

Estudio espectral de diferentes variedades de agave para la creación de una librería espectral para su mapeo y monitoreo mediante percepción remota

Spectral study of different varieties of agave for the creation of a spectral library for mapping and monitoring by remote sensing

Nirani Corona-Romero,* Erick Coronado Juárez** y José Manuel Madrigal Gómez***

Recibido: 30/07/2021. Aprobado: 28/02/2022. Publicado: 31/03/2022.

Resumen. El agave es una planta representativa de paisajes naturales y antrópicos de muchas regiones áridas y semiáridas de México y da gran cantidad de productos, entre ellos, el mezcal. Para su producción se emplean tanto magueyes silvestres como cultivados, por lo que su demanda en los mercados nacionales e internacionales han propiciado el cambio de uso de suelo para su cultivo y la erosión genética de sus poblaciones. Al no existir información sobre su ubicación y abundancia, no es posible elaborar planes de manejo que aseguren su permanencia. Por lo tanto, en este trabajo se presenta una librería espectral para *A. angustifolia* (espadín), *A. americana* var. *Oaxacensis* (arroqueño) y *A. potatorum* (tobalá) y otras coberturas asociadas al cultivo, así como la identificación, mediante la prueba no-paramétrica para muestras independientes de Kruskal-Wallis y la de Dunn, de las bandas de imágenes de Sentinel 2A donde la reflectancia de las firmas hiperespectrales (350-2500 nm) de estos elementos es significativamente distinta para que puedan ser usadas para determinar su distribución espacial con estas imágenes, que fueron tomadas en tres localidades de Oaxaca, por un espectroradiómetro portátil. Los resul-

tados apuntan a que mediante el uso de las bandas 2, 3, 6 y 8 es probable que puedan clasificarse tanto los agaves como sus coberturas asociadas.

Palabras clave: agave, librería espectral, firma espectral de reflectancia, bandas espectrales, Sentinel 2^a.

Abstract. The agave is a representative plant of natural and anthropic landscapes of many arid and semi-arid regions of Mexico and produces a large number of products, including mezcal. Both wild and cultivated magueyes are used for its production, so its demand in national and international markets has led to changes in land use for its cultivation and the genetic erosion of its populations. As there is no information on their location and abundance, it is not possible to develop management plans that ensure their permanence. Therefore, in this work a spectral library for *A. angustifolia* (sprat), *A. americana* var. *Oaxacensis* (arroqueño) and *A. potatorum* (tobalá) and other covers associated with the crop, as well as the identification, by means of the

* Profesor investigador tecnólogo asociado A del Centro de Investigación en Ciencias de Información Geoespacial, A. C. Contoy 137, Col. Lomas de Padierna, Alcaldía Tlalpan, 14240, México, CDMX. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8271-0396>. Email: ncorona@centrogeo.edu.mx. Autor de correspondencia

** Investigador asociado del Centro de Investigación en Ciencias de Información Geoespacial, A. C. Contoy 137, Col. Lomas de Padierna, Alcaldía Tlalpan, 14240, México, CDMX. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0156-4820>. Email: e.coronadoj@gmail.com

*** Técnico Titular C del Centro de Investigación en Ciencias de Información Geoespacial, A. C., Contoy 137, Col. Lomas de Padierna, Alcaldía Tlalpan, 14240, México, CDMX. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0156-4820>. Email: jmadrigal@centrogeo.edu.mx

non-parametric test for independent Kruskal-Wallis and Dunn samples, of the Sentinel 2A image bands where the reflectance of the hyperspectral signatures (350-2500 nm) of these elements is significantly different so that they can be used to determine their spatial distribution with these images, which were taken in three locations in Oaxaca, by

a portable spectroradiometer. The results suggest that by using bands 2, 3, 6 and 8 it is likely that both agaves and their associated covers can be classified.

Keywords: agave, spectral library, reflectance spectral signature, spectral bands, Sentinel 2^a.

INTRODUCCIÓN

La familia *Agavaceae* es endémica del continente americano, y tiene a México como su centro geográfico de origen (García-Mendoza, 2002), donde se encuentran los nueve géneros con 251 especies, siendo *Agave* el más representado (200 especies). Abarcan más del 75% del territorio del país, con la mayor riqueza en la provincia de Tehuacán-Cuicatlán (entre los bordes de Puebla y Oaxaca; García-Mendoza, 2002, 2007).

Del agave se obtienen múltiples productos con el tequila y el mezcal encabezando la lista (Narváez-Zapata y Sánchez-Teyer, 2009). El mezcal puede obtenerse de más de 50 especies del género *Agave* (maguey) ya sea de poblaciones silvestres o de cultivos y se produce en alrededor de 26 estados de México de manera artesanal (Chavez-Parga *et al.*, 2016; Vega y Akaki, 2017) con Oaxaca como el estado que emplea el mayor número de especies (8 cultivadas y 17 silvestres) y con los volúmenes más altos de producción (97.3% de la producción total de México) (Martínez Jiménez *et al.* 2019; Vega y Akaki, 2017).

El incremento de la demanda de esta bebida ha dado como resultado la extracción de plantas de poblaciones silvestres sin prácticas de manejo que aseguren su permanencia o en el establecimiento de cultivos de agave sobre otras coberturas y usos de suelos. Esto ha ocasionado la extinción de poblaciones naturales, lo que impacta significativamente en su variabilidad genética, en la calidad de los recursos naturales y en la sostenibilidad del socio ecosistema (Delgado-Lemus *et al.*, 2014; Flores *et al.*, 2008)but the current mescal production has great impact on populations of the most used species. Harvesting of *A. potatorum* takes place before sexual reproduction and the over-extraction put local populations at high risk. In the community of San Luis Atolotlán (SLA).

De acuerdo con Velasco-Bautista *et al.* (2009), el ámbito geográfico donde se distribuye el agave determina su situación actual y su capacidad de producción, por lo tanto, es importante la elaboración del mapa base para la generación de un plan de manejo. En este sentido, los trabajos hasta ahora realizados plantean la localización geográfica de varias especies a partir de herbarios, entrevistas, recorridos en campo o su posible ubicación a partir del cálculo de áreas potenciales (García-Mendoza, 2002; Aguirre-Dugua y Eguiarte, 2013; dominant nuclear markers associated to microsatellites Delgado-Lemus *et al.*, 2014)but the current mescal production has great impact on populations of the most used species. Harvesting of *A. potatorum* takes place before sexual reproduction and the over-extraction put local populations at high risk. In the community of San Luis Atolotlán (SLA; Ocaña-Nava *et al.*, 2007), lo que da una distribución probable más no real, lo que no permite el monitoreo de las poblaciones silvestres y cultivos de maguey.

Los datos de percepción remota han sido de gran utilidad para el monitoreo de la agricultura gracias a sus tiempos de visita, cobertura global, capacidad de almacenamiento y acceso sin o bajo costo. Tal es el caso de Sentinel, que cuenta con altas resoluciones temporal (10 días) espacial (10-20 m) y varias bandas que son útiles para la detección y discriminación de vegetación (Defourny *et al.*, 2019; European Sapce Agency, 2015), además ha probado ser eficiente para el monitoreo en tiempo casi real de la agricultura aunque sus alcances aún se encuentran en exploración (Defourny *et al.*, 2019)new methodological developments and cloud computing infrastructure calls for a paradigm shift in operational agriculture monitoring. The Copernicus Sentinel-2 mission providing a systematic 5-day revisit cycle and free data access opens a completely new avenue for near real-time

crop specific monitoring at parcel level over large countries. This research investigated the feasibility to propose methods and to develop an open source system able to generate, at national scale, cloud-free composites, dynamic cropland masks, crop type maps and vegetation status indicators suitable for most cropping systems. The so-called Sen2-Agri system automatically ingests and processes Sentinel-2 and Landsat 8 time series in a seamless way to derive these four products, thanks to streamlined processes based on machine learning algorithms and quality controlled in situ data. It embeds a set of key principles proposed to address the new challenges arising from countrywide 10 m resolution agriculture monitoring. The full-scale demonstration of this system for three entire countries (Ukraine, Mali, South Africa).

