




**Sistemas de información, zonificación y georreferenciación (agricultura de precisión)**

Artículo de investigación científica y tecnológica

## Detección de *Agave angustifolia* y *Agave cupreata* con técnicas geomáticas en Guerrero, México

Detection of *Agave angustifolia* and *Agave cupreata* with geomatic techniques in Guerrero, Mexico

 Luis Alberto Olvera-Vargas <sup>1\*</sup>  Joaliné Pardo-Núñez<sup>1</sup>  Noé Aguilar-Rivera<sup>2</sup>

 David Israel Contreras-Medina <sup>1</sup>

<sup>1</sup>Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología. Ciudad de México, México.

<sup>2</sup>Universidad Veracruzana. Veracruz, México.

\*Autor de correspondencia: Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología. Av. Insurgentes Sur 1582 Colonia Crédito Constructor, Benito Juárez, Ciudad de México. México  
lolvera@ciatej.mx

Recibido: 24 de septiembre de 2020  
Aprobado: 25 de octubre de 2021  
Publicado: 22 de marzo de 2022

Editor temático: Juan Manuel Rodríguez Rondón, Cartografía Temática de Colombia S.A.S. [Biogeomática] Bogotá, Colombia.

Para citar este artículo: Olvera-Vargas, L. A., Pardo-Núñez, J., Aguilar-Rivera, N., Contreras-Medina, D. I. (2022). Detección de *Agave angustifolia* y *Agave cupreata* con técnicas geomáticas en Guerrero, México. 23(2), e2241. [https://doi.org/10.21930/rcta.vol23\\_num2\\_art:2241](https://doi.org/10.21930/rcta.vol23_num2_art:2241)

**Resumen:** La planta del agave tiene un significativo valor económico y cultural, pues no solo se considera un producto agrícola y forestal, sino que además se emplea en la elaboración de una cantidad importante de productos. En México, uno de los derivados más representativos del agave son las bebidas destiladas de mezcal y tequila, cuya venta se ha incrementado fuera del país. En respuesta a esta demanda, Guerrero ha reportado un crecimiento anual de la producción de mezcal del 1,5 %, con un aumento en la superficie de más de 1.000 hectáreas entre 2015 y 2020. Este auge comercial ha generado una expansión e intensificación de la siembra y producción de la *Agave* spp. (Asparagaceae), así como el uso de técnicas agrícolas de producción inadecuadas y cambios en la tecnología tradicional. Es por ello que el objetivo de este trabajo fue localizar espacialmente el agave mezcal, en particular las especies *Agave cupreata* Trel. & Berger y *Agave angustifolia* Haw., con tecnologías geomáticas para identificar los ambientes diversificados del agave (silvestre o cultivado) que fortalezcan los procesos agroproductivos y potencien los subproductos del cultivo. El estudio encontró que la superficie potencial del cultivo de agave es superior a lo reportado por fuentes oficiales en más de 25.000 hectáreas y que los cálculos realizados con tecnologías geomáticas tienen una precisión del 91 % para identificar áreas adecuadas para el aprovechamiento y la conservación de estas dos especies de importancia económica.

**Palabras clave:** análisis espectral, aprovechamiento del agave, espectrorradiometría, producción de maguey, teledetección.

**Abstract:** The agave plant has significant economic and cultural value, it is considered an agricultural and forestry product, and is also used in the production of a significant number of products. In Mexico, one of the most representative derivatives of agave are distilled beverages of mezcal and tequila, whose sales have increased outside the country. In response to this demand, Guerrero has reported an annual growth in production of 1.5 %, with an increase in area of more than 1,000 hectares between 2015 and 2020. This commercial boom has generated an expansion and intensification of planting and production of *Agave* spp. (Asparagaceae), as well as the use of inadequate agricultural production techniques and changes in traditional technology. That is why the objective of this work was to spatially locate the mezcal agave, in particular the species *Agave cupreata* Trel. & Berger and *Agave angustifolia* Haw., with geomatic technologies to identify the diversified environments of the agave (wild or cultivated) that strengthen the agro-productive processes and enhance the by-products of the crop. The study found that the potential area for agave cultivation is more than 25,000 hectares higher than that reported by official sources and that the calculations made with geomatic technologies have an accuracy of 91 % to identify suitable areas for the use and conservation of these two species of economic importance.

**Keywords:** Agave production, remote sensing, Spectral Angle Mapper (SAM), spectroradiometry, use of agave.



## Introducción

Las plantas del género *Agave* son endémicas de América y su distribución se extiende desde el sur de los Estados Unidos hasta Colombia y Venezuela (Castañeda-Nava et al., 2019). Se han registrado 206 especies, distribuidas principalmente en zonas áridas y semiáridas, ya que son muy tolerables al calor y la sequía (Esqueda et al., 2011; Izazola-Rodríguez, 2011). En México existen 159 especies de agave que durante siglos han sido domesticadas para obtener productos como alimentos, combustible, fibras, calzado, materiales de construcción, medicamentos y bebidas destiladas (García-Mendoza, 2002; Ramírez et al., 2016). El agave, también conocido como *maguey*, posee un valor ambiental y agroecológico por la asociación que establece con especies vegetales y animales, su variabilidad genética y su capacidad para evitar la erosión por la retención de suelos. Asimismo, tiene importancia económica y sociocultural porque se usan 48 especies para producir bebidas destiladas como el mezcal, pulque, tequila, sotol, bacanora y charanda, actividad que beneficia a 23.000 productores y más de 100.000 personas involucradas en su producción (Delgado-Lemus et al., 2014; Esparza-Ibarra et al., 2015; Martínez et al., 2012; Yin et al., 2018).

Los productos del agave más comercializados en el mercado internacional son el tequila y el mezcal; cabe anotar que la producción de este último ha tenido repuntes debido a la comercialización del primero. El mezcal, considerado una bebida ancestral, es importante en la economía de poblaciones rurales de México, y el incremento de su producción se debe a las características distintivas que se logran mediante procesos artesanales (Chávez-Parga et al., 2016; Cuevas et al., 2019). Según el Consejo Regulador del Mezcal (CRM), en los últimos diez años la producción ha aumentado el 37 % para el mercado de exportación y 10 % para el mercado nacional. Específicamente, en 2019 se obtuvo una producción de 7,4 millones de litros, de los cuales el 63,5 % se exportaron a 65 países del mundo y el resto fue envasado para consumo nacional (CRM, 2020). La producción de mezcal solo proviene de doce estados de México, los cuales están protegidos con la denominación de origen, entre los cuales Oaxaca domina con el 90 %, seguido de Puebla (3,2 %), Durango (2,5 %), Zacatecas (1,7 %) y Guerrero (1,1 %) (CRM, 2020).

Como producto del proceso de domesticación del agave se originaron tres grupos de especies: silvestre, semicultivado y cultivado (Bautista & Smit, 2012). Según el Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP, 2019), el cultivo se reporta en 363 municipios de quince estados, con un área sembrada de 120.000 ha, de la cual el 14,6 % está dedicada a la producción de mezcal. Oaxaca es el estado con mayor superficie de agave mezcalero, con el 55,4 % del total de esa variedad, seguido de Guanajuato (14,9 %) y Guerrero (8,7 %) (SIAP, 2019). En 2019, solo se cosecharon 4.758 ha de las 17.761 sembradas, con una producción de 274.000 toneladas, lo cual generó ganancias superiores a los USD \$66 millones (SIAP, 2019). La diferencia entre el área sembrada y la cosechada se debe al largo ciclo de vida que tiene el agave: tarda entre seis y ocho años para producir frutos con semilla y para que pueda ser aprovechado para obtener la bebida (Sánchez-Teyer et al., 2009).

Los agaves silvestres y semicultivados se consideran sustentables, ya que se asocian a otros cultivos como maíz y frijol (Bautista & Smit, 2012), lo cual evita la erosión de los suelos, y en algunos casos se encuentran en sitios con bajo potencial agronómico, de manera que se aprovechan y recuperan los suelos (Cruz et al., 2013). Estos grupos de especies tienen una amplia

tolerancia ecológica, lo cual permite que sus semillas sean dispersadas y germinadas por animales. Además de que es alimento para muchas especies, el cultivo y procesamiento del agave, así como la producción del mezcal están asociados a prácticas agrícolas tradicionales, y, en muchos casos, los cultivadores no aplican fertilización ni usan plaguicidas (Bautista & Smit, 2012).

