



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO

FACULTAD DE CIENCIAS AGRÍCOLAS

**MAESTRIA Y DOCTORADO EN CIENCIAS AGROPECUARIAS Y
RECURSOS NATURALES**

**DESARROLLO DE UN SISTEMA DE INFORMACIÓN
GEOGRÁFICA PARA LA GESTIÓN FITOSANITARIA EN LAS UNIDADES
PRODUCTIVAS DE AGUACATE (*Persea americana* Mill.) EN EL
ESTADO DE MÉXICO**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE DOCTORA EN CIENCIAS
AGROPECUARIAS Y RECURSOS NATURALES**

PRESENTA:

DULCE KAREN FIGUEROA FIGUEROA

COMITÉ DE TUTORES

Dr. José Francisco Ramírez Dávila. Tutor Académico

Dr. Andrés González Huerta. Tutor Adjunto

Dra. Xanat Antonio Némiga. Tutor Adjunto

El Cerrillo Piedras Blancas, Toluca, Estado de México.

Diciembre de 2019



RESUMEN

El aguacate es uno de los productos agroalimentarios más exitosos a nivel nacional, colocando a México como el principal proveedor del mercado internacional con más del 30% de la producción. La demanda por el aguacate es tal, que la superficie plantada se ha incrementado en diferentes estados como Michoacán, Jalisco y el Estado de México, éste último ha tenido un crecimiento importante en los municipios de Coatepec Harinas, Donato Guerra, Temascaltepec y Tenancingo. Los objetivos de esta investigación fueron: 1. Identificar por medio de imágenes satelitales Sentinel-2 la superficie real sembrada de aguacate en los municipios productores de este estado, 2. desarrollar un Sistema de Información Geográfica (SIG) para la gestión fitosanitaria en las principales unidades productivas de aguacate y 3. identificar regiones con potencial óptimo y sub óptimo para el establecimiento de plantaciones de aguacate en los municipios productores. La metodología consistió en tres etapas: 1. probar métodos de índices de vegetación, algoritmos SAM y SID y la combinación de estos en las imágenes Sentinel-2 para evaluar su desempeño en la identificación de áreas plantadas con el cultivo de aguacate, 2. Generar un sistema geoespacial mediante la estructura y diseño de las bases de datos geoespaciales en un entorno de desarrollo libre para la visualización de los datos en un editor de aplicaciones web, y 3. la elaboración de un mapa de aptitud a través de la integración de una base de datos geoespaciales en entorno de (SIG) y la validación de un modelo de asignación de potencial para el cultivo de aguacate. Se obtuvo que el algoritmo SID alcanzó una precisión de 97.5 % para detectar aguacate, mientras que el tratamiento SAM obtuvo una precisión de 63.1 %. La combinación de SID con el índice ARI1, proporcionó un mejor resultado sobre la cartografía de validación regional con un 85 % de precisión. Con el SIG se obtuvo la interfaz en un servidor libre que permite visualizar por medio de consultas la distribución y grado de infestación de plagas y enfermedades en el área de estudio de acuerdo a los criterios de temperatura y humedad. En cuanto a la aptitud del área de estudio las áreas con potencial óptimo representan un total de 7.93 % (9,543.82 ha) ubicado al sur de los municipios, distribuyéndose, 3,261.20 ha en Coatepec Harinas, 2,973.87 ha en Temascaltepec, 2,124.41 ha en Donato Guerra y 1,184.33 has en Tenancingo.

Palabras clave: Aguacate, sentinel-2, índice de vegetación, aptitud agronómica, sig.

ABSTRACT

Avocado is one of the most successful agri-food products nationwide, placing Mexico as the main supplier of the international market with more than 30% of production. The demand for avocado is such, the planted area has increased in different states such as Michoacán, Jalisco and the State of Mexico, the latter has had significant growth in the municipalities of Coatepec Harinas, Donato Guerra, Temascaltepec and Tenancingo. The objectives of this research were: 1. Identify by means of Sentinel-2 satellite images the real area planted with avocado in the producing municipalities of this state, 2. Develop a Geographic Information System (GIS) for phytosanitary management in the main avocado production units and 3. identify regions with optimal and subactive potential for the establishment of avocado plantations in producing municipalities. The methodology consists of three stages: 1. test methods of vegetation indexes, SAM and SID algorithms and the combination of these in Sentinel-2 images to assess their performance in the identification of planted areas with avocado cultivation, 2. Generate a geospatial system through the structure and design of geospatial databases in a free development environment for the visualization of data in a web application editor, and 3. the development of an aptitude map through the integration of a Geospatial database in the environment of (GIS) and the validation of a potential allocation model for avocado cultivation. It was obtained that the SID algorithm had an accuracy of 97.5% to detect avocado, while the SAM treatment obtained an accuracy of 63.1%. The combination of SID with the ARI1 index provided a better result on regional validation mapping with 85% accuracy. With the GIS, the interface is obtained in a free server that allows visualizing through consultations the distribution and degree of infestation of pests and diseases in the study area according to the temperature and humidity criteria. Regarding the aptitude of the study area, the areas with optimal potential represent a total of 7.93% (9,543.82 ha) located south of the municipalities, distributed, 3,261.20 ha in Coatepec Harinas, 2,973.87 ha in Temascaltepec, 2,124.41 ha in Donato Guerra and 1,184.33 ha in Tenancingo.

Keywords: Avocado, sentinel-2, vegetation index, agronomic aptitude, sig.

CONTENIDO

RESUMEN	II
ABSTRACT	III
CONTENIDO	IV
FIGURAS	VIII
TABLAS	IX
INTRODUCCIÓN	1
REVISIÓN DE LITERATURA	3
Origen del aguacate	3
Descripción botánica del aguacate.....	3
Morfología del fruto	4
Fenología y desarrollo del aguacate.....	4
Variedades.....	4
Variedad Hass.....	5
Características de Hass.....	5
Requerimientos del cultivo Hass	5
Propiedades nutricionales.....	6
Situación del cultivo a nivel mundial.....	6
Aguacate en México	7
Aguacate en el Estado de México	7
Plagas del aguacate	8
Enfermedades	8
Teledetección	9
Radiación electromagnética	10
Elementos de los que se compone el proceso de teledetección	10
Respuesta espectral de la vegetación	11
Respuesta espectral del suelo	13
Potencialidad de la teledetección aplicada al estudio del medio.....	15
Imágenes Sentinel-2 MSI.....	15
Composición de falso color Infrarrojo en la imagen Sentinel	17
Preprocesamiento de las imágenes	18
Georreferenciación de imágenes satelitales.....	19

Calibración radiométrica	19
Corrección atmosférica	19
Conversión a radiancia	20
Clasificación de imágenes	20
Métodos de clasificación de imágenes	20
Método Supervisado	21
Método No supervisado	21
Clasificador Spectral Angle Mapper (SAM)	21
Clasificador Spectral information Divergence (SID)	22
Índices de vegetación	23
Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)	24
Anthocyanin Reflectance Index 1 (ARI 1)	24
Anthocyanin Reflectance Index 2 (ARI 2)	25
Simple Ratio Index (SR)	25
Sistemas de Información Geográfica.....	25
Funcionamiento de un SIG	25
Creación de datos.....	26
Representación de los datos	26
SIG en la toma de decisiones.....	26
Bases de datos.....	27
Modelo entidad – relación	27
Entidades y relaciones.....	27
Modelo lógico.....	28
Zonificación agroecológica	29
Modelado cartográfico.....	29
Análisis Multivariante.....	31
El valor teórico.....	31
Escalas de medida	32
Error de medida.....	32
Transformación Tasseled cap.....	32
JUSTIFICACIÓN.....	35
HIPOTESIS	37
OBJETIVOS	38

General	38
Específicos	38
MATERIALES Y MÉTODO.....	39
Área de estudio	39
Identificación de áreas plantadas con cultivo de aguacate	40
Datos de Campo	40
Adquisición de imágenes y preprocesamiento	41
Procesamiento de la imagen Sentinel-2.....	41
Índices de vegetación	43
Validación de mapas	46
Sistema de Información Geográfica	47
Datos de campo.....	47
Muestreo de Trips (<i>Scirtothrips</i> sp.).....	47
Araña Roja (<i>Oligonychus punicae</i> Hirst)	48
Araña cristalina <i>Oligonychus perseae</i> (Tuttle, Baker y Abbatiello)	48
Barrenador de la rama (<i>Copturus aguacatae</i>).....	48
Antracnosis (<i>Colletotrichum gloeosporioides</i>).....	49
Desarrollo del Sistema de Información Geografica.....	49
Modelo conceptual de Entidad – Relación.....	50
Modelo Lógico	51
Depuración de las bases de datos	52
Creación de tablas	54
Generación de tablas Query SQL.....	54
Tabla de humedad.....	55
Tabla de temperatura.....	55
Tabla plaga	56
Tabla de almacenamiento de datos	56
Modelo Físico	57
Diseño de interfaz	57
Consultar	58
Guardar	58
Visualizar	58
Etapas de Consulta y visualización	58

Integración de Driver Postgres SQL (librerías)	59
Conexión de las bases de datos en Postgres SQL.....	59
Desarrollo de ficha de captura en Neatbeans.....	61
Diseño de la interfaz.....	61
Arquitectura geotecnologica del servicio de mapas	70
Servidor de aplicaciones web mediante el lenguaje HTML5, CSS y Java Script	70
Visualización de las incidencias desde Geoserver.....	73
Visualización de las incidencias	74
Mapa de aptitud para el establecimiento de futuras plantaciones de aguacate	75
Integración de la base de datos geoespaciales	75
Construcción de criterios de análisis y ponderación de las variables territoriales	76
Integración y validación de un modelo de asignación de potencial para el cultivo de aguacate.....	80
Método Weighted overlay	81
RESULTADOS	82
MODELO ESPACIAL DE AREAS POTENCIALES PARA EL ESTABLECIMIENTO DE FUTURAS PLANTACIONES DE Persea americana Mill. EN EL ESTADO DE MÉXICO	84
Cartografía de cultivos de aguacate en el sur del Estado de México mediante tratamiento digital mixto de imágenes Sentinel-2	103
OTROS RESULTADOS	127
Identificación de aguacate en Temascaltepec y Tenancingo	127
Sistema de Información Geográfica	128
DISCUSIÓN GENERAL.....	134
CONCLUSIONES	139
ANEXOS	140
BIBLIOGRAFÍA	145

FIGURAS

Figura 1. Proceso de teledetección. Fuente: https://es.slideshare.net/EDU3364/teledeteccion-9476986	9
Figura 2. Espectro electromagnético y técnicas de teledetección.	10
Figura 3. Respuestas espectrales.	12
Figura 4. Estado de las hojas y signatura espectral.	12
Figura 5. Reflectividad del suelo en función del contenido de humedad. Fuente: rsc.umn.edu/rsc/Volume4/Leblon/leblon.html	14
Figura 6. Línea de suelo. (www.soils.orf/publications/aj/articles/100/2/320).	15
Figura 7. Imágen Sentinel 2 con composición de falso color infrarrojo RGB=4,3,2.....	18
Figura 8. Área de estudio.	40
Figura 9. Diagrama Entidad - Relación.....	50
Figura 10. Diagrama de proceso weighted overlay para mapa de aptitud.	81
Figura 11. Cartografía del aguacate en Temascaltepec, Estado de México, obtenida mediante la combinación del SID y el índice ARI1.	127
Figura 12. Cartografía del aguacate en Tenancingo, Estado de México, obtenida mediante la combinación del SID y el índice ARI1.	128
Figura 13. Curva típica de aguacate.	140
Figura 14. Plantaciones de 1 a 3 años. Fuente: Google Earth.	140
Figura 15. Plantaciones de 3 a 6 años. Fuente: Google Earth.	141
Figura 16. Plantaciones de más de 6 años. Fuente: Google Earth.	141
Figura 17. Escena. S2B_MSIL1C_20171128T170639_N0206_R069_T14QMG_20171128T221610.....	142
Figura 18. Escena. S2B_MSIL1C_20171128T170639_N0206_R069_T14QLF_20171128T221610.	142
Figura 19. Escena. S2B_MSIL1C_20171128T170639_N0206_R069_T14QLG_20171128T221610.....	143
Figura 20. Escena. S2B_MSIL1C_20171128T170639_N0206_R069_T14QMF_20171128T221610.	143
Figura 21. Correlación espacial entre la clasificación obtenida de SAM y puntos de entrenamiento.	144

TABLAS

Tabla 1. Bandas del satélite Sentinel 2A del programa Copernicus de la Comisión Europea y operado por ESA.	16
Tabla 2. Composición RGB predefinida para Sentinel-2.....	17
Tabla 3. Algoritmo y ángulo aplicado.....	42
Tabla 4. Índices de vegetación calculados y relación de bandas “B” empleadas.	43
Tabla 5. Valor de la condicional aplicada a cada uno de los índices.	44
Tabla 6. Matriz de confusión de combinaciones de SAM, SID e índices de vegetación.....	46
Tabla 7. Rango de temperatura para Trips.	52
Tabla 8. Rango de temperatura para Barrenador de la rama.	52
Tabla 9. Rango de temperatura para Araña roja.....	52
Tabla 10. Rango de temperatura para Araña cristalina.	53
Tabla 11. Rango de temperatura para Antracnosis.	53
Tabla 12. Condiciones de porcentaje de humedad para Trips.....	53
Tabla 13. Cartografía empleada en la elaboración de mapa de aptitud para el cultivo de aguacate.	75
Tabla 14. Variables consideradas por 10 autores para valorar el potencial de cultivo de aguacate.	77
Tabla 15. Prioridad de las variables consideradas por expertos en cultivo de aguacate.	78
Tabla 16. Frecuencia de variables e importancia.	79
Tabla 17. Requerimientos agroecológicos del aguacate Hass.....	80

INTRODUCCIÓN

México es el principal productor de aguacate en el mundo, con una producción promedio anual de 1,836,700 ton, en 235,317 ha (SIAP, 2019). La entidad líder en producción nacional es Michoacán, que genera 80 % del total nacional, sin embargo, Jalisco y el Estado de México le siguen en importancia. En el Estado de México, los municipios con mayor producción son Coatepec Harinas con 2,155 ha, Temascaltepec 1558 ha, Donato Guerra 1,493 ha y Tenancingo 884 ha (SIAP, 2019). Parte de la producción de aguacate mexiquense tiene un valor de exportación que se dirige a Canadá, Europa y Asia. Con la firma del Tratado de Libre Comercio de América del Norte (TLCAN) en 1994 se marcó el inicio de una prometedora era para los productores mexicanos de aguacate, dado que les permitió ingresar su producto a los EEUU tras estar prohibido desde 1914 por temor a una infestación de insectos (INFOBAE, 2018).

Actualmente en el Estado de México, el aguacate Hass absorbió la producción, ya que del total de hectáreas entre el 90 y el 95 % están destinadas a esta fruta (Sangerman *et al.*, 2014). Este cultivo ha originado cambios profundos en la cultura agrícola de la región, ya que áreas anteriormente sembradas con maíz fueron ocupadas paulatinamente por huertos de aguacate, así mismo, ha traído una serie de consecuencias en los pueblos y comunidades de la región, como el aumento del ingreso económico, el crecimiento de una serie de servicios asociados, tales como el establecimiento de empresas distribuidoras de agroquímicos, servicios de irrigación, asesoría agronómica y la creación de fuentes de empleo para los locales (Chávez, 2012).

Las plantaciones comerciales presentan fuertes daños por plagas que se manifiestan en la planta, con pérdidas en la producción y una mala calidad de fruto; las plagas de mayor importancia económica son los trips (*Frankliniella occidentalis*, *Heliothrips haemorrhoidalis*, Bouché; *Scirtothrips* spp, *Pseudophilothrips perseae*, Watson), barrenador de tronco y ramas (*Copturus aguacatae*, Kissinger), barrenador del hueso del aguacate (*Conotrachelus perseae* Barber y *Heilipus lauri* Boheman) y ácaros como *Tetranychus: Urticae*, *Evansi* y *Turkestani*, que impactan al cultivo y requieren de la aplicación de medidas para su control.

Los elementos de la naturaleza tienen una respuesta espectral propia y la teledetección estudia las variaciones espectrales, espaciales y temporales de las ondas electromagnéticas y pone de

manifiesto las correlaciones existentes entre estas y las características de los diferentes materiales terrestres, centrándose en la identificación de estos materiales en la superficie y los fenómenos que en ella se generan a través su respuesta espectral (Sacristán, 2006).

En la actualidad, los Sistemas de Información Geográfica (SIG) se constituyen como un elemento protagonista en el análisis espacial al integrar la información sea cual sea su procedencia (Chuvioco, 2002). Según (Vílchez, 2000, citado en Liria, 2005) es un sistema de información que trata datos georreferenciados, es decir, procesa información de eventos o entidades geoespaciales con el fin de generar una información nueva mediante operaciones de manipulación y análisis que ayuda a la toma de decisiones.

Por otro lado, el análisis por superposición cartográfica es uno de los procedimientos básicos de la metodología geográfica tradicional y actualmente uno de los más utilizados ante el uso de la tecnología SIG. Este análisis tiene como objetivo encontrar respuesta a cuáles son los sitios de mayor aptitud locacional, determinar superficies y distribuciones espaciales a partir de considerar las áreas de asociación espacial entre diferentes características en forma de capas temáticas.

El éxito de la exportación del aguacate, ha provocado la transformación de una gran superficie de ecosistemas naturales en huertos de aguacate (CONABIO, 2012). La adecuada planificación de las actividades humanas debe partir de la realización de un inventario más completo y actualizado de las riquezas naturales, incrementando la vigilancia sobre el medio ambiente, generando conciencia y reduciendo los impactos.

Por lo que desarrollar un SIG para el manejo de plagas y enfermedades que atacan el cultivo de aguacate, puede ayudar en el manejo de plagas y enfermedades, así como identificar por medio de imágenes satelitales la superficie y distribución de las plantaciones de aguacate y ubicar las zonas óptimas para el establecimiento de futuras plantaciones, lo cual será de utilidad para la gestión de las tierras y la toma de decisiones de las plantaciones comerciales de aguacate.

REVISIÓN DE LITERATURA

Origen del aguacate

El aguacate (*Persea americana* Mill.), especie descrita por Miller, es un árbol frondoso con hoja perenne, originado en Mesoamérica, particularmente en el centro y este de México (Williams, 1977). La domesticación de esta especie data de la época Precolombina, cuando era muy apreciada por las civilizaciones Maya y Mexica, como lo evidencia su presencia en las representaciones pictóricas de dichas civilizaciones (Storey *et al.*, 1986; Gama y Gómez, 1992).

Las evidencias arqueológicas indican que el uso y la selección de *P. americana* en México comenzó hace 10.000 años, con el hallazgo de semillas de aguacate en Coxcatlán, Valle de Tehuacán, en el estado de Puebla, de un tamaño mayor a las encontradas en otras excavaciones, esto demuestra que, durante ese tiempo se produjo una selección progresiva que favoreció el crecimiento del fruto (Gran Diccionario Náhuatl, 2018).

Descripción botánica del aguacate

Taxonómicamente, *P. americana* fue clasificada en un inicio por Gaertner como *Persea grattissima*, posteriormente, Miller hizo una reclasificación, dejando a esta especie como *Persea americana* (Rodríguez, 1982). Es conocido como palta, cura, avocado o abacate, y es un árbol con fruto comestible que pertenece a la familia *Lauraceae*, una de las más antiguas entre las plantas con flores.

El árbol crece hasta 20 metros de altura, pero generalmente en los cultivos se mantiene de menos de cinco metros, es una especie de tallo leñoso que puede ser erecto, con un diámetro de 30 a 60 centímetros o más grueso en árboles muy viejos; también puede ser bajo y ancho, con ramas que se abren desde muy cerca del suelo.

Las hojas están dispuestas de forma alterna. Son pedunculadas, muy brillantes, de forma lanceolada, con base aguda, margen entero y ápice agudo. El color de las hojas maduras es verde mate, el peciolo presenta estrías o surcos y el relieve de la venación por el haz es intermedio, usualmente levantado (IICA, 2009).

Morfología del fruto

Es un fruto de una sola semilla, cuya pulpa es carnososa, presenta una amplia variedad de colores, texturas y formas, puede medir de 7.5 a 33 centímetros de largo y hasta 15 centímetros de ancho, dependiendo del cultivar (Scora *et al.*, 2002). El pericarpio puede ser desde color verde amarillo y alcanza tonalidades oscuras, púrpuras, rojizas, o tan oscuras que llegan a parecer negras; en ocasiones tiene puntos amarillos cuya textura suele ser lisa o rugosa, lustrosa u opaca; delgada o como cuero y de hasta 6 mm de gruesa; flexible o granulada y quebradiza (Barrientos, 2010). La semilla, única, puede ser ovoide, redonda o cónica, de 5 a 6.4 centímetros de largo, dura y pesada, de color marfil rosado, envuelta en dos capas como papeles de color café, frecuentemente adheridas a la cavidad pulposa, mientras la semilla sale fácilmente (Tiempo de aguacate, 2017).

Fenología y desarrollo del aguacate

El árbol de aguacate muestra diversas fases fenológicas conforme se presentan las estaciones del año, debe entenderse entonces, que la fenología es la relación entre el clima y los fenómenos biológicos de las especies a través del tiempo; entre las principales etapas fenológicas del cultivo de aguacate, se encuentra el inicio y la diferenciación de las flores que comienza en otoño y termina a finales de la primavera, el crecimiento vegetativo, el amarre y caída de frutos, así como el crecimiento y maduración de los mismos; el crecimiento de raíces y la abscisión de hojas también son etapas fenológicas importantes (Reyes *et al.* 2015).

Variedades

Rodríguez (1982) menciona que las variedades comerciales de aguacate se clasificaron en tres grupos ecológicos o razas: mexicana, guatemalteca y antillana. Para dicha clasificación se consideró la época de floración, la temporada de recolección, el periodo de floración-recolección, el peso y la corteza del fruto, la cantidad de aceite y la resistencia a bajas temperaturas; de igual manera, Scora *et al.* (2002) distinguieron 3 especies dentro del género *Persea*: *P. schiedeana*, *P. parviflora* y *P. americana*; de esta última, se han descrito las tres razas o variedades botánicas con base en diferencias morfológicas, ecológicas y moleculares.

Existe una gran diversidad de cultivares nativos, que actualmente son conocidos en muchas regiones como “criollos”, sin embargo, en los últimos 100 años, se han desarrollado alrededor de 400 cultivares, entre los que sobresalen “Fuerte”, “Hass”, “Bacon”, “Pinkerton”, “Gwen” y “Reed” (CONABIO, 2012).

Variedad Hass

Es la principal variedad comercial en el mundo y la más cultivada en México, representa cerca del 80 % de la producción en el mundial (Almanza, 2010). Este fruto fue obtenido por una semilla de una planta guatemalteca en la Habra Heights, California, Estados Unidos, por Rudolph Hass y patentado en 1935.

Es una variedad muy desarrollada en Estados Unidos y difundida en Israel, Islas Canarias, Sur de España, México y América del Sur. Posee 95 % de las características de la raza guatemalteca y solo el 5 % de la raza mexicana. Es altamente productiva y puede alcanzar alrededor de 16 toneladas por hectárea.

Características de Hass

Es un árbol grande, de rápido desarrollo, producción abundante pero alterna; es sensible a la humedad ambiental baja, al frío, a la sequía y a la salinidad (Amortegui, 2001). Es auto fértil, sin embargo, obtiene mejores resultados polinizándolo con las variedades Fuerte y Ettinger. Los frutos son de buena calidad y permiten el almacenamiento, son de tamaño mediano, con un peso que va de 150 a 400 g y de 8 a 10 cm de largo; de forma ovoide a piriforme; la cáscara es rugosa, de color verde que se oscurece al madurar, tornándose negra (Téliz, 2000).

Requerimientos del cultivo Hass

Se aconseja su establecimiento en regiones libres de heladas y vientos calurosos y secos. La temperatura y precipitación son los factores de mayor incidencia en el desarrollo del cultivo. Las altitudes recomendadas varían entre 800 y 2500 msnm, en suelos arcillosos o franco arcillosos, siempre que exista un buen drenaje (SAGARPA, 2017).

Los requerimientos agroecológicos específicos para el cultivo de aguacate Hass en el Estado de México, propuestos por Reyes, 2012, se encuentran entre los rangos: Temperatura mínima de 12 °C, óptima de 18-22°C y máxima de 27 °C. Precipitación mínima de 850 mm, óptima de 1000 – 1400 mm y máxima de 1800 mm. Tipo de suelo óptimo andosol y subóptimo vertisol con textura ligera y media y un valor mínimo de altitud de 1200 msnm, óptimo de 1600 – 2200 msnm y máximo de 2400 msnm. Y una pendiente óptima de 5 a 10 %, mínima de 1 % y máxima de 20 %.

Se adapta a diferentes tipos de suelo, desde los arenosos hasta los compactos, prefiriendo un suelo franco y moderadamente profundo con poca salinidad, ya que el aguacate es muy susceptible al exceso de sodio. El pH óptimo para el desarrollo del aguacate oscila entre 6.0 y 7.5 aunque puede variar según la raza y variedad. Según lo reportado por Benacchio (1982), es indispensable que el terreno tenga buen drenaje. En cuanto a luz, el aguacate se comporta como una planta de día corto, pero requiere mucha insolación y lugares con vientos moderados, ya que podrían provocar caída de flores y afectar la producción (Benacchio, 1982).

Propiedades nutricionales

El fruto es uno de los más nutritivos entre todas las frutas comerciales. Tiene un alto contenido de calorías, proteínas, lípidos y vitaminas (particularmente A), así como potasio, fósforo y calcio (CONABIO, 2012). Cabe mencionar que, además sus frutos son utilizados en la industria cosmética y farmacéutica para la elaboración de productos a base de extractos naturales como cremas, aceites y películas protectoras y de limpieza corporal, debido a la cantidad de aceites, vitaminas y otros nutrientes que contiene, es una planta integral, pues la madera es altamente resistente que se usa para la fabricación de papel y muebles (Ornela y Yahia, 2002).

Situación del cultivo a nivel mundial

El aguacate es uno de los productos más exitosos de la exportación agroalimentaria nacional. México ocupa el primer lugar en producción de aguacate a nivel mundial y el principal proveedor del mercado internacional con una aportación de 1,836,700 ton (SIAP, 2019) cifra que representa

el 31 % de la producción mundial, Chile ocupa el segundo lugar en producción con el 9 %, destacan también República Dominicana e Indonesia como productores importantes (FAO, 2012).

A pesar de que se han trascendido fronteras y la demanda cada vez es mayor, Estados Unidos sigue siendo el principal país consumidor, seguido de Japón, Francia, España, Holanda y Reino Unido, extendiéndose a China y Corea (Agrichem, 2015). Se reporta un consumo per cápita anual de 10 kg, que lo ubica como el país donde se da el mayor consumo de esta fruta (Urquiza *et al.*, 2015).

Aguacate en México

El consumo nacional de aguacate es sensible a cambios en el precio, por lo que se ha visto afectado por variaciones importantes. De la producción nacional, 69 % se destina al consumo en fresco, 12 % a exportaciones y 19 % se va a la industria. La demanda anual de aguacate le permite a México comercializar más de 635 mil toneladas entre países de prácticamente todo el mundo, lo cual es una muestra clara de la cadena de valor que existe entre el campo mexicano, los productores y el comercio internacional. Aunque Estados Unidos es el principal consumidor del producto mexicano, acaparando el 80 por ciento del total de toneladas anuales producidas en el país, México ha logrado ampliar su mercado, llegando a países como Canadá, China, Japón, Alemania, Francia y España, quienes, durante el primer semestre del año, acapararon el 16% de las exportaciones mundiales (Doporto, 2019).

Aguacate en el Estado de México

El estado de México contribuye en la producción de aguacate con un 5.4 %, distribuido en treinta municipios, entre los que destaca Coatepec Harinas, Temascaltepec, Tenancingo y Donato Guerra que exportan el 73 % de la producción de fruta (SIAP, 2018). El establecimiento de este cultivo cada vez es mayor en los diferentes municipios del estado, ya que se cuenta con las condiciones climatológicas adecuadas.

Uno de los municipios con mayor relevancia es Coatepec Harinas que produce el 25 % del aguacate mexiquense; es decir, uno de cada cuatro proviene de este municipio, también es uno de los más importantes a nivel mundial por las distintas especies y razas que conserva de esta fruta. La

producción en el estado ha crecido cerca de un 50%, principalmente en los municipios ubicados al sur de la entidad (BANCOMEX, 2017).

Plagas del aguacate

Los insectos siempre están asociados con la producción de los vegetales. Algunos de éstos son plagas de importancia económica, ya que afectan los rendimientos o la calidad del fruto a cosechar; en otras, son vectores o transmisores de enfermedades. Sin embargo, existe un gran número de insectos cuya presencia en el cultivo o lote no representa peligro para la producción y que por lo tanto no requieren manejo (Bernal *et al.*, 2008). Existe una gran diversidad de especies de insectos plaga asociadas al cultivo de aguacate los cuales afectan de manera directa o indirecta al cultivo. (García, Méndez, y Morales, 1967) registraron al menos 14 especies de ellas 10 son consideradas de importancia económica y el resto como secundarias.

Se han hecho registros a través de la Norma Oficial Mexicana (NOM-066-FITO-2002) en donde se reportan a las especies *Conotrachelus aguacatae*, *Heilipus lauri* y *Copturus aguacatae* (Coleoptera: Curculionidae) *Stenoma catenifer* (Lepidoptera: Elasmobranchidae), como plagas cuarentenadas del aguacate. También existen plagas consideradas de importancia económica como *Metcalfiella monogramma* y *Aethalion quadratum* (Hemiptera: Membracidae), la chinche de encaje *Pseudacysta perseae* (Hemiptera: Tingidae), la agalla *Tryoza anceps* (Hemiptera: Triozidae) y el gusano confeti *Pyrrhopyge chalybea* (Lepidoptera: Hesperidae).

Enfermedades

Entre las enfermedades de mayor importancia, por su frecuencia y severidad en cultivos de aguacate, destacan: La pudrición de raíces, causada por el hongo *Phytophthora cinnamomi* var. *cinnamomi* y la marchitez por *Verticillium* sp., las cuales normalmente ameritan decisiones de manejo. Cada vez, son más frecuentes e importantes, por su difícil manejo, las afecciones por *Armillaria mellea* y *Rosellinia* sp. en cultivos de aguacate establecidos en zonas de clima medio y frío moderado.

Los hongos causantes de la roña (*Sphaceloma perseae*), la antracnosis del fruto (*Glomerella cingulata* (anamorfo *Colletotrichum gloeosporioides*) y la mancha de la hoja y la mancha negra

del fruto por *Pseudocercospora purpurea* (*Cercospora purpurea*), causan pérdidas importantes en el campo y en la poscosecha, al deteriorar la calidad de la fruta (Bernal, *et al.* 2008).

Otros patógenos que afectan frutos en poscosecha, como *Rhizopus stolonifer*, *Lasiodiplodia theobromae* (= *Botryodiplodia theobromae*) y *Dothiorella* sp. Otras enfermedades, como la muerte descendente de ramas, brotes y pudrición de injertos por *C. gloeosporioides*, *L. theobromae* y la pudrición de raíces por *Cylindrocladium* sp., adquieren cada vez mayor importancia en viveros, almácigos y en el campo (Bernal, *et al.* 2008).

Teledetección

La Teledetección es una técnica que permite obtener información a distancia (sin contacto físico) de la superficie de la Tierra a partir de la radiación electromagnética captada por un sensor situado a bordo de plataformas aeroespaciales. Para analizar el proceso físico de teledetección es necesario tener en cuenta la interacción existente entre el objeto de observación y el sensor, estudiando un flujo de radiación electromagnética que se codificará en información digital mediante el uso de un sistema de captura de imágenes como se representa en la (Figura 1).

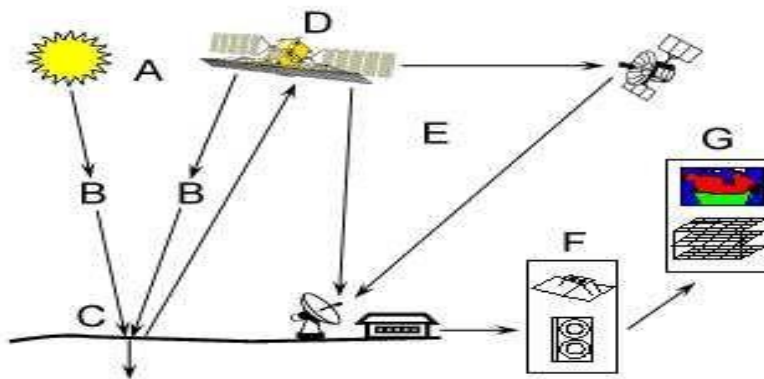


Figura 1. Proceso de teledetección. Fuente: <https://es.slideshare.net/EDU3364/teledeteccion-9476986>

Radiación electromagnética

La teledetección hace uso de la energía del sol que es absorbida y reflejada por los objetos de la corteza terrestre, en diferentes magnitudes dependiendo de la fracción de la energía con la que está interactuando. La radiación electromagnética, está compuesta por campos eléctricos y magnéticos que se combinan y propagan en forma de ondas que se desplazan a la velocidad de la luz (300000 km/s). De manera que, el conjunto de todas las longitudes de onda se denomina espectro electromagnético, donde se pueden distinguir diferentes regiones o intervalos dependiendo de su longitud de onda (Figura 2).

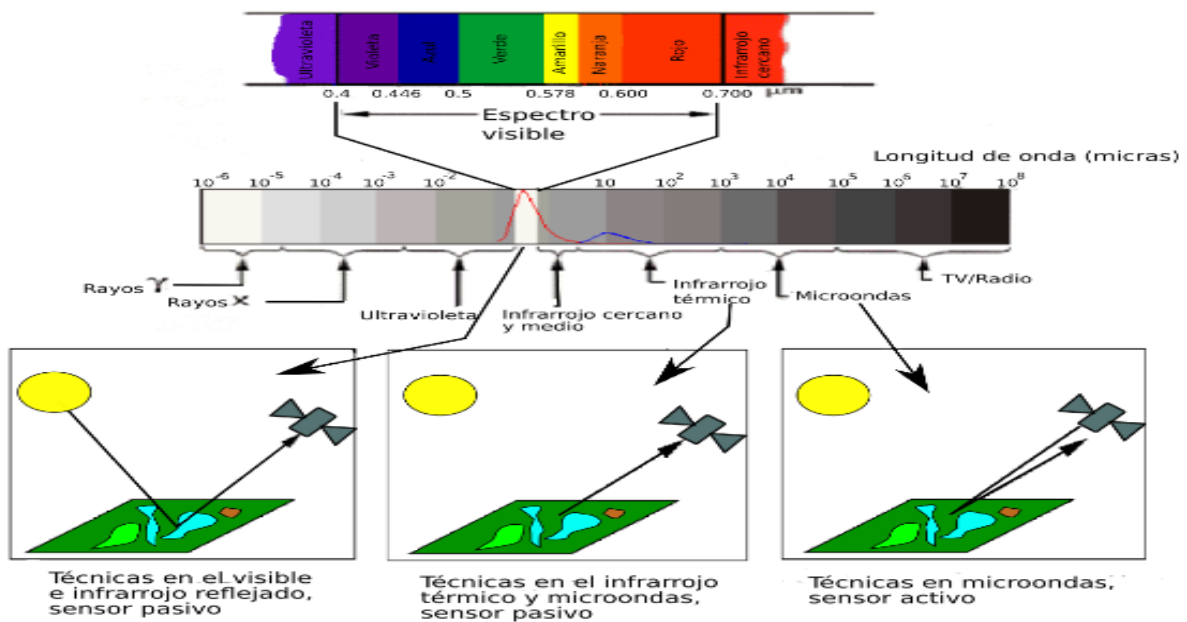


Figura 2. Espectro electromagnético y técnicas de teledetección.

Elementos de los que se compone el proceso de teledetección

Los elementos que componen un sistema de teledetección incluyen; una fuente de energía, la interacción con la corteza terrestre, la transmisión, recepción y procesamiento de la señal electrónica, así como su interpretación y análisis.

Es necesario una fuente de energía que ilumine o transmita energía electromagnética al cuerpo que se quiere observar. En el caso de teledetección pasiva es el sol la fuente de irradiación.

En el momento en que la energía se dirige desde la fuente de iluminación al objeto a observar entrará en contacto con la atmósfera y la atravesará interaccionando con ella, dicha interacción se dará de nuevo cuando la energía reflejada desde el objeto se dirija hasta el sensor. Cuando la energía llega hasta el objeto a través del filtro atmosférico, interactúa con el mismo de diferentes maneras dependiendo de sus propiedades y las de la radiación electromagnética. Una vez que la energía haya sido reflejada, dispersada y/o emitida por el objeto, el sensor recoge y graba la radiación resultante. Esta energía registrada por el sensor es transmitida en formato electrónico a una estación de recepción (terrestre o aérea) y se realiza un procesamiento en el que los datos se transforman en una imagen digital. Esta imagen resultante del proceso se interpreta de manera visual, digital o electrónica para poder obtener información sobre el objeto que fue iluminado. El último paso del proceso se logra cuando se puede aplicar la información obtenida del proceso de teledetección para comprenderlo mejor, poder revelar nueva información o ayudar a resolver distintos problemas en particular.

Respuesta espectral de la vegetación

De especial interés para este proyecto es la respuesta espectral de la vegetación; pues es su objeto de estudio. Su respuesta ha sido estudiada y se caracteriza por que la vegetación sana tiene una reflectividad baja en el visible, aunque con un pico en el color verde debido a la clorofila, ese pigmento aparece en concentraciones entre 5 y 10 veces mayores que otros como el caroteno. La reflectividad es muy alta en el infrarrojo reflejado o próximo debido a la escasa absorción de energía por parte de las plantas en esta banda. En el infrarrojo medio hay una disminución especialmente importante en aquellas longitudes de onda en las que el agua de la planta absorbe la energía (Figura 3).

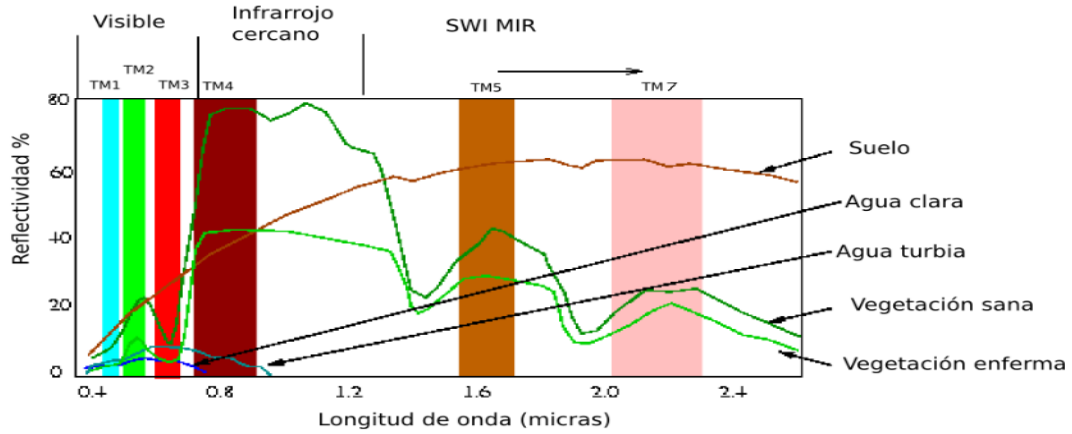


Figura 3. Respuestas espectrales.