Sin embargo, las características de los ecosistemas áridos vuelven un desafío la identificación de vegetación mediante percepción remota (Smith *et al.*, 2019) and billions of people depend on services provided by these critically important ecosystems. Despite their relatively sparse vegetation, dryland ecosystems are structurally and functionally diverse, and emerging evidence suggests that these ecosystems play a dominant role in the trend and variability of the terrestrial carbon sink. More, drylands are highly sensitive to climate and are likely to have large, non-linear responses to hydroclimatic change. Monitoring the spatiotemporal dynamics of dryland ecosystem structure (e.g., leaf area index, como en el estudio realizado por Flores *et al.* (2008) diseases, and environmental conditions. However, there are not documented studies on the use of satellite technology to locate it. The experience reported does not give details on processes, and techniques. Moreover, the validation criteria are not reported, therefore it is not possible make serious conclusions. Based on this, Jalisco state government (through FIPRODEFO, donde se emplearon imágenes LANDSAT TM+ para identificar plantaciones de *Agave tequilana* Weber en el estado de Jalisco, a partir de técnicas supervisadas y no supervisadas, modelado espacial basado en regresiones y árboles de clasificación. Encontraron que las bandas 4, 5 y 7 fueron las más eficientes con una confiabilidad del 70%, por

lo que plantean que la gran heterogeneidad de ambientes del agave, la densidad no homogénea de sus cultivos y el color y humedad de los suelos o materiales parentales donde crece complican su clasificación.

El trabajo de Calvario *et al.* (2017) prueba el uso de ortomosaicos RGB con una resolución espacial de 2.5 cm, tomados por un dron de bajo costo para la discriminación de *A. tequilana* Weber y maleza en parcelas de este cultivo, obteniendo una confiabilidad del 99%, mediante el algoritmo k-medias. Concluyen que es factible realizar este tipo de análisis con drones, pero que el éxito depende de la resolución del sensor y del área a tratar, por lo que proponen probar esta aproximación en áreas más extensas y heterogéneas.

Al ser el pixel una medición de la interacción de la radiación electromagnética con múltiples constituyentes de la superficie terrestre, una resolución espacial menor, implicará una mezcla mayor de elementos y una resolución espectral menor, menos capacidad del sensor para discriminar clases cuya variabilidad espectral no sea muy distinta (Keshava y Mustard, 2002; Somers *et al.* 2011). En este sentido, el uso de datos hiperespectrales ha surgido como una alternativa para la detección y cuantificación de la variabilidad y abundancia de clases de interés en ambientes altamente heterogéneos, gracias a su gran resolución espectral (5-10 nm de ancho de banda; Jia *et al.*, 2020; Paoletti *et al.*, 2019; Yan y Liu, 2013). Sin embargo, mucha de esta información es redundante por lo que es importante identificar las bandas que permitan la clasificación de los elementos de interés (Patra *et al.* 2015).

El uso de librerías espectrales permite aprovechar los detalles finos de sus datos para la clasificación de imágenes (Nidamanuri y Zbell, 2011). Estas son una compilación de firmas espectrales, una base de datos con las mediciones de reflectancia hechas en laboratorio o en campo, de materiales conocidos de la superficie terrestre (Lillesand *et al.*, 2004) y que, al ser una expresión de las propiedades estructurales y bioquímicas de la cobertura, se espera que cada una tengan un comportamiento espectral único (Maimaitiyming *et al.*, 2016). Es así que, mediante la comparación de esta firma

conocida con la de un material no identificado, es posible detectar a este a partir de la similitud numérica que ambas firmas tengan. Por lo tanto, es una forma adecuada, rápida y automatizada de identificar y mapear varios cultivos y especies de la vegetación natural (Nidamanuri y Zbell, 2011).

El trabajo realizado por Vikhamar y Solberg (2003a) es un ejemplo de lo anterior. Emplea endmembers (firmas espectrales características de los objetos de interés) de nieve, coníferas, ramas de árboles sin hojas y suelo libre de nieve para el mapeo de la fracción de cobertura de la nieve. Mediante un demezclado espectral de imágenes MODIS en zonas boscosas del sur de Noruega y con restricciones aplicadas a los endmembers a partir de coberturas derivadas de imágenes LANDSAT ETM+, lograron una precisión de hasta el 88%. Del análisis concluyen que los mejores resultados se obtuvieron al reducir el número de endmembers.

Somers *et al.* (2011) realizaron una revisión para encontrar los métodos más usados para mitigar el error que puede presentar la clasificación debida a la variabilidad y número de endmembers, donde identificaron como los principales: el uso de múltiples endmembers para cada componente en un ciclo de análisis de mezcla iterativo, la selección de un subconjunto de firmas espectrales estables, ponderación espectral de las bandas, transformaciones de señales espectrales y el uso de modelos de transferencia radiativa.

La ponderación espectral de bandas puede ayudar a reducir la cantidad de datos y, por tanto, el error que la redundancia de información puede generar. Un método que puede ser empleado para este fin es el realizado por Maimaitiyiming *et al.* (2016) en el que, a partir de un análisis derivativo y de la prueba t de Student realizados a datos hiperespectrales (350-2500 nm) de dos variedades vitícolas, fueron capaces de discriminar, a nivel de hoja y en menor medida, a la altura de la copa, aquellas bandas donde ambas variedades eran distintas, las cuales podrían ser usadas para la clasificación de imágenes.

Debido a la poca información que existe sobre la distribución espacial y espectral del agave y de

las variedades usadas y a que el estado de Oaxaca es uno de los principales productores, el presente trabajo muestra las librerías espectrales de *A. angustifolia* (espadín), *A. americana* var. *Oaxacensis* (arroqueño) y *A. potatorum* (tobalá) y otras coberturas asociadas al cultivo, así como las bandas de Sentinel 2A donde la reflectancia de estos elementos sea significativamente distinta, con la intención de contribuir en el conocimiento para la creación de un método de monitoreo de los cultivos de agave mediante el uso de estas imágenes.

ÁREA DE ESTUDIO

Con la finalidad de contar con el mayor número de ejemplares representativos de la “región del mezcal” en Oaxaca, se seleccionaron las localidades de San Sebastián de las Grutas, Santa Catarina Minas y San Pedro Teozalco (Figura 1) pues son zonas con gran tradición mezcalera (Vega y Akaki, 2017).

San Sebastián de las Grutas, municipio Villa Sola de Vega, se localiza en los Valles Centrales y Sierra Sur, entre los 16°15' y 16°55' Norte y 97°20' y 97° 11' Oeste. Para la elaboración de mezcal emplean especies cultivadas (espadín), domesticadas (arroqueño) y silvestres (tobalá). La parcela muestreada era tradicional, por lo que los magueyes tenían una ubicación similar a la estructura de un ecosistema nativo (Figura 2a y b).