No obstante, estas características, la producción de agave mezcalero ha tenido etapas de auge y crisis debido a factores políticos, económicos, culturales y tecnológicos, los cuales han generado la extracción y sobreexplotación de la planta (Antonio & Ramírez, 2005). A partir del año 2000, la demanda creciente de tequila en el mercado mundial ocasionó la intensificación y la expansión de las áreas de extracción del agave mezcalero, de modo que para cubrir su demanda la industria usó la materia prima de otras regiones mezcateras, principalmente de Oaxaca y Guerrero (Bautista & Smit, 2012). Estos procesos cambiaron la estructura de elaboración y comercialización del mezcal: los productores modificaron las técnicas tradicionales del cultivo, se intensificó el uso de agroquímicos, se eliminaron los períodos de descanso de los suelos, así como la rotación y la asociación con otros cultivos, de tal forma que se convirtió en un monocultivo, y en algunas zonas mezcateras, las tierras sobreexplotadas sufrieron erosión y desertificación (Antonio & Ramírez, 2005).

En este contexto, los ecosistemas tradicionales de producción de las regiones mezcateras se han degradado, por lo cual se necesitan estrategias que ayuden a identificar y caracterizar las áreas aptas para la preservación y aprovechamiento sustentable del cultivo. Por ello, el objetivo de este trabajo fue detectar geográficamente las áreas de agave mezcal, especialmente de *Agave cupreata* Trel. & Berger y *Agave angustifolia* Haw. (Asparagaceae), usando tecnologías geomáticas, específicamente de espectrorradiometría de campo e imágenes de satélite, para identificar ambientes diversificados de agave (silvestres o cultivados) que sirvan para fortalecer los procesos agroproductivos y apoyar las acciones de sustentabilidad del cultivo y sus ecosistemas.

Según el CRM (2020), el 85,8 % de la producción nacional de mezcal se obtiene de *A. angustifolia* (conocido como maguey sacatoro o espadín), especie preferida por los productores de mezcal debido al corto tiempo en que llega a la madurez y porque produce piñas de mayor tamaño, de modo que se siembra con propósitos comerciales (Espinoza et al., 2002). El resto de la producción del mezcal proviene de 54 especies diferentes de agave (CRM, 2020).

En el estado de Guerrero, que tiene 1.559 ha del cultivo, las especies predominantes son *A. angustifolia* y *A. cupreata*, este último conocido como maguey papalote (CRM, 2020; SIAP, 2019). En 2019, Guerrero ocupó el segundo lugar en producción de agave, con 33.000 t, lo cual generó ganancias superiores a los USD \$7,8 millones (SIAP, 2019). Precisamente, es uno de los estados productores de mezcal que han incrementado la superficie de agave y la destilación de mezcal en los últimos diez años, lo cual ha generado que también se aproveche el maguey papalote, que predomina en estas regiones como planta silvestre (Barrientos et al., 2019).

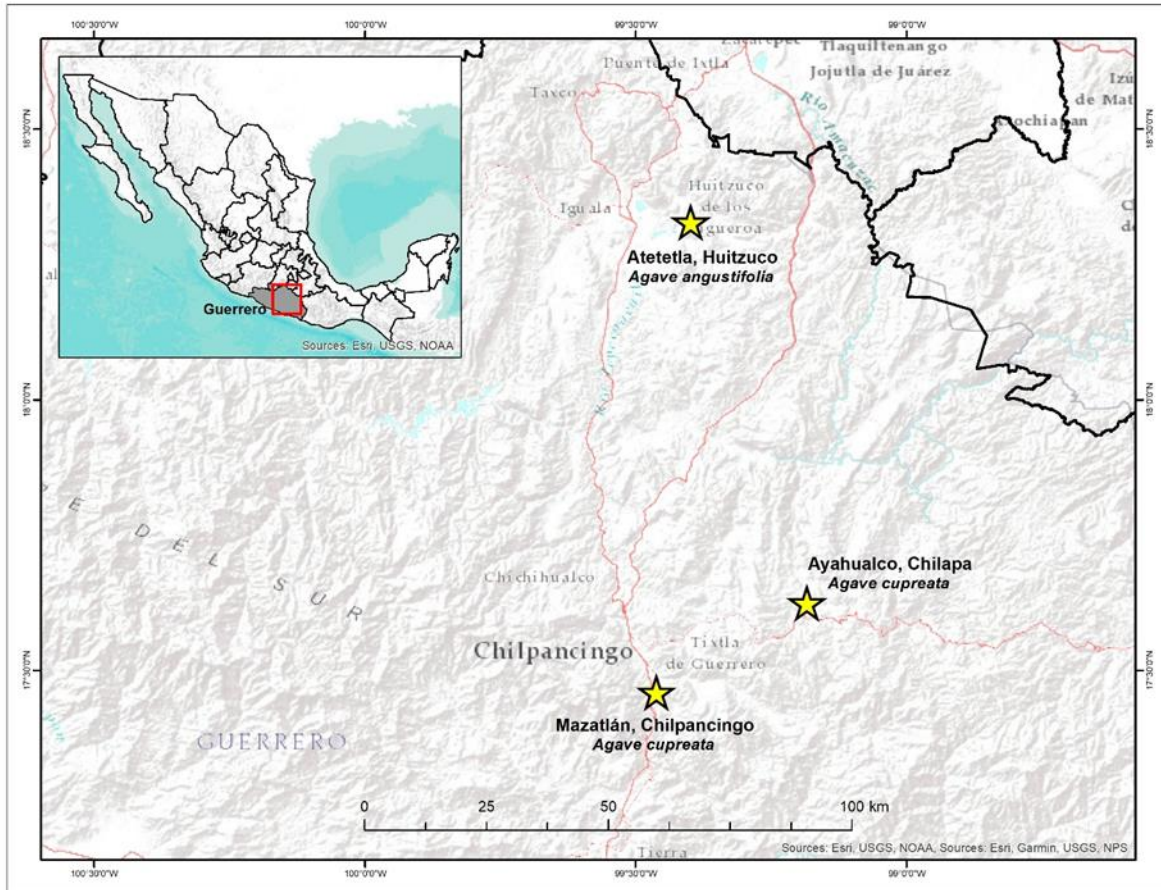
Identificar las áreas de agave, diferenciar sus condiciones de desarrollo o reconocer los problemas fitosanitarios son actividades que aplican con muy poca frecuencia tecnología geoespacial (González et al., 2017). Algunos estudios, como el de Flores et al. (2008) o Calvario et al. (2017), que emplean imágenes de satélite de alta resolución espacial e imágenes tomadas por vehículos aéreos no tripulados, son útiles para identificar áreas específicas o detectar condiciones de producción.

Sin embargo, los estudios basados en el reconocimiento espectral del cultivo de agave son poco frecuentes, particularmente los que emplean equipos en campo que ayuden a la identificación espectral *in situ*. En este sentido, la utilización de sensores portátiles se ha especializado, particularmente de espectrorradiómetros de campo de tipo multiespectral e hiperespectral, ya que permiten ver con detalle la longitud de onda electromagnética en términos de la posición específica de las bandas de absorción, las formas del espectro, la variabilidad espectral y la similitud o diferenciación con otros tipos de vegetación (Awad, 2018).

La importancia de estos sensores portátiles de campo radica en la obtención pura de espectros y firmas espectrales del objeto medido, los cuales se pueden correlacionar con los datos de sensores satelitales y/o imágenes capturadas con sensores infrarrojos montados en vehículos aéreos no tripulados (VANT). Asimismo, si son iguales y simultáneas, es posible generar un etiquetado espectral en la imagen, el cual ayuda a hacer la sistematización automática con píxeles de entrenamiento que diferencian características en cultivos de una misma área (Filippini et al., 2017). Por lo tanto, la organización e integración de estas firmas se pueden hacer construyendo librerías espectrales, las cuales no solo dan cuenta de la variabilidad entre especies vegetales, sino que también discriminan entre vegetación sana (o sin daño aparente), con deficiencias nutrimentales y/o con afectaciones por plagas y enfermedades (Rama et al., 2007).

## Materiales y métodos

Las zonas de estudio se encuentran en la Sierra Madre del Sur, en las regiones del centro y norte de Guerrero, específicamente en las comunidades de Atetetla (municipio de Huitzuco), Mazatlán (Chilpancingo) y Ayahualco (Chilapa) (figura 1). En estas zonas predominan los agaves papalote y espadín, los cuales se desarrollan sobre suelos de tipo regosol, litosol y vertisol, de poca profundidad (< 60 cm) (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], 2007), y la mayoría en áreas con pendientes entre los 5° y los 15°. La altitud va desde los 1.000 m s.n.m. hasta los 1.600 m s.n.m. (INEGI, 2019), clima cálido subhúmedo, con temperatura promedio entre 18 °C y 20 °C, y precipitaciones entre 900 mm y 1.200 mm al año (Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias [INIFAP], 2020).