Durante el otoño, las hojas pierden los cloroplastos (órganos que contienen la clorofila) ya que dejan de ser necesarios, por tanto, deja de ser la clorofila el pigmento principal y las plantas adquieren un color pardo-amarillento debido a la cada vez mayor importancia relativa de carotenos y otros pigmentos. Esta curva tan contrastada se debilita en el caso de la vegetación enferma en la que disminuye el infrarrojo y aumenta la reflectividad en el rojo y azul, por lo que, la reflectividad de una planta depende de su contenido en agua. Cuando el contenido de agua aumenta disminuye la reflectividad ya que aumenta la absorción de radiación por parte del agua contenida en la planta (Figura 4).

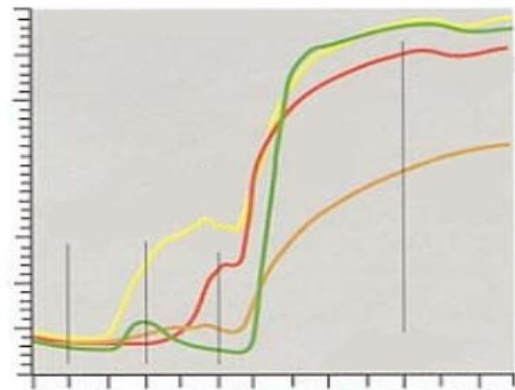
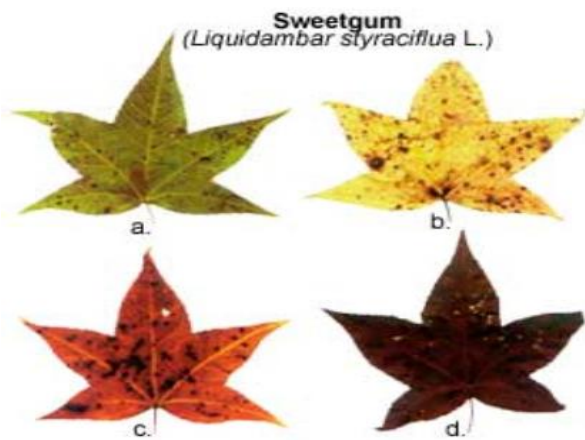


Figura 4. Estado de las hojas y signatura espectral.

La cantidad de energía de los fotones que viajan con longitudes de onda mayores (infrarrojo cercano) es demasiado baja para ser aprovechada por la vegetación, por lo que sólo se absorbe entorno al 5 %, el resto se transmite 40% o refleja 55%. Sin embargo, la energía transmitida acabará llegando a otra hoja situada por debajo, y por tanto el 55% de ese 40% se volverá a reflejar. Este proceso, repetido en diferentes capas hace que se incremente el tanto por ciento de energía reflejada por un dosel vegetal.

El envejecimiento de la planta conlleva a una reducción en la reflectividad en el infrarrojo. Las variaciones en la estructura interna de las hojas son la causa principal de que los patrones de respuesta espectral sean diferentes de unas especies a otras. En cuanto al infrarrojo medio, el agua presente en los tejidos vegetales absorbe la radiación en diversas longitudes de onda hasta alcanzar valores de $\alpha = 0,9$ que afectan incluso a las longitudes de onda vecinas de aquellas. Las variaciones en la estructura interna de las hojas son la causa principal de que los patrones de respuesta espectral sean diferentes de unas especies a otras.

Respuesta espectral del suelo

Las propiedades espectrales del suelo son relativamente simples, la transmisión es nula, por tanto, toda la energía se absorbe o refleja. La reflectividad es relativamente baja para todas las bandas, aunque aumentando hacia el infrarrojo. Hay una cierta dependencia entre reflectividad y contenido en agua del suelo, cuanto mayor es el segundo, menor es la primera como se puede ver en la figura 6. Este aumento se ve interrumpido en aquellas regiones en las que el agua absorbe energía, por tanto, cuanto mayor sea el contenido de agua en el suelo, mayor va a ser la disminución en reflectividad de estas regiones.

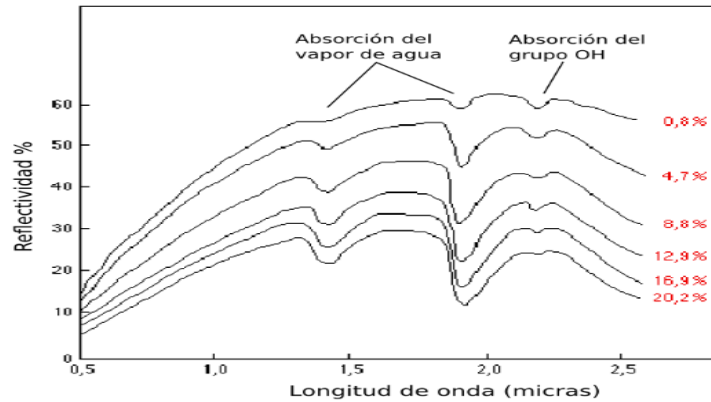


Figura 5. Reflectividad del suelo en función del contenido de humedad. Fuente: rsc.umn.edu/rsc/Volume4/Leblon/leblon.html

Otros factores que afectan la respuesta espectral del suelo son la textura con una mayor reflectividad al aumentar el tamaño medio de las partículas de suelo, los suelos arenosos tienen mayor reflectividad (se ven más claros) que los arcillosos. El problema es que la textura afecta también al contenido de humedad por lo que no resulta fácil diferenciar (con imágenes de satélite) entre ambos factores.

Los minerales de la arcilla tienen una caída en reflectividad en torno a 2.2 μm que no tienen las arenas. El contenido en materia orgánica también afecta a la reflectividad, cuanto mayor sea su contenido y cuanto menos descompuesta se encuentre más oscuro resulta el suelo (menor reflectividad). La composición química y mineralógica también va a influir en la respuesta espectral, así por ejemplo el contenido en óxidos de hierro va a incrementar la reflectividad en el rojo.

La fuerte correlación entre muchos de los factores que influyen sobre la respuesta espectral del suelo, imposibilita el que puedan sacarse conclusiones claras del análisis de una imagen de zonas cuyas características edáficas se desconocen. En todo caso se ha comprobado que las áreas de suelo desnudo de una misma imagen siguen una serie de pautas reconocibles. La más estudiada es que si se hace una representación gráfica con la reflectividad en el rojo en abscisas y la reflectividad en el infrarrojo cercano en ordenadas, las zonas de suelo desnudo aparecen formando una línea que se conoce como línea del suelo (Figura 6).

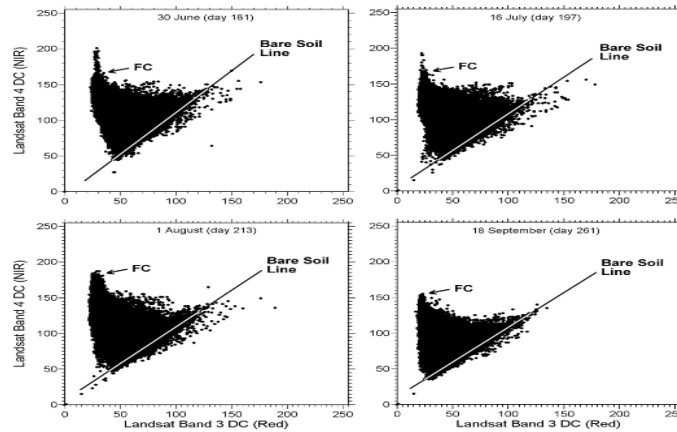


Figura 6. Línea de suelo. (www.soils.orf/publications/aj/articles/100/2/320).

Potencialidad de la teledetección aplicada al estudio del medio

Una de las potencialidades de la teledetección aplicadas al estudio del medio, es la capacidad de discriminar diferentes cubiertas vegetales, usos de suelo, masas de agua, o la detección de *fenómenos naturales* o provocados por la *actividad humana*. Esto puede analizarse gracias a la existencia de las diferentes bandas multispectrales con las que cuentan los *satélites* Sentinel.

Los datos captados por los *satélites* de teledetección se registran en diferentes *bandas* del espectro electromagnético, lo que genera una imagen *monocroma* que podemos visualizar en escala de grises con una paleta de 256 tonos. Por lo que cada *pixel* de la imagen puede contener un valor que oscila entre el negro (*valor 0*) y el blanco (*valor 256*).

Imágenes Sentinel-2 MSI

Sentinel-2 es un satélite óptico desarrollado por la Agencia Espacial Europea (ESA) dentro del programa Copérnico, compuesta por el instrumento Multi Spectral Instrument (MSI) que toma datos de alta resolución espacial y permite obtener información en las longitudes de onda, visibles e infrarrojos, permite monitorear los cambios en la tierra y en la vegetación, así como vigilar a nivel mundial el cambio climático. Fue lanzado el 23 de junio de 2015 y consta de 13 bandas con distintas resoluciones espaciales (10m, 20m o 60m). Las imágenes están disponibles de manera gratuita y pueden ser utilizadas en un rango amplio de aplicaciones (INTA, 2017).

Bandas del satélite Sentinel 2A del programa Copernicus de la Comisión Europea y operado por ESA (Tabla 2).

Tabla 1. Bandas del satélite Sentinel 2A del programa Copernicus de la Comisión Europea y operado por ESA.

Banda	Resolución	Longitud de onda central	Descripción
B1	60 m	433 nm	Ultra azul (costa y aerosol)
B2	10 m	490 nm	Azul
B3	10 m	560 nm	Verde
B4	10 m	665 nm	Rojo
B5	20 m	705 nm	Visible e infrarrojo cercano (VNIR)
B6	20 m	740 nm	Visible e infrarrojo cercano (VNIR)
B7	20 m	783 nm	Visible e infrarrojo cercano (VNIR)
B8	10 m	842 nm	Visible e infrarrojo cercano (VNIR)
B8a	20 m	865 nm	Visible e infrarrojo cercano (VNIR)
B9	60 m	940 nm	Onda corta infrarroja (SWIR)
B10	60 m	1375 nm	Onda corta infrarroja (SWIR)
B11	20 m	1610 nm	Onda corta infrarroja (SWIR)
B12	20 m	2190 nm	Onda corta infrarroja (SWIR)

Cada elemento territorial refleja la energía en una banda o juego de bandas específicas. Por ello, existen composiciones RGB predefinidas para cada satélite jugando con las bandas en las que existe mayor interacción de energía con el elemento. Algunas combinaciones RGB para Sentinel 2 y sus aplicaciones de análisis territorial.

Composición de falso color Infrarrojo en la imagen Sentinel

Las imágenes de las distintas bandas se pueden combinar entre ellas para producir una imagen en *color real* o *falso color* en función de las bandas escogidas. Esto se hace aplicando cada uno de los tres colores primarios (*rojo, verde, azul*) a una banda distinta de la imagen.

El máximo de bandas que podemos emplear por composición es de tres y la apariencia dependerá de las bandas espectrales que asignemos a los canales *rojo, verde* y *azul* del monitor. El proceso permite visualizar, simultáneamente, información de distintas regiones del *espectro*, lo que facilita la delimitación visual de algunas cubiertas (Tabla 1). La elección de las bandas para realizar la composición, y el orden de los colores destinados a cada una, dependen del *sensor* sobre el que se trabaje y de la aplicación del proyecto. La composición más habitual es la denominada *falso color* o *infrarrojo color*, fruto de aplicar los cañones de *rojo, verde* y *azul* sobre las bandas correspondientes al *infrarrojo cercano*, el *rojo* y el *verde* respectivamente.

Tabla 2. Composición RGB predefinida para Sentinel-2.

RGB	Composición Sentinel - 2
Color natural	4,3,2
Zonas urbanas	12,11,4
Vegetación general	8,4,3
Análisis de vegetación	11,8A,4
Análisis de vegetación sana	8A,11,2
Estudios agrarios	11,8A,2
Usos de suelo	8A,11,4

Esta combinación de bandas tiene buena sensibilidad a la vegetación verde (la cual aparece representada en tonalidad roja), debido a la alta *reflectividad* en el *infrarrojo* y la baja en el *visible*, representa de forma clara caminos y masas de agua. Además, muestra *bosques coníferos* con un rojo más oscuro mientras que los *bosques caducifolios* lo hacen con color rojo más claro.

Las tonalidades más habituales en una composición en falso color (Figura 6) son:

- *Rojo*, indica vegetación sana y bien desarrollada.
- *Rosa*, áreas vegetales menos densa o con vegetación menos desarrollada.
- *Blanco*, áreas con escasa o nula vegetación.
- *Azul oscuro o negro* indica la presencia de agua.
- *Marrón*, vegetación arbustiva muy variable.
- *Beig-dorado*, zonas de transición, prados secos asociados a matorral ralo.

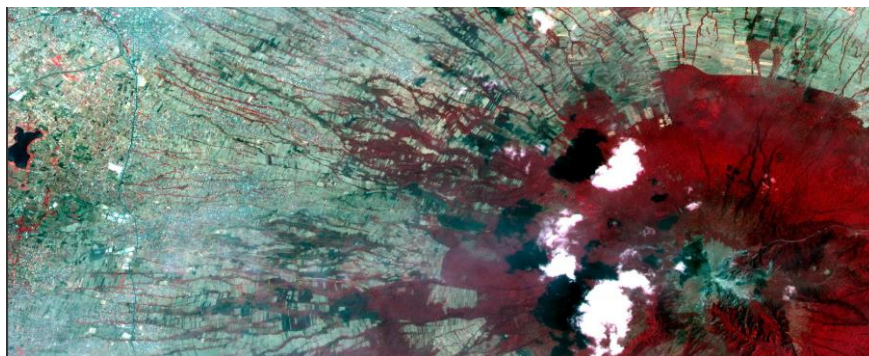


Figura 7. Imágen Sentinel 2 con composición de falso color infrarrojo RGB=4,3,2.

Preprocesamiento de las imágenes

Las imágenes originales son preprocesadas para corregirlas radiométrica y atmosféricamente (Bovolo, 2012), haciendo uso de los metadatos que acompañan a las imágenes. Además, en este preprocesado previo se mejora su resolución espacial mediante aplicación de algoritmos Pansharpening (Welch, 1987).

Georreferenciación de imágenes satelitales

Una imagen de satélite, al igual que las fotografías aéreas, no proporciona información georreferenciada; cada pixel se ubica en un sistema de coordenadas arbitrario de tipo fila-columna como los que manejan los programas de tratamiento digital de imágenes. El proceso de georreferenciación consiste en dar a cada pixel su localización en un sistema de coordenadas estandar (UTM, lambert, coordenadas geográficas) para poder, de este modo, combinar la imagen de satélite con otro tipo de capas en un entorno SIG. Tras la georreferenciación se obtiene una nueva capa en la que cada columna corresponde con un valor de longitud y cada fila con un valor de latitud.

Calibración radiométrica

Este proceso permite convertir la información de la imagen original (bruta) de cada pixel, de Niveles Digitales -ND- a Niveles de Reflectancia captada por el sensor en el tope de la atmosfera, es decir, sin los efectos de la misma, lo que permite disminuir los efectos de dispersión o absorción causados por la presencia de partículas en la atmósfera. Adicionalmente, se busca remover el efecto de los diferentes ángulos de incidencia de la energía solar y de la distancia Tierra - Sol, que se producen como consecuencia de las diferencias de tiempo de adquisición de las imágenes. En general con estas correcciones se busca minimizar los errores que influyen en la radiación o en el valor radiométrico de cada elemento captado en la escena (Chuvieco, 2008).

Corrección atmosférica

La corrección atmosférica busca recuperar la radiancia intrínseca del objeto de estudio, obtenida de la señal recibida por el sensor. Para lo que se requiere: convertir los niveles digitales de cada banda a valores de radiancia, la radiancia se transforma a valores de reflectividad en el techo de la atmósfera “Top of Atmosphere” (TOA) y se obtiene mediante FLAASH la conversión a valores de reflectancia (Kruse, 2004).

Conversión a radiancia

Como se indicó anteriormente, los ND de la imagen son proporcionales a la radiancia, pero son multiplicados por un factor de conversión que permite almacenar los datos en formatos más compactos. Los factores de conversión que revierten este proceso son característicos de cada sensor y por lo general son suministrados por el fabricante. Para revertir la compresión sólo es necesario multiplicar los valores de cada banda por el factor de compresión, ya sea un factor único para toda la imagen o un factor específico por cada banda según haya dispuesto el fabricante del sensor, en ciertos casos incluso proporciona una fórmula que debe aplicarse a los datos para revertir esta compresión (Aguilar *et al.*, 2014).

Clasificación de imágenes

Consiste en un conjunto de etapas que persiguen como objetivo final, delimitar las regiones asociadas a cada clase, en un espacio multidimensional de los píxeles de la imagen multibanda registrada por el sensor. La clasificación debe satisfacer requisitos como: que no haya píxeles de imagen sin clase asignada, que sea posible diferenciar las clases adecuadamente con el clasificador seleccionado y finalmente, que estas cubran las necesidades del usuario.

Se establecen los métodos óptimos automáticos de segmentación para obtener una partición inicial de la escena que sirva de base a la clasificación. Basándose en la estructura espacial de las imágenes, cada región puede considerarse relativamente homogénea y diferente de sus vecinas. Estas regiones son las unidades básicas de la clasificación, sobre las cuales se pueden definir una serie de atributos espaciales (forma, tamaño, orientación), estructurales (disposición interna, tono, textura y contraste entre las diferentes partes que las componen) y contextuales (relaciones con regiones vecinas) que no son aplicables a píxeles individuales.

Métodos de clasificación de imágenes

En general, los métodos de clasificación de imágenes se pueden agrupar según los siguientes criterios (Lu, 2007).

Método Supervisado

Este método de entrenamiento requiere un cierto conocimiento de la zona de estudio que permite delimitar sobre la imagen unas zonas o áreas representativas de las distintas categorías que se pretenden discriminar. Estas áreas se conocen como áreas de entrenamiento del clasificador. A partir de ellas, se calculan diversos parámetros estadísticos de los niveles digitales (ND) que definen cada clase, para luego clasificar el resto de píxeles en una de las categorías determinada atendiendo a sus ND. La selección de áreas de entrenamiento por clase debe reflejar correctamente su abundancia y variabilidad en la zona de estudio.

Método No supervisado

En este método se trata de definir las clases espectrales presentes en la imagen. No implica ningún conocimiento previo del área de estudio, por lo que la intervención humana se centra en la interpretación de los resultados. Se asume que los niveles digitales de la imagen se agrupan en una serie de conglomerados (o clusters) que se corresponden con grupos de píxeles con un comportamiento espectral homogéneo y que, por ello, deberían definir unas clases informacionales de interés. La delimitación de cada grupo espectral se inicia señalando dos criterios: uno que marque la similitud entre píxeles, y otro que marque las condiciones del proceso de agrupamiento.

En la fase de asignación se utilizan los algoritmos de clasificación. Desde un punto de vista estadístico, todos definen un área de dominio de cada clase en torno a su centro mediante un conjunto de funciones. Un determinado píxel será asignado a una clase si sus niveles digitales se encuentran dentro de los límites establecidos para dicha clase.

Clasificador Spectral Angle Mapper (SAM)

El clasificador angular Spectral Angle Mapper (SAM) compara la similitud entre dos espectros a partir de su desviación angular, asumiendo que forman dos vectores en un espacio n-dimensional (siendo n el número de bandas disponibles) (Chuvieco, 2002). El clasificador SAM viene dado por la ecuación (1).

$$\cos \alpha = \frac{\sum XY}{\sqrt{\sum(X)^2 \sum(Y)^2}} \quad (1)$$

Donde:

A = el ángulo formado entre el espectro de referencia y el espectro de la imagen,

X = el espectro de la imagen, y

Y = el espectro de referencia

El valor del SAM se expresa en radianes donde el menor ángulo **a** representa la mayor similitud entre las curvas. El ángulo **a** presenta una variación entre 0 y $\Pi/2$ radianes. El clasificador angular requiere la asignación de un umbral mínimo que restrinja o amplíe el rango de variación entre los vectores espectrales de los *endmember* y los vectores espectrales de cada píxel sin clasificar (García y Martínez, 2010).

Clasificador Spectral information Divergence (SID)

La Divergencia de Información Espectral (SID) es un método de clasificación espectral que utiliza una medida de divergencia para hacer coincidir la respuesta de los píxeles de la imagen con los espectros de referencia. Cuanto menor es la divergencia, es más probable que los píxeles sean similares a las referencias. Los píxeles con una medida divergente mayor que el umbral de divergencia máximo especificado, no se clasifican. Un resumen del método se describe a continuación (Du, 2004).

La medida de discriminación espectral se presenta y se usa para medir la similitud entre dos vectores de píxeles. Supongamos los vectores de píxeles r y r' con sus respectivas firmas espectrales dadas por:

$$s = (s_1, s_2, \dots, s_L)^T \text{ y } s' = (s'_1, s'_2, \dots, s'_L)^T.$$

Sean $p = (p_1, p_2, \dots, p_L)^T$ y $q = (q_1, q_2, \dots, q_L)^T$ las dos funciones de probabilidad generadas por $s = (s_1, s_2, \dots, s_L)^T$ y $s' = (s'_1, s'_2, \dots, s'_L)^T$ las firmas espectrales de r y r' respectivamente.

La información proporcionada por r y r' para la banda j dada por las expresiones de la ecuación (2).

$$I_j(r) = -\log p_j; I_j(r') = -\log q_j \quad (2)$$

La discrepancia promedio en la información de r relativa a la información de r' puede ser definida por la siguiente expresión de la ecuación (3).

$$D_j(r \parallel r') = \sum_{j=1}^L D_j((r' \parallel r)q_j) = \sum_{j=1}^L q_j \log(q_j/p_j) \quad (3)$$

Teniendo en cuenta las ecuaciones anteriores, se obtiene la divergencia de información espectral (SID) definida por la expresión de la ecuación (4).

$$SID(r, r') = D_j(r \parallel r') + D_j(r' \parallel r) \quad (4)$$

Se puede usar para medir la discrepancia entre dos vectores de píxel r y r' en términos de sus funciones de probabilidad p y q . Los espectros *endmember* (espectros supervisados incluidos en la librería espectral) utilizados por SID pueden provenir de archivos ASCII o bibliotecas espectrales, o se pueden extraer directamente de una imagen (como espectros seleccionados por un experto). Se realizan varias clasificaciones fijando diferentes valores para el umbral máximo de divergencia.

Índices de vegetación

Una de las técnicas más usada en la teledetección clásica para detectar la vegetación y valorar su estado es el cálculo de índices de vegetación mediante la combinación aritmética de dos o más bandas espectrales sensibles a comportamientos característicos de la vegetación.

Son uno de los fundamentos de la teledetección, que reside en una respuesta diferente de las distintas superficies a las diferentes longitudes de onda del espectro electromagnético (Pérez, 2017). Cada tipo de vegetación responde de diferente forma (Chuvieco, 2007), se cumplen parámetros generales, dados por una baja reflectividad en el visible, alta en el infrarrojo cercano (NIR) y baja con presencia de algunos picos en el infrarrojo de onda corta (SWIR) (Chuvieco, 2008).

En concreto, la baja reflectividad en el visible se debe al efecto absorbente de los pigmentos de la hoja (clorofilas, xantofilas y carotenos) (Gates *et al.*, 1965). La elevada reflectividad en el NIR responde a la baja absorción de las clorofilas y a la estructura celular interna de la hoja a partir de 1,4 μm , el efecto absorbente del agua es muy fuerte, por lo que se reduce la reflectividad drásticamente en el SWIR (Chuvieco, 2008).

Estos índices de vegetación consisten en la abstracción o síntesis de los valores de las bandas de la imagen a una sola banda mediante operaciones aritméticas, el resultado es ajustado normalmente a una escala de 0 a 1, pero puede variar (Chemura *et al.*, 2016).

Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)

El índice de vegetación con diferencia normalizada es uno de los más usados, tiene un rango entre -1 y 1, y sirve para interpretar los parámetros biofísicos de la vegetación. Permite identificar si hay vegetación verde en una superficie y mostrar cómo se distribuye espacialmente. Está condicionado por la climatología y la fenología anuales, y hay que considerarlos para distinguir oscilaciones naturales con otros factores, por ejemplo: el agua tiene mayor reflectancia en el infrarrojo, lo que implica valores negativos, el suelo sin vegetación presenta una ligera anomalía positiva o que las nubes tienen un índice de valores próximos a 0 (Sentinel hub, 2017).

Tiene un gran uso en ecología debido a que es capaz de estimar la fracción de la radiación fotosintéticamente activa captada por la vegetación, se calcula por medio de la siguiente expresión.

$$NDVI = \frac{B8 - B4}{B8 + B4}$$

Anthocyanin Reflectance Index 1 (ARI 1)

El cambio en antiocianina, que es un pigmento que da los colores rojo, azul o púrpura a las plantas, en las hojas indica cambios en el follaje, crecimiento de brotes o muerte. La reflectancia de la antiocianina es máxima alrededor de 550nm y también está influenciada por la clorofila, por tanto, este índice también considera la reflectancia a 700nm con el fin de tener en consideración la clorofila. Los valores normales de este índice se sitúan entre 0 y 0.2, la vegetación que se está debilitando presenta los valores más altos (Sentinel hub, 2017). El ARI1 viene dado por la siguiente ecuación:

$$ARI = \frac{1}{B3} - \frac{1}{B5}$$

Anthocyanin Reflectance Index 2 (ARI 2)

Este índice es similar a Anthocyanin Reflectance Index 1, la diferencia es que es capaz de detectar concentraciones más altas de antocianinas en la vegetación, está definido por la siguiente expresión:

$$\text{ARI 2} = \frac{B8}{B2} - \frac{B8}{B3}$$

Simple Ratio Index (SR)

El SR es un índice que indica la cantidad de vegetación que hay en una determinada zona y se define como el cociente entre la reflectancia en el infrarrojo cercano entre la del rojo.

$$\text{SR} = \frac{B8}{B4}$$

La teledetección es una excelente herramienta de generación de información geográfica. Sin embargo, la herramienta idónea para integrar datos geográficos provenientes de diferentes fuentes, son los sistemas de información geográfica.

Sistemas de Información Geográfica

Un Sistema de Información Geográfica (SIG), es una integración organizada de *hardware*, *software* y *datos geográficos* diseñada para capturar, almacenar, manipular, analizar y desplegar en todas sus formas la información geográficamente referenciada con el fin de resolver problemas complejos de planificación y de gestión (CIESA, 2019).

Funcionamiento de un SIG

El SIG funciona como una base de datos con información geográfica (datos alfanuméricos) que se encuentra asociada por un identificador común a los objetos gráficos de un mapa digital. De esta forma, señalando un objeto se conocen sus atributos e, inversamente, preguntando por un registro de la base de datos se puede saber su localización en la cartografía.

La razón fundamental para utilizar un SIG es la gestión de información espacial. El sistema permite separar la información en diferentes capas temáticas y las almacena independientemente, permitiendo trabajar con ellas de manera rápida y sencilla, y facilitando al profesional la posibilidad de relacionar la información existente a través de la topología de los objetos, con el fin de generar otra nueva que no podríamos obtener de otra forma.

Creación de datos

Los SIG trabajan con información digital y el método más utilizado es el de digitalización. Esta forma de digitalización implica la búsqueda de datos geográficos directamente en las imágenes aéreas en lugar del método tradicional de la localización de formas geográficas sobre un tablero de digitalización.

Representación de los datos

Los datos SIG representan los objetos del mundo real (carreteras, el uso del suelo, altitudes). Los objetos del mundo real se pueden dividir en dos abstracciones: objetos discretos (una casa) y continuos (cantidad de lluvia caída, una elevación). La forma de almacenar los datos es en formato vectorial o raster, siendo el formato vectorial el más popular en el mercado, no obstante, los raster son muy utilizados en estudios que requieran la generación de capas continuas, necesarias en fenómenos no discretos; también en estudios medioambientales (contaminación atmosférica, distribución de temperaturas, localización de especies marinas, análisis geológicos, etc.).

SIG en la toma de decisiones

Se han convertido en una solución muy acertada en distintos aspectos como la toma de decisiones o la interoperabilidad de información geográfica entre todo el mundo, eliminando la redundancia de datos, ayudando en gran medida a centralizar y especializar los datos y minimizando el tiempo de desarrollo de los mismos. Por otro lado, existe muy poca incompatibilidad entre los datos gracias a los estándares para la publicación de mapas que ya son aplicados automáticamente por los

servidores de mapas actuales y completamente transparentes para el usuario, diseñador o programador de la aplicación (Valencia *et al*, 2013).

Cada vez es mayor la iniciativa de convertir la información existente en bases de datos normales u otros medios en este tipo de sistema, mejorando la toma de decisiones, agilizando procesos, aclarando situaciones y aportando un poco al sistema global de interoperabilidad de mapas temáticos web. La imperiosa necesidad del aprovechamiento eficiente de los recursos naturales junto con el contexto socio-económico en el cual estamos inmersos, ha motivado al desarrollo de herramientas SIG aplicables a las tareas que comprenden la agricultura de precisión (AP) (Ariel y Campanella, 2017).

Bases de datos

Las bases de datos son un gran pilar de la programación actual, ya que permiten almacenar y usar de forma rápida y eficiente cantidades ingentes de datos con cierta facilidad. En la actualidad se usa de forma mayoritaria las bases de datos relacionales (dominadas por distintos gestores a través del lenguaje SQL, en gran medida).

Modelo entidad – relación

Cuando se utiliza una base de datos para gestionar información, se está plasmando una parte del mundo real en una serie de tablas, registros y campos ubicados en un ordenador; creándose un modelo parcial de la realidad. Antes de crear físicamente estas tablas en el ordenador se debe realizar un modelo de datos (Falla, 2012).

Entidades y relaciones

El modelo de datos más extendido es el denominado ENTIDAD/RELACIÓN (E/R) En el modelo E/R se parte de una situación real a partir de la cual se definen entidades y relaciones entre dichas entidades. Una Entidad es un Objeto del mundo real sobre el que queremos almacenar información.

Las entidades están compuestas de *atributos* que son los datos que definen el objeto. De entre los atributos habrá uno o un conjunto de ellos que no se repite; a este atributo o conjunto de atributos se le llama **clave** de la entidad. En toda entidad siempre hay al menos una clave que en el peor de los casos estará formada por todos los atributos de la tabla. Ya que puede haber varias claves y necesitamos elegir una, lo haremos atendiendo a estas normas: Que sea única, que se tenga pleno conocimiento de ella, y que sea mínima, ya que será muy utilizada por el gestor de base de datos. Por su parte, una Relación es la asociación entre entidades, sin existencia propia en el mundo real que estamos modelando, pero necesaria para reflejar las interacciones existentes entre entidades. Las relaciones pueden ser de tres tipos: Relaciones 1-1, en las que las entidades que intervienen en la relación se asocian una a una; Relaciones 1-n, donde una ocurrencia de una entidad está asociada con muchas (n) de otra; Relaciones n-n, en las que cada ocurrencia, en cualquiera de las dos entidades de la relación, puede estar asociada con muchas (n) de la otra y viceversa. Las Claves son atributos de una entidad, al que se le aplica una restricción que lo distingue de los demás registros (no permitiendo que el atributo específico se repita en la entidad) o le aplica un vínculo. Los tipos de clave son: la súper clave que aplica una clave o restricción a varios atributos de la entidad, para así asegurarse que en su conjunto no se repitan varias veces y así no poder entrar en dudas al querer identificar un registro. La clave primaria, que identifica inequívocamente un solo atributo no permitiendo que se repita en la misma entidad y la Clave externa o clave foránea, cuyo campo tiene que estar estrictamente relacionado con la clave primaria de otra entidad, para así exigir que exista previamente esa clave.

Modelo lógico

Es una descripción de la implementación de una base de datos en memoria secundaria: las estructuras de almacenamiento y los métodos utilizados para tener un acceso eficiente a los datos. Por ello, el diseño físico depende del SGBD concreto y el esquema físico se expresa mediante su lenguaje de definición de datos se expresa de una manera más detallada (atributos, relaciones, etc.). Son abstracciones que permiten la implementación de un sistema eficiente de base de datos; por lo general se refieren a algoritmos y conceptos matemáticos.

Zonificación agroecológica

La zonificación agroecológica (ZAE) constituye una herramienta más para darle respuesta al problema generalizado de realizar cambios en el uso de la tierra sin considerar la aptitud agroecológica de la misma, así como para evitar problemas generalizados de sub-uso y sobreuso de la tierra (Suárez, 2014). Es de gran importancia, cuando se trata de hacer una planificación en los sectores productivos donde el ambiente juega un rol decisivo. Cada especie vegetal tiene exigencias agroecológicas específicas y su potencial de producción y de rendimiento unitario dependerán en gran parte de la satisfacción de esos requerimientos.

Puede ser definida como el proceso de identificación de áreas con características propias, que las diferencian de otras áreas; su caracterización con respecto a factores físicos (clima, suelo, formas de la tierra), biológicos (vegetación, fauna,) y socio económicos (presencia del hombre y sus actividades), y su evaluación en relación a la aptitud de uso sostenido para algunos Tipos de Uso de la Tierra (TUT) (Couto, 1996). Investiga cuáles tierras tienen combinaciones similares de clima y características de suelo, asumiendo un mismo potencial biofísico para la producción agrícola (FAO, 1997). El análisis combina capas de información espacial en Sistemas de Información Geográfica (SIG) mediante modelos computarizados, proporcionando así un marco global para la evaluación y planificación de los recursos de tierras (FAO, 1978).

Modelado cartográfico

La producción agrícola requiere para su desarrollo la conjunción de varias características ambientales, entre las que se encuentran la disponibilidad de agua, la temperatura, el tipo de suelo, relieve, altitud sobre el nivel del mar, etc. Estos factores varían de acuerdo a los requerimientos ecológicos de las distintas especies cultivadas (Lanzelotti y Buzai, 2016). El análisis por superposición cartográfica es uno de los procedimientos básicos de la metodología geográfica tradicional y actualmente uno de los más utilizados ante el uso de la tecnología SIG.

El análisis de superposición tiene como objetivo encontrar respuesta a cuáles son los sitios de mayor aptitud locacional, determinar superficies y distribuciones espaciales a partir de considerar

las áreas de asociación espacial entre diferentes características en forma de capas temáticas. Corresponde principalmente a un análisis por divisiones lógicas, el cual implica un proceso deductivo en cual se determinan límites internos a un espacio que se considera como conjunto universal. Puede ser llevada a cabo cuando se tiene un buen conocimiento teórico del objeto de estudio y, con base en ello, se pueden determinar las características clave para la definición de clases (Lanzelotti y Buzai, 2016).

Desde el punto de vista de la geografía racionalista el método de superposición (coincidencia espacial) de regiones sistemáticas (formadas por una única variable) permite una descomposición de un todo en partes que generan áreas homogéneas. Este procedimiento de superposición temática (*overlay*) es una aplicación básica realizada a través de la tecnología SIG, principalmente como resultado de una abstracción intelectual que permite llegar a la construcción de espacios homogéneos con base a la combinación de variables (Lanzelotti y Buzai, 2016).

La recopilación de las variables que respaldan el análisis son la base o soporte digital, para canalizar el sistema de objetos o formas y sus atributos del mundo real, confeccionando un modelo conceptual, y por último un modelo digital visual (a través de una permanente meditación teórica). La primera entra en el mundo real y el modelo conceptual, y la segunda entre este último y el modelo digital en el cual se ingresan los aspectos computacionales para hacerla posible.

En esta tarea aparecen las primeras definiciones y criterios que se deberán retomar. Dentro de un sistema informático territorial, el concepto de topología es vital para la correcta definición de los polígonos, sus interrelaciones y la superposición de mapas que contengan información de la zona. Estos criterios obligan a crear la topología como punto de partida vital para convertir los datos en información utilizable (Jiménez y Escolano, 1992).

Una vez confeccionadas las capas de base, se emplea un análisis multivariado de datos georreferenciados. En primer lugar, y a partir del manejo de esta información por capas, se obtienen los primeros entrecruzamientos de datos por capas y se procede a realizar diversos análisis referidos a las distintas variables.

Con la capacidad de análisis y manipulación de la información dentro del SIG se opera sobre la topología, las relaciones o los atributos no espaciales, o sobre una combinación de ambos en un proceso interactivo. Los dos tipos de información se unen (empleando llaves o claves), y ello permite la manipulación en forma separada o conectada, según los requerimientos (Precedo, 1996).

Análisis Multivariante

Tiene sus raíces en la estadística univariante y bivariante, la extensión del dominio multivariante introduce conceptos y cuestiones adicionales. Estos conceptos van desde la necesidad de un entendimiento conceptual del elemento básico del análisis multivariante (el valor teórico) a las cuestiones específicas acerca de los tipos de escalas de medida utilizadas y los resultados estadísticos de los test de significación y los intervalos de confianza.

Se refiere a los métodos estadísticos que analizan simultáneamente medidas múltiples de cada individuo u objeto sometido a investigación. En el sentido estricto, muchas técnicas multivariantes son extensiones del análisis univariante (análisis de distribuciones de una sola variable) y del análisis bivariante (clasificaciones cruzadas, correlación, análisis de la varianza y regresiones simples utilizadas para analizar dos variables). Para ser considerado multivariante, todas las variables deben ser aleatorias y estar interrelacionadas de tal forma que sus diferentes efectos no pueden ser interpretados separadamente. El carácter multivariante reside en los múltiples valores teóricos (combinaciones múltiples de variables) y no sólo en el número de variables u observaciones.

El valor teórico

Es el elemento esencial del análisis multivariante, una combinación lineal de variables con ponderaciones determinadas empíricamente. El investigador especifica las variables, mientras que las ponderaciones son objeto específico de determinación por parte de la técnica multivariante. Un valor teórico de n variables ponderadas (X_1 a X_n) puede expresarse matemáticamente así:

$$\text{Valor teórico} = w_1X_1 + w_2X_2 + w_3X_3 + \dots + w_nX_n$$

Donde:

X_n = la variable observada

W_n = Ponderación determinada por la técnica multivariante

El resultado es un valor único que representa una combinación de todo el conjunto de variables que mejor se adaptan al objeto de análisis multivariante específico.

Escalas de medida

La medida es importante para representar con precisión el concepto de nuestro interés. Existen dos tipos básicos de datos: no métricos (cualitativos) y métricos (cuantitativos).

Error de medida

Es el grado en que los valores observados no son representativos de los valores verdaderos. El error de medida tiene múltiples fuentes, que van desde errores en la entrada de datos a la imprecisión en la medición (por ejemplo, imponiendo escalas de puntuación de siete puntos a la actitud medida cuando el investigador sabe que los encuestados sólo pueden responder con precisión a una puntuación de tres puntos).

Transformación Tasseled cap

La transformación Tasseled Cap fue desarrollada en 1976 por R. J. Kauth y G. S. Thomas quienes proporcionaron una lógica para los patrones encontrados en los datos MSS Landsat de campos agrícolas que explicaba el ciclo de vida del cultivo. Con el paso de los años, la utilidad de esta transformación se ha ampliado de los cultivos de seguimiento para al análisis y la representación cartográfica de la vegetación, permitiendo detectar de forma analítica cambios en la vegetación, el suelo y las transformaciones producidas por el hombre en períodos de corto y largo plazo.