La localidad de Santa Catarina Minas se localiza a 39 km al sur de la capital de Oaxaca, en los 16°46' Norte y 96° 37' Oeste. Alberga al Mezcal “Real Minero”, una empresa familiar de producción artesanal y en cuyo vivero se realizó el muestreo, ya que cuenta con la mayoría de las especies de agaves usados para la producción de mezcal en la región (Figura 2c; Vega y Akaki, 2017).

San Pedro Teozacoalco se encuentra en la región de la Mixteca Alta, entre los 17° 00' y 16°49' Norte y 97° 20' y 97° 11' Oeste. La producción de mezcal es artesanal con pequeñas plantaciones de agave cerca o al lado de los palenques y también hace uso de especies silvestres (Vega y Akaki, 2017). El muestreo se llevó a cabo en una parcela compuesta por líneas de agave intercaladas con suelo cubierto por hierba (Figura 2d).

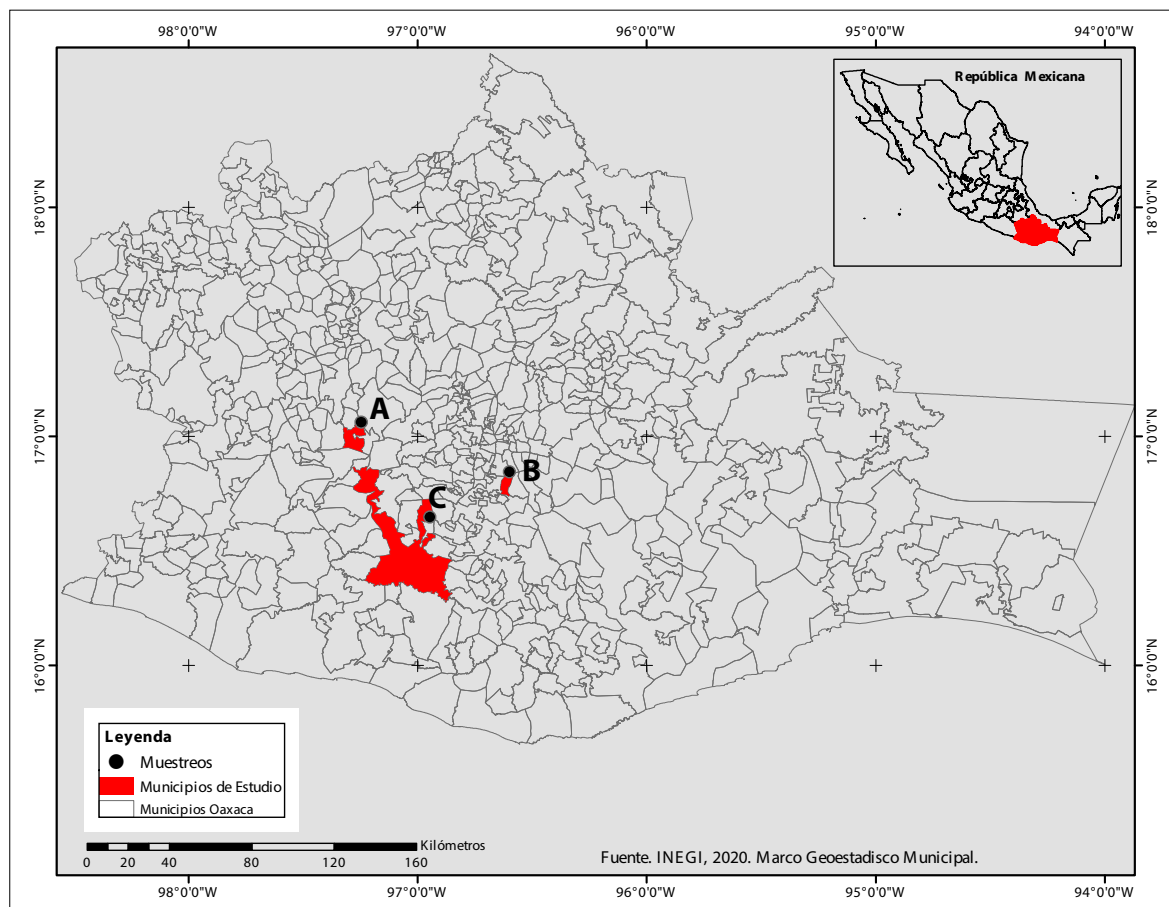


Figura 1. Zona de estudio. A. Región Mixteca, San Pedro Teozacoalco; B. Municipio Santa Catarina Minas; C. San Sebastián de las Grutas. Fuente: elaboración propia.

MÉTODOS

Toma de las firmas espectrales

La toma de firmas espectrales de reflectancia se llevó a cabo del 3 al 5 de septiembre del 2019 (un sitio por día), con la pistola de un espectralímetro portátil modelo FieldSpec 4 con un rango de medición entre los 350 a 2,500 nanómetros (a 3nm de resolución con remuestreo a 1nm) entre las 11:00 y las 14:00 horas, para evitar las variaciones de iluminación por la posición del sol. Se realizaron 5 tomas aéreas sobre la planta: una en la parte central y más elevada de la roseta y el resto en cada punto cardinal (N, S, E y O); donde fue posible, se hicieron 30 mediciones por especie. Para compensar las diferencias que pudieran deberse a cambios en

las condiciones atmosféricas, se llevaba a cabo una calibración con un espectralón cada media hora.

Procesamiento de las firmas espectrales

Las firmas espectrales fueron promediadas por variedad y tipo de cobertura para crear la librería espectral. A cada firma se le calculó la primera y segunda derivada mediante el método de filtrado Savitzky-Golay. Se eligió este ya que utiliza una convolución de mínimos cuadrados para el suavizado y cálculo de la derivada, lo que reduce el ruido generado por el ambiente y por diferencias en la forma de toma, los cuales podrían dar falsos positivos (Tsai y Philpot, 1998).

Para identificar las bandas del espectro electromagnético a las que las variedades y coberturas son



Figura 2. Estructura de los sitios muestreados. A y B: Espadín, Región Sierra Sur, San Sebastián de las Grutas, municipio Sola de Vega; C: Arroqueño, Región Valles Centrales, municipio Santa Catarina Minas; D: Tobalá, Región Mixteca, municipio San Pedro Tezacoalco. Fuente: elaboración propia

significativamente distintas, a la segunda derivada se le aplicó la prueba no-paramétrica para muestras independientes de Kruskal-Wallis (1952). Se eligió esta ya que los datos no se distribuyen de forma normal y como su varianza es relativamente homogénea, esta prueba permite identificar si un grupo de datos proviene de la misma población, es decir, si las firmas de las diversas especies y coberturas difieren unas con otras, siempre y cuando $p < 0.05$. Posteriormente se realizó la prueba Post-Hoc de Dunn (1961), la cual permite encontrar dentro de las muestras, cuáles son específicamente distintas con respecto a las otras.

El análisis se realizó en lenguaje de programación R, versión 4.0.2, utilizando las librerías `kruskal.test` y `dunnTest` (Anexo 1).

Los resultados que se reportan se centran en las bandas 2-8b de Sentinel 2A, que son las que brindan mayor información sobre la vegetación (Lillesand *et al.*, 2004). Esto se hizo agrupando las bandas de 1nm de la firma espectral al rango de cada banda de Sentinel 2A (Tabla 1).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En total se obtuvieron 237 firmas de reflectancia de los agaves espadín, arroqueño y tobalá de diferentes edades (2 a 8, 15 y 20 años), origen (silvestre o de vivero) y en algunos casos, capados, así como de otras coberturas (maleza, suelo y milpa, entre otros). De estos, es el arroqueño el que se encontró

Tabla 1. Bandas de Sentinel 2A empleadas para el estudio

No. Banda	Banda	Mínimo	Máximo	Centro	Ancho banda	Resolución (m)
2	Azul	457.5	522.5	490	65	10
3	Verde	542.5	577.5	560	35	10
4	Roja	650	680	665	30	10
5	Red edge 1	697.5	712.5	705	15	10
6	Red edge 2	732.5	747.5	740	15	20
7	Red edge 3	773	793	783	20	20
8	Near infrared 1	784.5	899.5	842	115	10
8b	Near infrared 2	855	875	865	20	20

Fuente: elaboración propia a partir de European Space Agency (2015).

en los tres sitios y en mayor abundancia, razón por la cual es el que mayor número de firmas presenta (88; Tabla 2).