**Figura 1.** Ubicación de la zona de estudio.

Fuente: Elaborado por los autores con datos de INEGI (2019)

### Obtención de firmas espectrales con espectrorradiometría de campo

Se realizó la campaña de muestreo entre los días 15 y 17 de mayo de 2019 en tres parcelas con agaves cultivados de las variedades *A. angustifolia* y *A. cupreata*. En las parcelas se identificaron diferentes etapas fenológicas (joven, velilla, capón y floración), entre las cuales predominaron los agaves a punto de cosechar (capón). Las características de cada una de las parcelas donde se realizó el muestreo están descritas en la tabla 1.

**Tabla 1.** Características de las áreas para la obtención de firmas espectrales

N.º parcela	Localidad	Municipio	Variedad	Edad	Área (ha)	Coordenadas		Altitud (m s.n.m.)
						Longitud	Latitud	
1	Atetla	Huitzoco	<i>A. angustifolia</i>	5 - 7	4	-99,3992	18,3293	1.000
2	Mazatlán	Chilpancingo	<i>A. cupreata</i>	7	7	-99,4653	17,4566	1.400
3	Ayahualco	Chilapa	<i>A. cupreata</i>	7	0.5	-99,1823	17,6178	1.500

Fuente: Elaboración propia

Para obtener las firmas espectrales se usó un espectrorradiómetro Apogee® PS-100 con una sensibilidad de longitud de onda de 350 a 1.150 nanómetros (nm) y una resolución de 1 nm, por lo cual se cuenta con más de 600 bandas de captura. El sensor se colocó en la parte superior de la planta (cenit), a una distancia aproximada de un metro, donde se capturó tres lecturas (repeticiones) para tener representatividad en los datos. Para cada planta muestreada se registraron las coordenadas geográficas, el estado fenológico, así como observaciones generales.

La distribución de los puntos para muestreo fue completamente al azar dentro de toda la parcela y las mediciones se realizaron entre las 10:00 a. m. y las 16:00 p. m., ya que el sensor captura la energía reflejada por la luz solar de los agaves. Los datos radiométricos se almacenaron de forma secuencial. Los datos espectrales se promediaron según etapa fenológica y se guardaron en formato .csv (delimitado por comas) para exportarlos al software ENVI 5.1 identificando cada dato con el número de parcela correspondiente.

### **Captura de imagen con cámara infrarroja**

Con el propósito de capturar la misma información espectral y escalar los datos a las imágenes de satélite, se capturó una imagen en cada sitio muestreado con una cámara MAPIR Survey 3W (R+G+NIR) de tres bandas, la cual toma imágenes con información entre 550 y 850 nm dentro de la longitud de onda. La cámara se colocó al lado del sensor del espectrorradiómetro, y simultáneamente se capturaba la información espectral de la misma área, ya que el lente de la cámara tiene un campo de visión de 87 ° HFOV (Horizontal Field of View) y el del sensor es de 80° HFOV.

Debido a las características de la cámara, las imágenes captadas se calibraron automáticamente. Además, con los valores de reflectividad de la banda roja (600 nm) y la banda infrarroja (800 nm) se generó una imagen de salida con el algoritmo del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI). Cada imagen fue etiquetada y se editó en el software ENVI 5.1 para representarla en una gama de colores y asociarla posteriormente con las firmas espectrales.

### **Obtención y procesamiento de imágenes de satélite**

Para conocer la distribución espacial de los agaves y reconocer sus etapas fenológicas, se descargaron imágenes de satélite de alta resolución espacial del sensor Landsat 8 OLI (Operational Land Imager), la cual cubre una longitud de onda desde los 0,435  $\mu\text{m}$  hasta los 12,51  $\mu\text{m}$  contenidas en once bandas (USGS, 2019). Para este estudio, se usaron solamente cuatro bandas, correspondientes a las bandas 2, 3, 4 y 5, que cubren una longitud de onda entre los 0,452  $\mu\text{m}$  y los 0,879  $\mu\text{m}$ .

Las imágenes fueron descargadas desde la página Earthexplorer (<https://earthexplorer.usgs.gov/>) con fecha del 21 de mayo de 2019. La imagen no corresponde a la fecha exacta de obtención de datos en campo, pero fue la imagen disponible más cercana a dicha fecha. Para cubrir la zona de estudio, se necesitaron dos escenas (path/row): 026/047 y 026/048. Para procesar las imágenes en el software ENVI 5.1 se generó un mosaico entre ambas escenas y se cortó el área de estudio.

## Clasificación espectral y escalamiento espacial de firmas espectrales

La clasificación espectral se realizó separando cada medición por etapa fenológica en el software ENVI 5.1. Los valores fueron introducidos y convertidos a formato *spectral library* (.sli) para posteriormente graficarlos por reflectancia según la longitud de onda. Estos datos son la principal fuente para realizar el escalamiento a imágenes de satélite descargadas. Para ello, se utilizó el método de clasificación SAM (Spectral Angle Mapper), que consiste en hacer una clasificación espectral rápida usando la longitud de onda de captura y la cantidad de reflectancia, la cual, además, evalúa la calidad de los clasificadores y la compresión de los valores del algoritmo en la imagen (Camps-Valls, 2016).

En dicho proceso, se define el número de bandas y la longitud que abarca cada una de ellas. Después se guarda el subconjunto (*subset*) en un archivo definidor, el cual se usa en la imagen que se va a clasificar, y se separa cada tipo de firma espectral distinta (etapas fenológicas). A los resultados con las áreas clasificadas se les otorga un color diferente para diferenciarlos y se edita para el formato de salida. Para validar el proceso de clasificación se usaron puntos de control de tres fuentes: datos georreferenciados *in situ*, datos reportados por Aguirre-Dugua y Eguiarte (2013), Avendaño-Arrazate et al. (2015) y Barrientos et al. (2019), además de datos reportados por el Global Biodiversity Information Facility (GBIF, 2020) para sitios con presencia de *A. angustifolia* y *A. cupreata*. Finalmente, la precisión del proceso de escalamiento de firmas espectrales a imágenes de satélite se obtuvo con una matriz de confusión.

## Resultados

En la parcela 1, ubicada en el municipio de Huitzuco, donde la especie de agave fue *A. angustifolia*, se tomaron 21 puntos (plantas) en diferentes estados de crecimiento, de los cuales 7 fueron en plantas jóvenes, 4 en etapa velilla, 5 en capón, 3 en estado de floración y 2 con daños por plaga del picudo de agave, *Scyphophorus acupunctatus* Gyllenhal (Coleoptera: Dryophthoridae). La firma espectral (figura 2) se elaboró con base en las lecturas tomadas.