La transformación Tasseled Cap es un caso especial de análisis de componentes principales que transforma los datos de imagen a un nuevo sistema de coordenadas con un nuevo conjunto de ejes ortogonales con un significado físico-biológico, de modo que se reduce la información espectral de bandas multispectrales a tres componentes principales: brillo, verdor y humedad. Este método se inspiró en el análisis visual del comportamiento de los cultivos durante el período vegetativo en el espacio espectral definido principalmente por las bandas del infrarrojo cercano (IRc) y del rojo visible (R). Este comportamiento adopta una forma de "gorro con pompón" (de allí viene el nombre Tasseled Cap).

Los nuevos ejes ortogonales resultan de una suma de los ejes originales ponderada por ciertos coeficientes obtenidos en forma empírica. En el caso del sensor Sentinel 2, la expresión de cálculo es la siguiente:

$$Brightness = [0.3037 \quad 0.2793 \quad 0.4743 \quad 0.5585 \quad 0.5082 \quad 0.1863]x \begin{bmatrix} Blue \\ Green \\ Red \\ Nir \\ Cirrus \\ SWIR 2 \end{bmatrix}$$

El brillo (Brightness) refleja los cambios en la reflectividad total de la escena y se trata de una suma ponderada de todos los canales menos el térmico. Está asociado con el suelo descubierto o parcialmente cubierto, hecho por el hombre, y las entidades naturales como el concreto, el asfalto, la grava, los afloramientos de roca y otras áreas descubiertas (Luna y Morales, 2018).

$$Greeness = [-0.2848 \quad -0.2435 \quad -0.5436 \quad 0.7243 \quad 0.0840 \quad -0.1800]x \begin{bmatrix} Blue \\ Green \\ Red \\ Nir \\ SWIR 1 \\ SWIR 2 \end{bmatrix}$$

El verdor (Greeness) indica el contraste entre las bandas visibles e infrarrojo cercano. Se destaca la intervención de la banda 4, la ponderación negativa de las visibles y la anulación mutua de las dos bandas del infrarrojo medio (SWIR). Está asociado con la vegetación.

$$Wetness = [0.1509 \quad 0.1973 \quad 0.3279 \quad 0.3406 \quad -0.7112 \quad -0.4572]x \begin{bmatrix} Blue \\ Green \\ Red \\ Nir \\ SWIR 1 \\ SWIR 2 \end{bmatrix}$$

La humedad (wetness) se relaciona con el contenido de agua en la vegetación y en el suelo y se marca por el contraste en el SWIR, en donde se manifiesta con mayor claridad la absorción del agua y el resto de las bandas. Se asocia con la humedad del suelo, el agua y otras entidades húmedas. Los tres ejes transformados engendran un espacio vectorial en el que pueden distinguirse tres planos característicos:

1. Plano de la vegetación formado por los ejes brillo y verdor;
2. Plano de los suelos formado por los ejes brillo y humedad;
3. Plano de transición formado por los ejes humedad y verdor

JUSTIFICACIÓN

El Estado de México ocupa el tercer lugar en producción de aguacate a nivel nacional y cuenta con municipios productores de este fruto, que en los últimos años han incrementado considerablemente la superficie plantada de este cultivo, lo cual se resume en beneficios económicos importantes pero también en inconvenientes como, el impacto ambiental, cambio de uso de suelo, problemas fitosanitarios provocados por el monocultivo y el establecimiento de nuevas plantaciones en áreas donde no se cuenta con la aptitud edafoclimática necesaria para este cultivo, situación que ha provocado que las poblaciones de insectos cambien sus hábitos de alimentación y reproducción.

Resulta justificable el incremento de este cultivo, sin embargo, es importante considerar que para las actuales plantaciones no se han realizado los análisis necesarios para determinar el potencial territorial, realizando una propagación del mismo sin contemplar las necesidades de la especie, comprometiendo los resultados de adaptación y rendimiento del cultivo, por lo que es necesario practicar una agricultura más productiva y con un menor nivel de riesgo, buscando la producción de cultivos en ambientes que provean condiciones que satisfagan los requerimientos agroecológicos de las plantas.

Por lo que desarrollar un SIG puede ayudar en el manejo de plagas que atacan el cultivo de aguacate proporcionando información de la distribución de estas, de manera precisa e informada para su control dirigido, reduciendo costos e impacto, así como identificar por medio de imágenes satelitales la superficie y distribución de las plantaciones de aguacate que proporcionará información confiable para la gestión oportuna de las unidades productivas de los municipios dedicados a esta actividad. La determinación de las zonas óptimas para el establecimiento de futuras plantaciones, será de utilidad para la gestión de las tierras, proporcionando la capacidad productiva de los principales municipios para una adecuada toma de decisiones de las plantaciones comerciales de aguacate.

Por tal motivo, en esta investigación se considera de gran valor contar con información detallada de las plantaciones establecidas que proporcione la distribución de las actuales plantaciones, así como la superficie que ocupa, conocer la variación de condiciones que propician la aparición de plagas y enfermedades y su distribución para tomar decisiones sobre un manejo más eficiente y

proponer por medio de la zonificación por aptitud del territorio las áreas con aptitud para este cultivo.

HIPOTESIS

El desarrollo de este proyecto de investigación descansa en tres supuestos:

- 1) Dado que el sensor sentinel 2 tiene una cobertura especial de la región infrarroja donde la vegetación expresa importantes diferencias en la respuesta espectral, existen nuevos tratamientos sobre la imagen de este sensor que pueden utilizarse para generación de cartografía de aguacate, obteniendo mejor desempeño que tratamientos anteriores.

- 2) Que la integración de datos en el entorno de un sistema de información geográfica puede favorecer la toma de decisiones en la gestión de plagas para el control de los problemas fitosanitarios del aguacate, por su capacidad de desplegar aquellas regiones con mayor infestación.

- 3) Que existen combinaciones de las condiciones del paisaje visto desde un enfoque integral, que favorecen en mayor grado el establecimiento del cultivo de aguacate, pudiendo establecerse zonas aptas para su establecimiento.

OBJETIVOS

General

- Desarrollar un Sistema de Información Geográfica para la gestión fitosanitaria en las principales unidades productivas de aguacate en el Estado de México.

Específicos

- Identificar por medio de imágenes satelitales Sentinel-2 la superficie real sembrada de aguacate en los municipios productores del Estado de México.
- Agrupar la información obtenida en campo para realizar la confección de las bases de datos para la creación del SIG.
- Realizar un mapa de aptitud que permita identificar los lugares con mayor potencial para el establecimiento futuro de aguacate en el Estado de México.

MATERIALES Y MÉTODO

Área de estudio

Se encuentra integrada por cuatro municipios al sur del Estado de México (Figura 1) en los paralelos 19°25'51" y 18°46'58.14" de latitud norte y 100°19'59" y 99°28'46.45" longitud oeste. A continuación, se detallan algunos aspectos físicos de estos:

Coatepec Harinas forma parte del segundo sistema del Xinantécatl por lo que su altitud varía de 1900 a 3000 msnm, su clima es templado subhúmedo, con temperatura promedio es de 16.1 °C y precipitación promedio anual de 1,242.53 mm por lo que predomina el bosque mesófilo de montaña.

Donato Guerra se ubica en la región que pertenece al Eje Neovolcánico Transversal, por lo que presenta formas características de relieve accidentado, semiplano y plano, gran parte de las sierras son de origen volcánico con altitud entre 2200 y 3040 msnm, su clima es templado subhúmedo con temperatura promedio de 22 °C y precipitación promedio de 1,000 mm características que favorecen la presencia de bosque de pino, encino, ocote, cedro, eucalipto, fresno y roble (PMDUCHEM, 2009; PMDUDGEM, 2009).

Tenancingo se encuentra en dos sistemas fisiográficos; Provincia del Eje Neovolcánico y Provincia de la Sierra Madre del Sur, presenta zonas semiplanas con pendientes máxima de 15 por ciento, su altitud media es de 2020 msnm y su clima es templado con temperatura entre los 12 y 22 °C, con precipitación promedio entre 1000 mm y 1500 mm, por lo que predomina el bosque de encino, cedro y ciprés.

Temascaltepec se asienta en laderas fuertemente pronunciadas del Nevado por lo que su altitud varía entre los 1200 y los 3600 msnm; su clima es templado subhúmedo con lluvias en verano, con temperatura media anual entre 16 °C y 20 °C y una precipitación de 1100 mm a 1300 mm, lo que favorece el crecimiento de comunidades de bosque de encinos, pino, cedro, ocote y fresno (PMDUTNEM, 2009; PMDUTMEM, 2009).

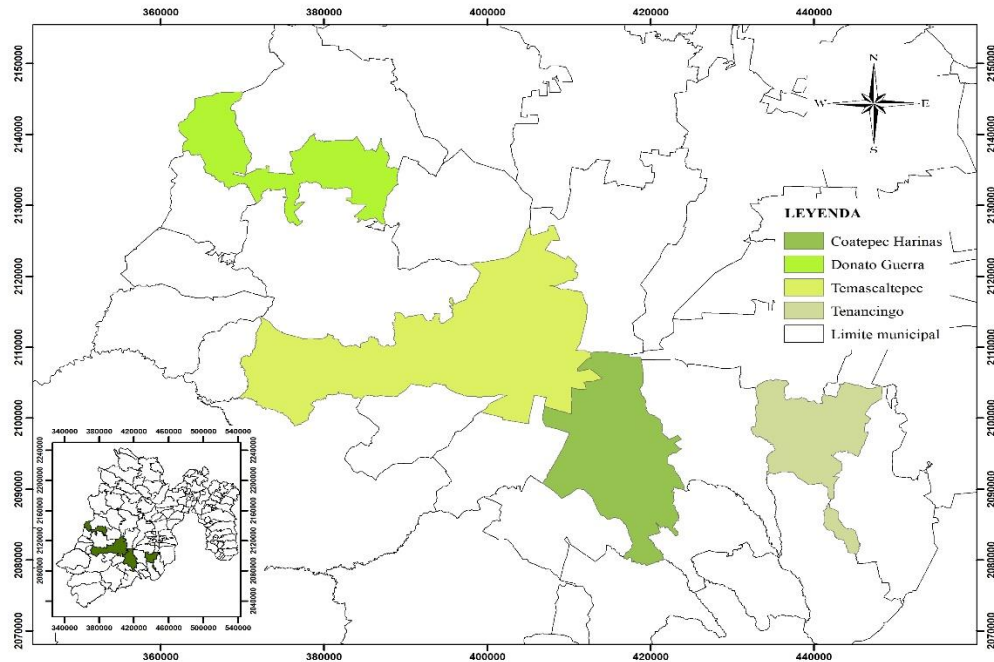


Figura 8. Área de estudio.

Identificación de áreas plantadas con cultivo de aguacate

Se aplicaron los métodos de índices de vegetación, algoritmos SAM y SID y la combinación de estos últimos con los índices de vegetación en las imágenes de acceso libre del sensor Sentinel-2 de mayo de 2017, re-muestreadas a una resolución espacial de 10 m, libre de nubes y a un nivel de procesamiento 1C, es decir, en valores de reflectancia en el Tope de la Atmósfera (TOA). Para la identificación del cultivo de interés, se hizo uso de una metodología de tratamiento de la imagen, obteniendo un resultado individual del análisis espectral de la firma del aguacate con los algoritmos spectral angle mapper (SAM) y spectral information divergence (SID), el uso de índices de vegetación y la combinación de los algoritmos con los índices de vegetación.

Datos de Campo

Se aplicaron dos conjuntos de datos de referencia, uno para entrenamiento y otro para validación. Los datos de campo para el proceso de entrenamiento se obtuvieron el 18 de mayo de 2017 con un GPS Garmin® digital portátil, logrando precisiones entre tres y cinco metros, los cuales

consistieron en 130 puntos de datos de campo georreferenciados para el cultivo de aguacate, distribuidos aleatoriamente en el área de estudio. Respecto al conjunto de datos para validación, se georreferenciaron 120 puntos con otro GPS Garmin® portátil, en áreas de cada municipio totalmente alejadas de los primeros puntos de muestreo (entrenamiento), por lo que cabe mencionar que este conjunto de datos es totalmente independiente del primer conjunto de datos y no fue utilizado para entrenamiento de la imagen Sentinel-2.

Adquisición de imágenes y preprocesamiento

Los datos de Sentinel-2 se descargaron del servidor de la agencia espacial europea (ESA) disponible en: (<https://scihub.copernicus.eu/dhus/>: visitada el 06 de junio de 2017) con el nombre de escena: S2B_MSIL1C_20171128T170639_N0206_R069_T14QMG_20171128T221610, S2B_MSIL1C_20171128T170639_N0206_R069_T14QLG_20171128T221610, S2B_MSIL1C_20171128T170639_N0206_R069_T14QLF_20171128T221610 y S2B_MSIL1C_20171128T170639_N0206_R069_T14QMF_20171128T221610 correspondientes al 7 de mayo de 2017, fecha en la que se obtuvieron imágenes libres de nubes. Las imágenes fueron re-muestreadas a una resolución espacial de 10 m con el software libre SNAP 5.0 desarrollado y distribuido por la ESA (Agencia Espacial Europea). La imagen se calibró radiométricamente mediante el método de FLAT FIELD CALIBRATION, se marcó un área de interés ROI (Region of Interest) haciendo uso del techo plastificado de los invernaderos como referencia, debido a que emiten una respuesta alta y homogénea, y se agregó la longitud promedio de onda de cada banda con el software ENVI 4.7.

Procesamiento de la imagen Sentinel-2

La imagen fue procesada mediante dos estrategias: el uso del clasificador spectral angle mapper (SAM) y spectral information divergence (SID) y el desarrollo de consultas lógicas en los índices de vegetación. El diagrama de la Figura 2, muestra el proceso del método combinado aplicado a la imagen Sentinel-2 MSI para obtener los sitios con cultivo de aguacate en la zona de estudio. Se obtuvo la curva espectral típica del cultivo de aguacate y de las librerías excluidas se excluyó la

vegetación de laurel, cordillera de jaspe, madroño y dos variedades de roble con lo cual se obtuvo la firma espectral.

Estas firmas espectrales se guardaron como referencia y se emplearon para clasificar la imagen considerando el algoritmo SAM y SID. Se generaron reglas de confiabilidad con las firmas espectrales obtenidas del cultivo de aguacate de acuerdo a su clasificación y se llevaron a cabo pruebas para visualizar cual generaba un resultado más claro. Respecto al ángulo elegido para SAM y SID, el cual produce una imagen clasificada basada en el umbral de ángulo máximo de este, se probaron los ángulos máximos de 0.100, 0.075, 0.050 y 0.025.

Se realizó una clasificación de plantaciones encontradas en campo de acuerdo a la reportada por Rubí et al. (2013) árboles de 1 a 3 años, 3 a 6 años de edad y la tercera de más de 6 años en adelante. Se obtuvo la curva del comportamiento de cada clasificación de las plantaciones, con la finalidad de aplicar cada uno de los algoritmos e índices de vegetación de acuerdo al tipo de plantaciones presentes en el área de estudio de las cuales se eligieron solo diez árboles que presentaron la curva típica de comportamiento de cada uno de los patrones espaciales correspondientes a plantaciones.

Para la identificación de áreas con cultivo de aguacate se aplicó a los algoritmos SAM y SID los diferentes valores de ángulo máximo (radianes) considerado (Tabla 3).

Tabla 3. Algoritmo y ángulo aplicado.

Algoritmo	Lugar y Tipo de plantación	Angulo Máximo
SAM	Coatepec plantaciones de 1 a 3 años	0.100
SID	Coatepec plantaciones de 3 a 6 años	0.075
	Coatepec plantaciones de más de 6 años	0.050
		0.025
SAM	Donato plantaciones de 1 a 3 años	0.100
SID	Donato plantaciones de 3 a 6 años	0.075
	Donato plantaciones de más de 6 años	0.050
		0.025

Índices de vegetación

Con el software Envi 4.7 se obtuvieron cuatro índices de vegetación: Anthocyanin Reflectance Index 1 (ARI1), Anthocyanin Reflectance Index 2 (ARI2), Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) y Simple Ratio Index (SR) (Tabla 4).

Tabla 4. Índices de vegetación calculados y relación de bandas “B” empleadas.

Índice	Abreviatura	Bandas Sentinel-2	Autor
Anthocyanin Reflectance Index 1	ARI1	$ARI1 = \frac{1}{B3} - \frac{1}{B5}$	
Anthocyanin Reflectance Index 2	ARI2	$ARI2 = \frac{B8}{B2} - \frac{B8}{B3}$	(Sentinel Hub, 2017)
Normalized Difference Vegetation Index	NDVI	$NDVI = \frac{B8 - B4}{B8 + B4}$	
Simple Ratio Index	SR	$SR = \frac{B8}{B4}$	

En el software ArcGis 10.2.2, se analizaron los valores mínimo, medio y máximo de estos índices en sitios con y sin aguacate. Habiendo entendido los valores característicos del aguacate, se construyeron consultas lógicas para extraer esos valores de los índices, con los criterios que a continuación se despliegan (Tabla 5):

Tabla 5. Valor de la condicional aplicada a cada uno de los índices.

Índice	Lugar y Tipo de plantación	Consulta condicional aplicada
ARI1	Coatepec de 1 a 3 años	Value > 0.20 Value < 1.45
	Coatepec de más de 6 años	Value >= 0.39
	Donato de 3 a 6 años	Value >= 0.30 Value <= 1.45
ARI2	Coatepec de 1 a 3 años	Value >= 0.35 Value <= 0.82
	Donato de 3 a 6 años	Value >= 0.34 Value <= 0.95
	Donato de más de 6 años	Value > 0.07 Value < 0.65
NDVI	Coatepec de 3 a 6 años	Value >= 0.50 and Value <= 0.73
	Donato de más de 6 años	Value > 0.40 and Value < 0.65
SR	Donato de más de 6 años	Value >= 2.45

Combinaciones

SAM + ARI1

Coatepec de 3 a 6 años Value ≥ 0.025 and Value $\leq 0.65-1.35$

SAM + NDVI

Coatepec de 3 a 6 años Value ≥ 0.100 and Value $\leq 0.50 - 0.73$

SID + ARI1

Coatepec de 1 a 3 años Value ≥ 0.050 and Value $\leq 0.20 - 0.145$

SID + ARI1

Donato de 3 a 6 años Value ≥ 0.100 and Value $\leq 0.30 - 0.145$

SID + ARI 2

Donato de 3 a 6 años Value ≥ 0.100 and Value $\leq 0.34 - 0.95$

SID + NDVI

Coatepec de 3 a 6 años Value ≥ 0.050 and Value $\leq 0.50 - 0.73$ Coatepec de 3 a 6 años Value ≥ 0.075 and Value $\leq 0.50 - 0.73$ Coatepec de 3 a 6 años Value ≥ 0.100 and Value $\leq 0.50 - 0.73$

SID + SR

Donato de 3 a 6 años Value ≥ 0.100 and Value ≤ 2.45 Donato de 3 a 6 años Value ≥ 0.075 and Value ≤ 2.45 **Algoritmos**

SAM

Ángulo

SID

Coatepec de 3 a 6 años Value = 0.100, 0.075, 0.050, 0.0025

Donato de más de 6 años Value = 0.100, 0.075, 0.050, 0.0025

Se asignó el valor 1 para los pixeles que cumplen con la condición y 0 para los pixeles sin valor.

Value: valor del pixel.

Para la cartografía de los cultivos, no necesariamente se consideró el mismo rango de las condicionales para todas las escenas, dado que los valores del índice pueden variar de escena a escena, por lo que se encontró el umbral de valores de índice que corresponden con el cultivo de interés. Las regiones extraídas, tanto del clasificador como de los índices se relacionaron mediante álgebra de mapas, con la herramienta COMBINATORIAL AND. Esto permitió consultar aquellos sitios donde ambos (el clasificador SAM y SID y la condicional de los índices) tienen un valor verdadero.

Validación de mapas

La precisión obtenida por estos tratamientos digitales en la imagen se validó mediante la sobreposición de esta cartografía contra puntos de validación obtenidos en campo, este conjunto de datos de validación permitió realizar una matriz de confusión con la que se obtuvo el valor en porcentaje de la precisión de los tratamientos, en el que se observa que tanto el algoritmo SID como sus combinaciones, presentan el mayor porcentaje de precisión para la obtención de zonas con plantaciones de aguacate en el área de estudio.

Tabla 6. Matriz de confusión de combinaciones de SAM, SID e índices de vegetación.

TRATAMIENTO	Número de pixeles			Porcentaje	
	Acierto	Error	TOTAL	Acierto	Error
SAM	76	44	120	63.1	36.6
SID	117	3	120	97.5	2.5
ARI1	103	17	120	85.8	14.1
ARI2	80	40	120	66.6	33.3
NDVI	108	12	120	90	10
Simple Ratio	95	25	120	79.1	20.8
SAM + ARI1	63	57	120	52.5	47.5
SAM + NDVI	74	46	120	61.6	38.3
SID + ARI1	102	18	120	85	15
	93	27	120	78	22
	84	36	120	70	30
	72	48	120	60	40
SID + ARI2	80	40	120	66.6	33.3
	72	48	120	60	40
SID + NDVI	108	12	120	90	10
	79	41	120	66.39	33.61
	84	36	120	70	30

SID + SR	95	25	120	79.1	20.8
	91	29	120	76	24

Sistema de Información Geográfica

Datos de campo

El estudio se llevó a cabo en los municipios de Coatepec Harinas, Donato Guerra, Temascaltepec y Tenancingo donde se llevó a cabo el muestreo de plagas y enfermedades.

Muestreo de Trips (*Scirtothrips sp.*)

Se seleccionaron cuatro parcelas comerciales (4 ha cada una) de aguacate de la variedad Hass. La edad aproximada de las parcelas fue de 5 años, no recibieron aplicaciones de agroquímicos, con un manejo agronómico similar; siendo similares las condiciones ambientales de las mismas. Cada parcela se dividió en cuadrantes de 20 x 20 m, para un total de 100 cuadrantes por parcela. Bajo el método de muestreo por cuadrantes, se tomaron 40 cuadrantes al azar y por cada uno se seleccionaron tres árboles, resultando un total de 120 árboles por parcela experimental. Cada árbol muestreado fue georreferenciado para obtener sus coordenadas con un DGPS marca Trimble modelo Pro XR. Para realizar los muestreos se utilizaron trampas amarillas, consistentes en vasos de plástico N°8, marca JAGUAR®, de 10 cm de alto, 4.5 cm de diámetro en la base, 7.5 cm de diámetro en el borde superior, y color amarillo canario. De acuerdo con lo sugerido por González et al. (1988), a cada vaso se le colocó un gancho en la base y un adherente (manteca vegetal) en la superficie externa. Se colocaron cuatro trampas en los árboles (uno en cada punto cardinal) y estas se revisaron quincenalmente para contar y retirar los trips capturados y recebarlas nuevamente.

Araña Roja (*Oligonychus punicae* Hirst)

Las parcelas se dividieron en 50 cuadrantes (20 × 20 m), y en forma aleatoria se seleccionaron 25 para realizar el muestreo. En cada cuadrante se consideraron dos árboles (variedad hass) de diez años en promedio. Cada árbol se georeferenció utilizando un GPSmap60 (Garmin) para obtener sus coordenadas (Ramírez et al. 2013a, Maldonado et al. 2016). Los muestreos se realizaron mensualmente a partir de octubre 2016 a mayo 2017, contando el número de arañas con un lente de aumento de 20X, para lo cual se seleccionaron 60 hojas por árbol con una altura promedio de cuatro metros, tomando quince hojas divididas en tres estratos (inferior, medio, y superior), por cada punto cardinal del árbol (Norte, Este, Oeste, y Sur) (González-Olmos 2012).

Araña cristalina *Oligonychus perseae* (Tuttle, Baker y Abbatiello)

El área de estudio consistió en 200 árboles cv. Hass distribuidos aleatoriamente, estos fueron etiquetados y georreferenciados con un navegador Garmin modelo e Trex Vista HCx 2007, a lo largo y ancho de los municipios evaluados usando el método de cuadrantes. Los árboles muestreados se seleccionaron en plantaciones de siete a 10 años en promedio, se efectuaron recuentos quincenales a partir de 3 de enero al 18 de junio de 2017 y del 1 de julio al 22 de diciembre 2017. De los estadios móviles de araña cristalina hubo una selección de 60 hojas por árbol tomadas del estrato (bajo, medio y alto del árbol), seleccionando 5 hojas por cada punto cardinal teniendo un total de 20 hojas por cada extracto tomado del árbol. Para las observaciones y conteo de arañas se usó una lupa de aumento de 20x, esto de acuerdo con los ensayos hechos por González (2012) y se llenaron las hojas de registro para cada árbol.

Barrenador de la rama (*Copturus aguacatae*)

Se consideraron 200 árboles distribuidos aleatoriamente en cada municipio, para el muestreo se seleccionaron únicamente árboles de la variedad Hass, se verificó que existiera la presencia de la plaga en las parcelas establecidas y que el manejo agronómico de las huertas de aguacate fuera de manera similar, es decir, que no se aplicaran agroquímicos. Cada árbol muestreado fue etiquetado

y georreferenciado utilizando un DGPS (Sistema de Posicionamiento Global diferencial). Para realizar el muestreo de los adultos de *C. aguacatae* se colocaron bandas plásticas de color azul (Gasca y Equihua, 1999) provista con un adhesivo llamado spider plus, se colocó una banda plástica en los tres estratos del árbol (estrato bajo, medio y alto) por cada punto cardinal teniendo un total de 12 trampas por árbol, se contabilizó el número de adultos capturados y se colgaron más bandas para el siguiente muestreo, los muestreos se realizaron cada 15 días, dando un total de 24 muestreos por municipio.

Antracnosis (*Colletotrichum gloeosporioides*)

En cada zona fueron muestreados 200 árboles de aguacate cv. Hass distribuidos aleatoriamente en el total de la superficie de cada municipio, se verificó que el manejo agronómico del cultivo en las zonas muestreadas fuera llevado de forma similar, en las cuales se identificó la presencia de antracnosis (*C. gloeosporioides*). Los muestreos se realizaron cada 14 días, revisando los 200 árboles en cada municipio, cuya edad osciló entre los siete y 10 años, a partir de enero hasta diciembre de 2017. Dichos arboles fueron etiquetados y georeferenciados espacialmente mediante un sistema de posicionamiento global diferencial (DGPS), y se identificaron colocándoles una banda plástica de color verde en la base. Se seleccionaron cuatro ramas y cuatro frutos por estrato (alto, medio y bajo, 12 frutos en total por cada árbol), distribuidos hacia los cuatro puntos cardinales en cada árbol, esto con el objetivo de contabilizar el número de frutos enfermos por árbol (incidencia).

Desarrollo del Sistema de Información Geografica

En esta etapa de la investigación se desarrolló un sistema de información geografica para la gestión de plagas en el cultivo de aguacate, este sistema se dividió en tres etapas que constan de un modelo conceptual de identidad – relación donde se establecieron las tablas con sus atributos.

Modelo conceptual de Entidad – Relación

Se establecieron las tablas con sus atributos correspondientes en donde a cada entidad le corresponden varios atributos relacionados con otra entidad. En el diagrama se describen las entidades y su relación.

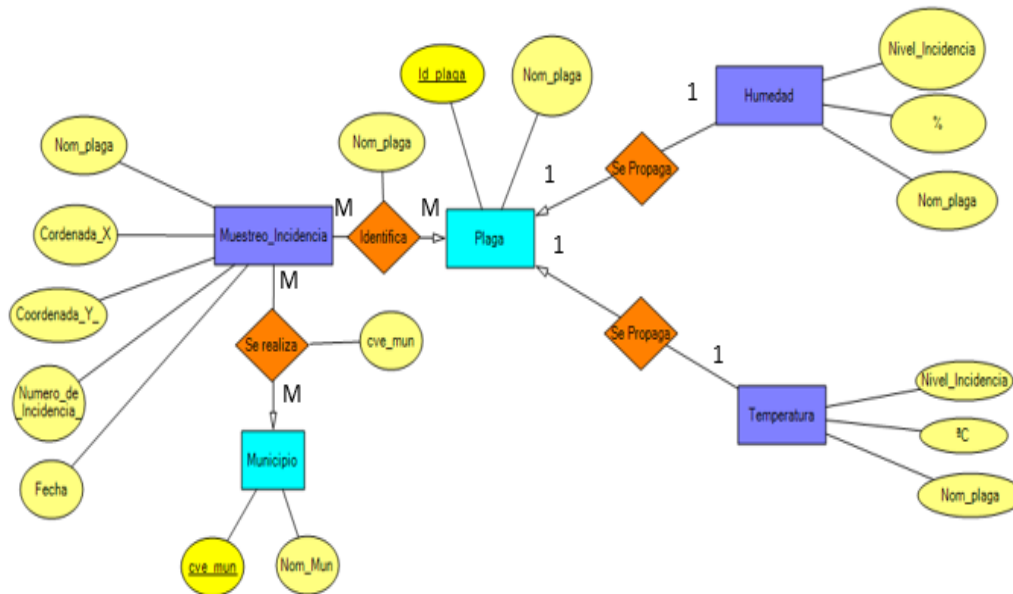


Figura 9. Diagrama Entidad - Relación.

Se establecieron las condiciones y requerimientos del sistema para crear la base de datos donde se generaron las tablas con el gestor de bases de datos PostgreSQL, generando las tablas por medio de la herramienta Query SQL (espacio de desarrollo). Se creó el proyecto en NetBeans, un entorno de desarrollo integrado libre, hecho principalmente para el lenguaje de programación Java, que permite que las aplicaciones sean desarrolladas a partir de un conjunto de componentes de software llamados *módulos*. Un módulo es un archivo Java que contiene clases de java escritas para interactuar con las APIs de NetBeans y un archivo especial (manifest file) que lo identifica como módulo. Contiene todos los módulos necesarios para el desarrollo de aplicaciones Java en una sola descarga, permitiéndole al usuario comenzar a trabajar inmediatamente.

Se utilizaron los servicios reusables comunes para las aplicaciones de escritorio, como:

- Gestión de la interfaz de usuario (menús y barras de herramientas)
- Gestión de configuración de usuario
- Gestión de almacenamiento (guardar o cargar algún tipo de dato)
- Gestión de ventana
- Librería visual de Netbeans

Modelo Lógico

En esta etapa se encuentran las representaciones de las entidades y atributos, relaciones, identificadores exclusivos, subtipos y supertipos y restricciones entre relaciones de las bases de datos generadas en el modelo lógico.

Código:

ENTIDAD A TABLAS

Municipio (cve_mun, nombre)

Plaga (Id_plaga, nombre)

Muestreo_Incidencia (Nombre_plaga*, x, y, Numero_Incidencia, Fecha)

Temperatura (Nivel_Incidencia, °C)

Humedad (Nivel_Incidencia, %)

RESULTADO FINAL

Muestreo_Incidencia (Nombre_plaga*, x, y, Numero_Incidencia, Fecha, nom_mun*)

Temperatura (Nivel_Incidencia, °C, Nom_plaga)

Humedad (Nivel_Incidencia, %, nom_plaga)

Municipio (cve_mun, nombre)

Depuración de las bases de datos

Se realizó la depuración y adaptación de las bases de datos a las que se incorporó dos campos para agregar los rangos de temperatura y humedad (Tabla 7-12) establecidos por Ramírez. (2019) para cada una de las plagas y enfermedades.

Tabla 7. Rango de temperatura para Trips.

Rango (°C)	Descripción
15 a 24	Se alarga el ciclo de vida (existe poca presencia)
25 a 30	Condiciones óptimas para el desarrollo del ciclo normal de Trips
31 a 40	Se acelera la eclosión de huevos (Se acorta el ciclo de vida)

Tabla 8. Rango de temperatura para Barrenador de la rama.

Rango (°C)	Descripción
10 a 19	Se alarga el ciclo de vida (existe poca presencia)
20 a 25	Condiciones óptimas para el desarrollo del ciclo normal de Barrenador
26 a 35	Se acelera la eclosión de huevos (Se acorta el ciclo de vida)

Tabla 9. Rango de temperatura para Araña roja.

Rango (°C)	Descripción
15 a 27	Se alarga el ciclo de vida (existe poca presencia)
28 a 34	Condiciones óptimas para el desarrollo del ciclo normal de Araña roja
35 a 40	Se acelera la eclosión de huevos (Se acorta el ciclo de vida)

Tabla 10. Rango de temperatura para Araña cristalina.

Rango (°C)	Descripción
15 a 24	Se alarga el ciclo de vida (existe poca presencia)
25 a 32	Condiciones óptimas para el desarrollo del ciclo normal de Araña cristalina
33 a 40	Se acelera la eclosión de huevos (Se acorta el ciclo de vida)

Tabla 11. Rango de temperatura para Antracnosis.

Rango (°C)	Descripción
10 a 14	Se acelera la eclosión de huevos (Se acorta el ciclo de vida de antracnosis)
25 a 32	Condiciones óptimas para el desarrollo del ciclo normal de Antracnosis
33 a 40	Se alarga el ciclo de vida (existe poca presencia de antracnosis)

Tabla 12. Condiciones de porcentaje de humedad para Trips.

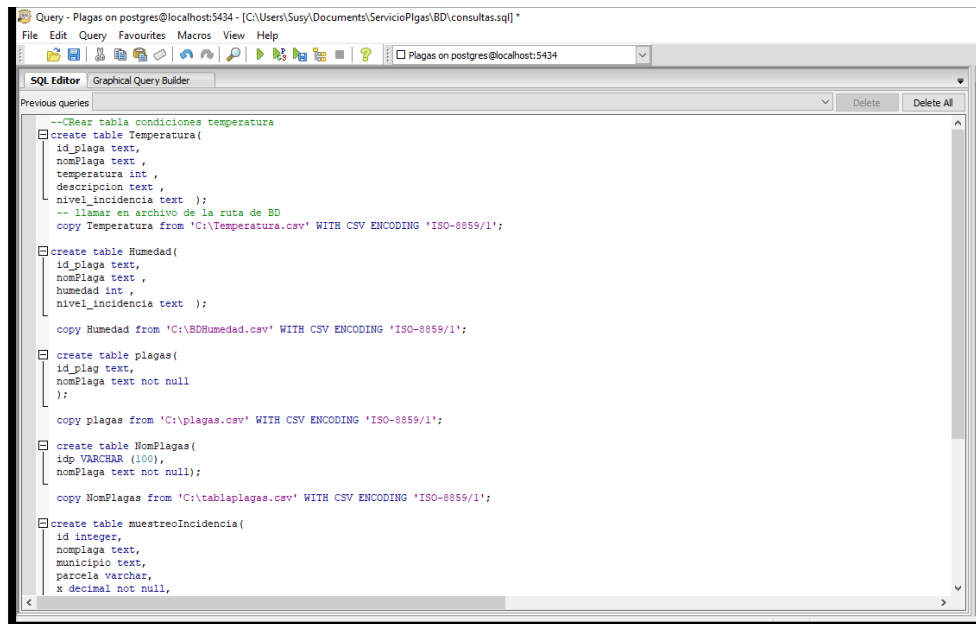
Humedad (%)	Descripción
< 50	Baja incidencia
50 a 70	Condiciones ideales

En el modelo, las tablas generadas contienen información de: municipio, parcela, humedad, plaga, fecha (dd/mm/aaaa), longitud, latitud, incidencia.

1.6. Creación de tablas

Se generaron las tablas por medio de la herramienta Query SQL.

Generación de tablas Query SQL



```
--Crear tabla condiciones temperatura
create table Temperatura(
  id_plaga text,
  nomPlaga text,
  temperatura int,
  descripcion text,
  nivel_incidencia text );
-- llamar en archivo de la ruta de BD
copy Temperatura from 'C:\Temperatura.csv' WITH CSV ENCODING 'ISO-8859/1';

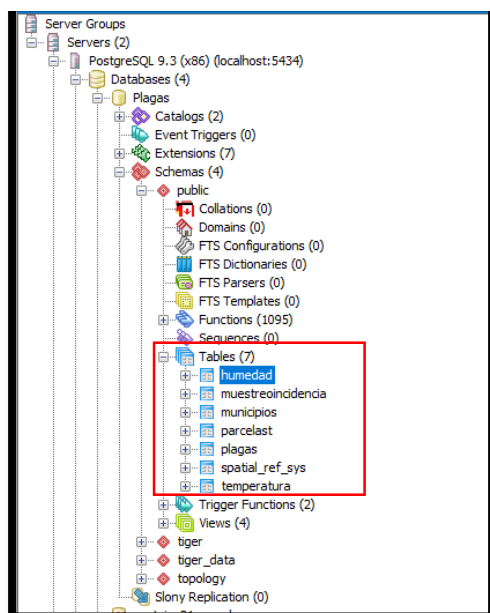
create table Humedad(
  id_plaga text,
  nomPlaga text,
  humedad int,
  nivel_incidencia text );
copy Humedad from 'C:\BD\Humedad.csv' WITH CSV ENCODING 'ISO-8859/1';

create table plagas(
  id_plaga text,
  nomPlaga text not null
);
copy plagas from 'C:\plagas.csv' WITH CSV ENCODING 'ISO-8859/1';

create table NomPlagas(
  idp VARCHAR (100),
  nomPlaga text not null);
copy NomPlagas from 'C:\tablaplagas.csv' WITH CSV ENCODING 'ISO-8859/1';

create table muestreoIncidencia(
  id integer,
  nomplaga text,
  municipio text,
  parcela varchar,
  x decimal not null,
```

Tabla creada



Se cargaron cada una de las tablas de las plagas, incorporando la información de humedad, temperatura y plaga:

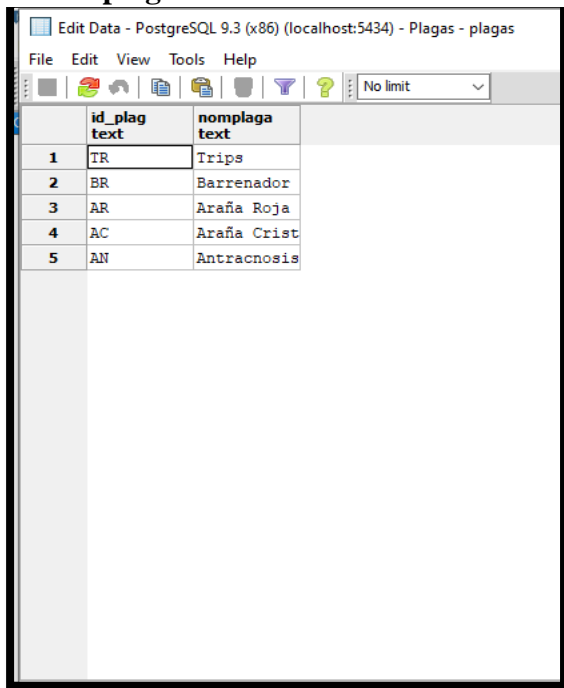
Tabla de humedad

	id_plaga text	nomplaga text	humedad integer	nivel_inciden text
1	TR	Trips	40	Baja incide
2	TR	Trips	41	Baja incide
3	TR	Trips	42	Baja incide
4	TR	Trips	43	Baja incide
5	TR	Trips	44	Baja incide
6	TR	Trips	45	Baja incide
7	TR	Trips	46	Baja incide
8	TR	Trips	47	Baja incide
9	TR	Trips	48	Baja incide
10	TR	Trips	49	Baja incide
11	TR	Trips	50	Condiciones
12	TR	Trips	51	Condiciones
13	TR	Trips	52	Condiciones
14	TR	Trips	53	Condiciones
15	TR	Trips	54	Condiciones
16	TR	Trips	55	Condiciones
17	TR	Trips	56	Condiciones
18	TR	Trips	57	Condiciones
19	TR	Trips	58	Condiciones
20	TR	Trips	59	Condiciones
21	TR	Trips	60	Condiciones

Tabla de temperatura

	id_plaga text	nomplaga text	temperatura integer	descripcion text	nivel_inciden text
1	TR	Trips	-5	Se alarga e	Baja Incide
2	TR	Trips	-4	Se alarga e	Baja Incide
3	TR	Trips	-3	Se alarga e	Baja Incide
4	TR	Trips	-2	Se alarga e	Baja Incide
5	TR	Trips	-1	Se alarga e	Baja Incide
6	TR	Trips	0	Se alarga e	Baja Incide
7	TR	Trips	1	Se alarga e	Baja Incide
8	TR	Trips	2	Se alarga e	Baja Incide
9	TR	Trips	3	Se alarga e	Baja Incide
10	TR	Trips	4	Se alarga e	Baja Incide
11	TR	Trips	5	Se alarga e	Baja Incide
12	TR	Trips	6	Se alarga e	Baja Incide
13	TR	Trips	7	Se alarga e	Baja Incide
14	TR	Trips	8	Se alarga e	Baja Incide
15	TR	Trips	9	Se alarga e	Baja Incide
16	TR	Trips	10	Se alarga e	Baja Incide
17	TR	Trips	11	Se alarga e	Baja Incide
18	TR	Trips	12	Se alarga e	Baja Incide
19	TR	Trips	13	Se alarga e	Baja Incide
20	TR	Trips	14	Se alarga e	Baja Incide
21	TR	Trips	15	Se alarga e	Baja Incide

Tabla plaga



The screenshot shows a PostgreSQL data editor window titled "Edit Data - PostgreSQL 9.3 (x86) (localhost:5434) - Plagas - plagas". The window contains a table with the following data:

	id_plag text	nomplaga text
1	TR	Trips
2	BR	Barrenador
3	AR	Araña Roja
4	AC	Araña Crist
5	AN	Antracnosis

En la tabla de almacenamiento de datos se concentran todas las tablas de muestreos de plagas y enfermedades.