Con esta información se generó una biblioteca espectral de la reflectancia a un nanómetro de resolución de los 350 nm a los 2500 nm para 3 magueyes y otras coberturas (Figuras 3). Los agaves muestran variaciones entre ellos principalmente entre los 350 y los 850 nm, con tobalá con el mayor número de diferencias. Al compararlos con otras coberturas, los datos indican que estos tienen un comportamiento distinto a lo largo de

todo el espectro muestreado. Esto se confirma con lo obtenido de las pruebas no-paramétrica de Kruskal-Wallis y de Dunn, que identificaron que en 1470 longitudes de onda entre los 350 nm y los 2500 nm hay una diferencia significativa entre al menos 2 muestras, siendo la región de los 400 a los 1400nm con el mayor número de estas (Figura 4).

De acuerdo con Fondom *et al.* (2014) y Gates *et al.* (1965), el agave no transmite la energía incidente, por lo que la refleja o la absorbe, y es en la región del visible donde se da el mayor porcentaje de absorción y se compensa con una alta reflec-

Tabla 2. Número de firmas de reflectancia por sitio, especie de agave y tipo de cobertura.

Especie/cobertura	No. de firmas			Totales
	Villa Sola de Vega	Real de Minas	Nochistlán	
Arroqueño	40	23	25	88
Tobalá	42	0	41	83
Espadín	30	0	0	30
Calabaza_milpa	7	0	0	7
Frijol	5	0	0	5
Maiz	3	0	0	3
Maleza	4	0	0	4
Milpa	3	0	0	3
Suelo calichoso	10	0	0	10
Suelo desnudo	4	0	0	4
Total general	148	23	66	237

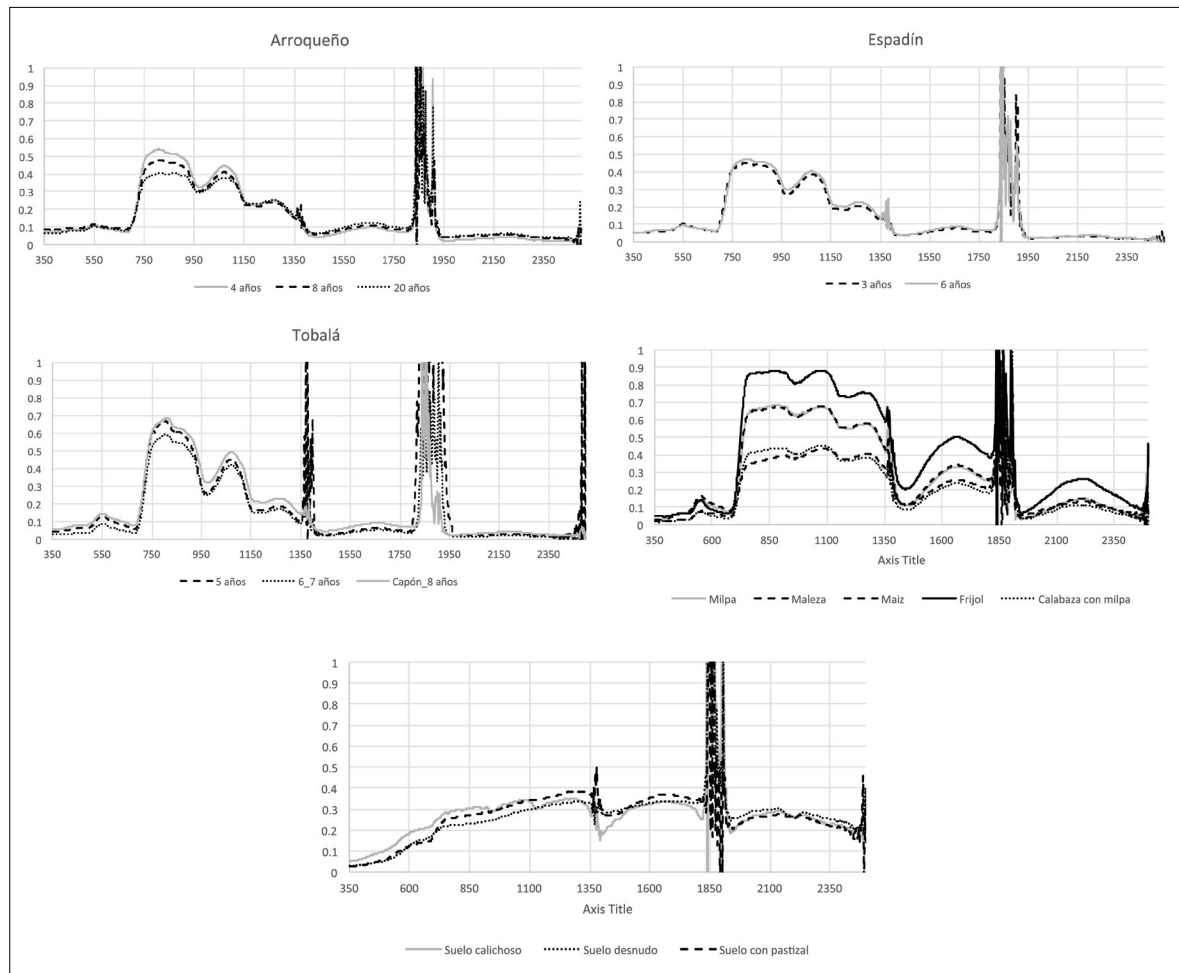


Figura 3. Librerías espectrales de la reflectancia de diferentes edades de agaves arroqueños, espadines y tobalás, así como de otras coberturas que acompañan el cultivo de maguey mezcalero. Fuente: elaboración propia.

tancia en el resto del espectro, reportando valores alrededor del 80%. De acuerdo con los resultados obtenidos, existe una congruencia hasta los 700 nm ya que la reflectancia es mínima para todas las especies en esa región del espectro, pero por encima de ese rango, arroqueño y espadín muestran una reflectancia no mayor al 50% y tobalá en algunos casos del 70% (Figura 3). Estas variaciones podrían deberse a la forma en que fueron tomados los datos, ya que no se hicieron a nivel de hoja sino de roseta, lo que tiende a disminuir el porcentaje de reflectancia (Asner, 1998).

Con respecto a las bandas de Sentinel 2A, se encontró que la verde es donde se presentan el

mayor número de diferencias (930; Figura 5), las cuales se dieron principalmente entre tobalá con suelo calichoso, desnudo y con los arroqueños (s/d y 15 años); frijol y milpa con suelos desnudo y calichoso y los arroqueños s/d y de 15 años con frijol. La azul tiene un comportamiento similar, aunque el número de bandas fue menor. En ambas, el espadín sólo mostró diferencias con el tobalá de vivero de 6 años en algunas longitudes de onda de las bandas 2 y 3 (Tablas 3 y 4; Figura 5).