**Figura 2.** Firmas espectrales de *A. angustifolia*.

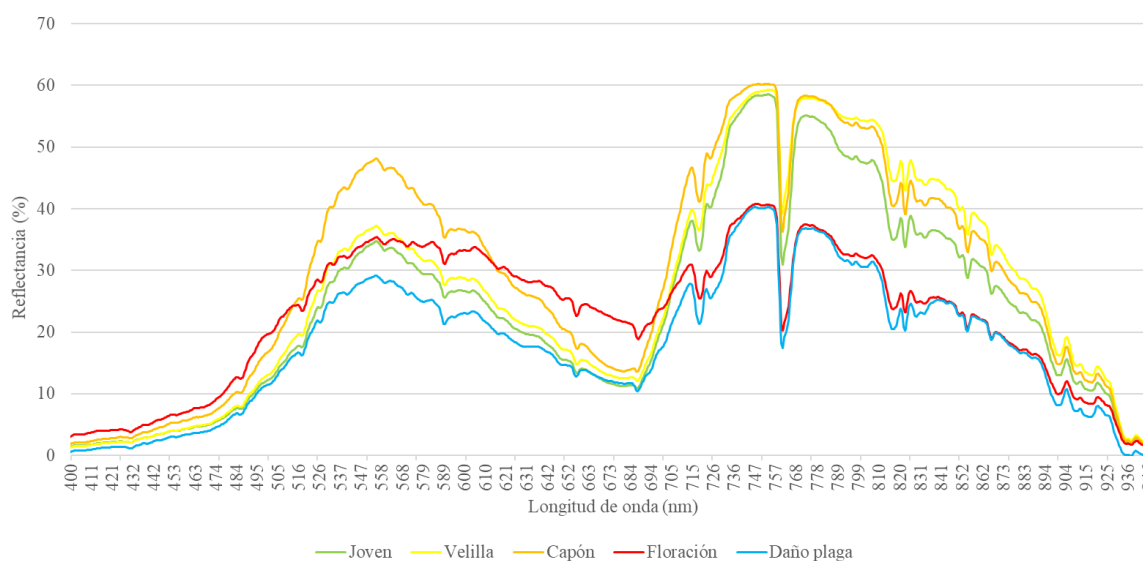
Fuente: Elaboración propia

Se han realizado pocos estudios sobre las respuestas espectrales del agave con técnicas geomáticas de campo, y menos aún en las especies de *A. angustifolia* y *A. cupreata*. Sin embargo, existen algunas investigaciones que han caracterizado los agaves usando la radiancia y la reflectancia, como lo han expuesto Cervantes-Martínez et al. (2004), que muestran espectros de intensidad parecidos a los obtenidos en los agaves espadín. La respuesta espectral de cada etapa fenológica presenta separabilidad en las regiones del verde (500-600 nm), el rojo (650-690 nm) y el infrarrojo cercano (700-820 nm), aunque este último no es detectable en las imágenes Landsat.

Cuando la planta está en etapa joven, la banda verde no alcanza más del 30 % de reflectancia, mientras que en la banda roja solo se refleja el 10 % de la energía recibida. Este proceso se debe a que la clorofila del agave absorbe la luz visible y especialmente la luz roja para realizar el proceso de fotosíntesis, en tanto que en la longitud de onda infrarroja, refleja la energía con más eficacia (> 50 %), ya que la planta no la requiere y la libera para evitar calentarse y perder agua por la evapotranspiración (Nidamanuri & Zbell, 2012).

A medida que el agave va madurando, el porcentaje de reflectancia aumenta en casi toda la longitud de onda medida. Específicamente, refleja mayor energía en la etapa capón, sobre todo en la porción de 500 nm a 700 nm en la longitud de onda. Estos valores de reflectancia coinciden con lo reportado por Fondom et al. (2009), quienes demostraron que la reflectancia va incrementando conforme la planta llega a la madurez.

Cuando los escapos de agave rebasan la altura de 1,5 metros, la planta florece y produce semillas. Dado que la planta requiere mayor energía para realizar este proceso (Treviño-Carreón et al., 2011), reduce la reflectancia, sobre todo en la banda verde y el infrarrojo. En el caso de los agaves con daño por plaga (en la mayoría por picudo del agave *S. acupunctatus*), la reflectancia en la porción del infrarrojo se reduce entre el 30 % y el 20 %, lo cual genera que la planta pierda humedad y se seque (Aquino-Bolaños et al., 2013).



**Figura 3.** Firmas espectrales de *A. cupreata*.

Fuente: Elaboración propia

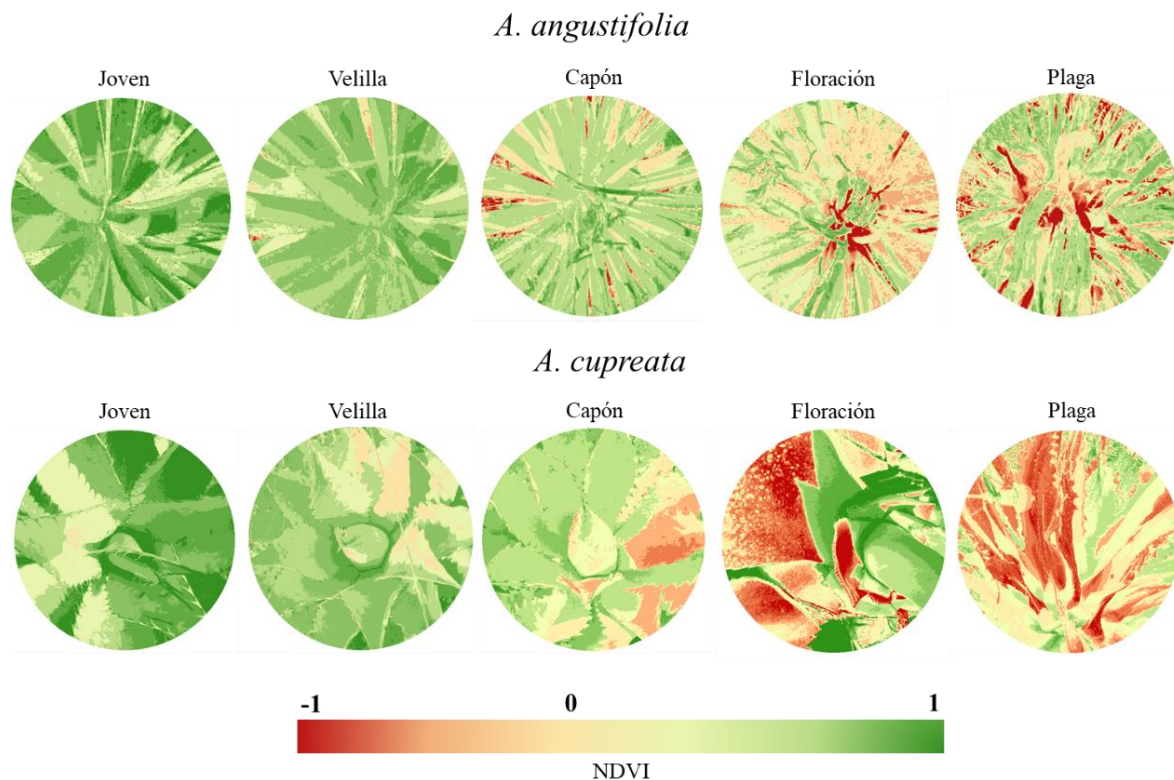


Para *A. cupreata* se obtuvieron 29 puntos en dos parcelas ubicadas en los municipios de Chilpancingo y Chilapa. Se tomaron 4 puntos en agaves jóvenes, 10 en velilla, 5 en capón, 5 en floración y 5 con daño por plaga. La respuesta espectral por estado fenológico se muestra en la figura 3.

De la misma forma que el maguey espadín, *A. cupreata* refleja menos energía en la etapa más joven y a medida que va madurando aumenta la energía que refleja en casi toda la longitud de onda medida, registrando mayor separación de reflectancia en el área visible verde. Sin embargo, la reflectancia en la longitud de onda visible e infrarroja es superior al maguey espadín, pues llega a porcentajes por arriba del 40 % en la banda verde y del 60 % en la porción infrarroja. Esto se debe a que la planta se encuentra de forma silvestre o semicultivada, por lo que existe poco manejo agrícola, además de que se encuentra en paisajes más secos y caducifolios (Aguirre-Dugua & Eguiarte, 2013). Además, este agave presentaba un mayor número de plantas con problemas fitosanitarios, generalmente causados por el picudo del agave, lo cual se observa en el promedio de la respuesta espectral, particularmente en la porción infrarroja, debido a la pudrición del cogollo y el daño a parte de las hojas (Aquino-Bolaños et al., 2007).

Este comportamiento espectral se puede observar con las imágenes tomadas en el cenit de la planta (figura 4), en las cuales la representación del NDVI evidencia el estado general de la planta en sus diferentes etapas fenológicas. En el estado joven, las tonalidades en verde indican poca reflectividad en las bandas visibles, particularmente en el verde (500-600 nm), lo cual se debe a la fuerte absorción por la presencia de pigmentos de clorofila. En contraste, cuando las plantas van madurando reflejan mayor cantidad de energía, ya que la reflectancia está asociada con la estructura del cultivo y su contenido de agua (Noyola-Medrano & Martínez-Sías, 2017). En etapa de floración, los azúcares se concentran en el cogollo, de manera que la planta libera energía y humedad (Aguirre-Dugua & Eguiarte, 2013; Santiago-García et al., 2017), elementos que se notan en las tonalidades rojizas que están asociadas a las longitudes de onda de infrarrojo (700-800 nm). Finalmente, cuando existe daño por el picudo del agave, los efectos se encuentran en hojas y raíz, aunque cuando son severas también se localizan en el cogollo y en el escapo floral (Aquino-Bolaños et al., 2007), lo cual se denota en las tonalidades en rojo de la imagen.

