Conde C, Eakin H, Villers L (2006) Potential impacts of climate change on agriculture: a case of study of coffee production in Veracruz, Mexico. *Climatic Change* 79: 259-288.
- Gómez-González R, Palma-López DJ, Obrador-Olan JJ, Ruiz-Rosado O (2018) Root density and soil types in which coffee (*Coffea arabica* L.) is produced in Chiapas, Mexico. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios* 5: 203-215.
- Guerrero-Carrera J, Jaramillo-Villanueva JL, Mora-Rivera J, Bustamante-González A, Vargas-López S, Chulim-Estrella N (2020) Impacto del cambio climático sobre la producción de café. *Tropical and Subtropical Agroecosystems* 23: 1-18.
- Hernández JR, Ortiz MA, Figuroa M (2009) Análisis morfoestructural del estado de Oaxaca, México: un enfoque de clasificación tipológica del relieve. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM* 68: 7-24.
- Hidayat E, Afriliana A, Gusmini G, Darfis I, Rasyid Y, Harada H (2020) Land suitability evaluation of arabica coffee (*Coffea Arabica* L) plantation in Subdistrict Aie Dingin, Lembah Gumanti, Indonesia. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 583. 012005. Doi: 10.1088/1755-1315/583/1/012005.
- Jha S, Bacon CM, Philpott SM, Ernesto Méndez V, Läderach P, Rice RA (2014) Shade coffee: update on a disappearing refuge for biodiversity. *BioScience* 64: 416-428.
- Jonsson M, Raphael IA, Ekbohm B, Kyamanywa S, Karungi J (2015) Contrasting effects of shade level and altitude on two important coffee pests. *Journal of Pest Science* 88: 281-287.

- Läderach P, Ramirez-Villegas J, Navarro-Racines C, Zelaya C, Martinez-Valle A, Jarvis A (2017) Climate change adaptation of coffee production in space and time. *Climatic Change* 141: 47-62.
- Liebig T, Ribeyre F, Läderach P, Poehling HM, van Asten P, Avelino J (2019) Interactive effects of altitude, microclimate and shading system on coffee leaf rust. *Journal of Plant Interactions* 14: 407-415.
- Machado L, Rodríguez L, Murcia V, Orduz SA, Ordoñez CM, Suárez JC (2020) Macrofauna del suelo y condiciones edafoclimáticas en un gradiente altitudinal de zonas cafeteras, Huila, Colombia. *Revista de Biología Tropical* 69: 102-112.
- Mora N (2008) *Agrocadena de Café*. Ministerio de Agricultura y Ganadería. Dirección Regional Huetar Norte. <http://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/E70-9314.pdf>. Fecha de consulta: 01 de febrero de 2021.
- Moreira SLS, Pires C V., Marcatti GE, Santos RHS, Imbuzeiro HMA, Fernandes RBA (2018) Intercropping of coffee with the palm tree, macauba, can mitigate climate change effects. *Agricultural and Forest Meteorology* 256-257: 379-390. Doi: 10.1016/J.AGRFORMET.2018.03.026.
- Nesper M, Kueffer C, Krishnan S, Kushalappa C, Ghazoul J (2019) Simplification of shade tree diversity reduces nutrient cycling resilience in coffee agroforestry. *Journal Applied Ecology* 56: 119. Doi: 10.1111/1365-2664.13176.
- Ochoa P, Chamba Y, Arteaga J, Capa E (2017) Estimation of suitable areas for coffee growth using GIS approach and multicriteria evaluation in regions with scarce data. *American Society of Agricultural and Biological Engineers* 33: 841-848.
- Oscoco MI, Roldan CE, Quispe ME, Camacho VA, Marmolejo D, Marmolejo K (2020) Selección, identificación y zonificación de café (*Coffea arabica* L.) por su adaptabilidad, rendimiento, calidad sensorial y resistencia a plagas y enfermedades. *Agroindustrial Science* 10: 249-257.
- Palacio-Prieto JL, Rosado-González E, Ramírez-Miguel X, Oropeza-Orozco O, Cram-Heydrich S, Ortiz-Pérez MA, Figueroa-Mah-Eng JM, de Castro-Martínez GF (2016) Erosion, culture and geohéritage; the case of Santo Domingo Yanhuitlán, Oaxaca, México. *Geoheritage* 8: 359-369.
- Palacio PJJ, Fernández de Castro G, Rosado M (2019) Geotrails in the Mixteca Alta UNESCO Global Geopark, Oaxaca, Mexico. *Cuadernos Geograficos* 58: 111-125.
- Partelli F, Monzoli A, Goes M, Sobreira A, Leandro da Vitória E, Barreto da Silva M (2014) Root system distribution and yield of "Conilon" coffee propagated by seeds or cuttings. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 49: 349-355.
- Perez-Rodriguez V, Anderson KC (2013) Terracing in the Mixteca Alta, Mexico: Cycles of resilience of an ancient land-use strategy. *Human Ecology* 41: 335-349.
- Rosado-González EM, Ramírez-Miguel X (2017) Importancia del trabajo comunitario participativo para el establecimiento del geoparque mundial de la UNESCO Mixteca Alta, Oaxaca, México. *Investigaciones Geográficas* 92: 1-11.
- Rúa MA, Antoninka A, Antunes PM, Chaudhary VB, Gehring C, Lamit LJ, Piculell BJ, Bever JD, Zabinski C, Meadow JF, Lajeunesse MJ, Milligan BG, Karst J, Hoeksema JD (2016) Home-field advantage? evidence of local adaptation among plants, soil, and arbuscular mycorrhizal fungi through meta-analysis. *BMC Evolutionary Biology* 16: 122. Doi: 10.1186/s12862-016-0698-9.
- Samper L, Quiñones-Ruiz X, Samper LF, Quiñones-Ruiz XF (2017) Towards a balanced sustainability vision for the coffee industry. *Resources* 6: 17. Doi: 10.3390/resources6020017.

- Siebe C, Janh R, Stahr K (2006) Manual para la descripción y evaluación ecológica de suelos en el campo. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, A. C. Estado de México, México. 70p.
- Silva BM, Oliveira GC, Serafim ME, Silva ÉA, Guimarães PTG, Melo LBB, Norton LD, Curi N (2019) Soil moisture associated with least limiting water range, leaf water potential, initial growth and yield of coffee as affected by soil management system. *Soil and Tillage Research* 189: 36-43.
- Talhinhas P, Batista D, Diniz I, Vieira A, Silva DN, Loureiro A, Tavares S, Pereira AP, Azinheira HG, Guerra-Guimarães L, Várzea V, Silva M do C (2017) The coffee leaf rust pathogen *Hemileia vastatrix*: one and a half centuries around the tropics. *Molecular Plant Pathology* 18: 1039-1051.
- Toledo VM, Moguel P (2012) Coffee and sustainability: The multiple values of traditional shaded coffee. *Journal of Sustainable Agriculture* 36: 353-377. Doi: 10.1080/10440046.2011.583719.
- Tully KL, Lawrence D, Wood SA (2013) Organically managed coffee agroforests have larger soil phosphorus but smaller soil nitrogen pools than conventionally managed agroforests. *Biogeochemistry* 115: 385-397.
- Yageta Y, Osbahr H, Morimoto Y, Clark J (2019) Comparing farmers' qualitative evaluation of soil fertility with quantitative soil fertility indicators in Kitui County, Kenya. *Geoderma* 344: 153-163.
- Zhang Y, Hartemink AE (2019) A method for automated soil horizon delineation using digital images. *Geoderma* 343: 97-115.