Es probable que estos resultados se deban a la presencia de Xanthophiles en los agaves, pues son pigmentos accesorios que ayudan a la planta a disminuir su calentamiento al disipar la energía

Tabla 3. Número total de bandas a 1nm de resolución, donde las coberturas presentan diferencias significativas en el rango de la banda 2 (azul) de Sentinel 2A.

Cobertura	A_s_d	A_4a	A_7a	A_8a	A_15a	A_20a	T_5a	T_6_7a	T_6a	E_M_2a	E_3a	E_M_3a	E_6a	Frijol	Maíz	Milpa	Cal_Mil	Sc	Sd	Total
A_4a	0	0	0	0	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6
A_15a	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
T_s/d	9	3	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	17	3	35
T_5a	25	9	1	14	14	0	0	0	1	2	0	1	1	0	0	0	0	37	17	122
T_5_6a	10	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	20	9	40
T_6a	17	15	0	14	22	1	0	0	0	3	1	0	1	1	0	0	1	23	16	115
T_silv_6a	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8	0	8
T_viv_6a	25	27	6	25	29	5	1	1	0	11	1	0	3	3	0	0	1	27	18	183
T_6_7a	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	20	0	22
T_silv_8a	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	2
T_cap_8a	8	0	0	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	18	1	32
T_cap	10	1	0	8	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	21	7	48
E_M_2a	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
E_3a	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
E_M_3a	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Frijol	14	4	4	12	15	3	0	0	0	5	2	3	2	0	0	0	0	0	0	64
Maíz	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Milpa	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Cal_Mil	2	0	0	0	3	0	2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8
Sc	1	6	1	1	6	0	0	0	1	0	8	1	0	20	11	7	13	0	0	76
Sd	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	17	1	1	0	0	0	19
Total	125	65	12	80	100	9	3	1	4	21	13	5	7	42	12	8	15	193	71	786

Tabla 4. Número total de bandas a 1nm de resolución, donde las coberturas presentan diferencias significativas en el rango de la banda 3 (verde) de Sentinel 2A.

Cobertura	A_s/d	A_4a	A_7a	A_8a	A_15a	A_20a	E_M_2a	E_3a	E_M_3a	Frijol	Maíz	Cal_Mil	Milpa	Sc	Sd	Total
T_s/d	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	19	6	27
T_5a	20	4	0	5	22	0	2	1	0	0	0	0	0	54	30	138
T_5_6a	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	26	16	49
T_6a	18	9	1	7	17	0	4	0	0	0	0	0	0	32	20	108
T_6_7a	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	23	1	24
T_cap_8a	8	0	0	2	3	0	0	0	0	2	0	0	0	26	12	53
T_cap	8	1	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	28	18	57
T_silv_6a	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	18	0	18
T_viv_6a	20	22	7	15	29	0	2	0	0	2	0	0	0	33	26	156
T_silv_8a	1	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	10	3	16
E_3a	3	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5
Frijol	24	11	15	16	25	1	4	1	0	0	0	0	0	0	0	97
Maíz	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
Cal_Mil	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Sc	0	4	0	0	0	0	0	17	5	32	30	19	15	0	0	122
Sd	0	0	0	0	0	0	0	2	0	28	14	4	9	0	0	57
Total	113	51	23	45	101	1	12	21	5	66	44	23	24	269	132	930

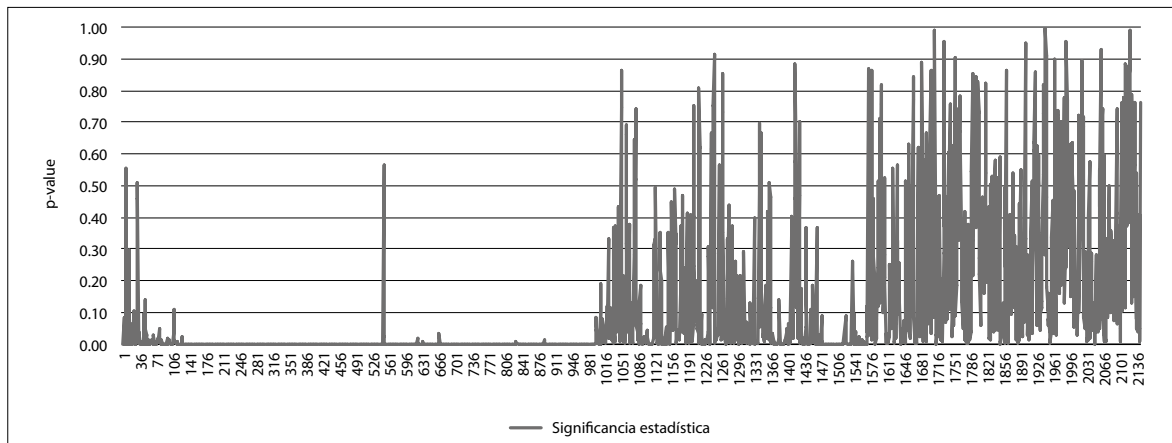


Figura 4. Análisis de diferencia significativa entre variedades de agave y otros elementos entre los 350 nm a los 2500 nm del espectro electromagnético. Todas aquellas bandas con p-value < 0.5 tienen al menos dos elementos muestreados que son estadísticamente diferentes. Fuente: elaboración propia.

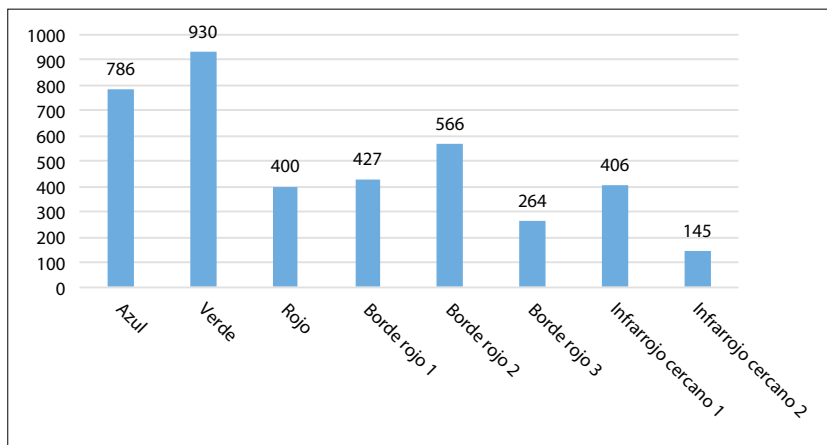


Figura 5. Número total de diferencias significativas encontradas por banda de Sentinel 2A. Fuente: elaboración propia.

que absorbe entre los 500 y los 550 nm y la pueda aprovechar de mejor manera con las clorofilas a y b (Jacquemound y Ustin, 2019; Fondom *et al.*, 2014).

En general, las coberturas de frijol, maíz y maleza no mostraron diferencias significativas con los agaves en estas bandas y se esperaría que su comportamiento espectral fuera distinto, pues el agave tiene un metabolismo tipo CAM, el maíz C4 y el frijol y la maleza C3, lo que implica que hacen uso de diferentes estrategias fotosintéticas para sobrevivir (Yahia *et al.* 2019). Esto podría deberse al tipo de prueba que se empleó, aunque es poco probable ya que la prueba no paramétrica

de Kruskal-Wallis y la de Dunn son empleadas para examinar datos que no se distribuyen de forma normal y con varianza homogénea, como es el caso de los valores aquí presentados. Por lo tanto, es más probable que sea resultado de la falta de datos (Vikhamar y Solberg, 2003b).