En general, cuando el NDVI presenta valores cercanos a 1 significa que la planta está sana, con hojas verdes y abundantes, mientras que si se acerca a valores de -1 y 0 es posible que tenga problemas asociados a falta de nutrimentos, daños por plaga o enfermedad, o falta de agua (Noyola-Medrano & Martínez-Sías, 2017).

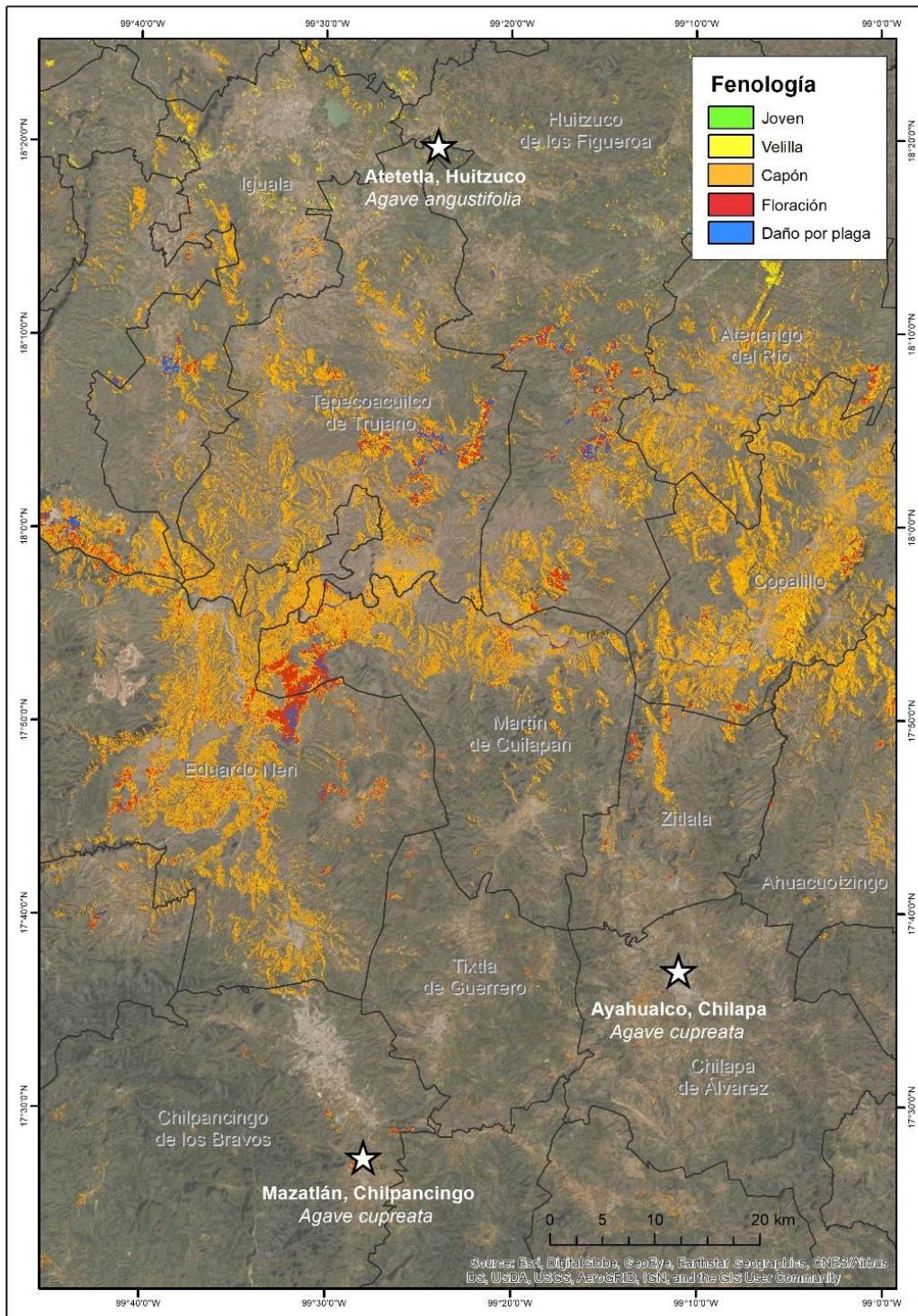


**Figura 4.** Imágenes tomadas en el cenit en diferentes etapas fenológicas de *A. angustifolia* y *A. cupreata*.

Fuente: Elaboración propia

Las firmas espectrales de las etapas de desarrollo identificadas en campo y su escalamiento por el método de clasificación SAM (Spectral Angle Mapper) se muestran en la figura 5. De acuerdo con las fechas en que se hicieron las mediciones, la etapa que predominó en la región fue capón, la misma que se ve clasificada en la imagen de satélite. Este grado de madurez recibe un manejo especial del labrador, quien lo selecciona en los recorridos de campo, y se caracteriza porque la planta desarrolla el escapo floral, que se corta antes de que alcance los 1,5 m de altura. Posteriormente, se deja el maguey en campo para que los azúcares se acumulen en la piña y después se cosecha (Barrientos et al., 2019; Sánchez-Jiménez, 2017).

También se observaron áreas donde los magueyes se encontraban en etapa de floración, en la cual la planta ya no es aprovechada para la producción del mezcal, sino que se utiliza para la producción natural de flor y semillas (Aguirre-Dugua & Eguiarte, 2013). En el caso de las áreas con daños por picudo del agave, si bien están definidas solo en algunos sitios, el problema está presente en casi todos los lugares donde se produce *A. angustifolia* (Aquino-Bolaños et al., 2013). La región mezcalera más importante de Guerrero está conformada por diez municipios, que producen el 87 % del agave en el estado. Según el SIAP (2019), en Guerrero se reportan 1.559 ha de agave, pero los cálculos obtenidos de la clasificación muestran que en la zona pueden existir condiciones para 19.000 ha de *A. angustifolia* (figura 5).



**Figura 5.** Escalamiento espacial según clasificación de etapas fenológicas de *A. angustifolia* en el estado de Guerrero.

Fuente: Elaboración propia

Los municipios con mayor superficie estimada son Tixtla de Guerrero, Martín de Cuilapa, Chilpancingo de los Bravos, Chilapa de Álvarez, Eduardo Neri, Huitzuco de los Figueroa, Zitlala y Ahuacuotzingo, que además son los municipios que reportan mayor producción del cultivo. Estas áreas estimadas de agave se encuentran actualmente sobre diferentes usos de suelo: selvas bajas caducifolias (23 %), pastizales inducidos (14 %) y áreas con vegetación primaria con diversos grados de perturbación (48 %), el resto son áreas donde hoy en día se siembra la planta (INEGI, 2017).

La clasificación espectral también marca los sitios en donde existen o pudieran existir problemas fitosanitarios, así como las plantas de agave que se encuentran en floración, que a su vez pueden ser sitios para la conservación de flores y semillas de la planta que ayuden a las prácticas de propagación (Santiago-García et al., 2017).