Tabla de almacenamiento de datos

En esta tabla se concentran los datos de todas las plagas y la enfermedad; con la información de municipio, parcela, humedad, plaga, fecha (dd/mm/aaaa), longitud, latitud, incidencia y rangos de temperatura y humedad.

Query - plagas on postgres@localhost:5434 - [C:\Users\Susy\Documents\SistemaPlagas\consultas.sql] *

File Edit Query Favourites Macros View Help

SQL Editor Graphical Query Builder

Output pane

	nomplaga	municipio	x	y	geom	Enero 2017	Febrero 2017	Marzo 2017	Abril 2017	Mayo 2017	Junio 2017	Julio 2017	Agosto 2017	Septiembre 2017	Octubre 2017	Noviembre 2017
	text	text	double precision	double precision	geometry(Geometry,4326)	integer	integer	integer	integer	integer	integer	integer	integer	integer	integer	integer
1	Antracno	Coatepec	414585	2093493	0101000020E61000000000	4	2	2	3	3	12	8	10	8	2	7
2	Antracno	Coatepec	414592	2093412	0101000020E61000000000	2	2	1	2	5	9	5	7	8	5	8
3	Antracno	Coatepec	414610	2093506	0101000020E61000000000	1	3	2	4	5	5	10	9	5	2	8
4	Antracno	Coatepec	414610	2093479	0101000020E61000000000	1	1	2	5	4	9	7	11	10	6	6
5	Antracno	Coatepec	414611	2093443	0101000020E61000000000	1	1	3	3	2	5	8	10	7	1	10
6	Antracno	Coatepec	414616	2093383	0101000020E61000000000	2	1	1	2	5	8	5	10	10	6	5
7	Antracno	Coatepec	414623	2093403	0101000020E61000000000	1	4	2	2	4	6	5	9	4	6	5
8	Antracno	Coatepec	414625	2093504	0101000020E61000000000	1	1	3	5	5	6	11	9	4	4	4
9	Antracno	Coatepec	414625	2093517	0101000020E61000000000	2	2	3	3	5	7	11	10	8	5	10
10	Antracno	Coatepec	414633	2093516	0101000020E61000000000	1	1	2	4	4	9	9	9	4	5	7
11	Antracno	Coatepec	414637	2093370	0101000020E61000000000	0	1	2	2	6	6	6	11	5	3	10
12	Antracno	Coatepec	414638	2093476	0101000020E61000000000	4	2	3	1	7	12	3	9	8	2	7
13	Antracno	Coatepec	414644	2093439	0101000020E61000000000	0	5	2	1	5	5	5	10	5	5	10
14	Antracno	Coatepec	414650	2093554	0101000020E61000000000	2	1	3	3	2	9	10	11	8	4	5
15	Antracno	Coatepec	414651	2093406	0101000020E61000000000	1	1	3	2	3	8	11	10	9	1	2
16	Antracno	Coatepec	414661	2093399	0101000020E61000000000	1	2	1	1	4	11	11	10	6	3	7
17	Antracno	Coatepec	414664	2093506	0101000020E61000000000	3	2	3	3	5	7	6	12	7	5	7
18	Antracno	Coatepec	414664	2093453	0101000020E61000000000	2	2	3	3	5	11	9	9	4	5	5
19	Antracno	Coatepec	414670	2093578	0101000020E61000000000	3	7	2	1	4	11	2	8	6	6	3
20	Antracno	Coatepec	414672	2093386	0101000020E61000000000	2	1	3	4	3	12	9	10	8	4	6
21	Antracno	Coatepec	414672	2093482	0101000020E61000000000	4	3	3	3	5	8	6	11	8	1	7
22	Antracno	Coatepec	414677	2093529	0101000020E61000000000	2	1	2	3	4	7	9	9	5	3	2
23	Antracno	Coatepec	414687	2093437	0101000020E61000000000	2	4	3	4	6	12	2	10	7	3	7
24	Antracno	Coatepec	414691	2093562	0101000020E61000000000	1	1	4	3	4	10	3	11	8	2	5
25	Antracno	Coatepec	414695	2093530	0101000020E61000000000	2	3	2	5	5	8	10	7	8	5	6
26	Antracno	Coatepec	414704	2093529	0101000020E61000000000	1	2	2	5	4	10	12	8	8	1	6
27	Antracno	Coatepec	414707	2093496	0101000020E61000000000	2	3	2	3	4	11	11	10	7	5	4
28	Antracno	Coatepec	414716	2093558	0101000020E61000000000	2	6	5	2	5	11	3	12	10	6	9

OK. Unix Ln 56, Col 1, Ch 1321 32 chars 3563 rows. 550 ms

Modelo Físico

El modelo de datos físicos muestra cómo se construirá el modelo en la base de datos. Un modelo de base de datos física muestra todas las estructuras de tabla, incluidos el nombre de columna, el tipo de datos de columna, las restricciones de columna, la clave principal, la clave externa y las relaciones entre las tablas.

Las características de un modelo de datos físicos incluyen:

- Especificación de todas las tablas y columnas.
- Las claves externas se usan para identificar relaciones entre tablas.
- La desnormalización puede ocurrir según los requisitos del usuario.

Diseño de interfaz

Se encuentra integrado por 3 secciones:

Consultar

Es la primera parte donde el usuario podrá buscar conforme a la plaga que desee y por temperatura o humedad que existe en ese momento para obtener un resultado de la posible presencia.

Guardar

En esta parte el usuario ingresa datos de algún muestreo, capturando municipio, parcela, humedad, plaga, fecha (dd/mm/aaaa), longitud, latitud, incidencia.

Visualizar

El usuario ingresará al visor donde ubicará los datos con los que alimento la ficha de captura, donde se mostrará el nivel de incidencia de la plaga.

Etapas de Consulta y visualización

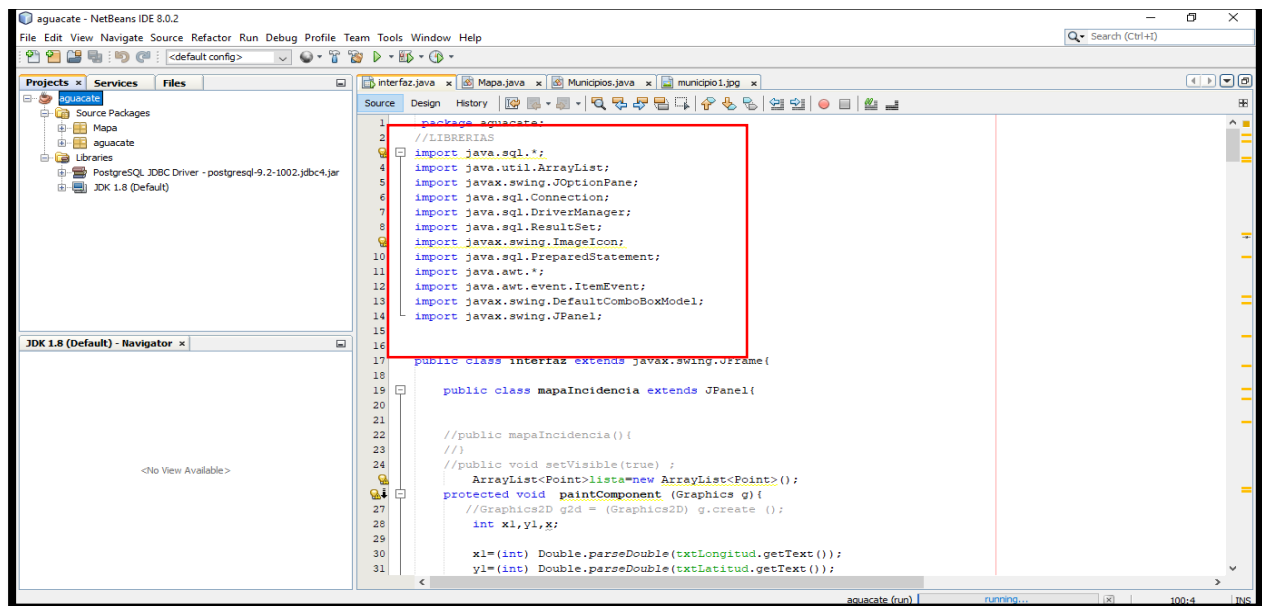
Para la consulta y visualización del sistema se desarrollaron tres etapas:

1. Integración de Driver Postgres SQL (librerías).
2. Conexión de las bases de datos en Postgres SQL
3. Desarrollo de ficha de captura en Neatbeans cuyo código del proceso de programación se muestra a continuación:

Integración de Driver Postgres SQL (librerías)

Se realizó conexión con Driver que es un controlador que proporciona la conectividad de la base de datos Postgres con Java.

Código donde la base de datos se llamada Plagas.



Conexión de las bases de datos en Postgres SQL

Código:

```
public static final String URL = "jdbc:postgresql://localhost:5434/Plagas";
```

```
public static final String USERNAME = "postgres";
```

```
public static final String PASSWORD = "postgres";
```

```
PreparedStatement ps;
```

```
ResultSet rs;
```

```
public static Connection getConnection (){
```

```
    Connection con = null;
```

```
try{
```

```
    Class.forName("org.postgresql.Driver");
```

```
    con = (Connection) DriverManager.getConnection(URL, USERNAME, PASSWORD);
```

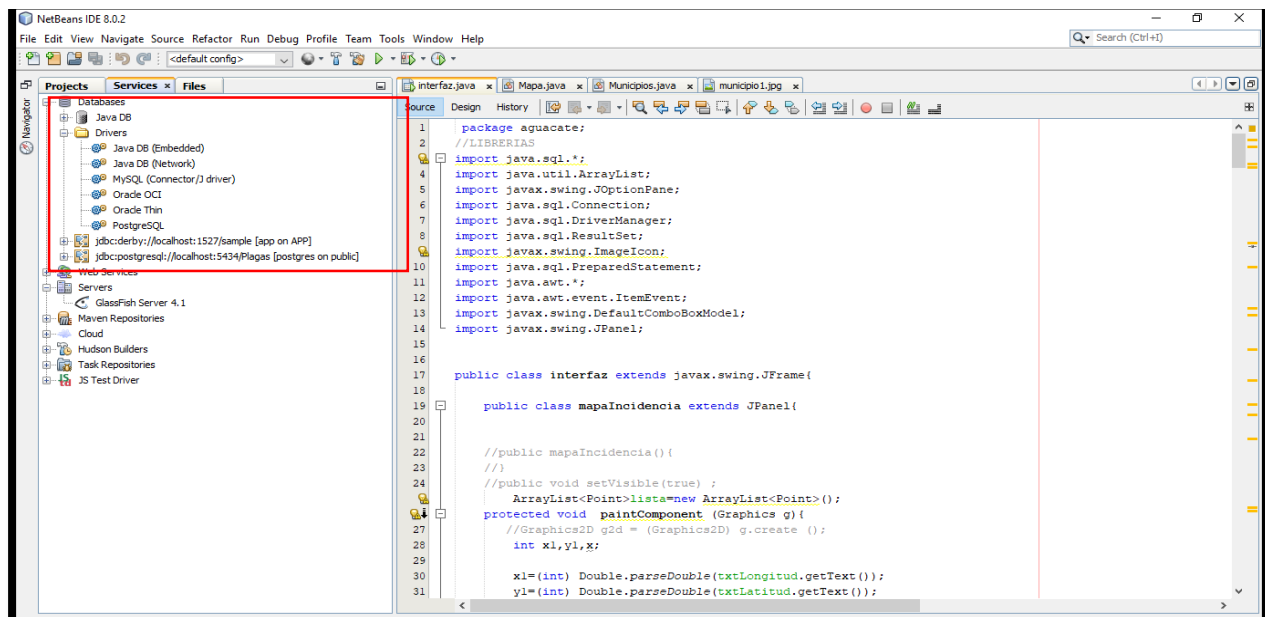
```
} catch (Exception e){
```

```
    System.out.println(e);
```

```
}
```

```
return con;
```

```
}
```



Desarrollo de ficha de captura en Neatbeans

El código del proceso de programación se muestra a continuación. En esta etapa se importaron las librerías.

Las librerías ayudan a realizar la conexión directa de la base de datos que se encuentra en PostgreSQL.

Diseño de la interfaz

En el proyecto de aguacate se diseñó la ficha de consulta y captura.

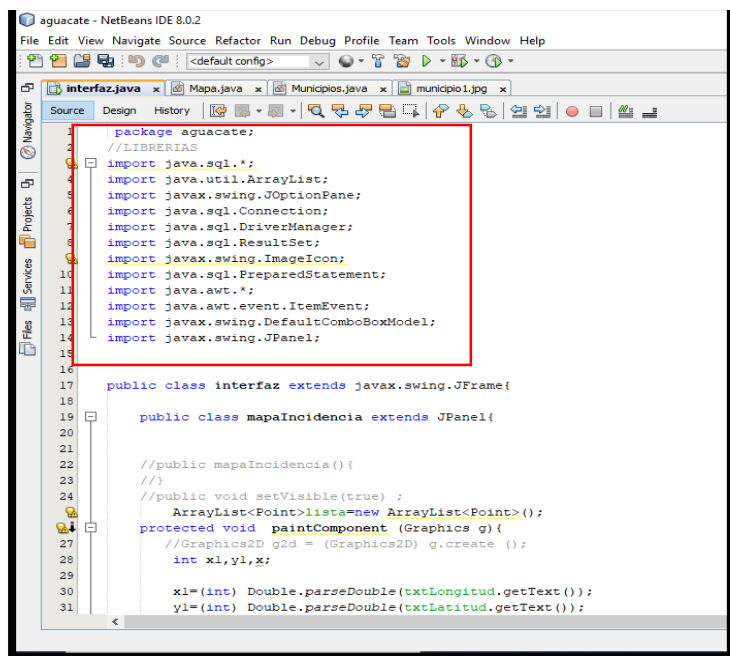
En un JFrame (lugar de trabajo en Java), se utilizó la paleta de diseño de herramientas que se mostrarán en la interfaz.

Código:

```
package aguacate;  
  
//LIBRERIAS  
  
import java.sql.*;  
  
import java.util.ArrayList;  
  
import javax.swing.JOptionPane;  
  
import java.sql.Connection;  
  
import java.sql.DriverManager;  
  
import java.sql.ResultSet;  
  
import javax.swing.ImageIcon;  
  
import java.sql.PreparedStatement;  
  
import java.awt.*;  
  
import java.awt.event.ItemEvent;
```

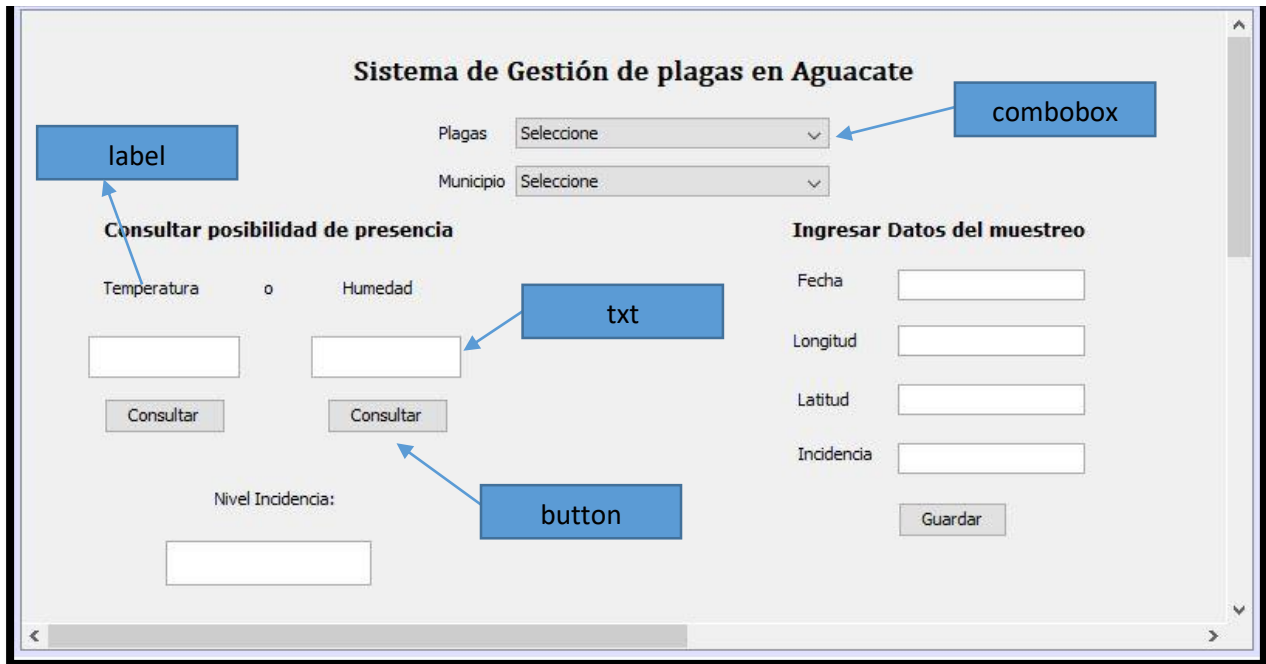
```
import javax.swing.DefaultComboBoxModel;
```

```
import javax.swing.JPanel;
```



Los botones que se muestran en la interfaz, se eligieron a través de la paleta de diseño en Java.

En el panel se agregan todos los elementos de la interfaz, donde se utilizarón: boton, label, combobox y txt.



A continuación, se puede observar la integración de cada uno de los elementos que conforman la interfaz.

- **Llenar JComboBox (desplegar opciones)**

```

109
110
111 public interfaz() {
112     initComponents();
113     this.jComboBoxConsultaMuestreo.removeAllItems();
114     //this.jComboBoxPlagas.removeAllItems();
115
116     PreparedStatement ps = null;
117     ResultSet rs = null;
118     Connection con = null;
119     try {
120         con = getConnection();
121         String sql = "SELECT * FROM muestreoIncidencia ";
122
123         ps=con.prepareStatement(sql);
124         rs=ps.executeQuery();
125         while(rs.next()){
126             jComboBoxConsultaMuestreo.addItem(rs.getString("fecha"));
127
128         }
129         rs.close();
130     } catch (Exception e) {
131         System.err.println(e);
132     }
133
134     try {
135         con = getConnection();
136         String sql = "SELECT * FROM plagas ";
137
138         ps=con.prepareStatement(sql);
139         rs=ps.executeQuery();

```

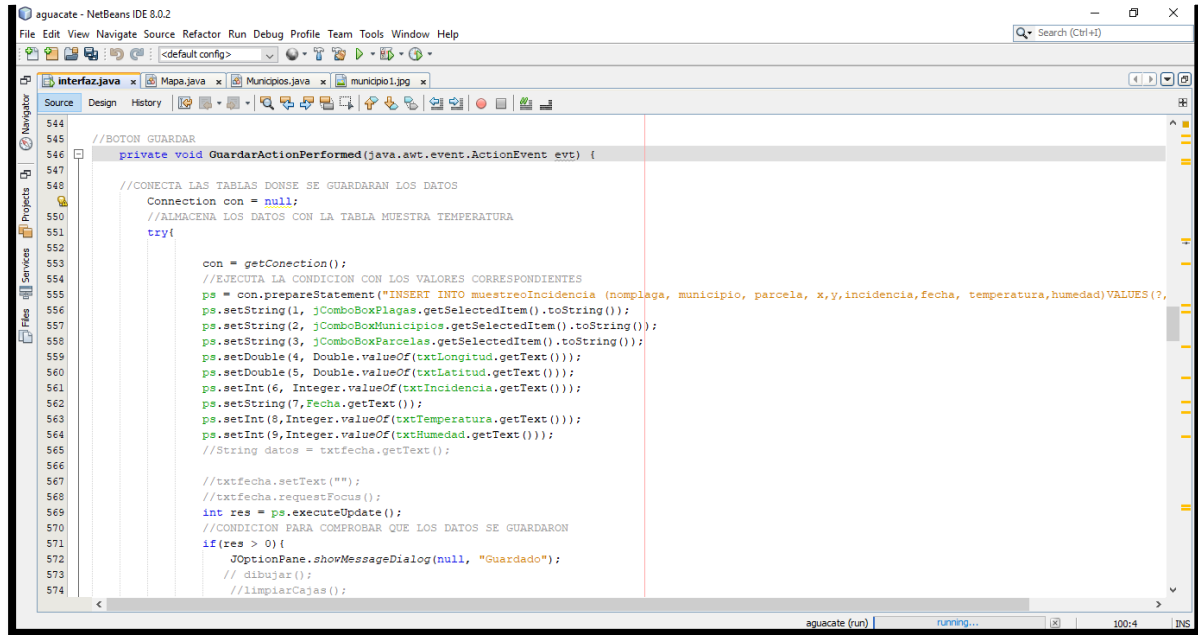
- **Botón Consultar Humedad**

```
604 }
605 //BOTON CONSULTAR DE LA TABLA HUMEDAD
606 private void BotonConsultarHumedadActionPerformed(java.awt.event.ActionEvent evt) {
607     Connection con = null;
608     //CONSULTA DIRECTAMENTE EN LA BASE DE DATOS
609     try{
610
611         con = getConnection();
612         //EJECUTA LA CONDICION
613         ps = con.prepareStatement("SELECT nivel_incidencia FROM humedad WHERE humedad = ? + "AND nomplaga = ?");
614         ps.setInt(1, Integer.valueOf(txtHumedad.getText()));
615         ps.setString(2, (jComboBoxPlagas.getSelectedItem().toString()));
616
617         rs=ps.executeQuery();
618         //CONDICION PARA LANZAR EL RESULTADO EL LA CAJA DE TEXTO
619         if(rs.next()){
620             TextResultado.setText(rs.getString("nivel_incidencia"));
621
622         }else{
623             JOptionPane.showMessageDialog(null, "Error");
624
625         }
626
627     }catch(Exception e) {
628         System.err.println(e);
629     }
630
631
632
633
634 }
```

- **Botón Consultar Temperatura**

```
634 }
635 //BOTON CONSULTAR DE LA TABLA TEMPERATURA
636 private void BotonTemperaturaActionPerformed(java.awt.event.ActionEvent evt) {
637     Connection con = null;
638     //CONSULTA DIRECTAMENTE EN LA BASE DE DATOS
639     try{
640
641         con = getConnection();
642         //EJECUTA LA CONDICION
643         ps = con.prepareStatement("SELECT nivel_incidencia FROM temperatura WHERE temperatura = ? + "AND nomplaga = ?");
644         ps.setInt(1, Integer.valueOf(txtTemperatura.getText()));
645         ps.setString(2, (jComboBoxPlagas.getSelectedItem().toString()));
646
647
648
649
650         rs=ps.executeQuery();
651         //CONDICION PARA LANZAR EL RESULTADO EL LA CAJA DE TEXTO
652         if(rs.next()){
653             TextResultado.setText(rs.getString("nivel_incidencia"));
654
655         }else{
656             JOptionPane.showMessageDialog(null, "Error");
657
658         }
659
660     }catch(Exception e) {
661         System.err.println(e);
662     }
663
664 }
```

- **Botón Guardar**



Código:

//BOTON GUARDAR

private void GuardarActionPerformed(java.awt.event.ActionEvent evt) {

//CONECTA LAS TABLAS DONDE SE GUARDARAN LOS DATOS

Connection con = null;

//ALMACENA LOS DATOS CON LA TABLA MUESTRA INCIDENCIA

try{

con = getConection();

//EJECUTA LA CONDICION CON LOS VALORES CORRESPONDIENTES

```

ps = con.prepareStatement("INSERT INTO muestreoIncidencia
(nomplaga,x,y,incidencia,fecha, temperatura, humedad)VALUES(?,?,?,?,?,?,?,?)");

ps.setString(1, jComboBoxPlagas.getSelectedItem().toString());

ps.setDouble(2, Double.valueOf(txtLongitud.getText()));

ps.setDouble(3, Double.valueOf(txtLatitud.getText()));

ps.setInt(4, Integer.valueOf(txtIncidencia.getText()));

ps.setString(5, Fecha.getText());

ps.setInt(6, Integer.valueOf(txtTemperatura.getText()));

ps.setInt(7, Integer.valueOf(txtHumedad.getText()));

int res = ps.executeUpdate();

//CONDICION PARA COMPROBAR QUE LOS DATOS SE GUARDARON

if(res > 0){

    JOptionPane.showMessageDialog(null, "Guardado");

    // dibujar();

    //limpiarCajas();

}else{

    JOptionPane.showMessageDialog(null, "Error");

    // limpiarCajas();

}

con.close();

}catch(Exception e) {

    System.err.println(e);

```

```
}  
}
```

```
private void txtLongitudActionPerformed(java.awt.event.ActionEvent evt) {  
  
}
```

```
private void txtIncidenciaActionPerformed(java.awt.event.ActionEvent evt) {  
    // TODO add your handling code here:  
}
```

```
private void BotonTemperaturaActionPerformed(java.awt.event.ActionEvent evt) {  
    Connection con = null;  
  
    //CONSULTA DIRECTAMENTE EN LA BASE DE DATOS  
    try{  
  
        con = getConection();  
  
        //EJECUTA LA CONDICION  
  
        ps = con.prepareStatement("SELECT nivel_incidencia FROM temperatura WHERE  
temperatura = ? " + "AND id_plaga = ?");  
  
        ps.setInt(1, Integer.valueOf(txtTemperatura.getText()));  
  
        ps.setString(2, (jComboBoxPlagas.getSelectedItem().toString()));
```


La integración de la interfaz con los botones de consulta es la siguiente:

Sistema de Gestión de plagas en Aguacate

Plagas

Municipio

Consultar posibilidad de presencia

Temperatura o Humedad

Nivel Incidencia:

Ingresar Datos del muestreo

Fecha

Longitud

Latitud

Incidencia

Posteriormente, la visualización de las consultas de la ficha de captura se realizó en un entorno web, en un servidor de mapas que publica y almacena archivos shape. Geoserver.

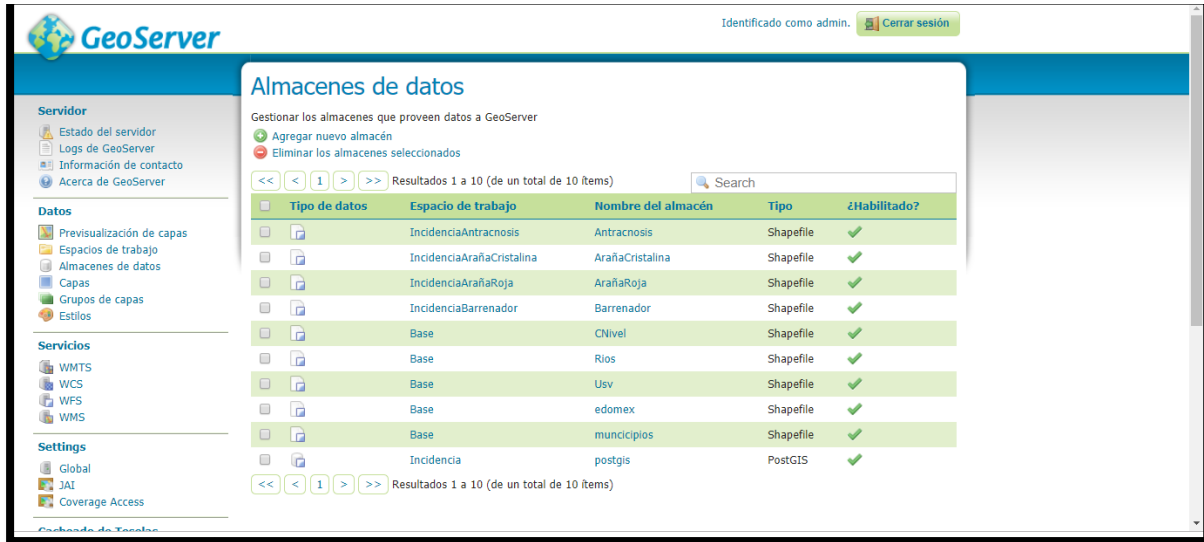
Arquitectura geotecnologica del servicio de mapas

Las etapas de la arquitectura geotecnologica del servicio de mapas se divide en dos:

- 1. Servidor de bases de datos Postgres**
- 2. Servidor de mapas Geoserver**

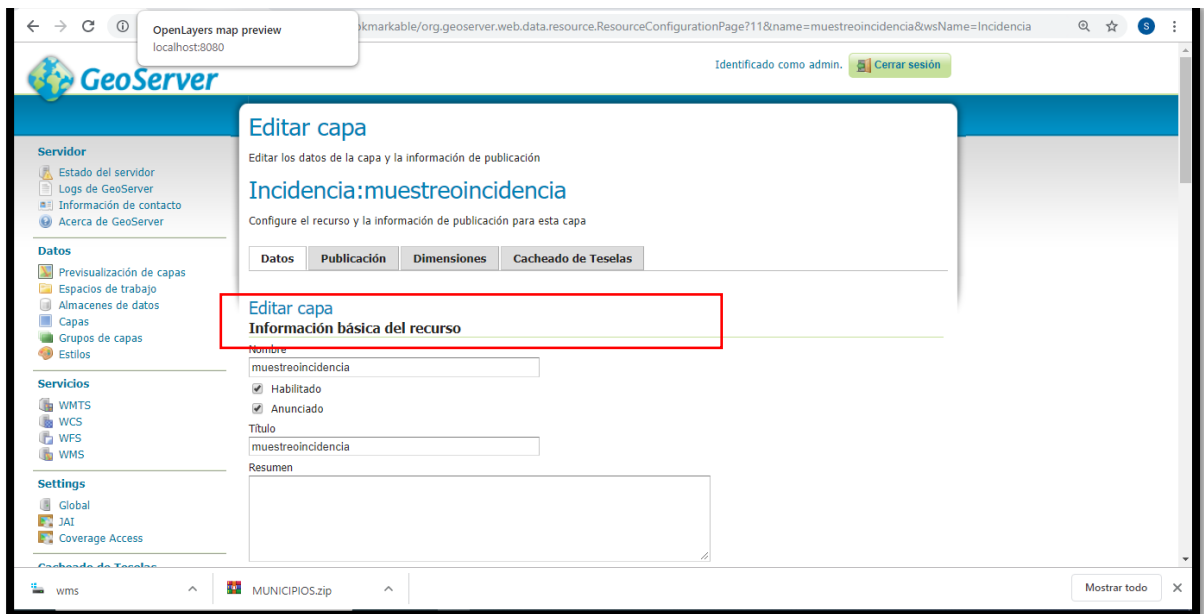
Servidor de aplicaciones web mediante el lenguaje HTML5, CSS y Java Script

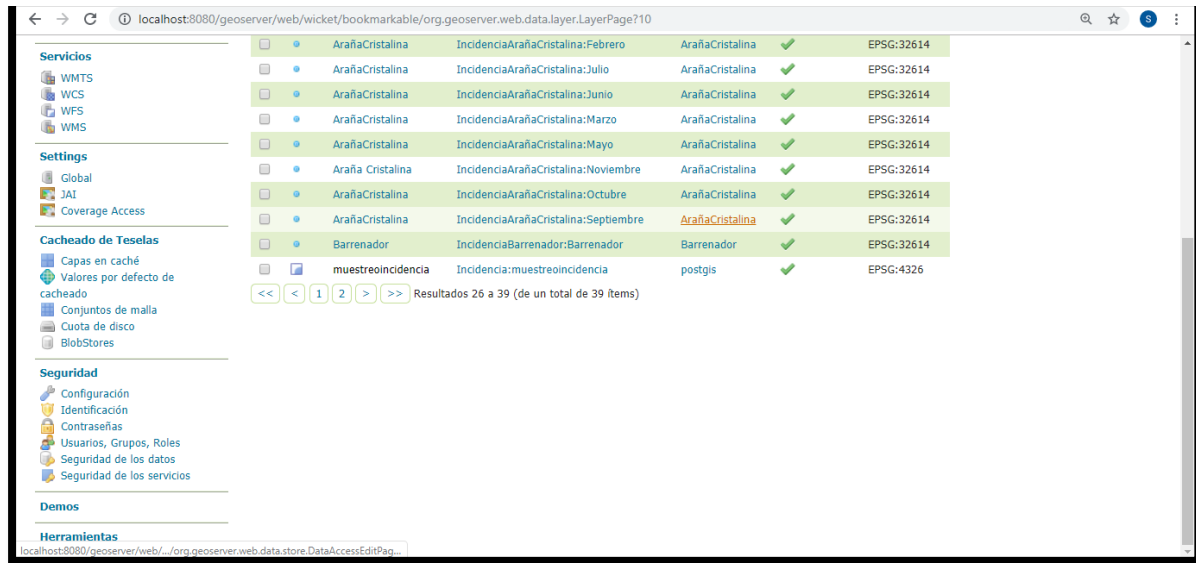
En Geoserver se suben las capas a publicar



Se realiza el almacén de datos de la tabla muestreo incidencia.

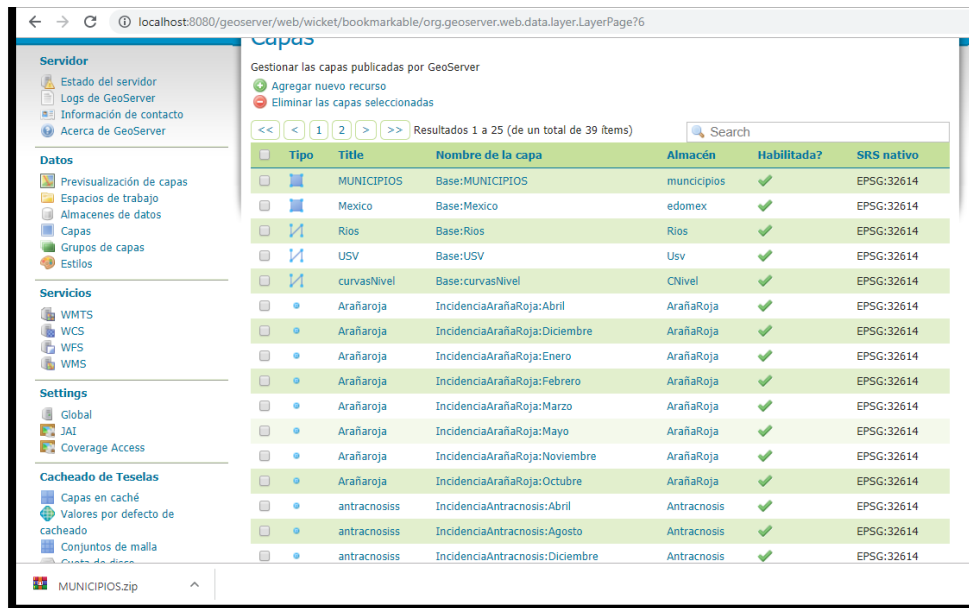
Se crea el almacén



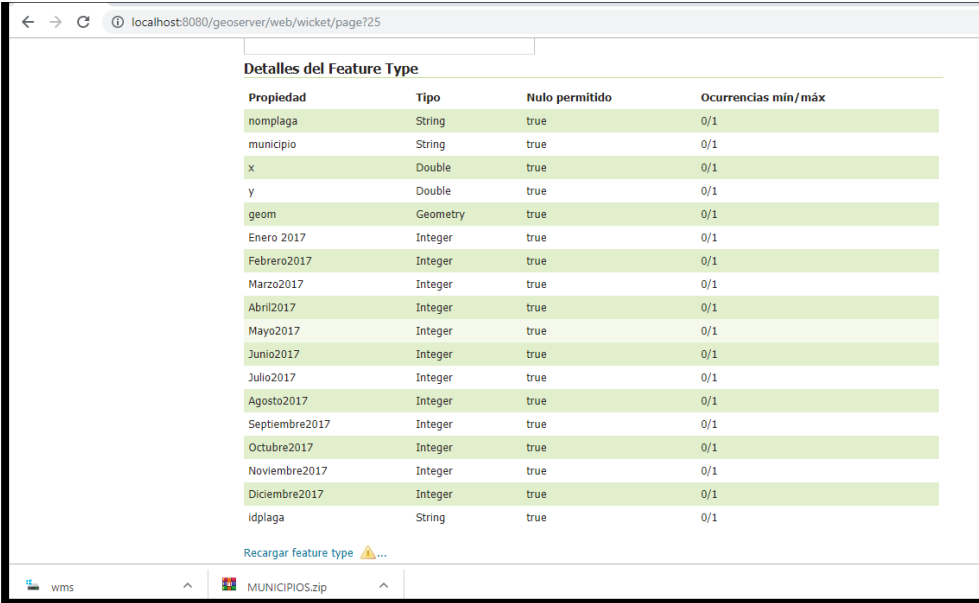


Capas incorporadas

Las capas de información utilizadas para la visualización fueron: Uso de suelo y municipios.