Estos resultados podrían explicar la confiabilidad obtenida por Flores *et al.* (2008) diseases, and environmental conditions. However, there are not documented studies on the use of satellite technology to locate it. The experience reported does not give details on processes, and techniques. Moreover, the validation criteria are not reported, therefore it is not possible make serious conclu-

Tabla 5. Número total de bandas a 1nm de resolución, donde las coberturas presentan diferencias significativas en el rango de la banda 6 (red edge, borde rojo) de Sentinel 2A.

Cobertura	A_s/d	A_4a	A_7a	A_8a	A_15a	A_20a	T_5a	Tcv_6a	E_M_2a	E_3a	E_M_3a	Frijol	Maiz	Milpa	Maleza	Sc	Sd	Total
A_4a	1	0	0	0	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10
T_S/D	6	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8	3	19
T_5_6a	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	4	14
T_6_7a	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15	5	26
T_5a	11	0	3	6	8	5	0	0	0	2	0	0	0	0	4	26	19	84
T_6a	4	0	2	3	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7	4	24
Tcv_6a	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	4
T_cap	5	0	3	3	9	6	0	2	0	3	0	0	0	0	6	15	12	64
Tc_8a	2	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	2	17
T_silv_6a	3	0	1	2	4	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	14	10	35
T_silv_8a	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	1	8
T_viv_6a	4	2	3	3	5	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	16	3	38
E_3a	4	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6
E_M_3a	4	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8
Frijol	13	0	10	9	16	10	0	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0	63
Maiz	4	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5
Milpa	3	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4
Maleza	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8	0	0	0	0	0	8
Sc	0	12	0	0	0	0	0	0	10	3	13	16	12	12	0	0	0	78
Sd	0	7	0	0	0	0	0	0	0	3	8	16	8	9	0	0	0	51
Total	76	23	24	28	62	23	2	2	10	17	21	42	20	21	10	122	63	566

sions. Based on this, Jalisco state government (through FIPRODEFO ya que las bandas que reportan que detectaron el agave de otras coberturas fueron la del infrarrojo cercano, medio y térmico, aunque tuvieron una alta confusión con pastos y selva baja, lo cual también sucede en este trabajo. Sin embargo, Calvario *et al.* (2017) mencionan que el uso de un sensor RGB permitió segmentar agave de maleza, y la resolución espacial (2.5 cm) de su estudio es menor a la del presente trabajo, por lo que es probable que las diferencias entre ambos, se deba al número de muestras obtenidas, por lo que puede ser conveniente incrementarlo, así como incorporar otras especies vegetales y de cultivos, sobre todo cuando se quiere discriminar a una escala regional, para que este sea representativo y comparable con las del agave y así sea factible la clasificación de imágenes satelitales.

La banda 6 es la que ocupa el tercer lugar en diferencias significativas (Figura 5), pero es donde el arroqueño de 20 años contabiliza 23 y los espadines entre 10 y 21. Así mismo, otras coberturas muestran diferencias con tobalá, por lo que puede ser una banda de gran utilidad para identificar estos elementos (Tablas 3, 4 y 5). Esto posiblemente sea porque esta banda abarca la zona del borde rojo, cuyas forma y ubicación están dadas tanto por el contenido de clorofila de la planta como por su estructura, las cuales determina la dispersión de la luz (Filella y Pañuelas, 1994). En este sentido, las tres especies de agave estudiadas presentan diferencias tanto de coloración, las que son más notorias entre arroqueño y tobalá y espadín y tobalá, como de estructura (Figura 2).

La banda 8 también podría ser empleada tanto para la identificación de la mayoría de los agaves analizados, como para el monitoreo y planes de manejo del cultivo, ya que muestra varias diferencias entre arroqueños, espadines y tobalás, entre diversas edades de la misma especie, así como con otras coberturas, aunque con estas últimas siguen siendo menos de 10 bandas (Tabla 6). Esto podría deberse a que las propiedades ópticas en el infrarrojo cercano están dadas por las múltiples reflexiones y refracciones de la luz dentro de la hoja. Por lo tanto, su forma, tamaño, fracción de aire y el arreglo de las tres dimensiones de las células, juegan un papel

importante en la dispersión de la luz (Jacquemound y Ustin, 2019). Es así que, al ser plantas que a diferentes edades aprovechan el CO₂ de distinta forma (Nobel, 1988), y a que morfológicamente son disímiles (García-Mendoza, 2011), es esperable que en esta región se distingan esas variaciones. Así mismo, podría explicar los resultados obtenidos por Flores *et al.* (2008) diseases, and environmental conditions. However, there are not documented studies on the use of satellite technology to locate it. The experience reported does not give details on processes, and techniques. Moreover, the validation criteria are not reported, therefore it is not possible make serious conclusions. Based on this, Jalisco state government (through FIPRODEFO el cual menciona que, con la combinación de las bandas 3,4 y 5 de LANDSAT, fue posible separar magueyes jóvenes y maduros.

Los trabajos que se han realizado para establecer la ubicación espacial del agave mediante percepción remota, se han centrado en el agave azul, uno de ellos mediante LANDSAT TM+ y otro a partir de ortoimágenes RGB de un dron. El primero reporta que el uso de clasificadores supervisados arrojó mejores resultados que los obtenidos de modelado espacial con variables ambientales, aunque este último tuvo mejor desempeño para discriminar otras coberturas. El segundo, por su parte encontró que es factible clasificar agave y maleza con una precisión del 99% mediante métodos no supervisados. Por lo tanto, de acuerdo a lo antes descrito, es muy probable que los datos aquí presentados sean de utilidad para entrenar clasificadores que permitan obtener la ubicación espacial a nivel regional, de tres especies de agave importantes para la producción de mezcal, así como de las coberturas que acompañan a su cultivo, mediante el uso de imágenes Sentinel 2A.

CONCLUSIONES

El uso de firmas espectrales para la clasificación de imágenes es un método que se ha implementado en los últimos años, pero para que funcione de manera adecuada, es importante encontrar aquellas bandas donde los elementos a identificar

Tabla 6. Número total de bandas a 1nm de resolución, donde las coberturas presentan diferencias significativas en el rango de la banda 8 (infrarrojo cercano 1) de Sentinel 2A.

Cobertura	A_s/d	A_4a	A_7a	A_8a	A_15a	A_20a	E_M_2a	E_6a	T_s/d	T_5a	T_5_6a	T_vi_6a	T_6_7a	Total
A_4a	1	0	0	0	8	2	0	0	0	0	0	0	0	11
E_M_2a	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	2
E_3a	1	4	0	1	2	2	0	0	0	0	0	0	0	10
Frijol	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4
Maleza	0	3	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	4
T_s/d	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
T_5a	2	10	0	0	3	26	1	1	15	2	4	0	0	64
T_5_6a	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
T_6a	2	11	0	1	13	25	3	3	15	0	0	0	0	73
T_silv_6a	2	3	1	1	6	14	1	0	0	9	0	0	0	37
T_viv_6a	9	14	3	6	16	21	1	0	1	19	1	0	3	94
T_vi_ca_6a	0	0	0	0	1	3	0	0	0	5	0	0	0	9
T_6_7a	0	3	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	5
T_silv_8a	0	0	0	0	0	0	0	0	0	13	0	0	0	13
T_cap_8a	1	3	0	1	4	5	0	0	0	22	0	0	1	37
T_cap	1	4	0	0	2	13	0	0	13	1	3	4	0	41
Total	19	62	4	10	57	113	6	4	44	71	8	4	4	406

son significativamente distintos. En este sentido, se analizaron las firmas espectrales de los agaves espadín, arroqueño y tobalá, ya que estos son ampliamente empleados para la producción de mezcal y su producción está terminando con las poblaciones nativas, y otras coberturas que suelen acompañar a su cultivo. Y se llevó a cabo un análisis mediante la prueba no paramétrica para muestras independientes de Kruskal-Wallis y de Dunn, para obtener las bandas del espectro electromagnético en que dichos elementos son significativamente distintos. Esto permitió identificar aquellas bandas donde las diferentes variedades de agave sí muestran diferencias significativas de reflectancia entre ellas, así como con otras coberturas que están dentro o aledañas al cultivo. Dichas diferencias se dan principalmente en la región del azul, verde, borde rojo e infrarrojo cercano, por lo que es probable que la distribución de estas coberturas sí pueda ser obtenida mediante las bandas 2, 3, 6 y 8 de Sentinel 2A, regiones del espectro donde las firmas mostraron posibilidades de discriminar tobalá y arroqueño en diferentes edades, espadín, frijol y maíz.