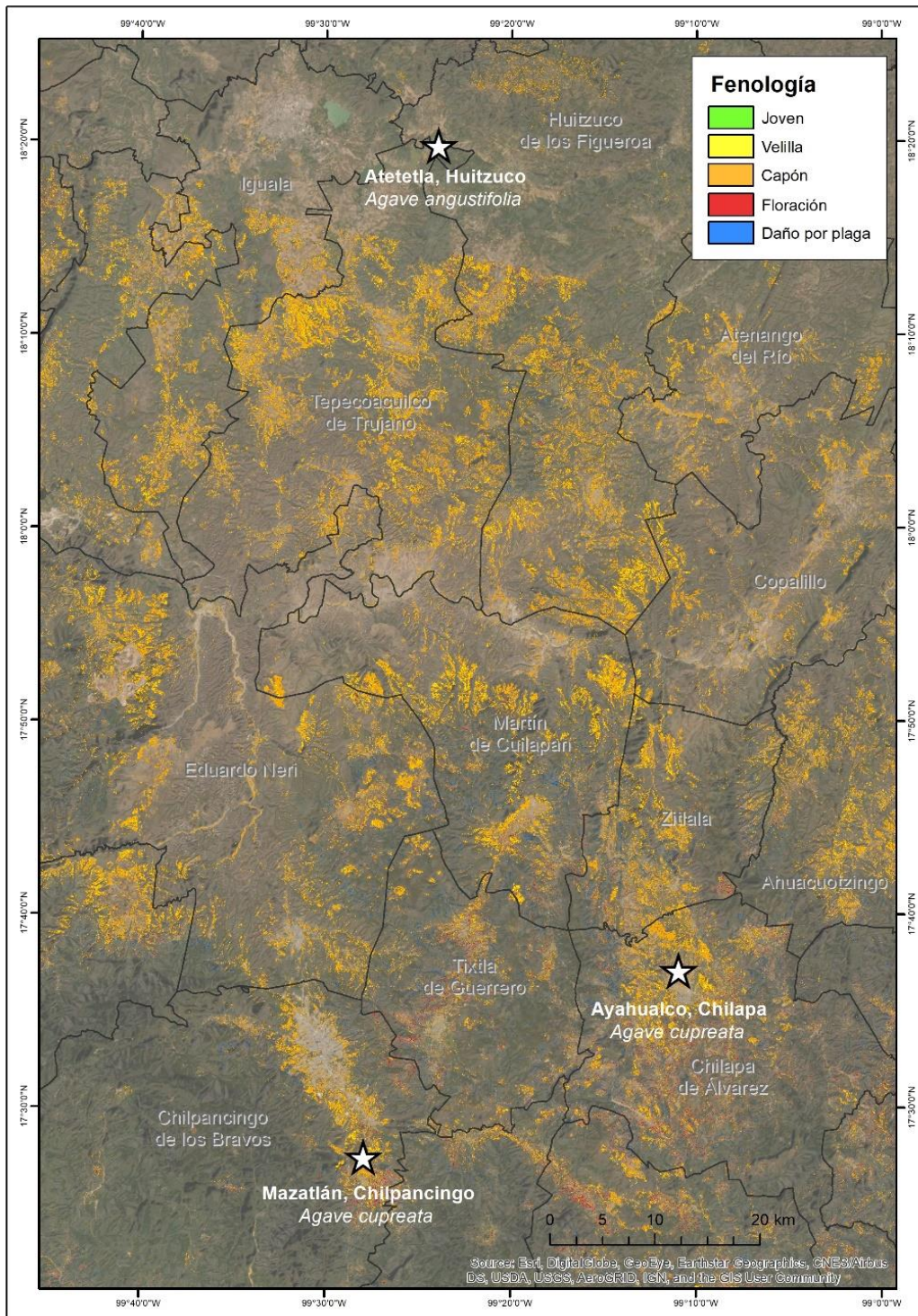
Con base en las firmas espectrales obtenidas en campo para *A. cupreata* se hizo el escalamiento espacial en el área de interés, clasificado por etapa fenológica (figura 6). Este agave se encuentra distribuido ampliamente por toda la región, aunque en menor extensión que el maguey espadín, probablemente por ser una especie más silvestre que cultivada, además de que es considerada un producto forestal no maderable (Avendaño-Arrazate et al., 2015).

De acuerdo con Martínez-Palacios et al. (2011), esta especie se encuentra en altitudes superiores a los 1.200 m.s.n.m., sobre piedemontes de laderas poco abruptas y está asociada a paisajes caducifolios. Estas características coinciden con lo estimado por la clasificación de las firmas espectrales escaladas a las imágenes Landsat de la región, en donde existe un área de 7.800 ha que podría ser aprovechada para cultivar *A. cupreata*.

A partir de los datos de superficie del SIAP (2019) y el porcentaje que estima el CRM (2020), en Guerrero se reporta poco más de 200 ha de maguey papalote, ya que, según la información, el 83 % corresponde a maguey espadín. Sin embargo, estos datos no coinciden con los reportados por Lisle (2008), según los cuales tan solo en los municipios de Martín de Cuilapan y Zitlala se cuantifican 4.700 ha de *A. cupreata*. Esta superficie estimada se sobrepone a paisajes que actualmente tienen bosques de encino asociados a vegetación secundaria, así como a selvas caducifolias y pastizales cultivados; además, el maguey papalote se podría encontrar o establecer sobre áreas con problemas de deforestación y erosión de suelo (Bautista & Smit, 2012).

Según el escalamiento de las firmas espectrales, en la fecha a la que corresponde la imagen (mayo) no existen problemas fitosanitarios representativos, a pesar de que las parcelas donde se obtuvieron los datos sí tenían picudo del agave. Adicionalmente las áreas de floración no se muestran extensivamente en el escalamiento de las firmas, sin embargo, esta etapa fenológica es frecuente en la zona y es fundamental para la conservación de la especie en la región (Aguirre-Dugua & Eguiarte, 2013).

Aunque no existen reportes oficiales que indiquen la superficie aproximada por el uso tradicional que se le da a este agave, sí hay datos sobre el uso y la explotación que se ha hecho de la especie: primero, para cubrir la demanda de otros estados en la elaboración de tequila y, segundo, en los últimos años por el auge del mezcal artesanal y la poca diversidad genética provocada por el aprovechamiento desmedido de la planta (Aguirre-Dugua & Eguiarte, 2013; Antonio & Ramírez, 2005; Bautista & Smit, 2012; Cruz et al., 2013).



**Figura 6.** Escalamiento espacial según clasificación de etapas fenológicas de *A. cupreata* en el estado de Guerrero.

Fuente: Elaboración propia

Con los datos obtenidos en campo, los datos reportados en el GBIF (2020) y los registrados por Aguirre-Dugua y Eguiarte (2013), Avendaño-Arrazate et al. (2015) y Barrientos et al. (2019), se tuvieron en total 99 puntos de control para *A. angustifolia* y 63 puntos para *A. cupreata*. Todos estos sitios se encuentran dentro de los diez municipios con más superficie de agaves en el estado de Guerrero. Con el fin de realizar un análisis de efectividad de la clasificación de firmas espectrales, dichos puntos se sobrepusieron a cada escenario, los cuales contienen coordenadas en longitud y latitud (Unger, 2007). La matriz de confusión se realizó para cada especie, con lo cual se obtuvo una precisión del 91 % para el maguey espadín y del 92 % para el maguey papalote (tabla 2).

**Tabla 2.** Matriz de confusión para evaluar la clasificación de firmas espectrales de *A. angustifolia* y *A. cupreata*.

		Predicho		
		<i>A. angustifolia</i>	<i>A. cupreata</i>	Otro
Observado	<i>A. angustifolia</i>	91	7	1
	<i>A. cupreata</i>	2	58	3

Fuente: Elaboración propia

La precisión de la clasificación de firmas espectrales vía SAM fue alta, comparándola con otras clasificaciones hechas para la especie de agave. Por ejemplo, González et al. (2017) obtuvieron una precisión del 73 % en una clasificación supervisada por puntos de control en *Agave tequilana*, la cual se considera buena al usar imágenes Landsat. Sin embargo, se mejora la precisión si se usan imágenes capturadas con Vehículos Aéreos No Tripulados (VANT), como hicieron Calvario et al. (2017), quienes reportaron una precisión del 99 % de plantas correctamente clasificadas. En general, la clasificación por medio de firmas espectrales *in situ* en la región Centro y Norte del estado de Guerrero fue en promedio del 91 %.

## Conclusiones

La combinación de diferentes técnicas geomáticas, como la espectrorradiometría de campo, asociada a su escalamiento espacial a imágenes de satélite, es relevante para clasificar objetos de forma precisa. En este estudio se identificaron áreas que pueden ser aprovechadas y conservadas con dos especies de agave importantes en la región de Guerrero: *A. angustifolia* y *A. cupreata*.

El análisis de la información recogida permitió ubicar de forma concreta los diferentes estados de desarrollo que tiene cada especie, así como calcular la superficie con potencial, ya que las firmas espectrales permiten diferenciar la reflectancia de cada especie con facilidad, proceso que es difícil con el uso exclusivo de imágenes de satélite. De esta manera, la combinación espectral con imágenes tomadas al cenit y las firmas espectrales in situ ayudaron a mejorar la clasificación SAM (Spectral Angle Mapper), incorporando un elemento intermedio entre la información espectral de la planta y la respuesta espectral de la imagen. No obstante, es importante tener en cuenta que las fechas de las mediciones y las de la captura del satélite deben coincidir, ya que las condiciones vegetales pueden cambiar en períodos cortos.

El cálculo obtenido de la superficie potencial de *A. angustifolia* y *A. cupreata* fue de 19.000 h y 7.800 ha, respectivamente, para la región centro y norte de Guerrero, que es la más productiva del estado. Dicha superficie es superior a lo reportado por fuentes oficiales en más de 25.000 ha. Finalmente, se concluye que los cálculos realizados con las tecnologías geomáticas descritas poseen una precisión del 91 % en la identificación de áreas adecuadas para el aprovechamiento y la conservación de estas dos especies de importancia económica, que son usadas para la producción del mezcal, una bebida de relevancia nacional e internacional.