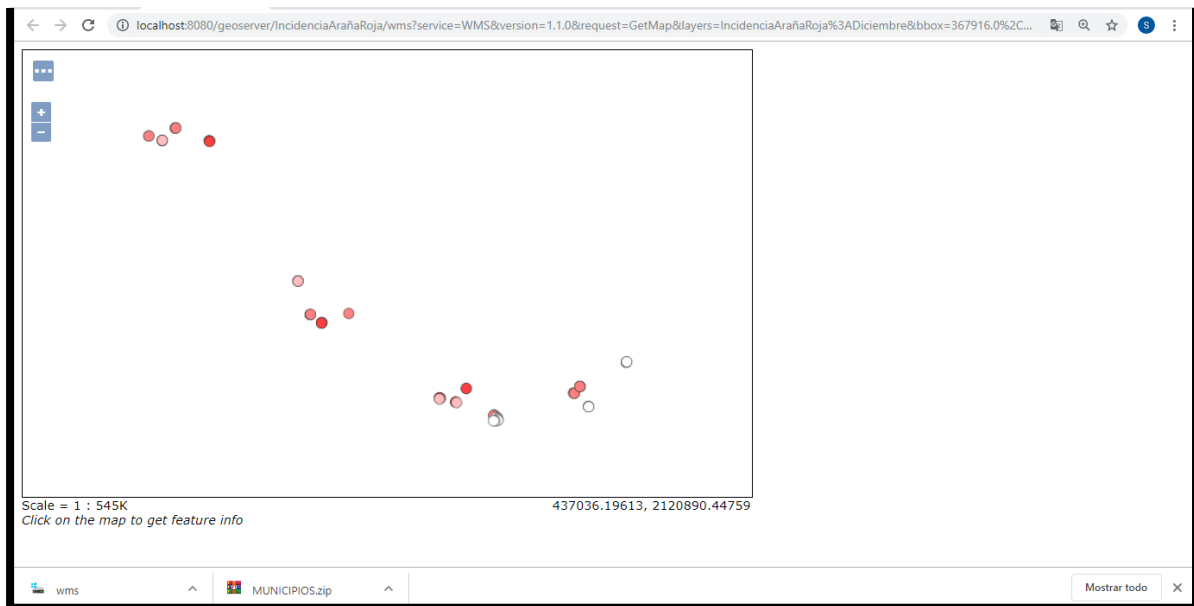
Visualización de los atributos de la tabla del muestreo incidencia en Postgres en la base de datos



Propiedad	Tipo	Nulo permitido	Ocurrencias mín/máx
nomplaga	String	true	0/1
municipio	String	true	0/1
x	Double	true	0/1
y	Double	true	0/1
geom	Geometry	true	0/1
Enero 2017	Integer	true	0/1
Febrero2017	Integer	true	0/1
Marzo2017	Integer	true	0/1
Abril2017	Integer	true	0/1
Mayo2017	Integer	true	0/1
Junio2017	Integer	true	0/1
Julio2017	Integer	true	0/1
Agosto2017	Integer	true	0/1
Septiembre2017	Integer	true	0/1
Octubre2017	Integer	true	0/1
Noviembre2017	Integer	true	0/1
Diciembre2017	Integer	true	0/1
idplaga	String	true	0/1

Visualización de las incidencias desde Geoserver

Se observan los puntos de muestreo de la plaga o enfermedad consultada y cada punto muestra con un color diferentes el nivel de incidencia que presenta la plaga o enfermedad consultada.

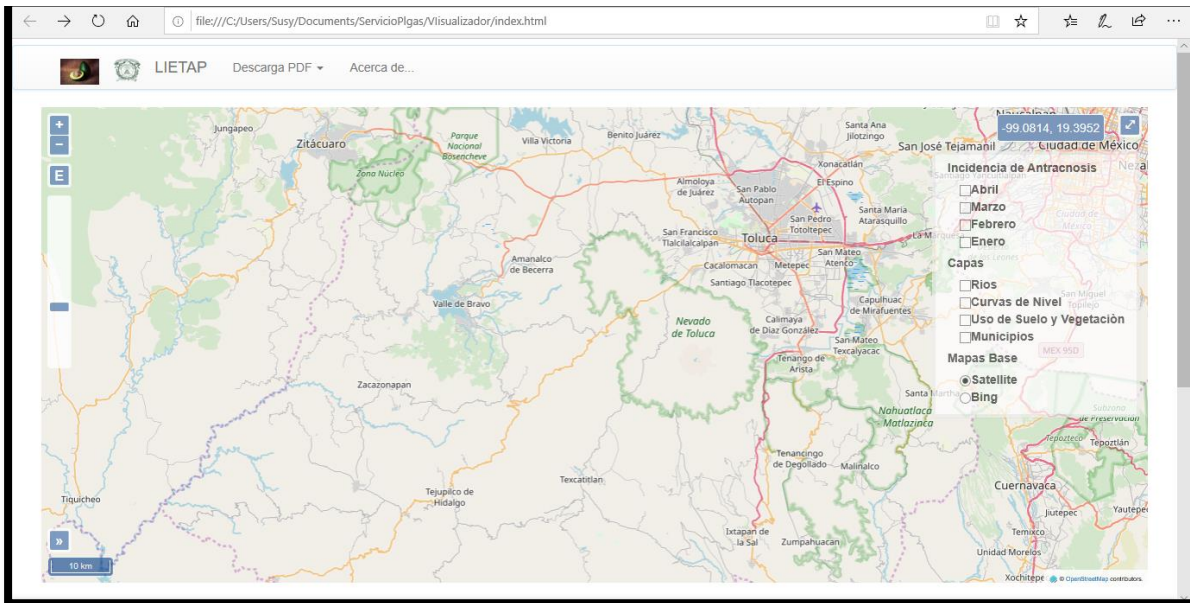


Código para visualizar el mapa base

```
var map = new ol.Map({
  target: 'map', //Put the object .Map on a DIV with ID = "map"
  projection: 'EPSG:4326', //Choose de projection
  layers: [
    new ol.layer.Group({ //Declares an object in the class .Layer.Group . This is the MAP-BASE group
      title: 'Mapas Base',
      layers: [
        new ol.layer.Tile({
          title: 'Bing',
          type: 'base',
          visible: false,
          preload: Infinity,
          source: new ol.source.BingMaps({
            key: 'SR0p7157k4wEPi0kTge-faJuCck8bmSxPhAz5kThHg-Au26JJcvrkay0GXq1RGzntKPubwAQqqPecDFVueYCHEYhpaz2yFy0VhB9TrOcGg8k',
            imagerySet: 'AerialWithLabels',
            maxZoom: 19
          })
        }),
        new ol.layer.Tile({
          title: 'Satellite',
          type: 'base',
          visible: true,
          source: new ol.source.OSM({layer: 'OSM'})
        })
      ]
    })
  ], //end MAP-BASE group. Don't forget the coma
  new ol.layer.Group({ //Declares an object in the class .Layer.Group . This is the MAP-OUR-LAYERS group
    title: 'Capas',
    layers: [
      new ol.layer.Tile({
        title: 'Municipios',
        visible: false,
        source: new ol.source.TileWMS({
          url: 'http://localhost:8080/geoserver/wms',
          params: {'LAYERS': 'Base:MUNICIPIOS', 'TILED': true},
          transparent: true
        })
      })
    ]
  })
]);
```

Una vez que se hizo la conexión de las tablas se obtuvo el visualizador, en donde se observarían las incidencias de plagas o enfermedad que se desee consultar.

Visualización de las incidencias



Mapa de aptitud para el establecimiento de futuras plantaciones de aguacate

Para esta investigación se desarrollaron tres etapas; la primera fue la integración de una base de datos geoespaciales en entorno de sistemas de información geográfica, la segunda la construcción de criterios de análisis y ponderación de las variables territoriales, y la tercera el desarrollo y validación de un modelo de asignación de potencial para el cultivo de aguacate.

Integración de la base de datos geoespaciales

Se consultaron diferentes repositorios de información geográfica abierta, tales como: INEGI, CONABIO, y el Atlas de Riesgos Climatológicos del Estado de México. De ellos se extrajeron las capas: edafología, temperatura media anual, uso del suelo, precipitación media anual, curvas de nivel y límite estatal, así como cuatro imágenes obtenida por el sensor Sentinel 2 de la Agencia Espacial Europea (ESA) (Tabla 13).

Tabla 13. Cartografía empleada en la elaboración de mapa de aptitud para el cultivo de aguacate.

Cobertura	Fuente	Escala
Clima	Atlas de riesgos climatológicos	1 : 250 000
Edafología	Atlas de riesgos climatológicos	1 : 250 000
Temperatura media anual	Atlas de riesgos climatológicos	1 : 250 000
Uso de suelo	Atlas de riesgos climatológicos	
Precipitación media anual	INEGI	1 : 250 000
Curvas de nivel	INEGI	1 : 250 000
MDE a partir de curvas de nivel	Elaboración propia a partir de curvas de nivel	1 : 250 000 1 : 250 000
Pendientes a partir de MDE	Elaboración propia a partir de MDE	
Límite estatal	INEGI	1 : 250 000
Imágenes satelitales Sentinel 2	Agencia Espacial Europea (ESA)	10 m / píxel

Las cartas se unieron cuando fue necesario, y se re proyectaron al sistema de coordenadas UTM Zona 14 N con el datum WGS1984. Sus tablas de datos relacionados se re codificaron en función de los criterios de potencial, generando un nuevo campo de aptitud. Posteriormente se convirtieron al formato ráster.

Construcción de criterios de análisis y ponderación de las variables territoriales

Para el diseño del análisis para la selección de regiones con potencial óptimo y subóptimo se hizo un proceso de investigación de variables recomendadas por diferentes, autores reconociendo la frecuencia y prioridad con que cada variable es considerada por un determinado autor (Tabla 14). Posteriormente y considerando la valoración de Reyes (2012) se seleccionaron y categorizaron dichas variables

Se resumen las variables sugeridas en la literatura para diferentes variedades en diferentes regiones de América Latina, mostrando también los rangos que considera óptimos cada uno de los autores.

Tabla 14. Variables consideradas por 10 autores para valorar el potencial de cultivo de aguacate.

	EXP 1	EXP 2	EXP 3	EXP 4	EXP 5	EXP 6	EXP 7	EXP 8	EXP 9	EXP 10
Temperatura	De 10 a 35 °C Óptimo de 25 a 30°C	De 17 a 24°C Ideal 20°C	NA	De 5 a 19°C	Medias anuales de 17 a 19°C	De 17 a 24°C Ideal 20°C	De 14 a 24°C	De 18 a 25°C °T no inferiores a 17°C	De 15 a 22°C	Ideal de 14 a 24°C hasta 30°C °T min de -4°C
Raza						°T min 10-17°C °T max 28-33°C				
Guatemala	22 a 25°C con mínima invernal no menor a 0°C °T mínimas no deberían llegar a -5°C									
Altitud	Raza Guatemala de 500 a 1000 m Raza Mexicana de 1000 a 2500 m	NA	Entre 800 y 2500m	Raza Guatemala de 800 a 2400m Raza Mexicana por encima de los 2000	Raza Guatemala de 800 a 2400m Raza Mexicana por encima de los 2400 a 2800 Hass de 1500 a 2500	NA	Mayores a 1000m	Hass de 1200 a 1800m Min de 1100m 2500m permiten adecuado desarrollo	De 1400 a 2200m	De 1200 a 2500m
Precipitación	Raza Guatemala de 1000 a 1500mm	De 1000 a 2000 mm	1200mm	De 665 a 2000mm	NA	De 1000 a 2000mm	Hass de 1200 a 1800 mm	No mayor a 1500mm	De 800 a 1600mm	Hass de 1200 a 1800mm En general de 1000 a 2000mm
Suelo	Franco Franco-arcillo-limoso Arenosos	Arcillosos Franco-arcillosos	Arcillosos Franco-arcillosos	NA	Textura ligera, profundos, bien drenados	Franco de consistencia media y ricos en materia orgánica	Andisol Inceptisoles Aluviales Repsoles	Textura franca	Textura media	Arcilla roja Arena ceniza volcánica Calizos
Pendiente	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	De 0 a 25%	NA

Humedad ambiental	Relativamente alta	NA	NA	Se adapta a climas subhúmedos	Clima húmedo a subhúmedo con estaciones secas y lluviosas bien definidas	NA	Optima de 60 a 70%	No mayor a 65%	NA	De 75 a 80%
pH	De 6 a 7	De 5.5 a 7	De 5.5 a 7	NA	De 5.5 a 7	NA	De 5.5 a 7	De 5.5 a 7	NA	De 5.5 a 7
Viento	NA	NA	NA	No mayores a 20 km/hr	NA	NA	NA	NA	NA	NA

NA= No Aplica

La Tabla 15 muestra la prioridad que cada experto otorgó a las variables por experto: se jerarquizaron las variables de acuerdo al número de variables que menciona el experto y al lugar en el que él mismo las menciona.

Tabla 15. Prioridad de las variables consideradas por expertos en cultivo de aguacate.

Variable	EXP 1	EXP 2	EXP 3	EXP 4	EXP 5	EXP 6	EXP 7	EXP 8	EXP 9	EXP 10
Temperatura	4/7	1/4	NA	1/5	1/5	1/4	1/6	3/6	1/5	1/6
Altitud	1/7	NA	1/4	5/5	2/5	NA	6/6	5/6	3/5	4/6
Precipitación	2/7	2/4	2/4	3/5	NA	4/4	4/6	6/6	2/5	3/6
Suelo	5/7	3/4	3/4	NA	4/5	3/4	5/6	1/6	5/5	5/6
Pendiente	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	4/5	NA
Humedad ambiental	3-7	NA	NA	2-5	3-5	NA	3-6	4-6	NA	2-6
pH	6-7	4-4	4-4	NA	5-5	2-4	NA	2-6	NA	6-6

Leyenda: Posición de la variable/Total de variables consideradas, NA= No aplica.

La Tabla 16 jerarquiza las variables considerando la frecuencia con la que los expertos las consideran (NVE), se muestra también el valor de priorización propia (PPA), mismo que se define considerando las tablas anteriores y el juicio experto. Con ellas también se establecieron valores de peso (Peso %) para cada una de las variables incluidas en el modelo.

Tabla 16. Frecuencia de variables e importancia.

	NVE	PPA	Peso (%)
Temperatura	9	1	20
Altitud	8	4	15
Precipitación	9	3	15
Suelo	9	2	20
Pendiente	1	7	10
Uso de suelo	0	5	20
Humedad ambiental	6	6	0
pH	7	8	0
Viento	1	9	0

Como resultado de contrastar estas interpretaciones con la interpretación de un experto, se llegó a la siguiente tabla de requerimientos agroecológicos para el aguacate Hass en el Estado de México (Tabla 17).

Tabla 17. Requerimientos agroecológicos del aguacate Hass.

FACTOR	Límite mínimo	Valor óptimo	Límite máximo
Temperatura	12 °C	12 °C – 22 °C	27 °C
Precipitación	850 mm	1000 mm – 1400 mm	1800 mm
Suelo	Vertisol	Andosol	Vertisol
Altitud	1200 msnm	1600 msnm– 2200 msnm	2400 msnm
Pendiente	1 %	5 % – 10 %	20 %

Fuente: Reyes (2012) y Anguiano et al. (2007).

Esta tabla considera que el cultivo de aguacate presenta un comportamiento fenológico característico, donde las fases de floración, formación, madurez del fruto, brotación vegetativa y dormancia se traslapan, se acortan o prolongan por las condiciones climáticas, el manejo y la alta variabilidad genética (Téliz et al., 2000). Lo que hace esencial conocer y considerar las condiciones agroecológicas para su correcto establecimiento y manejo.

Integración y validación de un modelo de asignación de potencial para el cultivo de aguacate.

Se desarrolló una sobreposición ponderada (Weighted overlay) en ArcGis™ integrando los valores de aptitud de cada una de las variables mencionadas y recodificadas, restringiendo aquellas áreas que desea excluir del análisis y ponderando cada capa de entrada según su peso de influencia, este peso se expresa en porcentaje y la suma de los pesos porcentuales de influencia de todas las variables es 100.

Al modelo resultante se le aplicó una máscara que excluye las zonas de alta reflectancia como suelo urbano; viveros cubiertos con plástico y regiones de roca expuesta, ya que en estas zonas se asume la imposibilidad de implantar exitosamente el cultivo de aguacate. Esta máscara se derivó de las

siguientes escenas del sensor Sentinel 2B: S2B_MSIL1C_20171128T170639_N0206_R069_T14QMG_20171128T221610, S2B_MSIL1C_20171128T170639_N0206_R069_T14QLG_20171128T221610, S2B_MSIL1C_20171128T170639_N0206_R069_T14QLF_20171128T221610 y S2B_MSIL1C_20171128T170639_N0206_R069_T14QMF_20171128T221610 correspondientes al 7 de mayo de 2017. Estas fueron sub muestreadas para extraer únicamente las bandas 2, 3 ,4, 8, 11 y 12 que son compatibles con aquellas regiones que abarca Landsat ETM, para poder posteriormente calcular la transformación Tasseled Cap (Kauth y Thomas, 1976). Esta transformación sintetiza los valores de las bandas de la imagen generando tres nuevas bandas de información mediante la multiplicación por factores definidos, las cuales muestran el brillo, el verdor y la humedad en la imagen. Posteriormente se reclasificó la banda 1 (correspondiente a brillo) mediante el método de clasificación no supervisada isodata clasificación en el software Envi. Esto permitió extraer los píxeles altamente reflectantes. Se restó esta superficie al modelo de aptitud para quitar estas regiones imposibilitadas para el cultivo (Figura 10).

Método Weighted overlay

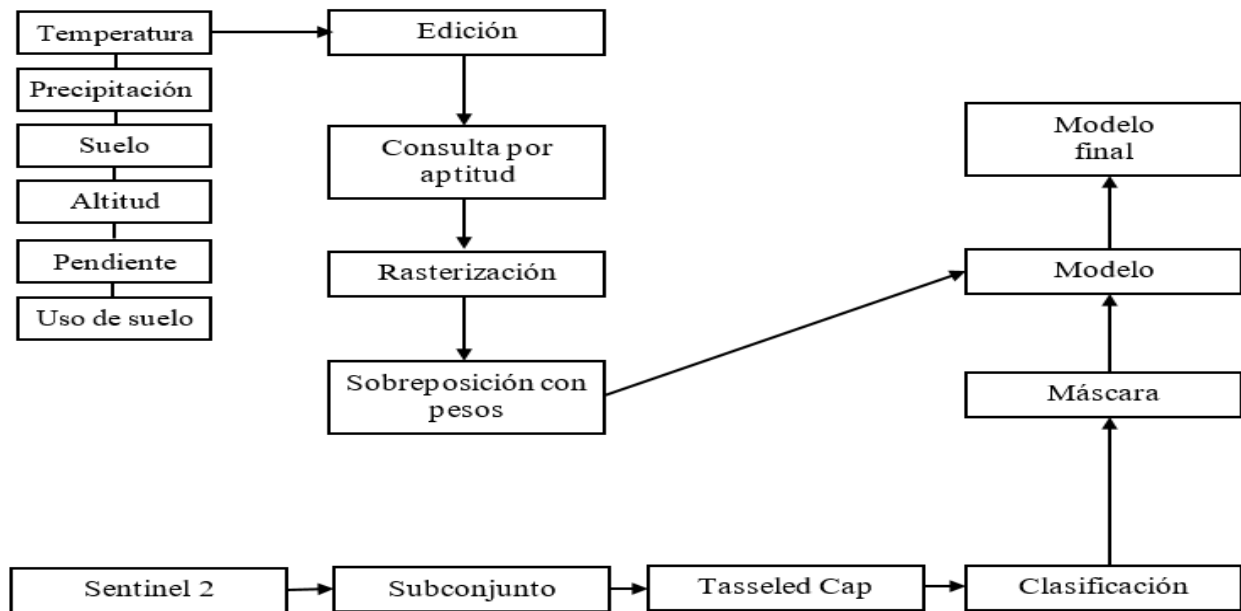


Figura 10. Diagrama de proceso weighted overlay para mapa de aptitud.

RESULTADOS

Como resultados de esta investigación se realizaron dos artículos científicos, los cuales fueron enviados a una revista indizada en el CONACyT y otra indizada en el JCR (Journal Citation Reports). El primer artículo enviado a la Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas fue aceptado para su publicación y está próximo a publicarse y el segundo artículo fue enviado a la Revista Chapingo Serie Horticultura se encuentra en revisión por los pares académicos. A continuación, se anexan los artículos mencionados, así como las cartas de aceptación y de envío correspondientes.

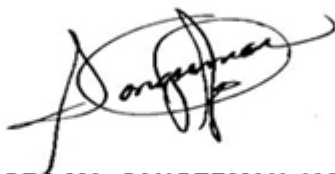
Texcoco, Estado de México, 21 de octubre de 2019

Dra. Dulce Karen Figueroa Figueroa
Universidad Autónoma del Estado de México
Presente

Por medio de la presente se hace constar que el manuscrito titulado: “**Modelo espacial de áreas potenciales para el establecimiento de futuras plantaciones de *Persea americana* Mill. en el Estado de México**”, del cual son autores (as): **Dulce Karen Figueroa Figueroa, Xanat Antonio Némiga, José Francisco Ramírez Dávila, Andrés González Huerta**, fue aceptado para ser publicado en el Vol. **11(3), 2020** en la Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas.

Sin otro particular, le envío un cordial saludo.

Atentamente



DRA. DORA MA. SANGERMAN-JARQUÍN |
EDITORA EN JEFA DE LA REVISTA
MEXICANA DE CIENCIAS AGRÍCOLAS

c.c.p. * Archivo
DMSJ/dmmm

Carretera Los Reyes- Texcoco, km 13.5. Coatlínchán, Texcoco, Estado de México, México. C. P. 56250
E-mail: revista_atm@yahoo.com.mx. Tel. 55-38-71-87-00 -Ext. 85353

MODELO ESPACIAL DE AREAS POTENCIALES PARA EL ESTABLECIMIENTO DE FUTURAS PLANTACIONES DE *Persea americana* Mill. EN EL ESTADO DE MÉXICO

SPATIAL MODEL OF POTENTIAL AREAS FOR THE ESTABLISHMENT OF FUTURE PLANTATIONS OF *Persea americana* Mill. IN THE STATE OF MEXICO

Dulce Karen Figueroa-Figueroa¹, Xanat Antonio-Némiga^{3*} José Francisco Ramírez-Dávila², Andrés González-Huerta²

¹ Estudiante Programa de Doctorado en Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales, Facultad de Ciencias Agrícolas, Universidad Autónoma del Estado de México. Carretera Toluca - Ixtlahuaca Kilómetro 15.5, El Cerrillo Piedras Blancas, Toluca Estado de México, México, C.P. 50295.

² Facultad de Ciencias Agrícolas, Universidad Autónoma del Estado de México. Carretera Toluca - Ixtlahuaca Kilómetro 15.5, El Cerrillo Piedras Blancas, Toluca Estado de México, México, C.P. 50295.

³ Facultad de Geografía, Universidad Autónoma del Estado de México. Cerro Coatepec s/n Ciudad Universitaria, Toluca Estado de México, México, C.P. 50110.

* (Autor de correspondencia) correo electrónico: xanynemiga@hotmail.com, número telefónico: (722) 215 0255.

RESUMEN

En los últimos años, el cultivo de aguacate se ha convertido en uno de los más importantes y demandados a nivel internacional, siendo una alternativa de diversificación de cultivos con alto rendimiento, rentabilidad e importancia comercial y nutricional. México tiene el 30% de la producción mundial y el Estado de México es el tercer productor a nivel nacional, situación que propicia la expansión desmedida de este cultivo en el estado. Por tal motivo, el objetivo de esta investigación fue identificar regiones con potencial óptimo y subóptimo para el establecimiento de plantaciones de aguacate en los municipios de: Coatepec Harinas,

Donato Guerra, Temascaltepec y Tenancingo del Estado de México. El método comprende tres etapas; la integración de una base de datos geoespaciales en entorno de sistemas de información geográfica (SIG), la construcción de criterios de análisis y ponderación de las variables territoriales y el desarrollo y validación de un modelo de asignación de potencial para el cultivo de aguacate. Se obtuvo que las áreas con potencial óptimo representan un total de 7.93 % (9,543.82 ha) ubicado al sur de los municipios, distribuyéndose, 3,261.20 ha en Coatepec Harinas, 2,973.87 ha en Temascaltepec, 2,124.41 ha en Donato Guerra y 1,184.33 ha en Tenancingo. Se presentan y analizan las brechas entre zonas con potencial y zonas cultivadas.

Palabras clave: Cultivo de aguacate, potencial agronómico, análisis SIG multivariado.

SUMMARY

In recent years, avocado cultivation has become one of the most important and demanded internationally, being an alternative for crop diversification with high yield, profitability and commercial and nutritional importance. Mexico has 30% of world production and the State of Mexico is the third largest producer nationwide, a situation that encourages the excessive expansion of this crop in the state. For this reason, the objective of this research was to identify regions with optimal and sub-optimal potential for the establishment of avocado plantations in the municipalities of: Coatepec Harinas, Donato Guerra, Temascaltepec and Tenancingo of the State of Mexico. The method comprises three stages; the integration of a geospatial database in the environment of geographic information systems (GIS), the construction of criteria for analysis and weighting of territorial variables and the development and validation of a potential allocation model for avocado cultivation. It was obtained that the areas with optimal potential representing a total of 7.93% (9,543.82 ha) located to the south of the municipalities, distributing 3,261.20 ha in Coatepec Harinas, 2,973.87 ha in Temascaltepec, 2,124.41 ha in Donato Guerra and 1,184.33 ha in Tenancingo. The gaps between areas with potential and cultivated areas are presented and analyzed.

Keywords: Avocado cultivation, agronomic potential, multivariate GIS analysis.

INTRODUCCIÓN

El cultivo de aguacate (*Persea americana* Mill.) es originario de las regiones tropicales y subtropicales de Centroamérica y México. Desde tiempos remotos ha sido un cultivo de interés para muchos agricultores, como una alternativa para la diversificación de cultivos con alto rendimiento, rentabilidad e importancia comercial y nutricional. México tiene el 30 % de la producción mundial de aguacate, siendo Michoacán la entidad líder en producción nacional pues genera el 80% del total. Jalisco y el Estado de México le siguen en importancia. En el Estado de México, Coatepec Harinas produce el 25 % del aguacate con una superficie de 2,155 ha, es decir, que uno de cada cuatro frutos mexiquenses proviene de este municipio (El Financiero, 2019). De acuerdo con la información reportada por el SIAP (2019) otros municipios contribuyen con grandes superficies de aguacate como: Tenancingo 884 ha, Temascaltepec 1,558 ha y Donato Guerra 1493 ha. El incremento en la superficie sembrada, fue motivado por el aumento en el volumen de exportación de aguacate desde el año 2000 y originó que el precio de venta tomara una considerable tendencia al alza, lo que despertó mayor interés por incursionar en la producción de esta especie (Inforural, 2012).

Por eso es necesario practicar una agricultura más productiva y con un menor nivel de riesgo, buscando la producción de cultivos en ambientes que provean condiciones que satisfagan los requerimientos agroecológicos de las plantas. Esto implica una zonificación de cultivos que permita identificar áreas y épocas con diferente nivel de aptitud agroecológica; desde las marginales, en donde el cultivo difícilmente satisface sus necesidades ecológicas, hasta las óptimas, donde el cultivo satisface íntegramente tales exigencias (Ruíz et al., 1999). De acuerdo con la FAO (1997), los límites de la capacidad de producción de las tierras están determinados por el clima, las condiciones del suelo y la fisiografía, así como por el uso y manejo que se hace de ellos. Su proyecto *Zonas Agro-ecológicas* (ZAE) investiga cuáles tierras tienen combinaciones similares de clima y características de suelo, asumiendo un mismo potencial biofísico para

la producción agrícola. El análisis combina capas de información espacial en Sistemas de Información Geográfica (SIG) mediante modelos computarizados, proporcionando así un marco global para la evaluación y planificación de los recursos de tierras (FAO, 1978). En México el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) ha determinado el potencial productivo de diversos cultivos mediante Sistemas de Información Geográfica integrando información obtenida de imágenes de satélite, fotografías aéreas e información presentada en mapas y en bases de datos georreferenciadas (Reyes et al., 2017).

Considerando la importancia de optimizar la producción de aguacate y reconociendo la necesidad de estudios más específicos por su alta demanda, el objetivo de esta investigación es identificar regiones con potencial óptimo y subóptimo para el establecimiento de plantaciones de aguacate en los municipios de Coatepec Harinas, Donato Guerra, Temascaltepec y Tenancingo del Estado de México.

METODOLOGÍA

Zona de estudio

Se encuentra integrada por cuatro municipios al sur del Estado de México (Figura 1) en los paralelos 19°25'51" y 18°46'58.14" de latitud norte y 100°19'59" y 99°28'46.45" longitud oeste. A continuación, se detallan algunos aspectos físicos de estos:

Coatepec Harinas forma parte del segundo sistema del Xinantécatl por lo que su altitud varía de 1900 a 3000 msnm, su clima es templado subhúmedo, con temperatura promedio de 16.1 °C y precipitación promedio anual de 1,242.53 mm por lo que predomina el bosque mesófilo de montaña.

Donato Guerra se ubica en la región que pertenece al Eje Neovolcánico Transversal, por lo que presenta formas características de relieve accidentado, semiplano y plano, gran parte de las sierras son de origen volcánico con altitud entre 2200 y 3040 msnm, su clima es templado subhúmedo con temperatura promedio

de 22 °C y precipitación promedio de 1,000 mm características que favorecen la presencia de bosque de pino, encino, ocote, cedro, eucalipto, fresno y roble (PMDUCHEM, 2009; PMDUDGEM, 2009).

Tenancingo se encuentra en dos sistemas fisiográficos; Provincia del Eje Neovolcánico y Provincia de la Sierra Madre del Sur, presenta zonas semiplanas con pendientes máxima de 15 por ciento, su altitud media es de 2020 msnm y su clima es templado con temperatura entre los 12 y 22 °C, con precipitación promedio entre 1000 mm y 1500 mm, por lo que predomina el bosque de encino, cedro y ciprés.

Temascaltepec se asienta en laderas fuertemente pronunciadas del Nevado por lo que su altitud varía entre los 1200 y los 3600 msnm; su clima es templado subhúmedo con lluvias en verano, con temperatura media anual entre 16 °C y 20 °C y una precipitación de 1100 mm a 1300 mm, lo que favorece el crecimiento de comunidades de bosque de encinos, pino, cedro, ocote y fresno (PMDUTNEM, 2009; PMDUTMEM, 2009).

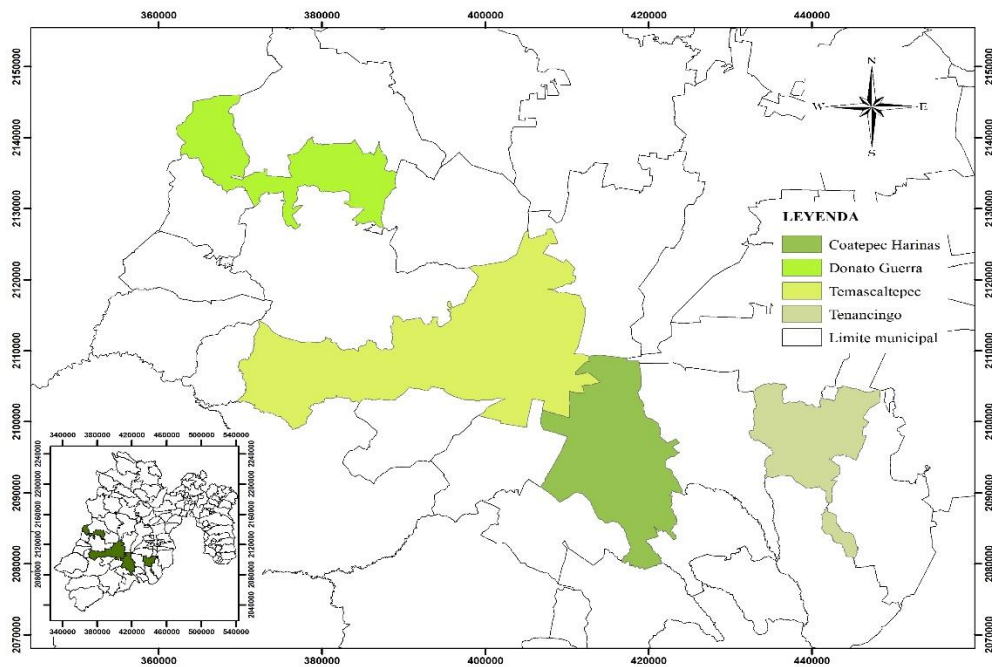


Figura 1. Área de estudio

Etapas de la investigación

Para esta investigación se desarrollaron tres etapas; la primera fue la integración de una base de datos geoespaciales en entorno de sistemas de información geográfica, la segunda la construcción de criterios de

análisis y ponderación de las variables territoriales, y la tercera el desarrollo y validación de un modelo de asignación de potencial para el cultivo de aguacate.

Integración de la base de datos geoespaciales

Se consultaron diferentes repositorios de información geográfica abierta, tales como: INEGI, CONABIO, y el Atlas de Riesgos Climatológicos del Estado de México. De ellos se extrajeron las capas: edafología, temperatura media anual, uso del suelo, precipitación media anual, curvas de nivel y límite estatal, así como cuatro imágenes obtenida por el sensor Sentinel 2 de la Agencia Espacial Europea (ESA) (cuadro 1).

Cuadro 1. Cartografía empleada en la elaboración de mapa de aptitud para el cultivo de aguacate.

Cobertura	Fuente	Escala
Clima	Atlas de riesgos climatológicos	1 : 250 000
Edafología	Atlas de riesgos climatológicos	1 : 250 000
Temperatura media anual	Atlas de riesgos climatológicos	1 : 250 000
Uso de suelo	Atlas de riesgos climatológicos	
Precipitación media anual	INEGI	1 : 250 000
Curvas de nivel	INEGI	1 : 250 000
MDE a partir de curvas de nivel	Elaboración propia a partir de curvas de nivel	1 : 250 000
Pendientes a partir de MDE	Elaboración propia a partir de MDE	1 : 250 000
Límite estatal	INEGI	1 : 250 000
Imágenes satelitales Sentinel 2	Agencia Espacial Europea (ESA)	10 m / píxel

Las cartas se unieron cuando fue necesario, y se re proyectaron al sistema de coordenadas UTM Zona 14 N con el datum WGS1984. Sus tablas de datos relacionados se re codificaron en función de los criterios de potencial, generando un nuevo campo de aptitud. Posteriormente se convirtieron al formato ráster.

Construcción de criterios de análisis y ponderación de las variables territoriales

Para el diseño del análisis para la selección de regiones con potencial óptimo y subóptimo se hizo un proceso de investigación de variables recomendadas por diferentes autores reconociendo la frecuencia y prioridad con que cada variable es considerada por un determinado autor (Cuadro 2 y 3). Posteriormente y considerando la valoración de Reyes (2012) se seleccionaron y categorizaron dichas variables

El Cuadro 2 resume las variables sugeridas en la literatura para diferentes variedades en diferentes regiones de América Latina, mostrando también los rangos que considera óptimos cada uno de los autores.

Cuadro 2. Variables consideradas por 10 autores para valorar el potencial de cultivo de aguacate

	EXP 1	EXP 2	EXP 3	EXP 4	EXP 5	EXP 6	EXP 7	EXP 8	EXP 9	EXP 10
Temperatura	De 10 a 35 °C Óptimo de 25 a 30°C	De 17 a 24°C Ideal 20°C	NA	De 5 a 19°C	Medias anuales de 17 a 19°C	De 17 a 24°C Ideal 20°C °T min 10-17°C °T max 28-33°C	De 14 a 24°C	De 18 a 25°C °T no inferiores a 17°C	De 15 a 22°C	Ideal de 14 a 24°C hasta 30°C °T min de -4°C
Raza	Raza Guatemalteca 22 a 25°C con mínima invernal no menor a 0°C °T mínimas no deberían llegar a -5°C									
Altitud	Raza Guatemalteca de 500 a 1000 m Raza Mexicana de 1000 a 2500 m	NA	Entre 800 y 2500m	Raza Guatemalteca de 800 a 2400m Raza Mexicana por encima de los 2000	Raza Guatemalteca de 800 a 2400m Raza Mexicana por encima de los 2400 a 2800 Hass de 1500 a 2500	NA	Mayores a 1000m	Hass de 1200 a 1800m Min de 1100m 2500m permiten adecuado desarrollo	De 1400 a 2200m	De 1200 a 2500m
Precipitación	Raza Guatemalteca de 1000 a 1500mm	De 1000 a 2000 mm	1200mm	De 665 a 2000mm	NA	De 1000 a 2000mm	Hass de 1200 a 1800 mm	No mayor a 1500mm	De 800 a 1600mm	Hass de 1200 a 1800mm En general de 1000 a 2000mm
Suelo	Franco Franco-arcillo-limoso Arenosos	Arcillosos Franco-arcillosos	Arcillosos Franco-arcillosos	NA	Textura ligera, profundos, bien drenados	Francos de consistencia media y ricos en materia orgánica	Andisoles Inceptisoles Aluviales Repsoles	Textura franca	Textura media	Arcilla roja Arena ceniza volcánica Calizos
Pendiente	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	De 0 a 25%	NA
Humedad ambiental	Relativamente alta	NA	NA	Se adapta a climas subhúmedos	Clima húmedo a subhúmedo con estaciones secas y lluviosas bien definidas	NA	Optima de 60 a 70%	No mayor a 65%	NA	De 75 a 80%
pH	De 6 a 7	De 5.5 a 7	De 5.5 a 7	NA	De 5.5 a 7	NA	De 5.5 a 7	De 5.5 a 7	NA	De 5.5 a 7
Viento	NA	NA	NA	No mayores a 20 km/hr	NA	NA	NA	NA	NA	NA

NA= No Aplica

El Cuadro 3 muestra la prioridad que cada experto otorgó a las variables por experto: se jerarquizaron las variables de acuerdo al número de variables que menciona el experto y al lugar en el que él mismo las menciona.

Cuadro 3. Prioridad de las variables consideradas por expertos en cultivo de aguacate.

Variable	EXP 1	EXP 2	EXP 3	EXP 4	EXP 5	EXP 6	EXP 7	EXP 8	EXP 9	EXP 10
Temperatura	4/7	1/4	NA	1/5	1/5	1/4	1/6	3/6	1/5	1/6
Altitud	1/7	NA	1/4	5/5	2/5	NA	6/6	5/6	3/5	4/6
Precipitación	2/7	2/4	2/4	3/5	NA	4/4	4/6	6/6	2/5	3/6
Suelo	5/7	3/4	3/4	NA	4/5	3/4	5/6	1/6	5/5	5/6
Pendiente	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	4/5	NA
Humedad ambiental	3-7	NA	NA	2-5	3-5	NA	3-6	4-6	NA	2-6
pH	6-7	4-4	4-4	NA	5-5	2-4	NA	2-6	NA	6-6
Viento	NA	NA	NA	4-4	NA	NA	NA	NA	NA	NA

Leyenda: Posición de la variable/Total de variables consideradas, NA= No aplica.

El Cuadro 4 jerarquiza las variables considerando la frecuencia con la que los expertos las consideran (NVE), se muestra también el valor de priorización propia (PPA), mismo que se define considerando las tablas anteriores y el juicio experto. Con ellas también se establecieron valores de peso (Peso %) para cada una de las variables incluidas en el modelo.

Cuadro 4. Frecuencia de variables e importancia.

	NVE	PPA	Peso (%)
Temperatura	9	1	20
Altitud	8	4	15
Precipitación	9	3	15
Suelo	9	2	20
Pendiente	1	7	10
Uso de suelo	0	5	20
Humedad ambiental	6	6	0
pH	7	8	0
Viento	1	9	0

Como resultado de contrastar estas interpretaciones con la interpretación de un experto, se llegó a la siguiente tabla de requerimientos agroecológicos para el aguacate Hass en el Estado de México (Cuadro 5).