Con respecto a las diferencias encontradas, tobalá fue el que mostró el mayor número de diferencias con arroqueño y otras coberturas; espadín, por su parte, fue el más parecido a las muestras recolectadas, aunque la banda 6 parece ser una buena opción para su identificación.

Conocer la distribución espacial del cultivo de agave es imperativo debido al valor cultural y económico que tiene a nivel nacional, sin embargo, son pocos los esfuerzos que se han encaminado a dicho propósito. En este sentido, este estudio abona conocimiento en la comprensión del comportamiento espectral del agave y de las otras coberturas que acompañan su cultivo, así como en la generación de datos que pueden ser empleados para la clasificación supervisada de imágenes Sentinel 2A para obtener la distribución espacial de estos elementos. No obstante, y de acuerdo con lo reportado por otros autores, es importante incrementar el tipo de coberturas y cantidad de muestras de estas para asegurar un resultado significativo al hacer un análisis de clasificación de imágenes, sobre todo, de coberturas que no son aledañas al cultivo.

Por último, es importante mencionar que, a pesar de que el estudio se concentró en las bandas de las imágenes Sentinel 2A, con la intención de que estos resultados sean usados en posteriores estudios para la clasificación de estas imágenes, al haberse realizado las mediciones entre los 350 y 2500 nm, mediante los análisis aquí descritos, es posible obtener las bandas de cualquier otro sensor, tanto multispectral (LANDSAT) como hiperespectral (HYPERION).

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue posible gracias al proyecto “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” Problemas Nacionales 6590.

REFERENCIAS

- Aguirre-Dugua, X. y 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. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2012.10.018>
- Asner, G. P. (1998). *Biophysical and Biochemical Sources of Variability in Canopy Reflectance*. 253, 234-253.
- Calvario, G., Sierra, B., Alarcón, T. E., Hernandez, C. y Dalmau, O. (2017). A multi-disciplinary approach to remote sensing through low-cost UAVs. *Sensors (Switzerland)*, 17(6). DOI: <https://doi.org/10.3390/s17061411>
- Chavez-Parga, M. D. C., Pérez Hernández, E. y González Hernández, J. C. (2016). Revisión del agave y el mezcal. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 18(1). DOI: <https://doi.org/10.15446/rev.colomb.biote.v18n1.49552>
- Defourny, P., Bontemps, S., Bellemans, N., Cara, C., Dedieu, G., Guzzonato, E., Hagolle, O., Inglada, J., Nicola, L., Rabaute, T., Savinaud, M., Udriou, C., Valero, S., Bégué, A., Dejoux, J. F., El Harti, A., Ezzahar, J., Kussul, N., Labbassi, K., ... Koetz, B. (2019). Near real-time agriculture monitoring at national scale at parcel resolution: Performance assessment of the Sen2-Agri automated system in various cropping systems around the world. *Remote*

- Sensing of Environment*, 221, 551-568. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.11.007>
- 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(1). DOI: <https://doi.org/10.1186/1746-4269-10-63>
- Dunn, O. J. (1961). Multiple comparisons among means. *Journal of the American statistical association*, 56(293), 52-64.
- European Sapce Agency. (2015). *SENTINEL-2 User Handbook Sentinel-2 User Handbook SENTINEL-2 User Handbook*, 1, 1-64.
- Filella, I. y Pañuelas, J. (1994). The red edge position and shape as indicators of plant chlorophyll content, biomass and hydric status. *International Journal of Remote Sensing*, 15(7), 1459-1470.
- Flores, J. G., Reich, R., Zuñiga, E Talavera, C. A., Cirpac, I., Guadalajara, P. L. C. S. N., México, J., Forestal, D. D., & México, D. J. (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. Vol. XXXVII. Part B8. Beijing 2008 Analysis* (pp. 941-944). Disponible en http://www.isprs.org/proceedings/XXXVII/congress/8_pdf/10_WG-VIII-10/04.pdf
- Fondom, N. Y., Castro-Nava, S., & Huerta, A. J. (2014). Field assessment of sub-epidermal leaf anthocyanin, PSII photochemistry, and the xanthophyll-cycle as photoprotective mechanisms in two morphs of Agave striata. *Flora: Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants*, 209(2), 131-141. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.flora.2013.12.006>
- García-Mendoza, A. (2002). Distribution of Agave (Agavaceae) in Mexico. *Cactus and Succulent Journal*, 74(4), 177-187.
- García-Mendoza, A. (2007). Los agaves de México. *Ciencias*, 87, 14-23.
- García-Mendoza, A. J. (2011). *Flora del valle de Tehuacán-Cuicatlán*. Instituto de Biología, Departamento de Botánica.
- Gates, D. M., Keegan, H. J., Schleter, J. C. y Weidner, V. R. (1965). *Spectral Properties of Plants*. 4(1), 11-20.
- Jacquemound, S. y Ustin, S. (2019). Leaf Optical Properties in Different Wavelength Domains. In *Leaf optical properties* (1st ed., pp. 124-169). Cambridge University Press. DOI: <https://doi.org/10.1017/9781108686457>
- Jia, J., Wang, Y., Chen, J., Guo, R., Shu, R. y Wang, J. (2020). Status and application of advanced airborne hyperspectral imaging technology: A review. *Infrared Physics and Technology*, 104(September 2019), 103115. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2019.103115>
- Keshava, N. y Mustard, J. (2002). Spectral Unmixing. *IEEE Signal Processing Magazine*.
- Kruskal, W. H. y Wallis, W. A. (1952). Use of ranks in one-criterion variance analysis. *Journal of the American statistical Association*, 47(260), 583-621.
- Lillesand, T. M., Kiefer, R. W. y Chipman, J. W. (2004). *Remote sensing and image interpretation* (5th ed.). John Wiley & Sons.
- Maimaitiyiming, M., Miller, A. J., & Ghulam, A. (2016). Discriminating Spectral Signatures Among and Within Two Closely Related Grapevine Species. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 82(1), 51-62. DOI: <https://doi.org/10.14358/PERS.82.2.51>
- Martínez Jiménez, R., Ruiz Vega, J., Caballero Caballero, M., Silva Rivera, M. E. y Montes Bernabé, J. L. (2019). Agaves silvestres y cultivados empleados en la elaboración de mezcal en Sola de Vega, Oaxaca, México. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 22, 477.
- Narváez-Zapata, J. A. y Sánchez-Teyer, L. F. (2009). Agaves as a raw material: recent technologies and applications. *Recent Patents on Biotechnology*, 3(3), 185-191. DOI: <https://doi.org/10.2174/187220809789389144>
- Nidamanuri, R. R. y Zbell, B. (2011). Transferring spectral libraries of canopy reflectance for crop classification using hyperspectral remote sensing data. *Biosystems Engineering*, 110(3), 231-246. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2011.07.002>
- Nobel, P. S. (1988). *Environmental Biology of Agaves and Cacti by Nobel P.S. (z-lib.org).pdf*. Cambridge University Press.
- Paoletti, M. E., Haut, J. M., Plaza, J. y Plaza, A. (2019). ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing Deep learning classifiers for hyperspectral imaging : A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 158, 279-317. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2019.09.006>
- Patra, S., Modi, P. y Bruzzone, L. (2015). Hyperspectral Band Selection Based on Rough Set. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 53(10), 5495-5503. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2015.2424236>
- Smith, W. K., Dannenberg, M. P., Yan, D., Herrmann, S., Barnes, M. L., Barron-Gafford, G. A., Biederman, J. A., Ferrenberg, S., Fox, A. M., Hudson, A., Knowles, J. F., MacBean, N., Moore, D. J. P., Nagler, P. L., Reed, S. C., Rutherford, W. A., Scott, R. L., Wang, X., & Yang, J. (2019). Remote sensing of dryland ecosystem structure and function: Progress, challenges, and opportunities. *Remote Sensing of Environment*, 233, 111401. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111401>