## Agradecimientos

Los autores agradecen a los productores de agave del estado de Guerrero: Rubén Velazco de Atetetla, Don Fili, de la localidad de Mazatlán, y a Gabriel Vázquez, de Ayahualco, por permitirnos medir en sus huertas. Esta investigación fue financiada por CONACYT a través del proyecto de Problemas Nacionales 6590 “Entornos de aprendizaje, capacitación y análisis para el fortalecimiento de las cadenas de valor a partir del trabajo con maestras mezcaleras en Oaxaca y Guerrero”. También se agradece a los pares evaluadores y a los editores de esta revista por sus contribuciones para mejorar este trabajo.

## Descargos de responsabilidad

Todos los autores realizaron aportes significativos al documento, están de acuerdo con su publicación y manifiestan que no existen conflictos de interés en este estudio.

## Referencias

- Antonio, B. J., & Ramírez, J. J. (2005). Sostenibilidad y pobreza en las unidades socioeconómicas campesinas de la “Región del Mezcal” en Oaxaca. En R. Wences Reza, L. Sampedro Rosas, R. López Velasco, & J. L. Rosas Acevedo (Eds.), *Problemática territorial y ambiental en el desarrollo regional* (1.ª ed.; pp. 325-351). Asociación Mexicana de Ciencias para el Desarrollo Regional; Unidad de Ciencias de Desarrollo Regional de la Universidad Autónoma de Guerrero; ININEE-Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. [https://www.amecider.org/files/ugd/3e9b9b\\_d6bf6df3b64f418588f969948eab8f51.pdf](https://www.amecider.org/files/ugd/3e9b9b_d6bf6df3b64f418588f969948eab8f51.pdf)
- Aquino-Bolaños, T., Iparraguirre Cruz, M. A., & Ruiz Vega, J. (2007). *Scyphophorus acupunctatus* (= *interstitialis*) Gyllenhal (Coleoptera: Curculionidae). Plaga del agave mezcalero: Pérdidas y daños en Oaxaca, México. *Revista UDO Agrícola*, 7(1), 175-180. <http://udoagricola.orgfree.com/V7UDOAgr/V7Aquino175.htm>
- Aquino-Bolaños, T., Ortiz-Hernández, Y. D., & Martínez-Gutiérrez, G. A. (2013). Relationship between *Scyphophorus acupunctatus* Gyllenhal damage and nutrient and sugar content of *Agave angustifolia* Haw. *Southwestern Entomologist*, 38(3), 477-486. <https://doi.org/10.3958/059.038.0310>
- Aguirre-Dugua, X., & Eguiarte, L. E. (2013). Genetic diversity, conservation and sustainable use of wild *Agave cupreata* and *Agave potatorum* extracted for mezcal production in Mexico. *Journal of Arid Environments*, 90, 36-44. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2012.10.018>
- Avendaño-Arrazate, C. H., Iracheta-Donjuan, L., Gódinez-Aguilar, J. C., López-Gómez, P., & Barrios-Ayala, A. (2015). Caracterización morfológica de *Agave cupreata*, especie endémica de México. *Phyton Revista Internacional de Botánica Experimental*, 84(1), 148-162. [http://www.revistaphyton.fund-romuloraggio.org.ar/vol84-1/Avendano\\_Arrazate\\_COLOR.pdf](http://www.revistaphyton.fund-romuloraggio.org.ar/vol84-1/Avendano_Arrazate_COLOR.pdf)
- Awad, M. M. (2018). Crop mapping using hyperspectral data and technologies - A comparison between different supervised segmentation algorithms. En *18th International Multidisciplinary Scientific GeoConference (SGEM 2018)* (pp. 89-96). International Multidisciplinary Scientific GeoConferences (SGEM). <https://doi.org/10.5593/sgem2018/2.3/S10.012>
- Barrientos Rivera, G., Esparza Ibarra, E. L., Segura Pacheco, H. R., Talavera Mendoza, Ó., Sampedro Rosas, M. L., & Hernández Castro, E. (2019). Caracterización morfológica de *Agave angustifolia* y su conservación en Guerrero, México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 10(3), 655-668. <https://doi.org/10.29312/remexca.v10i3.1554>
- Bautista, J. A., & Smit, M. A., (2012). Sustentabilidad y agricultura en la “región del mezcal” de Oaxaca. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 10(3), 655-668. <https://doi.org/10.29312/remexca.v3i1.1477>
- Calvario, G., Sierra, B., Alarcón, T. E., Hernandez, C., & Dalmau, O. (2017). A multi-disciplinary approach to remote sensing through low-cost UAVs. *Sensors*, 17(6), Article number 1411. <http://dx.doi.org/10.3390/s17061411>
- Camps-Valls, G. (2016). Kernel spectral angle mapper. *Electronics Letters*, 52(14), 1218-1220. <http://dx.doi.org/10.1049/el.2016.0661>
- Castañeda-Nava, J. J., Rodríguez-Domínguez, J. M., Camacho-Ruiz, R. M., Gallardo-Valdez, J., Villegas-García, E., & Gutiérrez-Mora, A. (2019). Morphological comparison among populations of *Agave salmiana* Otto ex Salm-Dyck (Asparagaceae), a species used for mezcal production in Mexico. *Flora*, 255, 18-23. <https://doi.org/10.1016/j.flora.2019.03.019>



- Cervantes-Martínez, J., López-Díaz, S., & Rodríguez-Garay, B. (2004). Detection of the effects of *Methylobacterium* in *Agave tequilana* Weber var. azul by laser-induced fluorescence. *Plant Science*, 166(4), 889-892. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2003.11.029>
- Chávez-Parga, M. D. C., Pérez Hernández, E., & González Hernández, J. C. (2016). Revisión del agave y el mezcal. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 18(1), 148-164. <https://doi.org/10.15446/rev.colomb.biote.v18n1.49552>
- Consejo Regulador del Mezcal. (2020). *Informe Estadístico 2020*. <https://comercam-dom.org.mx/>
- Cruz Gracia, H., Enríquez-del Valle, J. R., Velasco Velasco, V. A., Ruiz Luna, J., Campos Ángeles, G. V., & Aquino García, D. E. (2013). Nutrientes y carbohidratos en plantas de *Agave angustifolia* Haw. y *Agave karwinskii* Zucc. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 6(especial), 1161-1173. <https://doi.org/10.29312/remexca.v0i6.1280>
- Cuevas Reyes, V., Sánchez Toledano, B. I., Borja Bravo, M., Espejel García, A., Sosa Montes, M., Barrera Rodríguez, A. I., & Saavedra García, M. J., (2019). Caracterización de la producción de maguey en el Distrito de Miahuatlán, Oaxaca. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 10(2), 365-377. <https://doi.org/10.29312/remexca.v10i2.1632>
- Delgado-Lemus, A., Casas, A., & Téllez, O. (2014). Distribution, abundance and traditional management of *Agave potatorum* in the Tehuacán Valley, Mexico: bases for sustainable use of non-timber forest products. *Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine*, 10, Article number 63. <https://doi.org/10.1186/1746-4269-10-63>
- Esparza-Ibarra, E. L., Violante-González, J., Monks, S., Cadena Iñiguez, J., Araujo-Andrade, C., & Rössel-Kipping, E. D. (2015). Los agaves mezcaleros del altiplano potosino y zacatecano. En G. Pulido-Flores, S. Monks, & M. López-Herrera, *Estudios en biodiversidad* (vol. 1; pp. 227-245). Zea Books. <https://digitalcommons.unl.edu/biodiversidad/20/>
- Espinosa Paz, H., Arredondo Velázquez, C., Cano, García, M. A., Canseco López, A., & Vásquez Quintana, F. (2002). *La materia prima para producir el mezcal oaxaqueño: Catálogo de la diversidad de agaves*. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias; Centro de Investigación Regional del Pacífico Sur, Campo Experimental Valles Centrales de Oaxaca. <https://www.worldcat.org/title/materia-prima-para-producir-el-mezcal-oaxaqueño-catalogo-de-la-diversidad-de-agaves/oclc/651365119>
- Esqueda, M., Coronado, M. L., Gutiérrez, A. H., & Fragoso, T. (2011). *Agave angustifolia* Haw: *Técnicas para el trasplante de vitroplantas a condiciones de agostadero*. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural y Alimentación; Sistema Nacional de Recursos Fitogenéticos para la Alimentación y la Agricultura ; Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A. C. [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/168835/Agave\\_angustifolia\\_Haw\\_Tcnicas\\_para\\_el\\_Transplante\\_de\\_Vitroplantas\\_a\\_Condiciones\\_de\\_Agostadero.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/168835/Agave_angustifolia_Haw_Tcnicas_para_el_Transplante_de_Vitroplantas_a_Condiciones_de_Agostadero.pdf)
- Filippini Alba, J. M., Flores, C. A., & Miele, A. (2017). Geotechnologies and soil mapping for delimitation of management zones as an approach to precision viticulture. *Applied and Environmental Soil Science*, 2017, Article number 4180965. <http://dx.doi.org/10.1155/2017/4180965>
- Flores Garnica, J., Reich, R., Talavera Zuñiga, E., & Aguirre Bravo, C. (2008). Using remote sensing to support different approaches to identify agave (*Agave tequilana* Weber) crops. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 37, 941-948. [https://www.isprs.org/proceedings/XXXVII/congress/8\\_pdf/10\\_WG-VIII-10/04.pdf](https://www.isprs.org/proceedings/XXXVII/congress/8_pdf/10_WG-VIII-10/04.pdf)
- Fondom, N. Y., Castro-Nava, S., & Huerta, A. J. (2009). Photoprotective mechanisms during leaf ontogeny: cuticular development and anthocyanin deposition in two morphs of *Agave*