Cuadro 5. Requerimientos agroecológicos del aguacate Hass.

FACTOR	Límite mínimo	Valor óptimo	Límite máximo
Temperatura	12 °C	12 °C – 22 °C	27 °C
Precipitación	850 mm	1000 mm – 1400 mm	1800 mm
Suelo	Vertisol	Andosol	Vertisol
Altitud	1200 msnm	1600 msnm– 2200 msnm	2400 msnm
Pendiente	1 %	5 % – 10 %	20 %

Fuente: Reyes (2012) y Anguiano et al. (2007).

Esta tabla considera que el cultivo de aguacate presenta un comportamiento fenológico característico, donde las fases de floración, formación, madurez del fruto, brotación vegetativa y dormancia se traslapan, se acortan o prolongan por las condiciones climáticas, el manejo y la alta variabilidad genética (Téliz et al., 2000). Lo que hace esencial conocer y considerar las condiciones agroecológicas para su correcto establecimiento y manejo.

Integración y validación de un modelo de asignación de potencial para el cultivo de aguacate.

Se desarrolló una sobreposición ponderada (Weighted overlay) en ArcGis™ integrando los valores de aptitud de cada una de las variables mencionadas y recodificadas conforme al Cuadro 5, restringiendo aquellas áreas que desea excluir del análisis y ponderando cada capa de entrada según su peso de influencia definido en el Cuadro 4, este peso se expresa en porcentaje y la suma de los pesos porcentuales de influencia de todas las variables es 100.

Al modelo resultante se le aplicó una máscara que excluye las zonas de alta reflectancia como suelo urbano; viveros cubiertos con plástico y regiones de roca expuesta, ya que en estas zonas se asume la imposibilidad de implantar exitosamente el cultivo de aguacate. Esta máscara se derivó de las siguientes escenas del sensor Sentinel 2B: S2B_MSIL1C_20171128T170639_N0206_R069_T14QMG_20171128T221610, S2B_MSIL1C_20171128T170639_N0206_R069_T14QLG_20171128T221610, S2B_MSIL1C_20171128T170639_N0206_R069_T14QLF_20171128T221610 y S2B_MSIL1C_20171128T170639_N0206_R069_T14QMF_20171128T221610 correspondientes al 7 de mayo de 2017. Estas fueron sub muestreadas para extraer únicamente las bandas 2, 3, 4, 8, 11 y 12 que son compatibles con aquellas regiones que abarca Landsat ETM, para poder posteriormente calcular la transformación Tasseled Cap (Kauth y Thomas, 1976). Esta transformación sintetiza los valores de las bandas de la imagen generando tres nuevas bandas de información mediante la multiplicación por factores definidos, las cuales muestran el brillo, el verdor y la humedad en la imagen. Posteriormente se reclasificó la banda 1 (correspondiente a brillo) mediante el método de clasificación no supervisada isodata clasificación en el software Envi. Esto permitió extraer los píxeles altamente reflectantes. Se restó esta superficie al modelo de aptitud para quitar estas regiones imposibilitadas para el cultivo (Figura 1).

Método Weighted overlay

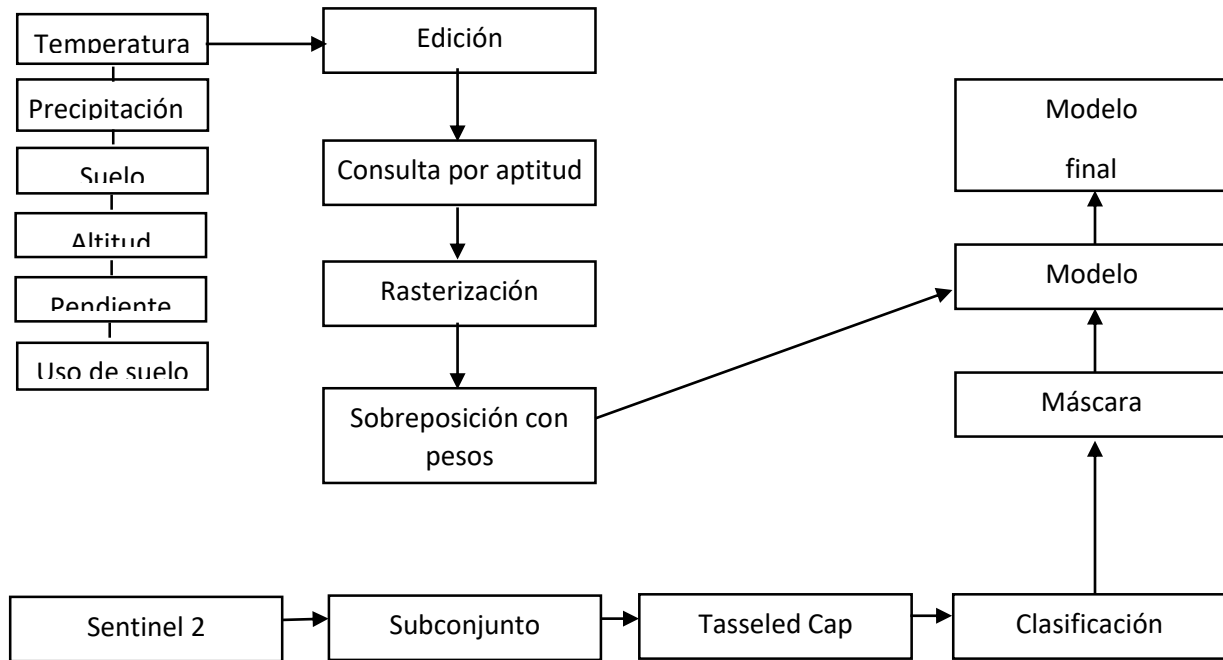


Figura 1. Diagrama de proceso weighted overlay para mapa de aptitud.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El resultado del mapa de aptitud indica que del porcentaje total del área de estudio solo el 7.93 % (120,262.91 ha) tiene aptitud óptima para el establecimiento del cultivo de aguacate, mientras que el 83.34 % (100,237.27 ha) tiene aptitud subóptima y el 8.71 % (10,481.82 ha) no cuenta con las condiciones para este cultivo. Así mismo, muestra que Coatepec Harinas es el municipio con mayor superficie con aptitud óptima para el establecimiento de este cultivo con el 4.17 % (3,261.20 ha), seguido de Temascaltepec con el 7.25 % (2,973.83 ha), Donato Guerra con 11.19 % (2124.41 ha) y Tenancingo con 7.25 % (1184.33 ha).

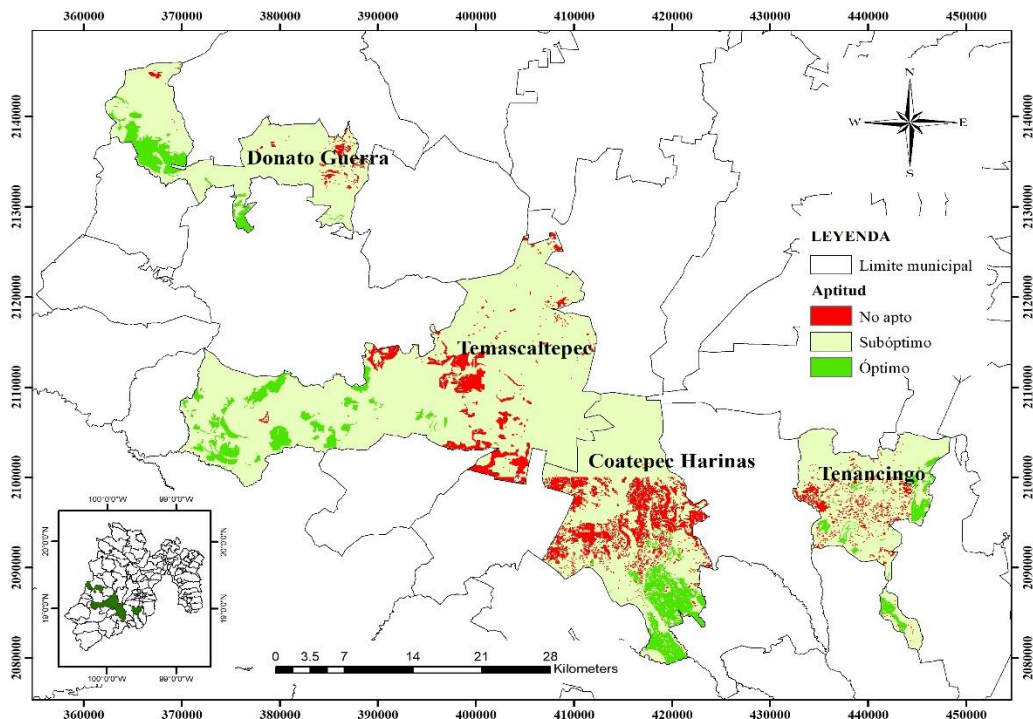


Figura 2. Mapa de aptitud para el cultivo de aguacate.

En el mapa de aptitud con sobreposición de puntos de cultivo de aguacate (Figura 3) se observa que la tendencia de áreas con potencial para el cultivo se encuentra hacia el sur de los municipios, mostrando que, en Donato Guerra las plantaciones actuales se desarrollan en áreas con alto potencial, en contraste con las actuales plantaciones en los municipios de Temascaltepec, Coatepec Harinas y Tenancingo que se encuentran en áreas con aptitud subóptima y no apta, es decir, el establecimiento no se ha basado en los análisis necesarios para determinar el potencial territorial, realizando una propagación del mismo sin contemplar las necesidades de la especie, comprometiendo los resultados de adaptación y rendimiento del cultivo.

Se observa que las zonas no aptas se encuentran distribuidas en el centro de Temascaltepec y Coatepec Harinas, en Donato Guerra al noreste del municipio y en Tenancingo del centro al noreste, por lo que se

infiere que el alto potencial de los diferentes municipios del estado de México no indica que la totalidad de la superficie cuente con las condiciones adecuadas para el establecimiento del cultivo de aguacate.

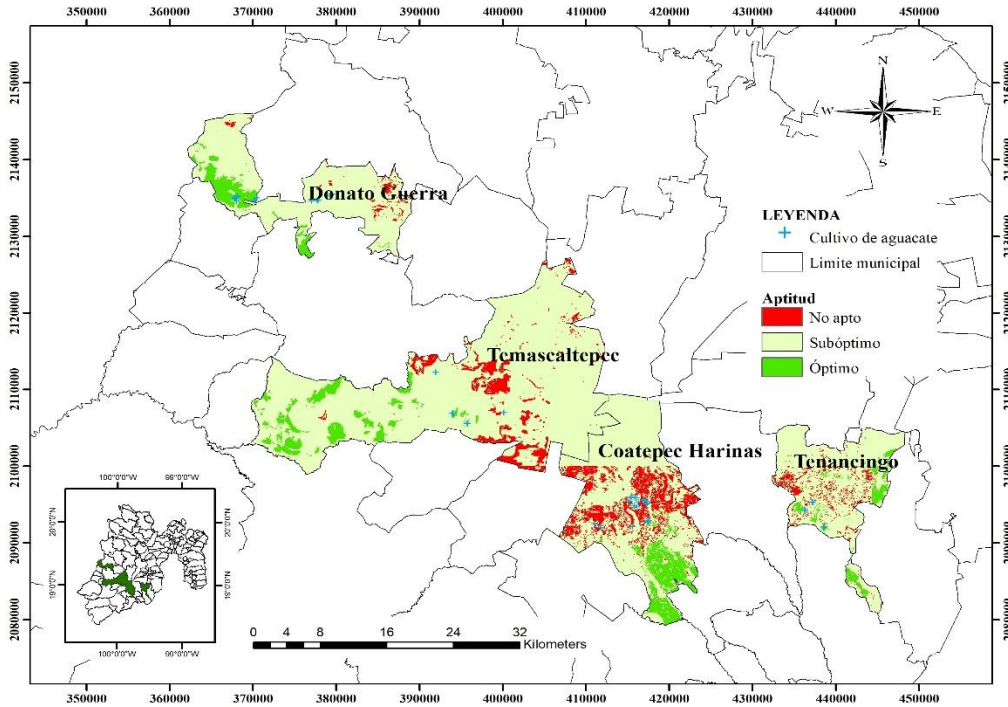


Figura 3. Mapa de aptitud con sobreposición de puntos de cultivo de aguacate.

En Donato Guerra las localidades en zonas con alto potencial para el cultivo se encuentran al suroeste del municipio y son 8 en total, mientras que en Temascaltepec las localidades con condiciones óptimas son 14 y están ubicadas en el suroeste, en Coatepec Harinas 11 localidades ubicadas al sur y en Tenancingo 7 localidades al sur este. Estos resultados coinciden con los reportados por INIFAP (2012b), INIFAP (2012) y Santos y Franco (2013), quienes mencionan que los Distritos de Desarrollo Rural (DDR): Coatepec Harinas, Valle de Bravo y Tejupilco tienen como Centro de Atención para el Desarrollo Rural (CADER) a estas localidades con potenciales para el cultivo de aguacate.

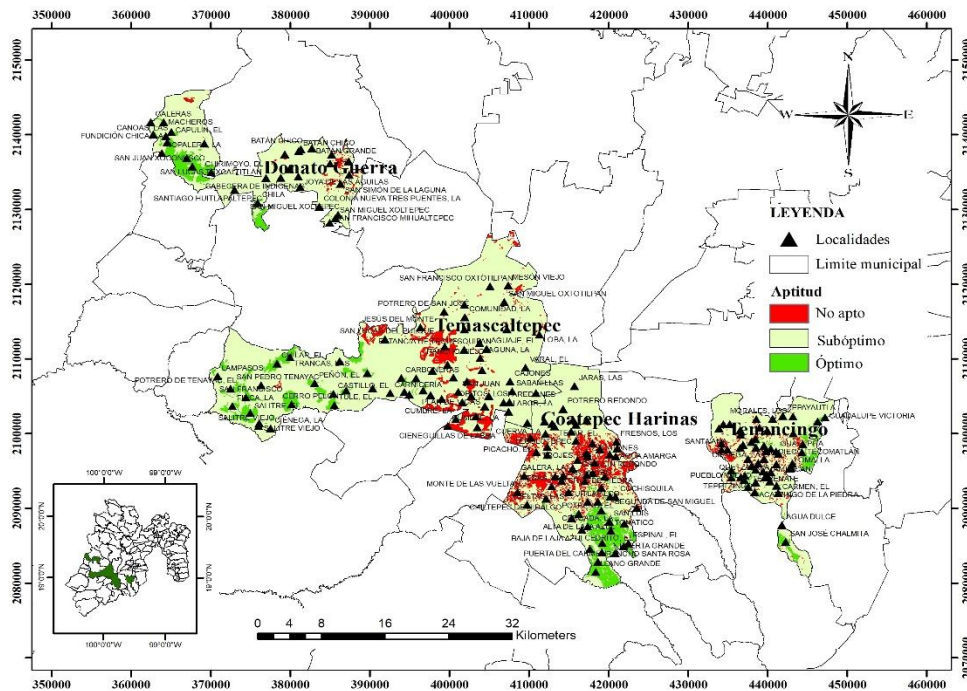


Figura 4. Mapa de aptitud con sobreposición de localidades.

Cuadro 6. Localidades con alto potencial para el establecimiento de aguacate.

Municipio	Localidades ubicadas en zonas con alto potencial para cultivar aguacate
Coatepec Harinas	Llano grande, Puerta del Carmen, Rancho Santa rosa, Puerta Grande, Meyuca de Morelos, El Cerrito, El Espinal, Tonicato, La Cerrada, El Potrero, Alta de Laja Azul
Temascaltepec	El Chilar, Lampasos, El Peñón, El Crucero Telpintla, Cerro Pelón, El Tule, El Castillo, El Potero de Tenayac, San Francisco, La Finca, El Salitre, El Salitre Viejo, San Francisco la Alborrada, Rincón de Tequisquiapan
Donato Guerra	Chila, Santiago Huitlapaltepec, Chirimoyo, San Juan Xoconusco, La Fundición Chica, El Capulin, Macheros, Las Canoas

CONCLUSIONES

Sólo el 7.93 % del área de estudio cuenta con aptitud óptima para el establecimiento del cultivo de aguacate.

El 83.34 % del área de estudio cuenta con áreas subóptimas para este cultivo.

El 8.71 % del área de estudio no es apto para el cultivo de aguacate.

Coatepec Harinas es el municipio con mayor superficie con aptitud óptima para el establecimiento de futuras plantaciones de aguacate con 4.17 % (3,261.20 ha).

Las localidades con mayor potencial en Coatepec Harinas son: Llano grande, Puerta del Carmen, Rancho Santa rosa, Puerta Grande, Meyuca de Morelos, El Cerrito, El Espinal, Tonicico, La Cerrada, El Potrero, Alta de Laja Azul.

Temascaltepec tiene 2,973.83 ha con aptitud óptima para el establecimiento de aguacate.

La mayoría de las plantaciones establecidas en el área de estudio no se encuentran en áreas con características óptimas para el cultivo de aguacate.

El alto potencial de los diferentes municipios del estado de México no indica que la totalidad de la superficie cuente con las condiciones adecuadas para el establecimiento del cultivo de aguacate.

BIBLIOGRAFÍA

Anguiano, C. J., Alcantar, B. R., Toledo, L. M y Vidales, F. J. A. 2007. Caracterización edafoclimática del área productora de aguacate en Michoacán, México. Revista Chapingo serie horticultura. 5:151- 154.

Atlas de Riesgos Ante el Cambio Climático en el Estado de México. 2019. Consulta 10 de febrero de 2019 en http://ieecc.edomex.gob.mx/altas_riesgos

Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). 2019. Portal de geoinformación. Consulta 05 de febrero de 2019 en <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>

El Financiero. 2019. Edomex buscará tener primera planta certificada de aguacate. Consultado el 20-02-2019 en <https://www.elfinanciero.com.mx/nacional/edomex-buscará-tener-primera-planta-certificada-de-aguacate>.

European Space Agency (ESA). 2017. El programa copérnico. Consulta 01 de noviembre de 2017 en http://www.esa.int/esl/ESA_in_your_country/Spain/El_programa_Copernico.

INFORURAL. 2012. Producción de aguacate tendrá un crecimiento importante. 17 de enero de 2012.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). 2019. Biblioteca digital de mapas. Consulta 02 de febrero de 2019 en <https://www.inegi.org.mx/app/mapas/default.html?t=0150001000000000&ag=21>

Instituto Nacional de Investigaciones forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). 2012. Determinación del potencial productivo en cultivos prioritarios en el Estado de México. Junio de 2012. Zinacantepec, Estado de México.

Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). 2012b. Determinación del potencial productivo en cultivos prioritarios en el Estado de México. Zinacantepec, México. Consulta 15 de mayo de 2019 en <http://www.inifap.gob.mx/circe/publicaciones/erasto.pdf>

Kauth, R. J., & Thomas, G. S. 1976. The Tasselled-Cap A Graphic Description of the Spectral-Temporal Development of Agricultural Crops as Seen by Landsat.

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). 1997. Zonificación agro-ecológica. Guía general. Roma, Italia.

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). 1978. Report on the Agro-Ecological Zones Project. Vol. 1. Methodology and Results for Africa. Rome, FAO.

Plan Municipal de Desarrollo Urbano de Coatepec Harinas, Estado de México. (2009). Datos Estadísticos proporcionados por el DDR 078 Coatepec Harinas, Consultado 20-02-2017 en [http://seduv.edomexico.gob.mx/planes_municipales/Coatepec de harinas](http://seduv.edomexico.gob.mx/planes_municipales/Coatepec%20de%20harinas).

Plan Municipal de Desarrollo Urbano de Donato Guerra, Estado de México. (2009). Datos Estadísticos proporcionados por el DDR 078 Donato Guerra, Consultado 20-02-2017 en [http://seduv.edomexico.gob.mx/planes_municipales/Donato guerra](http://seduv.edomexico.gob.mx/planes_municipales/Donato%20guerra).

Plan Municipal de Desarrollo Urbano de Temascaltepec, Estado de México. (2009). Datos Estadísticos proporcionados por el DDR 078 Donato Guerra. Consultado 22-02-2017 en [http://seduv.edomexico.gob.mx/ planes_municipales/Temascaltepec](http://seduv.edomexico.gob.mx/planes_municipales/Temascaltepec).

Plan Municipal de Desarrollo Urbano de Tenancingo, Estado de México. (2009). Datos Estadísticos proporcionados por el DDR 078 Coatepec de Harinas. Consultado 22-02-2017 en [http://seduv.edomexico.gob.mx/ planes_municipales/Tenancingo](http://seduv.edomexico.gob.mx/planes_municipales/Tenancingo).

Reyes Alemán, J.C. 2012. Establecimiento y manejo de plantaciones de aguacate. Día del aguacatero, abril 2012, Coatepec Harinas.

Reyes, A. J. C., Monteagudo, R. O., Valdez, P. M. E., Mejía, C. J., Espíndola, B. M y Urbina, S. E. 2017. Modelo fenológico para el aguacate “hass” en el Estado de México. Memorias del V congreso latinoamericano del aguacate. septiembre de 2017. Jalisco. México. i. e. 302-308 pp.

Ruiz et al. 1995. Determinación del potencial productivo de la Costa de Jalisco. Estudio Piloto. Informe de Investigación. SAGAR-INIFAP-C. E. Centro de Jalisco.

Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. (SIAP). 2019. Consultado: 15-03-2019 en <http://www.siap.gob.mx/>

Téliz, D. 2000. El aguacate y su manejo integrado. Ed. Mundiprensa. México. 219 p

A continuación, se presenta el manuscrito original enviado a la Revista Chapingo Serie Horticultura, adecuado a la guía de autores de la misma, incluyendo figuras y tablas en el apartado de anexos que se encuentra al final del manuscrito; los resultados que se incluyeron en este artículo pertenecen al procesamiento de las imágenes Sentinel para los municipios de Coatepec Harinas y Donato Guerra.

Manuscript Number:	
Full Title:	Cartografía de cultivos de aguacate en el sur del Estado de México mediante tratamiento digital mixto de imágenes Sentinel-2
Article Type:	Artículo Científico / Scientific Article
Section/Category:	Otras temas hortícolas
Keywords:	Aguacate (<i>Persea americana</i> Mill.); índices de vegetación; Sentinel-2; SID, SAM
Corresponding Author:	José Francisco Ramírez Dávila, Profesor investigador Universidad Autonoma del Estado de Mexico Facultad de Ciencias Agricolas Toluca, Estado de México MEXICO
Corresponding Author Secondary Information:	
Corresponding Author's Institution:	Universidad Autonoma del Estado de Mexico Facultad de Ciencias Agricolas
Corresponding Author's Secondary Institution:	
First Author:	Dulce Karen Figueroa Figueroa, MAEG
First Author Secondary Information:	
Order of Authors:	Dulce Karen Figueroa Figueroa, MAEG
	José Francisco Ramírez Dávila, Doctor
	Xanat Antonio Némiga, Doctora
	Andrés González Huerta, Doctor
Order of Authors Secondary Information:	

Abstract:

El cultivo de aguacate es uno de los más importantes en México, entre los estados con mayor producción se encuentra el Estado de México, que es el tercer estado productor a nivel nacional. Coatepec Harinas y Donato Guerra son dos de sus municipios más representativos en lo respectivo a esta actividad sin embargo, no existe un censo que especifique la superficie del cultivo, por lo que el objetivo de esta investigación fue probar métodos de índices de vegetación, algoritmos Spectral Angle Mapper (SAM) y Spectral Information Divergence (SID) y la combinación de estos en las imágenes de acceso libre del sensor Sentinel-2 para evaluar su desempeño en la identificación de áreas plantadas con el cultivo de aguacate. Los resultados se validaron con una matriz de confusión y la comparación de los datos de referencia de entrenamiento y validación. El algoritmo SID alcanzó una precisión de 97.5 % para detectar aguacate, mientras que el tratamiento SAM obtuvo una precisión de 63.1 %. La combinación de SID con el índice ARI1 (Anthocyanin Reflectance Index 1), proporcionó un mejor resultado sobre la cartografía de validación regional con un 85 % de precisión. Otras combinaciones de índices y tratamientos dieron resultados inferiores al 50 % de la precisión por lo que no se recomiendan. Esta metodología podría ser probada para la detección de otros cultivos de interés comercial, dado que Sentinel-2 muestra ser una alternativa viable para este tipo de estudios, teniendo una buena resolución espectral, además de ser de fácil acceso y manipulación.

Revista Chapingo Serie Horticultura
Cartografía de cultivos de aguacate en el sur del Estado de México
mediante tratamiento digital mixto de imágenes Sentinel-2
--Manuscript Draft--

Manuscrito

Powered by Editorial Manager® and ProduXion Manager® from Aries Systems Corporation

[Click here to access/download;Manuscrito / Manuscript;renamed_102f8.docx](#)

Cartografía de cultivos de aguacate en el sur del Estado de México mediante tratamiento digital mixto de imágenes Sentinel-2

Cartography of avocado crops in the south of the State of Mexico through digital mixed image processing Sentinel-2

Dulce Karen Figueroa-Figueroa¹, José Francisco Ramírez-Dávila^{2*}, Xanat Antonio-Némiga³, Andrés González-Huerta²

¹ Estudiante Programa de Doctorado en Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales, Facultad de Ciencias Agrícolas, Universidad Autónoma del Estado de México. Carretera Toluca - Ixtlahuaca Kilómetro 15.5, El Cerrillo Piedras Blancas, Toluca Estado de México, México, C.P. 50295.

² Facultad de Ciencias Agrícolas, Universidad Autónoma del Estado de México. Carretera Toluca - Ixtlahuaca Kilómetro 15.5, El Cerrillo Piedras Blancas, Toluca Estado de México, México, C.P. 50295.

³ Facultad de Geografía, Universidad Autónoma del Estado de México. Cerro Coatepec s/n Ciudad Universitaria, Toluca Estado de México, México, C.P. 50110.

* **(Autor de correspondencia) correo electrónico: jframirezd@uaemex.mx**, número telefónico: (722) 29 65 5313. Ext: 139.

Highlights

Importancia económica del aguacate y el incremento de este cultivo en el Estado de México.

Sentinel-2, imágenes gratuitas con alto potencial para la identificación del cultivo de aguacate.

Propuesta de métodos mixtos para la identificación del cultivo de aguacate.

Potencial del algoritmo SID y el índice Anthocyanine 1 para detectar aguacate.

RESUMEN

El cultivo de aguacate es uno de los más importantes en México, entre los estados con mayor producción se encuentra el Estado de México, que es el tercer estado productor a nivel nacional. Coatepec Harinas y Donato Guerra son dos de sus municipios más representativos en lo respectivo a esta actividad sin embargo, no existe un censo que especifique la superficie del cultivo, por lo que el objetivo de esta investigación fue probar métodos de índices de vegetación, algoritmos Spectral Angle Mapper (SAM) y Spectral Information Divergence (SID) y la combinación de estos en las imágenes de acceso libre del sensor Sentinel-2 para evaluar su desempeño en la identificación de áreas plantadas con el cultivo de aguacate. Los resultados se validaron con una matriz de confusión y la comparación de los datos de referencia de entrenamiento y validación. El algoritmo SID alcanzó una precisión de 97.5 % para detectar aguacate, mientras que el tratamiento SAM obtuvo una precisión de 63.1 %. La combinación de SID con el índice ARI1 (Anthocyanin Reflectance Index 1), proporcionó un mejor resultado sobre la cartografía de validación regional con un 85 % de precisión. Otras combinaciones de índices y tratamientos dieron resultados inferiores al 50 % de la precisión por lo que no se recomiendan. Esta metodología podría ser probada para la detección de otros cultivos de interés comercial, dado que Sentinel-2 muestra ser una alternativa viable para este tipo de estudios, teniendo una buena resolución espectral, además de ser de fácil acceso y manipulación.

PALABRAS CLAVE: Aguacate (*Persea americana* Mill.); índices de vegetación; Sentinel-2; SID, SAM.

ABSTRACT

The avocado crop is one of the most important in Mexico, among the states with the highest production is the State of Mexico, which is the third state producer nationwide. Coatepec Harinas and Donato Guerra are two of their most representative municipalities in this activity, however, there is no census that specifies the area of the crop, so the objective of this research was to test methods of vegetation indexes, Spectral algorithms Angle Mapper (SAM) and Spectral Information Divergence (SID) and the combination of

these in the free access images of the Sentinel-2 sensor to evaluate their performance in the identification of planted areas with avocado cultivation. The results were validated with a confusion matrix and comparison of training and validation reference data. The SID algorithm reached an accuracy of 97.5% to detect avocado, while the SAM treatment obtained an accuracy of 63.1%. The combination of SID with the ARI1 index (Anthocyanin Reflectance Index 1), provided a better result on regional validation mapping with 85% accuracy. Other combinations of indexes and treatments gave results below 50% accuracy, so they are not recommended. This methodology could be tested for the detection of other crops of commercial interest, since Sentinel-2 shows to be a viable alternative for this type of studies, having a good spectral resolution, as well as being easily accessible and manipulated.

Key words: Avocado (*Persea americana* Mill.); vegetation indices; Sentinel-2; SID, SAM.

1. INTRODUCCIÓN

México es el principal productor de aguacate en el mundo, con una producción promedio anual de 1, 644, 000 ton, en 220, 334 ha (SIAP, 2018), la entidad líder en producción nacional sigue siendo Michoacán. En segundo y tercer lugar respectivamente, se encuentran Jalisco y el Estado de México, aunque con volúmenes de producción del fruto significativamente menores. El Estado de México contribuye con grandes superficies de plantaciones de aguacate, las cuales se distribuyen en diferentes municipios al sur del estado: Coatepec Harinas 4291.95 ha, Tenancingo 1305 ha, Temascaltepec 4017.50 ha, Donato Guerra 1477.66 ha y Villa Guerrero 1321 ha (SIAP, 2018).

Actualmente, el aguacate Hass absorbió la producción, ya que del total de hectáreas que se dedican a la siembra de aguacate en el Estado de México, entre el 90 y el 95 % están destinadas a esta fruta (Sangerman et al., 2014). Este cultivo ha originado cambios profundos en la cultura agrícola de la región, ya que áreas anteriormente sembradas con maíz fueron ocupadas paulatinamente por huertos de aguacate, así mismo, ha traído una serie de consecuencias en los pueblos y comunidades de la región, como el aumento del ingreso económico, el crecimiento de una serie de

servicios asociados, tales como el establecimiento de empresas distribuidoras de agroquímicos, servicios de irrigación y de asesoría agronómica y la creación de fuentes de empleo para los locales (Chávez, 2012).

Resulta justificable que el incremento de este cultivo genere interés, sin embargo, es primordial conocer la manera en que se desarrolla y distribuye la producción en el Estado de México (Rubí et al., 2013), ya que estos conocimientos facilitarían la aplicación de acciones y decisiones de política agraria relacionadas con los pagos de subsidios o la implementación de medidas agroambientales.

La importancia del impacto económico que tiene el cultivo de aguacate en el Estado de México, así como el diagnóstico de la superficie que ocupa para una gestión eficiente y sostenible, hace del uso de los métodos de teledetección una opción viable gracias a su potencial en la identificación de cultivos agrícolas y forestales específicos, por lo que Sentinel-2 es particularmente atractivo, debido a su libre disponibilidad, con resolución espacial relativamente alta, así como bandas posicionadas estratégicamente, útiles para muchas aplicaciones que incluyen caracterización y cartografía de la vegetación (Chemura et al., 2018), así como llevar a cabo el seguimiento de una serie de cambios de uso de suelo y vegetación, por lo que el satélite es de interés para cultivos (ESA, 2017).

Los índices de vegetación son uno de los fundamentos de la teledetección, que reside en una respuesta diferente de las distintas superficies a las diferentes longitudes de onda del espectro electromagnético (Pérez, 2017). Cada tipo de vegetación responde de diferente forma (Chuvieco, 2007), se cumplen parámetros generales, dados por una baja reflectividad en el visible, alta en el infrarrojo cercano (NIR) y baja con presencia de algunos picos en el infrarrojo de onda corta (SWIR) (Chuvieco, 2008). En concreto, la baja reflectividad en el visible se debe al efecto absorbente de los pigmentos de la hoja (clorofilas, xantofilas y carotenos) (Gates et al., 1965). La elevada reflectividad en el NIR responde a la baja absorción de las clorofilas y a la estructura celular interna de la hoja a partir de 1,4 μm , el efecto absorbente del agua es muy fuerte, por lo que se reduce la reflectividad drásticamente en el SWIR (Chuvieco, 2008).

Estos índices de vegetación consisten en la abstracción o síntesis de los valores de las bandas de la imagen a una sola banda mediante operaciones aritméticas, el resultado

es ajustado normalmente a una escala de 0 a 1, pero puede variar (Chemura et al., 2016). Debido a las características de Sentinel-2 y la importancia económica del cultivo de aguacate y su distribución, el objetivo de esta investigación fue probar métodos de índices de vegetación, algoritmos Spectral Angle Mapper (SAM) y Spectral Information Divergence (SID) y la combinación de estos en las imágenes de acceso libre del sensor Sentinel-2 para evaluar su desempeño en la identificación de áreas plantadas con el cultivo de aguacate. Se considera de gran valor contar con información detallada de la distribución y superficie de este cultivo para mostrar a los interesados información más cercana a la realidad y así plantear estrategias de gestión más eficaces.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Se aplicaron los métodos de índices de vegetación, algoritmos SAM y SID y la combinación de estos últimos con los índices de vegetación en las imágenes de acceso libre del sensor Sentinel-2 de mayo de 2017, re-muestreadas a una resolución espacial de 10 m, libre de nubes y a un nivel de procesamiento 1C, es decir, en valores de reflectancia en el Tope de la Atmósfera (TOA). Para la identificación del cultivo de interés, se hizo uso de una metodología de tratamiento de la imagen, obteniendo un resultado individual del análisis espectral de la firma del aguacate con los algoritmos spectral angle mapper (SAM) y spectral information divergence (SID), el uso de índices de vegetación y la combinación de los algoritmos con los índices de vegetación.

2.1. Área de estudio

El estudio se realizó en dos municipios del sur del Estado de México (Figura 1):

Coatepec Harinas: ubicado entre los paralelos 18°48'08" y 19°04'43" latitud norte y 99°42'56" y 99°53'34" longitud oeste del meridiano, con una altitud de 2260 msnm. Su clima es templado, subhúmedo con lluvias en verano e invierno. La temperatura máxima es de 39 °C y la mínima de 2 °C, con una temperatura media anual de 18.8 °C y una precipitación promedio anual de 1,242.53 mm.

Donato Guerra: ubicado entre los paralelos 19°24'07" de latitud norte; 100°19'13" de longitud oeste del meridiano; altitud entre 2200 y 3040 m. De clima templado

subhúmedo con lluvias en verano, con una temperatura promedio de 22 °C, una máxima de 28 °C en los meses de abril, mayo y junio y una mínima de 16 °C en los meses de diciembre y enero. La precipitación promedio se establece en 1 000 mm con lluvias en verano (PMDUCHEM, 2009; PMDUDGEM, 2009).

2.2 Datos de campo

Se aplicaron dos conjuntos de datos de referencia, uno para entrenamiento y otro para validación. Los datos de campo para el proceso de entrenamiento se obtuvieron el 18 de mayo de 2017 con un GPS Garmin® digital portátil, logrando precisiones entre tres y cinco metros, los cuales consistieron en 130 puntos de datos de campo georreferenciados para el cultivo de aguacate, distribuidos aleatoriamente en el área de estudio. Respecto al conjunto de datos para validación, se georreferenciaron 120 puntos con otro GPS Garmin® portátil, en áreas de cada municipio totalmente alejadas de los primeros puntos de muestreo (entrenamiento), por lo que cabe mencionar que este conjunto de datos es totalmente independiente del primer conjunto de datos y no fue utilizado para entrenamiento de la imagen Sentinel-2.

3. Adquisición de imágenes y preprocesamiento

Los datos de Sentinel-2 se descargaron del servidor de la agencia espacial europea (ESA) disponible en: (<https://scihub.copernicus.eu/dhus/>: visitada el 06 de junio de 2017) con el nombre de escena:

S2B_MSIL1C_20171128T170639_N0206_R069_T14QMG_20171128T221610,
S2B_MSIL1C_20171128T170639_N0206_R069_T14QLG_20171128T221610 y
S2B_MSIL1C_20171128T170639_N0206_R069_T14QMF_20171128T221610

correspondientes al 7 de mayo de 2017, fecha en la que se obtuvieron imágenes libres de nubes.

Las imágenes fueron re-muestreadas a una resolución espacial de 10 m con el software libre SNAP 5.0 desarrollado y distribuido por la ESA (Agencia Espacial Europea). La imagen se calibró radiométricamente mediante el método de FLAT FIELD CALIBRATION, se marcó un área de interés ROI (Region of Interest) haciendo uso del techo plastificado de los invernaderos como referencia, debido a que emiten una

respuesta alta y homogénea, y se agregó la longitud promedio de onda de cada banda con el software ENVI 4.7 (Cuadro 1).

Cuadro 1.

Resolución de bandas Sentinel 2.

SENTINEL 2				
Banda	Sensor	Región espectral	Resolución espacial (m)	Longitud de onda promedio (μm)
1		0.43-0.45	60	0.44
2		0.45-0.52	10	0.48
3		0.54-0.57	10	0.55
4		0.65-0.68	10	0.66
5	MSI	0.69-0.71	20	0.7
6		0.73-0.74	20	0.73
7		0.77-0.79	20	0.78
8		0.78-0.90	10	0.84
9		0.85-0.87	20	0.86
10		0.93-0.95	60	0.94
11		1.36-1.39	60	1.37
12		1.56-1.65	20	1.60
13		2.10-2.28	20	2.19

Fuente: esa Sentinel (<http://sentinel.esa.int>).

4. Procesamiento de la imagen Sentinel-2

La imagen fue procesada mediante dos estrategias: el uso del clasificador spectral angle mapper (SAM) y spectral information divergence (SID) y el desarrollo de consultas lógicas en los índices de vegetación. El diagrama de la Figura 2, muestra el proceso del método combinado aplicado a la imagen Sentinel-2 MSI para obtener los sitios con cultivo de aguacate en la zona de estudio. Se obtuvo la curva espectral típica del cultivo de aguacate y de las librerías excluidas se excluyó la vegetación de laurel,

cordillera de jaspe, madroño y dos variedades de roble con lo cual se obtuvo la firma espectral (Figura 3).

Estas firmas espectrales se guardaron como referencia y se emplearon para clasificar la imagen considerando el algoritmo SAM y SID. Se generaron reglas de confiabilidad con las firmas espectrales obtenidas del cultivo de aguacate de acuerdo a su clasificación y se llevaron a cabo pruebas para visualizar cual generaba un resultado más claro.

Respecto al ángulo elegido para SAM y SID, el cual produce una imagen clasificada basada en el umbral de ángulo máximo de este, se probaron los ángulos máximos de 0.100, 0.075, 0.050 y 0.025.