- Somers, B., Asner, G. P., Tits, L. y Coppin, P. (2011). Remote Sensing of Environment Endmember variability in Spectral Mixture Analysis : A review. *Remote Sensing of Environment*, 115(7), 1603–1616. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.03.003>
- Tsai, F. y Philpot, W. (1998). Derivative analysis of hyperspectral data. *Remote Sensing of Environment*, 66(1), 41–51. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(98\)00032-7](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(98)00032-7)
- Vega, V. y Akaki, P. P. (2017). Oaxaca y sus regiones productoras de mezcal: Un análisis desde cadenas globales de valor The mezcal-producing regions of Oaxaca: an analysis from global value chains. *Perspectivas Rurales*, 15, 103-132.
- Velasco-Bautista, Efraín, Zamora-Martínez, Marisela, Espinoza-Paz, H., Sampayo-Bautista, C. y Moreno-Sánchez, F. (2009). *Modelos predictivos para la producción de productos forestales no maderables agaves mezcaleros*. Manual Técnico 3. México: INIFAP.
- Vikhamar, D. y Solberg, R. (2003a). Snow-cover mapping in forests by constrained linear spectral unmixing of MODIS data. *Remote Sensing of Environment*, 88(3), 309–323. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2003.06.004>
- Vikhamar, D. y Solberg, R. (2003b). Subpixel mapping of snow cover in forests by optical remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, 84(1), 69–82. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00098-6](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00098-6)
- Yahia, E. M., Carrillo-lópez, A., & Barrera, G. M. (2019). Photosynthesis. En E. Yahia y A. Carrillo-Lopez (Eds.), *Postharvest Physiology and Biochemistry of Fruits and Vegetables*. Elsevier. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813278-4.00003-8>
- Yan, Y. y Liu, B. (2013). Optik Algorithms of target detection on hyperspectral imagery. *Optik - International Journal for Light and Electron Optics*, 124(23), 6341–6344. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2013.06.006>

ANEXO 1. CÓDIGO GENERADO PARA LAS PRUEBAS DE KRUSKAL-WALLIS Y DE DUNN

```
#### TOTAL DE FIRMAS
firmas <- read.csv("c:/Users/roid8/Documents/
CentroGeo/2020/oAXACA/2nd_der_completas.
csv", sep = ",")
firmas <- firmas[, -c(1:3, 5)]

tfirmas <- t(firmas)
unique(firmas$Especie)
select(firmas)

tobala <- mutate(tfirmas[-c(1:3, 5)], tobalaMean =
rowMeans(select(tfirmas[-c(1:3, 5)], starts_
with("tob")), na.rm = TRUE))

firmas2 <- firmas[, -c(1:3, 5)]
fdf <- as.data.frame(firmas2)
str(firmas.tot)
str(firmast)

firmast <- as.data.frame(t(firmas2))

firmast.et <- firmast
firmast.et <- as.data.frame(firmast.et)

colnames(firmast.et) <- firmas[, 4]

firmas.tot <- rbind(firmas[, 4], as.data.
frame(firmast))
colnames(firmas.tot) <- firmas.tot[1,]

str(firmast.et)
tobala <- mutate(firmast.et, tobalaMean =
rowMeans(select(firmast.et, contains("tobala_ca
pon")), na.rm = TRUE))

#####
####3
# Kruskal Willis Test

factor.a <- as.factor((firmas$Especie))
str(firmas)

firmas$Especie <- as.factor(firmas$Especie)

plot(t(firmas[6,]), ylim = c(0.05, -.05), type = "l")

summary((firmas[6,]))

results <- list()
for (i in 2:length(firmas[1,])) {
  results[[i]] <- kruskal.test(firmas[, i] ~ factor.a,
data = firmas)

df <- as.data.frame(matrix(unlist(results),
nrow = length(results), byrow = T),
stringsAsFactors = FALSE)
str(df)

df$V3 <- as.numeric(df$V3)
df$V2 <- as.numeric(df$V2)

sig <- which(df$V3 < 0.05)
sig <- as.data.frame(sig)

summary(df)
df.wna <- na.omit(df)

plot(x = seq(350, 2501, by = 1), y = df$V3 < 0.05,
type = "l",
ylim = c(-.001, 0.1),
xlab = "Nm",
ylab = "p-value")

axis(1, tck = 0.05)

abline(h = 0.05, col = "red")

plot(sig)

write.csv(sig, file = "../Documents/Centro-
Geo/2020/oAXACA/sig.csv")

sig.senti <- c(95, 1027, 142, 212, 317,
357, 392, 435, 494, 517, 592)
band.senti <- c("B1", "B10", "B2", "B3",
```

```

"B4", "B5", "B6", "B7", "B8", "B8a", "B9")
#### DUNN TEST
#library(FSA)
library(dunn.test)

dunn <- dunnTest(firmas[,4],factor.a, method =
"bonferroni")

df.dunin <- as.data.frame(dunn)

df.dunin <- as.data.frame(matrix(unlist(dunn),
n r o w = l e n g t h ( d u n n ) ,   b y r o w = T ) ,
stringsAsFactors=FALSE)

results.dun <- list()
results.sig <- list()

for (i in 1:length(sig.senti)) {
  results.dun[[i]] <- dunnTest(firmas[,sig.
senti[i]],factor.a, method = "bonferroni")
  results.sig[[i]] <- as.data.frame(results.dun[[i]]$res)
  write.csv(results.sig[i], paste0(i,".csv"))
}

df.dunn <- as.data.frame(matrix(unlist(results.
sig), nrow=length(results.sig), byrow=T),
stringsAsFactors=FALSE)

tdf.dunn <- t(df.dunn)

dunn1 <- as.data.frame(results.dun[[1]]$res)

df <- as.data.frame(matrix(unlist(results),
n r o w = l e n g t h ( r e s u l t s ) ,   b y r o w = T ) ,
stringsAsFactors=FALSE)

str(df.dunn)

df.dunn2 <- data.frame((sapply(results.dun,c)))

length(results.dun)
dim(df.dunn)
str(df.dunn)

dunn.res <- as.data.frame(dunn$res)

write.csv(dunn.res, file = "../Documents/Centro-
Geo/2020/oAXACA/dunn_res.csv")

which(dunn$res < 0.05)

summary(df)
str(df.wna)

min(df.wna$V3)
max(df.wna$V3)

```