- striata* that differ in leaf coloration. *Botany*, 87(12), 1186-1197. <https://doi.org/10.1139/B09-076>
- García-Mendoza, A. (2002). Distribution of *Agave* (Agavaceae) in México. *Cactus and Succulent Journal*, 74(4), 177-188. [https://www.researchgate.net/publication/303263665\\_Distribution\\_of\\_Agave\\_Agavaceae\\_in\\_Mexico](https://www.researchgate.net/publication/303263665_Distribution_of_Agave_Agavaceae_in_Mexico)
- González, D. R., Ceja Ramírez, R., Ruiz Corral, J. A., Rendón Salcido, L. A., & Flores Garnica, J. G. (2017). Detección de restricciones en la producción de agave azul (*Agave tequilana* Weber var. azul) mediante percepción remota. *Terra Latinoamericana*, 35(3), 259-268. <https://doi.org/10.28940/terra.v35i3.252>
- Global Biodiversity Information Facility. [GBIF]. (2020). GBIF. <https://doi.org/10.15468/dl.mrfyrc>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI]. (2007). Edafología: Conjunto de datos vectoriales edafológico. Escala 1:250.000 Serie II (Continuo Nacional) [Base de datos]. <https://www.inegi.org.mx/temas/edafologia/default.html#Descargas>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI]. (2017). Uso de suelo y vegetación: Conjunto de datos vectoriales de la carta de uso de suelo y vegetación. Escala 1:250.000. Serie VI. Conjunto Nacional [Base de datos]. <https://www.inegi.org.mx/temas/usosuelo/default.html#Descargas>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI]. (2019). Topografía: Conjunto de datos vectoriales de información topográfica escala 1:250.000. Guerrero. Serie VI [Base de datos]. <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=889463776826>
- Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias [INIFAP]. (2020). Laboratorio Nacional de Modelaje y Sensores Remotos. <https://clima.inifap.gob.mx/lnmysr/Principal/Index>
- Izazola-Rodríguez, P. (2011). *Flora del Valle de Tehuacán-Cuicatlán*. Instituto de Biología, Universidad Nacional Autónoma de México. <https://doi.org/10.22201/ib.9786073009010e.2018>
- Lilsley, C. (2008). *Manejo campesino sustentable del maguey papalote del Chilapan: Fase II* [Informe final del Proyecto ES004]. Grupo de Estudios Ambientales AC. <http://www.conabio.gob.mx/institucion/proyectos/resultados/InfES004.pdf>
- Martínez Salvador, M., Mata-González, R., Morales Nieto, C., Valdez-Cepeda, R. (2012). *Agave salmiana* plant communities in Central Mexico as affected by commercial use. *Environmental Management*, 49, 55-63. <https://doi.org/10.1007/s00267-011-9759-4>
- Martínez-Palacios, A., Gómez-Sierra, J. M., Sáenz-Romero, C., Pérez-Nasser, N., & Sánchez-Vargas, N. (2011). Genetic diversity of *Agave cupreata* Trel. & Berger: Considerations for its conservation. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 34(3), 159-165. [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0187-73802011000300006](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-73802011000300006)
- Nidamanuri, R. R., & Zbell, B. (2012). Existence of characteristic spectral signatures for agricultural crops—potential for automated crop mapping by hyperspectral imaging. *Geocarto International*, 27(2), 103-118. <https://doi.org/10.1080/10106049.2011.623792>
- Noyola-Medrano, C., & Martínez-Sías, V. A. (2017). Assessing the progress of desertification of the southern edge of Chihuahuan Desert: A case study of San Luis Potosí Plateau. *Journal of Geographical Sciences*, 27, 420-438. <https://doi.org/10.1007/s11442-017-1385-5>
- Rama Rao, N., Garg, P. K., & Ghosh, S. K. (2007). Development of an agricultural crops spectral library and classification of crops at cultivar level using hyperspectral data. *Precision Agriculture*, 8, 173-185. <https://doi.org/10.1007/s11119-007-9037-x>

- Ramírez Tobías, H. M., Niño Vázquez, R., Aguirre Rivera, J. R., Flores, J., De-Nova Vásquez, J. A., & Jarquin Gálvez, R. (2016). Seed viability and effect of temperature on germination of *Agave angustifolia* subsp. *tequilana* and *A. mapisaga*; two useful *Agave* species. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 63(5), 881-888. <https://doi.org/10.1007/s10722-015-0291-x>
- Sánchez-Jiménez, E. (2017). *Propuesta de organización y aprovechamiento de Agave cupreata para productores de mezcal en el ejido de Mochitlán, Guerrero, para la Certificación Agroecológica Participativa* [Tesis de Maestría, Universidad Autónoma de Guerrero]. Repositorio RIUAGRO. <http://ri.uagro.mx/handle/uagro/351>
- Sánchez-Teyer, F., Moreno-Salazar, S., Esqueda, M., Barraza, A., & Robert, M. L. (2009). Genetic variability of wild *Agave angustifolia* populations based on AFLP: A basic study for conservation. *Journal of Arid Environments*, 73(6-7), 611-616. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2009.01.008>
- Santiago-García, P. A., Mellado-Mojica, E., León-Martínez, F. M., & López, M. G. (2017). Evaluation of *Agave angustifolia* fructans as fat replacer in the cookies manufacture. *LWT*, 77, 100-109. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2016.11.028>
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera [SIAP]. (2019). Anuario Estadístico de la Producción Agrícola [base de datos]. <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>
- Treviño-Carreón, J., Mora-Olivo, A., Carreón-Pérez, A., & Valiente-Banuet, A. (2011). Descubriendo el valor de los magueyes tamaulipecos. *CienciaUAT*, 5(3), 34-40. <https://www.redalyc.org/pdf/4419/441942923001.pdf>
- Unger Holtz, T. S. (2007). [Review of the book *Introductory digital image processing: A remote sensing perspective*, by John R. Jenson]. *Environmental and Engineering Geoscience*, 13(1), 89-90. <https://doi.org/10.2113/gseegeosci.13.1.89>
- USGS. 2016. Landsat 8 (L8) Data Users Handbook. Department of the Interior, U.S. Geological Survey. [https://d9-wret.s3.us-west-2.amazonaws.com/assets/palladium/production/s3fs-public/atoms/files/LSDS-1574\\_L8\\_Data\\_Users\\_Handbook-v5.0.pdf](https://d9-wret.s3.us-west-2.amazonaws.com/assets/palladium/production/s3fs-public/atoms/files/LSDS-1574_L8_Data_Users_Handbook-v5.0.pdf)
- Yin, H., Guo, H.-B., Weston, D. J., Borland, A. M., Ranjan, P., Abraham, P. E., Jawdy, S. S., Wachira, J., Tuskan, G. A., Tschaplinski, T. J., Wullschleger, S. D., Guo, H., Hettich, R., L., Gross, S. M., Wang, Z., Visel, A., & Yang, X. (2018). Diel rewiring and positive selection of ancient plant proteins enabled evolution of CAM photosynthesis in *Agave*. *BMC Genomics*, 19(1), Article number 588. <https://doi.org/10.1186/s12864-018-4964-7>