Se realizó una clasificación de plantaciones encontradas en campo de acuerdo a la reportada por Rubí et al. (2013) árboles de 1 a 3 años (Figura 4), 3 a 6 años de edad (Figura 5) y la tercera de más de 6 años en adelante (Figura 6). Se obtuvo la curva del comportamiento de cada clasificación de las plantaciones, con la finalidad de aplicar cada uno de los algoritmos e índices de vegetación de acuerdo al tipo de plantaciones presentes en el área de estudio de las cuales se eligieron solo diez árboles que presentaron la curva típica de comportamiento de cada uno de los patrones espaciales correspondientes a plantaciones.

Para la identificación de áreas con cultivo de aguacate se aplicó a los algoritmos SAM y SID los diferentes valores de ángulo máximo (radianes) considerado (Cuadro 2).

Cuadro 2.

Algoritmo y ángulo aplicado.

Algoritmo	Lugar y Tipo de plantación	Angulo Máximo
SAM	Coatepec plantaciones de 1 a 3 años	0.100
SID	Coatepec plantaciones de 3 a 6 años	0.075
	Coatepec plantaciones de más de 6 años	0.050
		0.025

SAM	Donato plantaciones de 1 a 3 años	0.100
SID	Donato plantaciones de 3 a 6 años	0.075
	Donato plantaciones de más de 6 años	0.050
		0.025

2.5 Índices de vegetación

Con el software Envi 4.7 se obtuvieron cuatro índices de vegetación: Anthocyanin Reflectance Index 1 (ARI1), Anthocyanin Reflectance Index 2 (ARI2), Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) y Simple Ratio Index (SR) (Cuadro 3).

Cuadro 3.

Índices de vegetación calculados y relación de bandas “B” empleadas.

Índice	Abreviatura	Bandas Sentinel-2	Autor
Anthocyanin Reflectance Index 1	ARI1	$ARI1 = \frac{1}{B3} - \frac{1}{B5}$	
Anthocyanin Reflectance Index 2	ARI2	$ARI2 = \frac{B8}{B2} - \frac{B8}{B3}$	(Sentinel Hub, 2017)
Normalized Difference Vegetation Index	NDVI	$NDVI = \frac{B8 - B4}{B8 + B4}$	
Simple Ratio Index	SR	$SR = \frac{B8}{B4}$	

En el software ArcGis 10.2.2, se analizaron los valores mínimo, medio y máximo de estos índices en sitios con y sin aguacate. Habiendo entendido los valores característicos del aguacate, se construyeron consultas lógicas para extraer esos valores de los índices, con los criterios que a continuación se despliegan (Cuadro 4):

Cuadro 4.

Valor de la condicional aplicada a cada uno de los índices

Índice	Lugar y Tipo de plantación	Consulta condicional aplicada
ARI1	Coatepec de 1 a 3 años	Value > 0.20 Value < 1.45
	Coatepec de más de 6 años	Value >= 0.39
	Donato de 3 a 6 años	Value >= 0.30 Value <= 1.45
ARI2	Coatepec de 1 a 3 años	Value >= 0.35 Value <= 0.82
	Donato de 3 a 6 años	Value >= 0.34 Value <= 0.95
	Donato de más de 6 años	Value > 0.07 Value < 0.65
NDVI	Coatepec de 3 a 6 años	Value >= 0.50 and Value <= 0.73
	Donato de más de 6 años	Value > 0.40 and Value < 0.65
SR	Donato de más de 6 años	Value >= 2.45
Combinaciones		
SAM + ARI1	Coatepec de 3 a 6 años	Value >= 0.025 and Value <= 0.65-1.35
SAM + NDVI	Coatepec de 3 a 6 años	Value >= 0.100 and Value <= 0.50 – 0.73
SID + ARI1	Coatepec de 1 a 3 años	Value >= 0.050 and Value <= 0.20 – 0.145
SID + ARI1	Donato de 3 a 6 años	Value >= 0.100 and Value <= 0.30 – 0.145
SID + ARI 2	Donato de 3 a 6 años	Value >= 0.100 and Value <= 0.34 – 0.95
SID + NDVI	Coatepec de 3 a 6 años	Value >= 0.050 and Value <= 0.50 – 0.73
	Coatepec de 3 a 6 años	Value >= 0.075 and Value <= 0.50 – 0.73
	Coatepec de 3 a 6 años	Value >= 0.100 and Value <= 0.50 – 0.73
SID + SR	Donato de 3 a 6 años	Value >= 0.100 and Value <= 2.45
	Donato de 3 a 6 años	Value >= 0.075 and Value <= 2.45
Algoritmos		Ángulo
SAM	Coatepec de 3 a 6 años	Value = 0.100, 0.075, 0.050, 0.0025
SID	Donato de más de 6 años	Value = 0.100, 0.075, 0.050, 0.0025

Se asignó el valor 1 para los pixeles que cumplen con la condición y 0 para los pixeles sin valor.

Value: valor del pixel.

Para la cartografía de los cultivos, no necesariamente se consideró el mismo rango de las condicionales para todas las escenas, dado que los valores del índice pueden variar de escena a escena, por lo que se encontró el umbral de valores de índice que corresponden con el cultivo de interés. Las regiones extraídas, tanto del clasificador como de los índices se relacionaron mediante álgebra de mapas, con la herramienta COMBINATORIAL AND. Esto permitió consultar aquellos sitios donde ambos (el clasificador SAM y SID y la condicional de los índices) tienen un valor verdadero.

Validación de mapas

La precisión obtenida por estos tratamientos digitales en la imagen se validó mediante la sobre posición de esta cartografía contra puntos de validación obtenidos en campo, este conjunto de datos de validación permitió realizar una matriz de confusión con la que se obtuvo el valor en porcentaje de la precisión de los tratamientos, en el que se observa que tanto el algoritmo SID como sus combinaciones, presentan el mayor porcentaje de precisión para la obtención de zonas con plantaciones de aguacate en el área de estudio.

Cuadro 5.

Matriz de confusión de combinaciones de SAM, SID e índices de vegetación.

TRATAMIENTO	Número de pixeles			Porcentaje	
	Acierto	Error	TOTAL	Acierto	Error
SAM	76	44	120	63.1	36.6
SID	117	3	120	97.5	2.5
ARI1	103	17	120	85.8	14.1
ARI2	80	40	120	66.6	33.3
NDVI	108	12	120	90	10

Simple Ratio	95	25	120	79.1	20.8
SAM + ARI1	63	57	120	52.5	47.5
SAM + NDVI	74	46	120	61.6	38.3
SID + ARI1	102	18	120	85	15
	93	27	120	78	22
	84	36	120	70	30
	72	48	120	60	40
SID + ARI2	80	40	120	66.6	33.3
	72	48	120	60	40
SID + NDVI	108	12	120	90	10
	79	41	120	66.39	33.61
	84	36	120	70	30
SID + SR	95	25	120	79.1	20.8
	91	29	120	76	24

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados de la validación indican que la combinación con SID alcanzó una precisión de 97.5 % para detectar aguacate, mientras que el tratamiento SAM, obtuvo una precisión de 63.1 %, siendo SID un algoritmo más efectivo que SAM, tanto de forma individual como combinada con los índices de vegetación, por lo que coincidimos con lo mencionado por Du et al. (2004) que SID es un método de clasificación espectral que utiliza una medida de divergencia para hacer coincidir la respuesta de los píxeles de la imagen con los espectros de referencia. Así como con lo observado por Du et al (2004), quien indica que el algoritmo SID puede caracterizar la similitud espectral y la variabilidad de manera más eficaz que otros algoritmos de clasificación, ya que ve cada espectro de píxeles como una variable aleatoria, y después mide la discrepancia de los comportamientos probabilísticos que existe entre dos espectros.

Respecto a los índices de vegetación probados, los mayores porcentajes de acierto son ARI1 con una precisión de 85.8 % y NDVI 90 %. Dentro de las combinaciones de índices de vegetación con los algoritmos y el resultado de la matriz de confusión

(Cuadro 5), los métodos que alcanzaron mayor precisión son (Figura 7, 8, 9 y 10): SID con los índices ARI1, ARI2, NDVI y SR con porcentaje de 85 %, 66.6 %, 90 % y 79.1 % respectivamente, a pesar de que la suma del algoritmo con el índice NDVI obtuvo un mayor porcentaje de precisión, en este caso no se recomienda debido a que tiende a sobreestimar la superficie establecida de plantaciones de aguacate, la combinación de SID más ARI2 muestra un resultado demasiado conservador subestimando la superficie de plantaciones de aguacate establecida actualmente.

El mapa de cada una de las combinaciones se puede observar en las Fig. 7-10.

Otras combinaciones de índices y métodos dieron resultados inferiores al 60 % de la precisión, por lo que no se recomiendan. En lo que refiere a las combinaciones de los parámetros del ángulo espectral con los índices de vegetación se obtuvo una mejor respuesta con el ángulo máximo (radianes) 0.025, 0.050 y 0.075, resultando una imagen con mayor coherencia y mejor calidad.

Los resultados obtenidos de los métodos combinados aplicados a la imagen Sentinel-2 muestran confiabilidad al exponer sitios con alta probabilidad de estar sembrados con cultivo de aguacate, lo que se corrobora con lo observado por Marcus et al. (2016), que indica que los resultados de la clasificación confirman el alto potencial de Sentinel-2 para obtener tipos de cultivos específicos y mapas de especies arbóreas. En cuanto a la información espectral, coincidimos con Marcus et al. (2016), en que la curva roja y ondas infrarrojas de onda corta (SWIR) para la cartografía de la vegetación, así como la banda azul fueron importantes para obtener la presencia del cultivo de aguacate en el área de estudio.

El resultado de la presencia de superficie plantada de cultivo de aguacate en los municipios de Coatepec Harinas y Donato Guerra con un 70 % de precisión (Figuras 11 y 12) es de 5 658.62 ha y 5 901.57 ha, con un total de 11 560.19 ha, dato que difiere de los reportados por SIACON, (2017), quien reporta una superficie para estos dos municipios de 5 501.36 ha, así como el SIAP, (2017), que reporta 3 188.36 ha para los dos municipios, para el 2018 el SIAP reporta una superficie plantada de aguacate en Coatepec Harinas de 4 291 ha y para Donato Guerra 1 477.66 ha. La diferencia en los datos reportados de la superficie plantada del cultivo de aguacate en el área de estudio respecto a los obtenidos se atribuye a que las estadísticas oficiales tienen dos y un

años de diferencia respecto a la información obtenida con los tratamientos aplicados a la imagen Sentinel-2, además de que existen reportes de que en los últimos años se han incrementado las plantaciones de aguacate en el área de estudio. Es importante mencionar que estas nuevas plantaciones se están estableciendo en las zonas anteriormente cubiertas de bosque, lo que provoca la deforestación de las mismas, convirtiéndose en el origen de problemas ambientales de consideración a corto, mediano y largo plazo, tal como sucede en el estado de Michoacán donde expertos señalan al cultivo de aguacate como el responsable de un ecocidio de magnitudes incalculables (Montiel et al., 2008; Toledo et al., 2009).

Las Figuras 11 y 12 muestran la cartografía del aguacate en Coatepec Harinas y Donato Guerra, Estado de México, obtenida mediante la combinación del SID y el índice ARI1, sobre el resultado obtenido de la combinación del algoritmo y el índice se sobrepusieron los puntos de validación obtenidos en campo, los cuales se encuentran en áreas identificadas con presencia del cultivo de aguacate en ambos municipios, además de que se visualiza un patrón de comportamiento con establecimiento de plantaciones de cultivo de aguacate en áreas con pendiente pronunciada y zonas donde anteriormente existía otro tipo de vegetación lo cual coincide con lo observado por Chávez et al. (2012) que la complejidad del cultivo del aguacate por la gran extensión que ocupa, su ciclo de producción, el uso de agroquímicos y el efecto sobre el entorno ambiental, hacen que este sistema-producto influya drásticamente en el cambio de uso del suelo y en el deterioro del medio ambiente en el que prospera.

En la Figura 12 se observa que el resultado obtenido con estos métodos muestra un incremento de superficie plantada con el cultivo de aguacate hacia el noroeste del municipio de Donato Guerra lo cual puede estar influenciado por la colindancia con el Estado de Michoacán.

La vegetación que proporcionó resultados más cercanos a lo que sucede en campo fue la de 1 a 3 años y de 3 a 6 años con el ángulo 0.0025 y 0.0075 con la combinación SID más ARI1. El índice de vegetación con mejor porcentaje de precisión tanto de manera individual como combinado con SID fue NDVI que obtuvo el 90 % de precisión, sin embargo, cabe destacar que el resultado sobre la cartografía de validación a nivel regional se visualiza una sobreestimación de la presencia del cultivo de aguacate, por lo

que se atribuye al error de comisión, siendo la combinación de SID más ARI1 con 70 % de precisión el que subestima de manera mínima la presencia del cultivo de aguacate y se aprecia una mayor precisión debido a la presencia de una cantidad de píxeles más representativos en comparación a las otras combinaciones, esto se atribuye a la edad de las plantaciones que de acuerdo al índice y tipo de vegetación para determinarlo, los arboles de 1 a 3 años y de 3 a 6 años fueron los que mostraron un comportamiento uniforme tanto en la firma espectral como en el resultado obtenido, posiblemente relacionado a lo que menciona Soler (2017), que el cambio en antocianina, que es un pigmento que da los colores rojo, azul o púrpura a las plantas, en las hojas indica cambios en el follaje, crecimiento de brotes o muerte. La reflectancia de la antocianina es máxima alrededor de 550 nm y también está influenciada por la clorofila, por tanto, este índice también considera la reflectancia a 700 nm con el fin de tener en consideración la clorofila (Sentinel Hub, 2019). Sin embargo, el debilitamiento de la vegetación contiene mayores concentraciones de antocianinas, por lo que este índice es una medida de la vegetación estresada, afirmación con la cual se difiere, debido a que su comportamiento en plantaciones con edades de 1 a 3 años y de 3 a 6 años mostró buen desempeño, lo que se atribuye a que los aumentos en ARI1 indican cambios en el follaje a través de un nuevo crecimiento, razón por la que este índice fue acertado.

De acuerdo con el comportamiento del índice NDVI y su combinación con SID, en donde se obtuvo error de comisión y la vegetación y patrones no cumplieron totalmente con los requerimientos de este índice, se atribuye a lo observado por Gill et al. (2009) quien comenta que el NDVI tiene algunos problemas en la estimación de la cubierta vegetal, por ejemplo, este índice comienza a saturar cuando la cubierta vegetal es superior al 50%, y no es sensible al verde cuando la cubierta vegetal es baja. Por este motivo puede sobre o subestimar la cubierta vegetal, dando información errónea en algunas zonas (Zhongming et al., 2009).

Probablemente una de las explicaciones a la falta de precisión y errores en los índices y combinaciones aplicadas a esta investigación se deba a lo encontrado en varios estudios (Castro et al., 2004; Kalacska et al., 2007; Sánchez y Castro., 2006) que al disponer de un tamaño de píxel de 10 metros, si la superficie ocupada por las copas

son inferiores a esta, pueden darse problemas de identificación de especies, por lo que una de las causas de no encontrar resultados satisfactorios, podría ser la contaminación del pixel por especies trepadoras, epifitas o no estructurales dando lugar a confusión en la firma espectral característica de los árboles, como se ha demostrado en estudios llevados a cabo en bosques tropicales.

Es importante reconocer que la tecnología de los sensores remotos que, dado su enfoque espacial exhaustivo y la temporalidad de las visitas a un mismo pixel, plantea una solución eficiente y de bajo costo (Zhang et al., 2012). Por lo que, la calidad de los resultados y la disponibilidad de la información hace a Sentinel-2 una alternativa viable y confiable para la identificación del cultivo de aguacate, lo cual se puede respaldar adoptando medidas propuestas en varios estudios (Peña et al., 2008; South et al., 2004; Peña et al., 2011) en los que se menciona como la información sobre el uso de la tierra agrícola se actualiza de manera rutinaria en muchas regiones de cultivo en los EE. UU. y Europa a través de las comunicaciones de los agricultores o las visitas de inspectores administrativos a los campos seleccionados.

4. CONCLUSIONES

- Los métodos de índices de vegetación, algoritmos SAM y SID y la combinación de estos en las imágenes de acceso libre del sensor Sentinel-2, muestran alto potencial para la identificación de áreas plantadas con el cultivo de aguacate.
- La imagen Sentinel-2 procesada con el algoritmo SID tiene un gran potencial para estudios de identificación de vegetación, mostrando una alta resolución y precisión.
- El índice de vegetación ARI1 proporcionó mayor confiabilidad al determinar el patrón que sigue el cultivo de aguacate.

AGRADECIMIENTOS

Al consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por la beca otorgada al autor principal. A la Agencia Espacial Europea (ESA) por la provisión de imágenes indispensables para este estudio.

FIGURAS

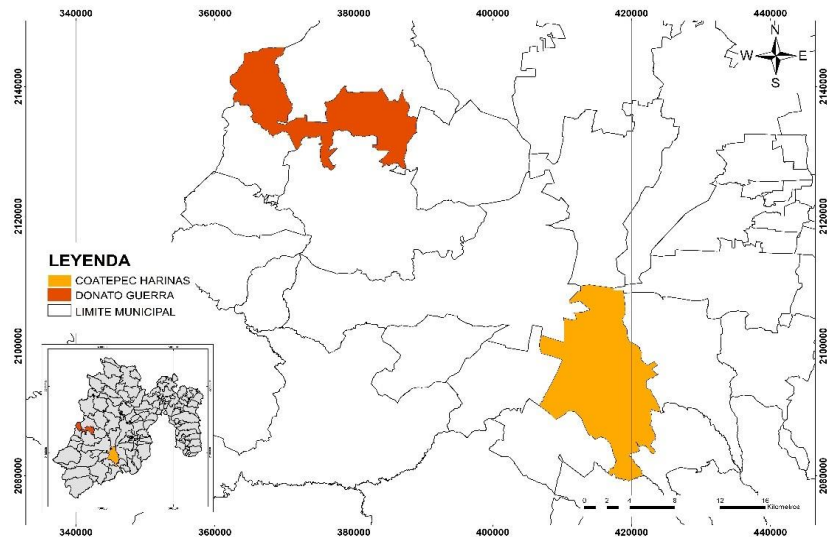


Figura 1. Área de estudio.

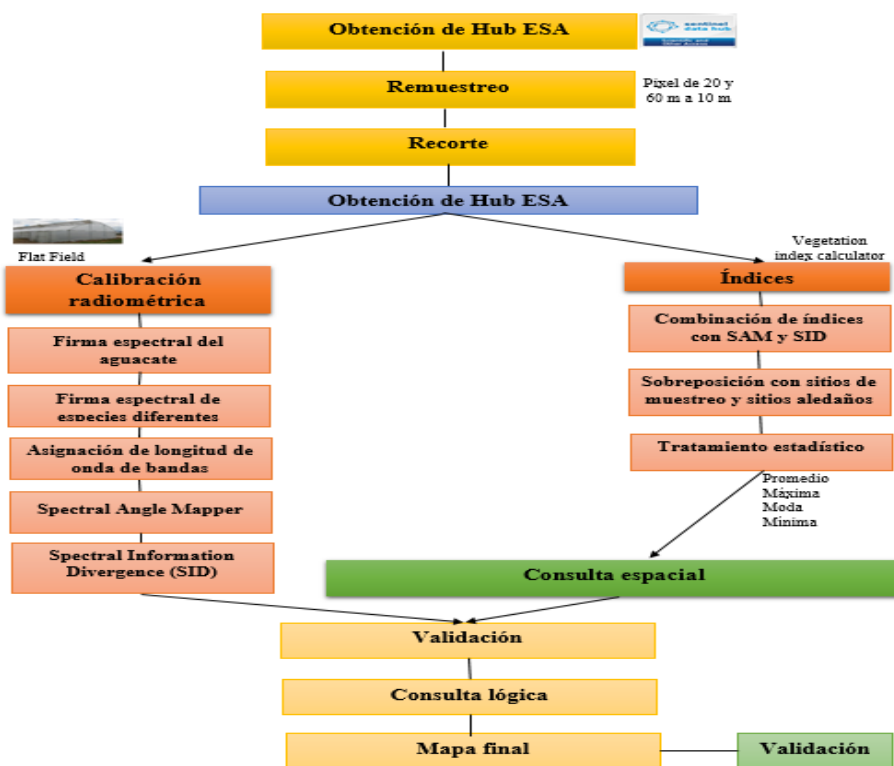


Figura 2. Proceso del método aplicado a la imagen Sentinel-2.

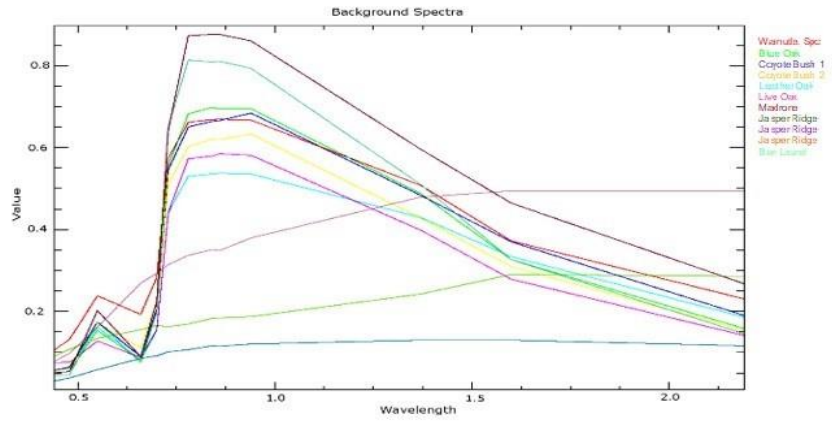


Figura 3. Librerías excluidas.

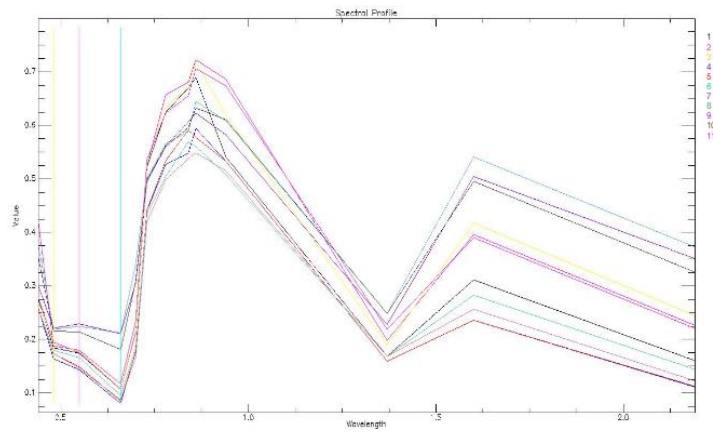


Figura 4. Árboles de 1 a 3 años.

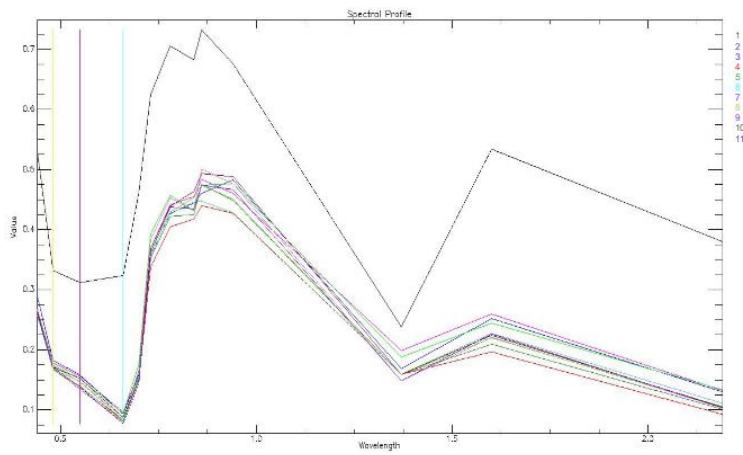


Figura 5. Árboles de 3 a 6 años.

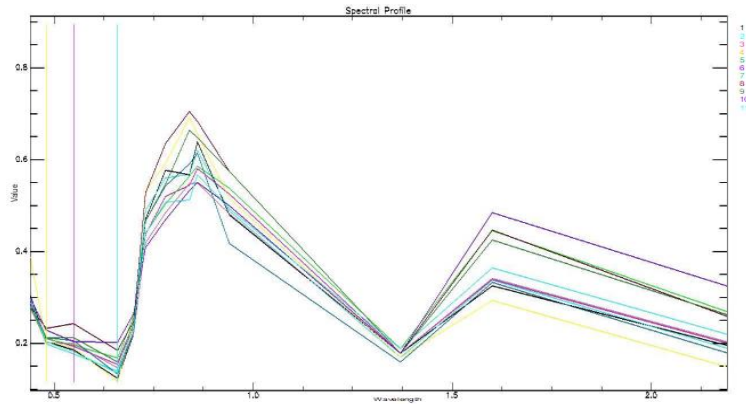


Figura 6. Árboles 6 de años en adelante.

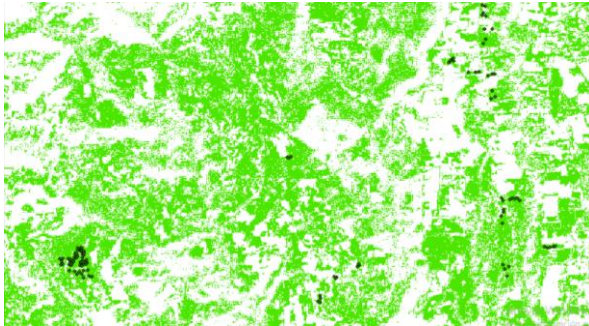


Figura 7. Combinación del índice SID + ARI1 plantaciones de 1 a 3 años, consulta 0.050_0.20-1.45 y puntos de validación.

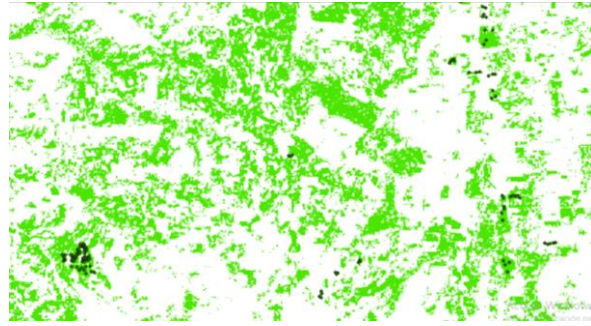


Figura 8. Combinación del índice SAM + NDVI plantaciones de 3 a 6 años, consulta 0.100_0.50-0.73 y puntos de validación.



Figura 9. Combinación del índice SID + ARI2 plantaciones de 3 a 6 años, consulta 0.100_0.34-0.95 y puntos de validación.

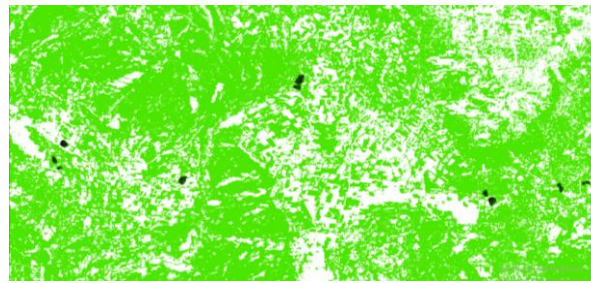


Figura 10. Combinación del índice SID + SR plantaciones de 3 a 6 años, consulta 0.100_2.45 y puntos de validación.

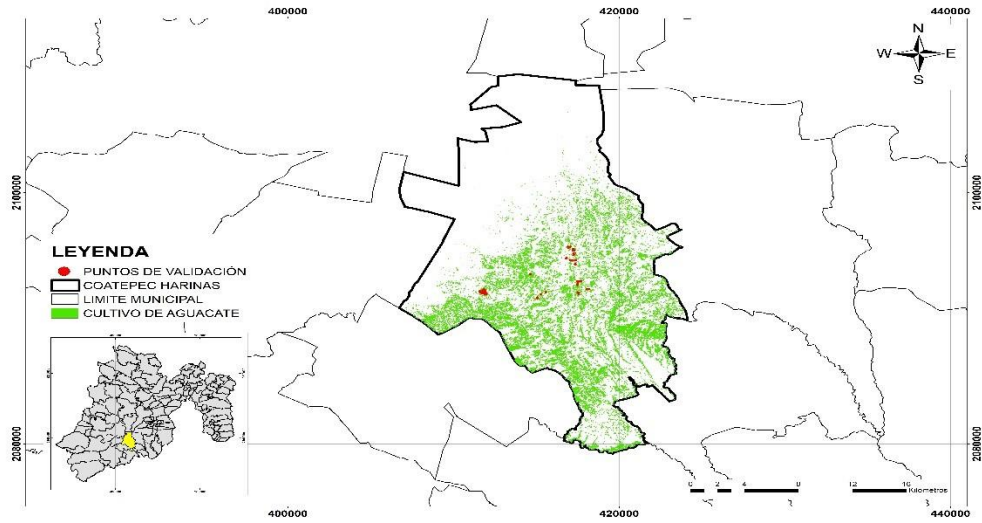


Figura 11. Cartografía del aguacate en Coatepec Harinas, Estado de México, obtenida mediante la combinación del SID y el índice ARI1.

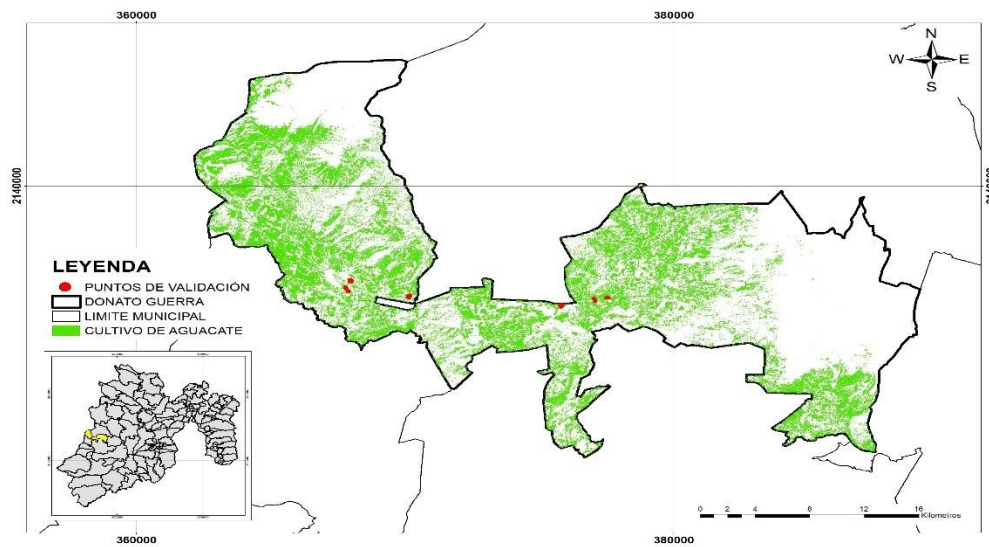


Figura 12. Cartografía del aguacate en Donato Guerra, Estado de México, obtenida mediante la combinación del SID y el índice ARI1.

REFERENCIAS

- Castro, K. L., Sánchez, G. A., y Caelli, T. (2004). Discrimination of lianas and trees with leaf-level hyperspectral data. *Remote Sensing of environment*, 90(3). 353-372. doi.org/10.1016/j.rse.2004.01.013.
- Chavéz, L. G., Tapia, V. L. M., Bravo, E. M., Sáenz, R. T., Muñoz F. H. J., y Vidales, F. I., et al. (2012). *Impacto del cambio de uso de suelo forestal a huertos de aguacate*. Inifap. 13, ISBN: 978-607-425-825-7. https://www.researchgate.net/publication/265125083_Impacto_del_cambio_de_uso_del_suelo_forestal_a_huertos_de_aguacate_IMPACT_OF_FOREST_LAND_USE_CHANGE_TO_AVOCADO_ORCHARDS.
- Chemura, A., Mutanga, O., y Dube, T. (2016). Separability of coffee leaf rust infection levels with machine learning methods at Sentinel-2 MSI spectral resolutions. *Precision Agric*, 18(5), 859-881. doi:10.1007/s11119-016-9495-0
- Chemura, A., Mutanga, O., Odindi, J., y Kutuywayo, D. (2018). Mapping spatial variability of foliar nitrogen in coffee (*Coffea arabica* L.) plantations with multispectral Sentinel-2 MSI data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 138, 1-11. doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2018.02.004
- Chuvieco, E. (2007) *Teledetección Ambiental. La observación de la tierra desde el espacio*. Editorial Planeta, S. A. Barcelona. ISBN: 978-84-344-8072-8. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/libro?codigo=630577>
- Du, Y., Chang, C., Ren, H., Chang, C., y Jensen, J. (2004). New hyperspectral discrimination measure for spectral characterization. *Optical Engineering*, 43(8), 1777-1786. doi:10.1117/1.1766301
- European Space Agency (ESA). El programa copérnico. (2017). Consultado 01-11-2017 en http://www.esa.int/esl/ESA_in_your_country/Spain/El_programa_Copernico.

- Gill, T. K., Phinn, S.R., Armston, J. D., y Pailthorpe, B. A. (2009). Estimating tree-cover change in Australia: challenges of using the MODIS vegetation index product. *International Journal of Remote Sensing*, 30(6), 1547-1565.
- Kalacska, M., Sánchez, A. G. A., Rivard, B., Caelli, T., White, H. P., y Calvo A. J. C. (2007). Ecological fingerprinting of ecosystem succession: Estimating secondary tropical dry forest structure and diversity using imaging spectroscopy. *Remote Sensing of Environment*, 108(1), 82-96. doi.org/10.1016/j.rse.2006.11.007.
- Montiel, A. L., Krishnamurthy, A., Vázquez, A. M., y Uribe, G. P. (2008). Opciones agroforestales para productores de aguacate. *Terra latinoamericana*. 26(1): 234-244. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-57792008000100011&lng=es&tlng=es
- Peña, B. J. M., López, G. F., García, T. L., Jurado, E. M., Sánchez, O. M., y García, F. A. (2008). Discriminating cropping systems and agro-environmental measures by remote sensing. *Agronomy for Sustainable Development*, 28(2), 355-362. doi.org/10.1051/agro:2007049
- Peña, B. J. M., Ngugi, M. K., Plant, R. E., y Six, J. (2011). Object-based crop identification using multiple vegetation indices, textural features and crop phenology. *Remote Sensing of Environment*, 115, 1301-1316. doi:10.1016/j.rse.2011.01.009
- Plan Municipal de Desarrollo Urbano de Coatepec de Harinas, Estado de México. (2009). Datos Estadísticos proporcionados por el DDR 078 Coatepec de Harinas. Consultado 20-02-2017 en [http://seduv.edomexico.gob.mx/planes_municipales/Coatepec de harinas](http://seduv.edomexico.gob.mx/planes_municipales/Coatepec%20de%20harinas).
- Plan Municipal de Desarrollo Urbano de Donato Guerra, Estado de México. (2009). Datos Estadísticos proporcionados por el DDR 078 Donato Guerra. Consultado 20-02-2017 en [http://seduv.edomexico.gob.mx/planes_municipales/Donato guerra](http://seduv.edomexico.gob.mx/planes_municipales/Donato%20guerra).
- Rubí, A. M., Franco, M. A. L., Rebollar, R. S., Bobadilla, S. E. E., Martínez, D. i., y Siles, H. Y. (2013). Situación actual del cultivo del aguacate (*Persea americana* Mill.) en

el Estado de México. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*. 16(1), 93-101.
<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=93927469014>

Sangerman, J.D. M., Larqué, S. B.S., Omaña, S. J. M., Shwenstesius, R. R., y Navarro, B. A. (2014). Tipología del productor de aguacate en el Estado de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 5(6), 1081-1095.
<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=263131532014>

Sánchez, A. G. A., y Castro, E. K. (2006). Canopy observations on the hyperspectral properties of a community of tropical dry forest lianas and their host trees. *International Journal of Remote Sensing*, 27(10), 2101-2109.
doi.org/10.1080/01431160500444749.

Sentinel Hub. Consultado 14-06-2017 en https://www.sentinel-hub.com/develop/documentation/eo_products/Sentinel2EOproducts

Sentinel Hub. Consultado 02-05-2019 en <https://github.com/sentinel-hub/custom-scripts/blob/master/sentinel-2/ari/script.js>

Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). (2017). Consultado 07-11-2017 en <http://www.siap.gob.mx/>

Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. (SIAP). (2018) Consultado: 10-11-2018 en <http://www.siap.gob.mx/>

Sistema de Información Agroalimentaria de Consulta. (SIACON). (2017). Consultado 04-03-2019. <https://www.gob.mx/siap/prensa/sistema-de-informacion-agroalimentaria-de-consulta-siacon>

South, S., Qi, J., y Lusch, D. P. (2004). Optimal classification methods for mapping agricultural tillage practices. *Remote Sensing of Environment*, 91(1), 90-97.
doi.org/10.1016/j.rse.2004.03.001

Toledo, R., Alcántar, J.J., Anguiano, J., y Chávez, G. (2009). Expansión del cultivo del aguacate y deforestación en Michoacán. *Boletín El Aguacatero*. No. 58.

<https://www.sdpnoticias.com/negocios/deforestacion-contribuye-expansion-aguacate-cultivo.html>

Zhang, X., Friedl, M. A., Tan, B., Goldberg, M. D., y Yu, Y. (2012). Long-term detection of global vegetation phenology from satellite instruments. pp. 297-320. In: X. Zhang (ed.). Chapter 16, Phenology and climate change. ISBN 978-953-51-0336-3. In tech open access publisher. doi:10.5772/39197.

Zhongming, W., Brian, G.L., Jiao, F., Wanning, L., y Haijing, S. (2009). Stratified vegetation cover index: A new way to assess vegetation impact on soil erosion. *Catena*, 83(1), 87-93. doi.org/10.1016/j.catena.2010.07.006

OTROS RESULTADOS

A continuación, se presentan datos que no están incluidos en los artículos anexados anteriormente.

Identificación de aguacate en Temascaltepec y Tenancingo

Se muestran los mapas de identificación del cultivo de aguacate con imágenes Sentinel-2. El resultado de la presencia de superficie plantada de cultivo de aguacate en los municipios de Temascaltepec y Tenancingo con un 70 % de precisión (Figuras 11 y 12) es de 8,653.76 ha y 4,096.95 ha, con un total de 12, 750.71 ha, dato que difiere de los reportados por SIACON, (2018), quien reporta una superficie para estos dos municipios de 2, 419 ha, así como el SIAP, (2018), que reporta 2, 442 ha para los dos municipios, para el 2019 el SIAP reporta una superficie plantada de aguacate en Temascaltepec de 1558 ha y para Tenancingo 884 ha. Existen reportes de que en los últimos años se han incrementado las plantaciones de aguacate en el área de estudio.

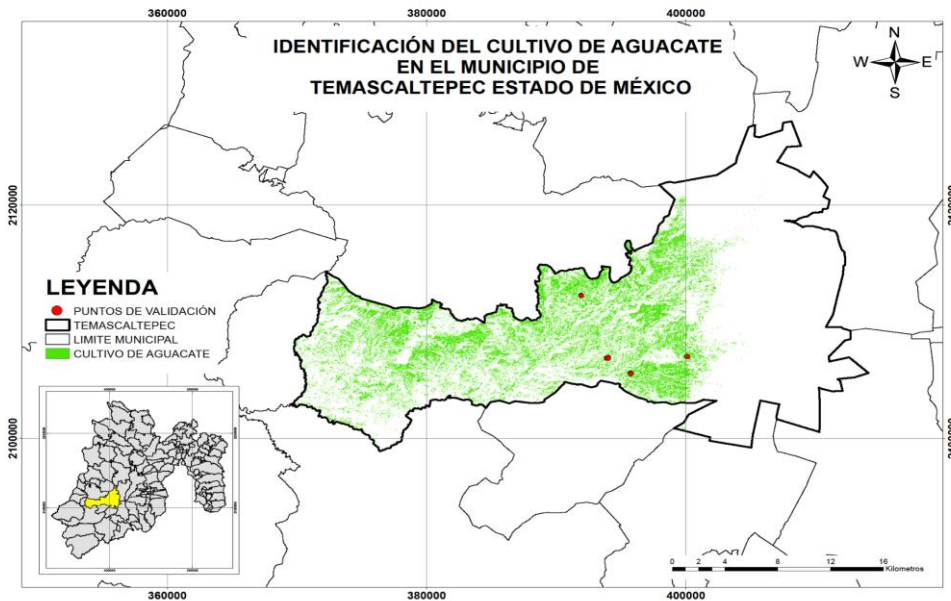


Figura 11. Cartografía del aguacate en Temascaltepec, Estado de México, obtenida mediante la combinación del SID y el índice ARI1.

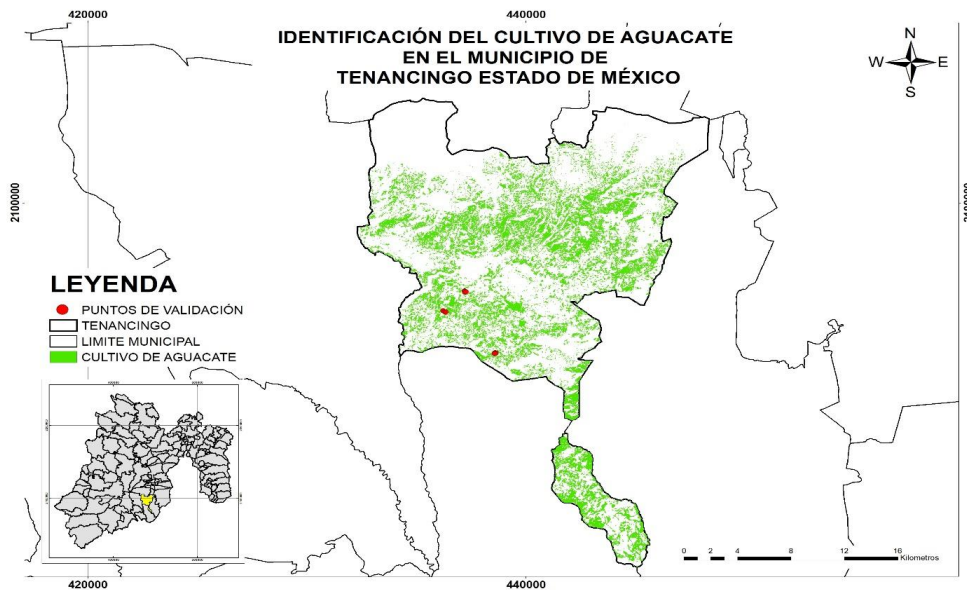


Figura 12, Cartografía del aguacate en Tenancingo, Estado de México, obtenida mediante la combinación del SID y el índice ARI1.

Sistema de Información Geográfica

A continuación, se presentan las imágenes del visualizador, producto del desarrollo del Sistema de información Geográfica con el que se obtuvo un visualizador en el que se pueden realizar consultas relacionadas a las plagas que presenta el cultivo. Esta herramienta permite realizar la consulta del nivel de incidencia de la plaga de interés con base en la información de muestreo realizado a la parcela, en el que se contabilizó el número de insectos presentes y se incorporó el dato de humedad y temperatura correspondiente al momento en que se realiza la consulta. Otra opción de esta herramienta, es la de incorporar las coordenadas de cada uno de los puntos muestreados, la fecha en que se realizó el muestreo y la incidencia del insecto al momento del muestreo, esta opción guarda cada una de las consultas (datos incorporados) para generar una tabla particular del muestreo que se realizó en la parcela de interés, esta consulta también proporciona el nivel de incidencia presente en la parcela mostrando cada punto muestreado con una diferenciación de coloración de acuerdo al nivel de incidencia (alta, media o baja) que se presente en cada punto

muestreado con una coloración que va de rojo intenso para incidencia alta, naranja para incidencia media y colores rosa y blanco para las incidencias baja y nula.

El resultado de las consultas se representa en el visualizador que ofrece el SIG, producto de esa investigación. La información representada en este visualizador permite conocer el comportamiento espacial de los insectos plaga, a partir de dicha información se pueden establecer programas de manejo integrado que ayuden a los productores a optimizar los insumos que utilizan, obtener mejores rendimientos reduciendo los costos de producción y hacer conciencia de que es muy importante evitar o disminuir en medida de lo posible el impacto que genera la agricultura al medio ambiente. Si bien, es cierto que la agricultura actualmente no se concibe sin la utilización de agroquímicos, existen varios recursos o alternativas que se pueden utilizar para mantener un equilibrio en los ecosistemas y causar un menor impacto en los mismos.

A continuación, se presenta la interfaz del Sistema de Información Geográfica.

The screenshot shows a web application interface titled "Sistema de Gestión de plagas en Aguacate". At the top, there are logos and the text "LIETAP". Below this, there are two dropdown menus: "Plagas" with "Trips" selected and "Municipio" with "Coatepec Harinas" selected. The main content area is divided into two sections: "Consultar posibilidad de presencia" and "Ingresar Datos del muestreo". The "Consultar" section has two input fields: "Temperatura" with "0" and "Humedad" with "50", each with a "Consultar" button below it. Below these is a "Nivel Incidencia:" label and a "Condiciones ideales" input field. The "Ingresar Datos del muestreo" section has four input fields: "Fecha" with "Enero 2017", "Longitud" with "414670", "Latitud" with "2093578", and "Incidencia" with "3". A "Guardar" button is located at the bottom right of this section.

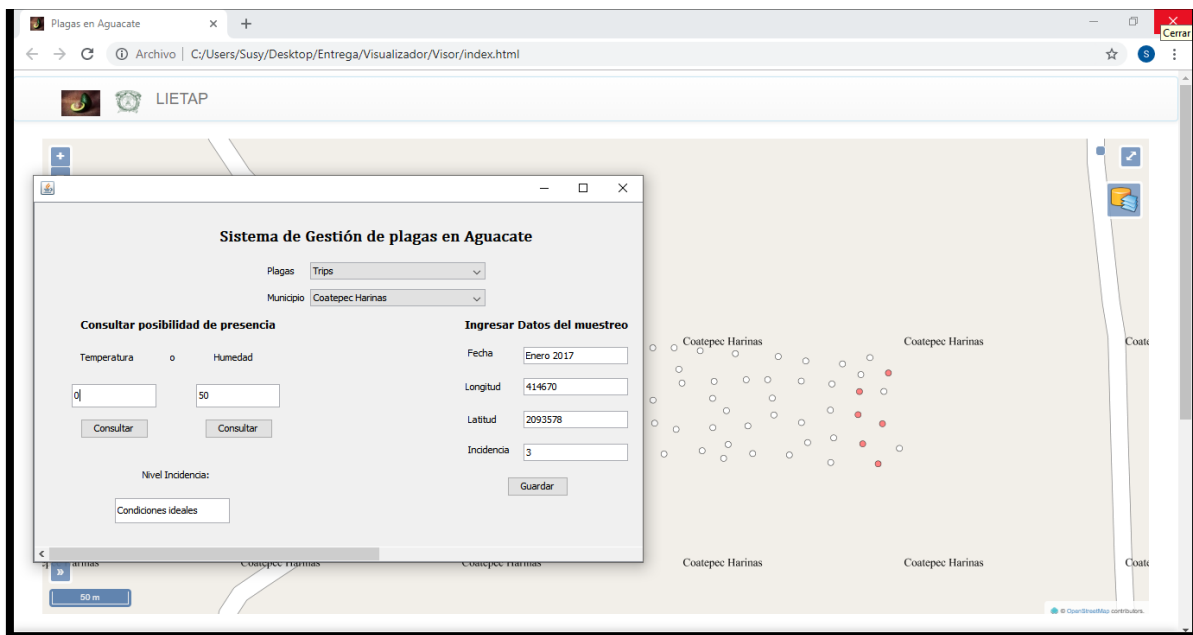
En la interfaz del sistema de información se observa la etiqueta plagas que refiere a la información que se va a consultar, en la parte central se presenta un JCombobox, donde se despliega la información de las diferentes plagas que se pueden consultar, bajo este se presenta otro JCombobox en el que se muestran los municipios para los que se puede realizar la consulta, en este caso son: Coatepec Harinas, Donato Guerra, Temascaltepec y Tenancingo.

La etiqueta llamada Consultar posibilidad de presencia, ubicada a la izquierda de la interfaz se incorporan los datos de temperatura o humedad que será el dato que el usuario ingresará para poder obtener el nivel de incidencia que podrá consultar en el botón consultar y en la caja de la parte izquierda inferior se mostrará la incidencia de la plaga de acuerdo a los datos que se proporcionaron.

A la derecha se muestra la segunda opción para realizar la consulta de incidencia en la que, para conocer el nivel de incidencia se tendrá que alimentar las cajas correspondientes a fecha, latitud, longitud y la incidencia que el interesado haya detectado en cada punto muestreado. Esta información se guardará con el botón guardar, cada punto ingresado se guardará en una base de datos generada en este ambiente, cada punto incorporado será representado en la parte inferior de la interfaz, mostrando el nivel de incidencia con puntos.

A continuación, se muestran las imágenes de algunas consultas para las diferentes plagas.

En esta imagen podemos observar la consulta realizada para Trips en la que se incorporó un porcentaje de humedad de 50 %, el resultado de esta consulta fue: condiciones ideales para que esta plaga se presente, para lo que el productor puede empezar a considerar las opciones de prevención, protección o manejo de la plaga.

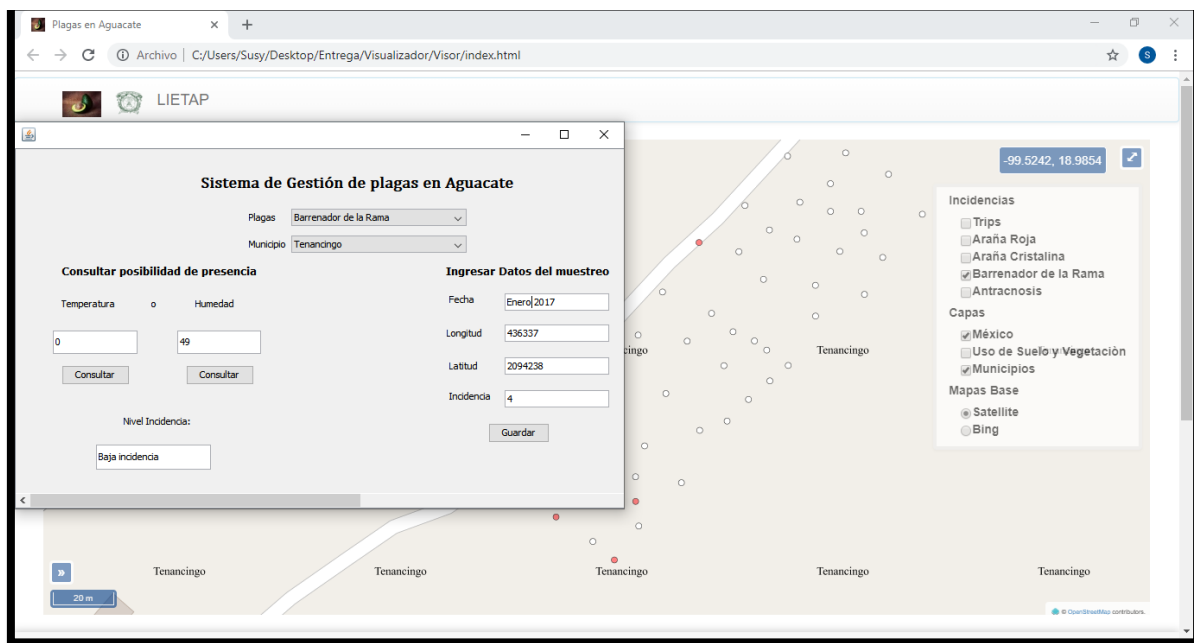


En esta imagen podemos observar la segunda opción de visualización de puntos en donde se ingresa la fecha del muestreo, coordenadas UTM (latitud, longitud) y el número de incidencia de la plaga

que presento la planta. La información se guarda y como resultado se tiene, los puntos muestreados distribuidos según las coordenadas ingresadas y cada punto con una coloración que representa el nivel de incidencia de la plaga en la parcela.

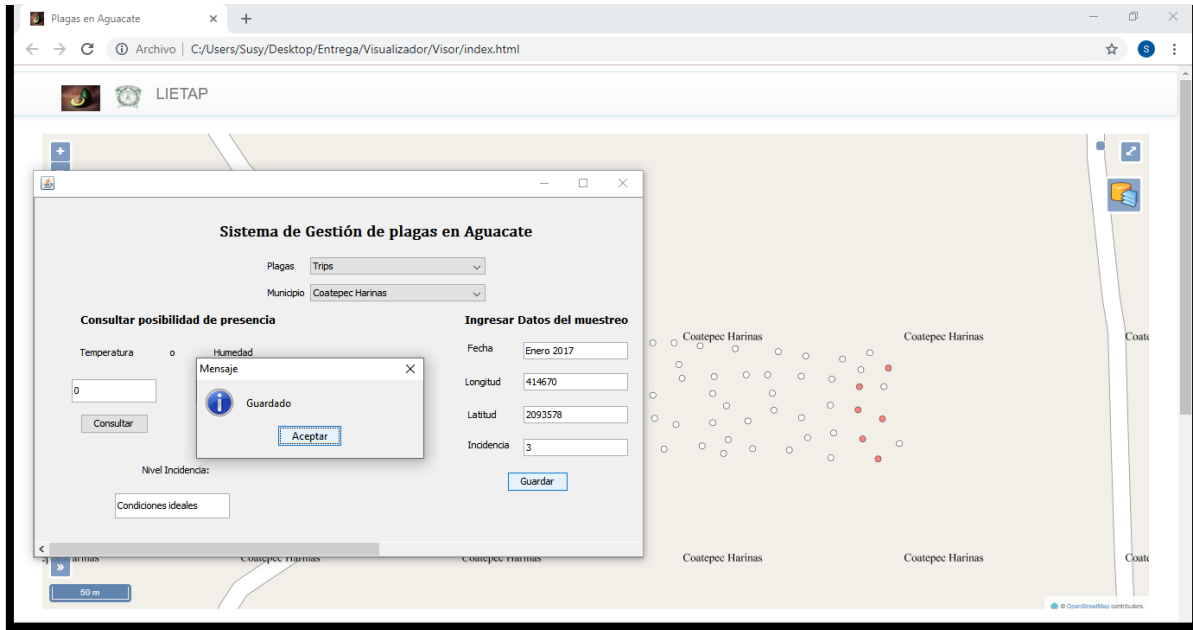
En la parte derecha del visualizador se muestra una serie de capas disponibles que ayudarán a la representación de los resultados de una manera más atractiva y explícita, estas capas son: curvas de nivel, uso de suelo y vegetación, municipios y un mapa base. También se muestran las incidencias de las diferentes plagas y la enfermedad con las que cuenta este SIG que fueron las plagas y enfermedad de las que se tiene información de muestreos de dos años 2017 y 2018, esta información se encuentra almacenada en el SIG en tablas que se diseñaron en el proceso de generación de este SIG para su consulta histórica.

En este caso la plaga consultada fue barrenador de la rama en el municipio de Tenancingo, en el que se colocó la humedad de 49 %, fecha de enero de 2017, latitud: 436337, longitud: 2094238 y una incidencia de 4 que representa para esta plaga un nivel de incidencia bajo.

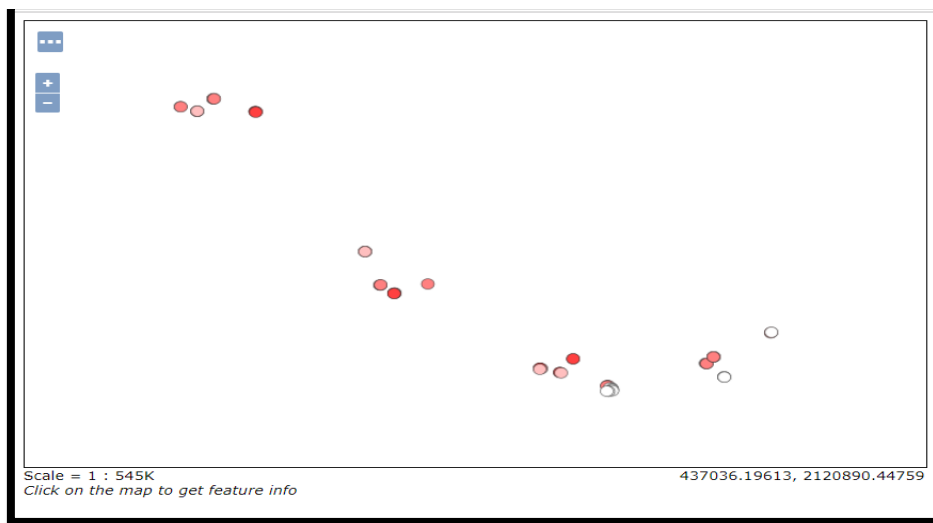


Este resultado indica que el nivel de incidencia es bajo y que las acciones de manejo deben apearse a este resultado, realizando un monitoreo de la plaga que permita conocer el incremento o disminución de la misma para efectuar las medidas de manejo de acuerdo al umbral económico de la plaga.

En cuanto a la siguiente consulta para Trips en Coatepec Harinas, se guardaron una serie de coordenadas de puntos muestreados para observar la incidencia de cada uno en la parcela, en la que se presentan las condiciones ideales para que se presente.



Esta imagen muestra los puntos incorporados con el nivel de incidencia en las diferentes coloraciones que representan las condiciones altas, medias y bajas.



Otra consulta fue: Trips en Coatepec Harinas con fecha de enero 2017, coordenadas longitud de 423419, latitud de 2090762 y la incidencia de la plaga en el punto de 10. El resultado fue una incidencia media.

DISCUSIÓN GENERAL

La agricultura es una actividad que requiere del conocimiento de los recursos disponibles y el impacto que genera, así como la planeación y control para su desarrollo. La explotación comercial del aguacate como un monocultivo tiende a manifestar diversos problemas de tipo fitosanitario y de conflicto de tierras, ya que no se considera la conservación de los recursos llevando a cabo una sobre explotación agrícola en áreas con vocación muy diferente a la que se impone como adecuada.

El cultivo de aguacate es significativo en México y de gran importancia en el Estado de México, en los últimos años se ha reportado un incremento en la superficie lo cual contribuye de manera importante en el crecimiento económico del sector agrícola. Es un hecho, que la coincidencia de condiciones agroclimáticas en el estado ha ocasionado un acelerado cambio de uso de suelo forestal a la producción de aguacate, provocando el deterioro de los ecosistemas forestales, situación que se manifiesta en un proceso de deforestación. Por lo que es importante tomar decisiones que orienten al ordenamiento territorial del cultivo y al manejo consciente y equilibrado de los problemas fitosanitarios.

El objetivo de esta investigación fue desarrollar un sistema de información geográfica (SIG) para la gestión fitosanitaria de plagas en las unidades productivas de aguacate e identificar por medio de imágenes satelitales la superficie y distribución de las plantaciones de este cultivo, así como ubicar las zonas óptimas para el establecimiento futuro de aguacate. Este tipo de estudios ayuda en la toma de decisiones de las plantaciones comerciales de aguacate ya que se generó información muy útil para la gestión de plagas, el conocimiento de la distribución del cultivo y la ubicación de áreas con aptitud óptima para futuras plantaciones.

Uno de los objetivos de esta investigación fue identificar la superficie y distribución de las plantaciones de aguacate. Los resultados del procesamiento de imágenes satelitales indican que, de los índices de vegetación probados, los mayores porcentajes de acierto son ARI1 con una precisión de 85.8 % y NDVI 90 %. Dentro de las combinaciones de índices de vegetación con los algoritmos y el resultado de la matriz de confusión, los métodos que alcanzaron mayor precisión fueron: SID con los índices ARI1, ARI2, NDVI y SR con porcentaje de 85 %, 66.6 %, 90 % y 79.1 % respectivamente, a pesar de que la suma del algoritmo con el índice NDVI obtuvo un mayor porcentaje de precisión, en este caso no se recomienda debido a que tiende a sobreestimar la

superficie establecida de plantaciones de aguacate, la combinación de SID más ARI2 muestra un resultado demasiado conservador subestimando la superficie de plantaciones de aguacate establecida actualmente.

Los métodos combinados aplicados a la imagen Sentinel-2 muestran confiabilidad al exponer sitios con alta probabilidad de estar sembrados con cultivo de aguacate, lo que se corrobora con lo observado por Marcus et al. (2016), que indica que los resultados de la clasificación confirman el alto potencial de Sentinel-2 para obtener tipos de cultivos específicos y mapas de especies arbóreas. En cuanto a la información espectral, coincidimos con Marcus et al. (2016), en que la curva roja y ondas infrarrojas de onda corta (SWIR) para la cartografía de la vegetación, así como la banda azul fueron importantes para obtener la presencia del cultivo de aguacate en el área de estudio.

La presencia de superficie plantada de cultivo de aguacate en los municipios de Coatepec Harinas, Donato Guerra, Temascaltepec y Tenancingo con un 70 % de precisión es de 5 658.62 ha, 5 901.57 ha, 8,653.76 ha y 4,096.95 ha, con un total de 24, 310.71 ha, dato que difiere de los reportados por SIACON, (2017), quien reporta una superficie para estos cuatro municipios de 7, 920.36 ha, así como el SIAP, (2017), que reporta 6, 090 ha para estos municipios, SIAP (2018) reporta una superficie plantada de aguacate en Coatepec Harinas de 4 291 ha, Donato Guerra 1 477.66 ha, Temascaltepec 1558 ha y Tonicato de 884 ha. Existen reportes de que en los últimos años se han incrementado las plantaciones de aguacate en el área de estudio.

La identificación de superficie de aguacate permite observar que estas nuevas plantaciones se están estableciendo en las zonas anteriormente cubiertas de bosque, lo que provoca la deforestación de las mismas, convirtiéndose en el origen de problemas ambientales de consideración a corto, mediano y largo plazo, tal como sucede en el estado de Michoacán donde expertos señalan al cultivo de aguacate como el responsable de un ecocidio de magnitudes incalculables (Montiel et al., 2008; Toledo et al., 2009).

En la cartografía obtenida mediante la combinación del SID y el índice ARI1, y la sobreposición de los puntos de validación obtenidos en campo, se observa que estos puntos se encuentran en áreas identificadas con presencia del cultivo de aguacate, además de que se visualiza un patrón de comportamiento con establecimiento de plantaciones de cultivo de aguacate en áreas con pendiente pronunciada y zonas donde anteriormente existía otro tipo de vegetación lo cual coincide con lo observado por Chávez et al. (2012) que la complejidad del cultivo del aguacate por la gran extensión que ocupa, su ciclo de producción, el uso de agroquímicos y el efecto sobre el entorno

ambiental, hacen que este sistema-producto influya drásticamente en el cambio de uso del suelo y en el deterioro del medio ambiente en el que prospera. El incremento de superficie plantada con el cultivo de aguacate hacia el noroeste del municipio de Donato Guerra puede estar influenciado por la colindancia con el Estado de Michoacán.

La vegetación que proporcionó resultados más cercanos a lo que sucede en campo fue la de 1 a 3 años y de 3 a 6 años con el ángulo 0.0025 y 0.0075 con la combinación SID más ARI1. La combinación de SID más ARI1 con 70 % de precisión subestima de manera mínima la presencia del cultivo de aguacate y se aprecia una mayor precisión debido a la presencia de una cantidad de píxeles más representativos en comparación a las otras combinaciones, esto se atribuye a la edad de las plantaciones que de acuerdo al índice y tipo de vegetación para determinarlo, los árboles de 1 a 3 años y de 3 a 6 años fueron los que mostraron un comportamiento uniforme tanto en la firma espectral como en el resultado obtenido, posiblemente relacionado a lo que menciona Soler (2017), que el cambio en antocianina, que es un pigmento que da los colores rojo, azul o púrpura a las plantas, en las hojas indica cambios en el follaje, crecimiento de brotes o muerte.

Es importante reconocer que la tecnología de los sensores remotos que, dado su enfoque espacial exhaustivo y la temporalidad de las visitas a un mismo píxel, plantea una solución eficiente y de bajo costo (Zhang et al., 2012). Por lo que, la calidad de los resultados y la disponibilidad de la información hace a Sentinel-2 una alternativa viable y confiable para la identificación del cultivo de aguacate.

Otro de los objetivos de este trabajo fue desarrollar un Sistema de Información Geográfica para la gestión fitosanitaria de las unidades productivas de aguacate. En este caso se obtuvo un visualizador en el que se pueden realizar consultas relacionadas a las plagas que presenta el cultivo. Esta herramienta permite realizar la consulta del nivel de incidencia de la plaga de interés con base en la información de muestreo realizado a la parcela, en el que se contabilizó el número de insectos presentes y se incorporó el dato de humedad y temperatura correspondiente al momento en que se realiza la consulta. Otra opción de esta herramienta, es la de incorporar las coordenadas de cada uno de los puntos muestreados, la fecha en que se realizó el muestreo y la incidencia del insecto al momento del muestreo, esta opción guarda cada una de las consultas (datos incorporados) para generar una tabla particular del muestreo que se realizó en la parcela de interés, esta consulta también proporciona el nivel de incidencia presente en la parcela mostrando cada punto muestreado

con una diferenciación de coloración de acuerdo al nivel de incidencia (alta, media o baja) que se presente en cada punto muestreado con una coloración que va de rojo intenso para incidencia alta, naranja para incidencia media y colores rosa y blanco para las incidencias baja y nula.

El resultado de las consultas se representa en el visualizador que ofrece el SIG, producto de esa investigación. La información representada en este visualizador permite conocer el comportamiento espacial de los insectos plaga, a partir de dicha información se pueden establecer programas de manejo integrado que ayuden a los productores a optimizar los insumos que utilizan, obtener mejores rendimientos reduciendo los costos de producción y hacer conciencia de que es muy importante evitar o disminuir en medida de lo posible el impacto que genera la agricultura al medio ambiente. Si bien, es cierto que la agricultura actualmente no se concibe sin la utilización de agroquímicos, existen varios recursos o alternativas que se pueden utilizar para mantener un equilibrio en los ecosistemas y causar un menor impacto en los mismos. El uso de las geotecnologías en la agricultura ayuda a que se tengan ahorros económicos al dirigir las diferentes medidas de control hacia puntos específicos, así como disminuir el impacto ambiental. Por lo que coincidimos con Valencia et al. (2013) quien menciona que la utilización del procesamiento de información de forma geográfica es una de las formas más eficientes de generar conocimiento basados en datos complejos como su posición en los mapas, además de ser una solución muy acertada en distintos aspectos como la toma de decisiones o la interoperabilidad de información geográfica, ya que ayuda a centralizar y espacializar los datos minimizando el tiempo de desarrollo de los mismos.

Así mismo, Valencia et al. (2013) menciona que los SIG, apoyan el manejo de los recursos naturales, la planificación y el ordenamiento del uso de la tierra a lo que también agregaremos la gestión de plagas en cultivos. En cuanto al manejo de plagas, Rivera et al. (2019) menciona que conocer el comportamiento de las plagas dentro de las huertas de aguacate proporciona información importante que se puede utilizar para aplicar medidas de control de forma dirigida hacia las zonas específicas de infestación de la plaga, ya que de esta manera se reducirán las poblaciones de insectos evitando hacer aplicaciones generalizadas, lo cual traerá ahorros económicos al utilizar menos insumos que se traducirá a un menor impacto al medio ambiente. El reto es formular y aplicar una estrategia que incluya la producción sustentable de aguacate, con un mayor uso de tecnologías de bajo impacto para el ambiente, para la conservación y recuperación del bosque, así

como el aprovechamiento forestal sostenible que conduzca al desarrollo económico y social de la región (INIFAP, 2012).

Otro de los objetivos de esta investigación fue de identificar por medio de un mapa las zonas con aptitud óptima para el establecimiento de aguacate, en el que se obtuvo un mapa de aptitud que indica que del porcentaje total del área de estudio solo el 7.93 % (120, 262.91 ha) tiene aptitud óptima para el establecimiento del cultivo de aguacate, mientras que el 83.34 % (100, 237.27 ha) tiene aptitud subóptima y el 8.71 % (10,481.82 ha) no cuenta con las condiciones para este cultivo. Así mismo, muestra que Coatepec Harinas es el municipio con mayor superficie con aptitud óptima para el establecimiento de este cultivo con 3,261.20 ha, seguido de Temascaltepec con el 2,973.83 ha, Donato Guerra con 2124.41 ha y Tenancingo con 1184.33 ha.

La tendencia de áreas con potencial para el cultivo se encuentra hacia el sur de los municipios, mostrando que, en Donato Guerra las plantaciones actuales se desarrollan en áreas con alto potencial, en contraste con las actuales plantaciones en los municipios de Temascaltepec, Coatepec Harinas y Tenancingo que se encuentran en áreas con aptitud subóptima y no apta, es decir, el establecimiento no se ha basado en los análisis necesarios para determinar el potencial territorial, realizando una propagación del mismo sin contemplar las necesidades de la especie, comprometiendo los resultados de adaptación y rendimiento del cultivo.

Se observa que las zonas no aptas se encuentran distribuidas en el centro de Temascaltepec y Coatepec Harinas, en Donato Guerra al noreste del municipio y en Tenancingo del centro al noreste, por lo que se infiere que el alto potencial de los diferentes municipios del estado de México no indica que la totalidad de la superficie cuente con las condiciones adecuadas para el establecimiento del cultivo de aguacate.

En Donato Guerra las localidades en zonas con alto potencial para el cultivo se encuentran al suroeste del municipio y son 8 en total, mientras que en Temascaltepec las localidades con condiciones óptimas son 14 y están ubicadas en el suroeste, en Coatepec Harinas 11 localidades ubicadas al sur y en Tenancingo 7 localidades al sur este. Estos resultados coinciden con los reportados por INIFAP (2012b), INIFAP (2012) y Santos y Franco (2013), quienes mencionan que los Distritos de Desarrollo Rural (DDR): Coatepec Harinas, Valle de Bravo y Tejupilco tienen como Centro de Atención para el Desarrollo Rural (CADER) a estas localidades con potenciales para el cultivo de aguacate,

CONCLUSIONES

1. Los métodos de índices de vegetación, algoritmos SAM y SID y la combinación de estos en las imágenes de acceso libre del sensor Sentinel-2, muestran alto potencial para la identificación de áreas plantadas con el cultivo de aguacate.
2. La imagen Sentinel-2 procesada con el algoritmo SID tiene un gran potencial para estudios de identificación de vegetación, mostrando una alta resolución y precisión.
3. El índice de vegetación ARII proporcionó mayor confiabilidad al determinar el patrón que sigue el cultivo de aguacate.
4. El sistema de información geográfica permitió conocer el comportamiento espacial de los insectos plaga.
5. El uso de los SIG para la generación de información es una alternativa viable para la obtención de información confiable a bajo costo.
6. El conocimiento de la distribución de las plagas permitirá realizar medidas de control dirigidas.
7. El SIG ayudará a evitar aplicaciones generalizadas, permitiendo ahorros económicos al utilizar menos insumos.
8. Sólo el 7.93 % del área de estudio cuenta con aptitud óptima para el establecimiento del cultivo de aguacate.
9. El 83.34 % del área de estudio cuenta con áreas sub óptimas para este cultivo.
10. Coatepec Harinas es el municipio con mayor superficie con aptitud óptima para el establecimiento de futuras plantaciones de aguacate con 3,261.20 ha.
11. Las localidades con mayor potencial en Coatepec Harinas son: Llano grande, Puerta del Carmen, Rancho Santa rosa, Puerta Grande, Meyuca de Morelos, El Cerrito, El Espinal, Tonicato, La Cerrada, El Potrero, Alta de Laja Azul.
12. El alto potencial de los diferentes municipios del estado de México no indica que la totalidad de la superficie cuente con las condiciones adecuadas para el establecimiento del cultivo de aguacate.

ANEXOS

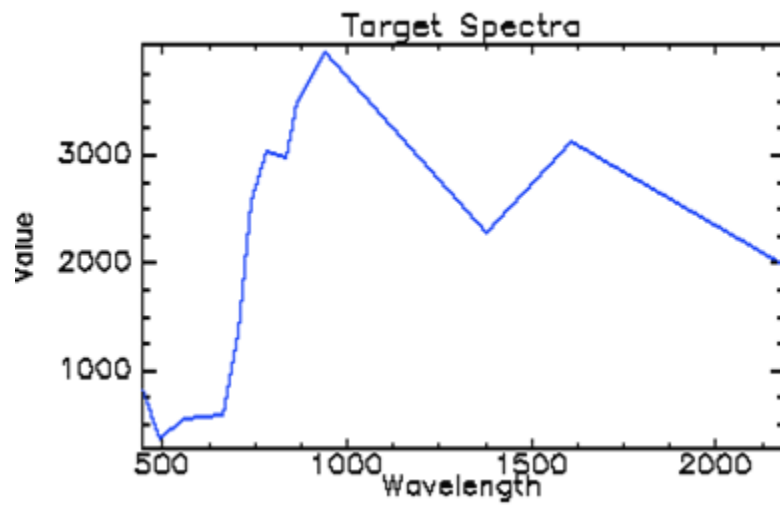


Figura 13. Curva típica de aguacate.

Se consideraron tres tipos de plantaciones de aguacate que se clasificaron de acuerdo a Rubí *et al.* (2013).



Figura 14. Plantaciones de 1 a 3 años. Fuente: Google Earth.

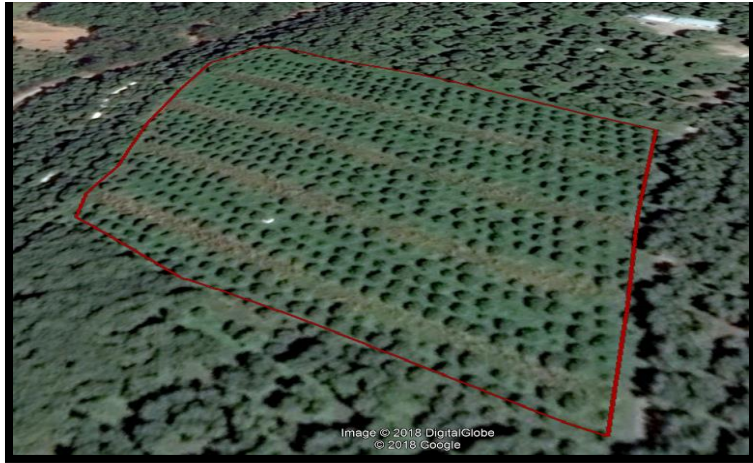


Figura 15. Plantaciones de 3 a 6 años. Fuente: Google Earth.



Figura 16. Plantaciones de más de 6 años. Fuente: Google Earth.

Imágenes Satelitales Sentinel-2. Obtenidas del servidor de la agencia espacial europea (ESA) disponible en: <https://scihub.copernicus.eu/dhus/>. A un nivel de procesamiento 1.



Figura 17.
S2B_MSIL1C_20171128T170639_N0206_R069_T14QMG_20171128T221610.

Escena.



Figura 18.
S2B_MSIL1C_20171128T170639_N0206_R069_T14QLF_20171128T221610.

Escena.



Figura 19.
S2B_MSIL1C_20171128T170639_N0206_R069_T14QLG_20171128T221610.

Escena.



Figura 20.
S2B_MSIL1C_20171128T170639_N0206_R069_T14QMF_20171128T221610.

Escena.

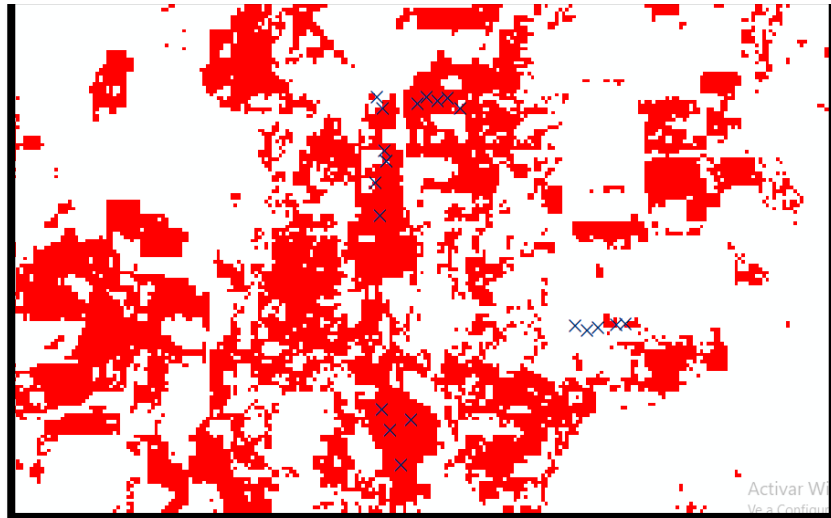


Figura 21. Correlación espacial entre la clasificación obtenida de SAM y puntos de entrenamiento.

BIBLIOGRAFÍA

Aguacate genera cadenas de valor importantes para México: Luis Doporto. (02 de octubre de 2019). Milenio. Recuperado de <https://www.milenio.com/negocios/aguacate-genera-cadenas-importantes-mexico-luis-doporto>

Amortegui, F. I. 2001. Cultivo de aguacate. Corporación para la promoción del desarrollo rural y agroindustrial del Tolima. Ibague.

Análisis multivariante. Recuperado de http://www.cyta.com.ar/biblioteca/bddoc/bdlibros/guia_multivariante/guia_multivariante.htm

Ariel, U. M, y Campanella, O. (2017). AP-SIG: un SIG con funciones específicas para agricultura de precisión. Universidad de Ciencias Exactas Físico Químicas y Naturales. Universidad Nacional de Río Cuarto.

Barrientos, P. A. F., Muñoz, P. R., Borys, M. W. y Martínez, D. M. T. 2007. Taxonomía, cultivares y portainjertos. In: Téliz, D.; Mora, A. (Ed.). El aguacate y su manejo integrado. 2ª edición. Mundi-Prensa México, S. A. de C. V. México, D. F. pp 30-62

Benacchio, S. S. 1982. Algunas exigencias agroecológicas en 58 especies de cultivo con potencial de producción en el Trópico Americano. FONAIAP-Centro Nal. de Inv. Agropecuarias. Ministerio de Agricultura y Cría. Maracay, Venezuela. 202 p.

Bernal, E. J.A., Diaz, D. C. A., Tamayo, V. A., Cordoba, G. O., Londoño, Z. M. E y Tamayo, M. P. 2008. Tecnología para el cultivo del aguacate. Manual técnico 5. *CORPOICA*.

Bovolo, F., Marchesi, S. & Bruzzone, L., (2012). A framework for automatic and unsupervised detection of multiple changes in multitemporal images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensin*, 50(6), 2196-2212.

Chavéz, L. G. 2012. Impacto del cambio de uso de suelo forestal a huertos de aguacate. INIFAP.

Chuvieco, E. (2007) *Teledetección Ambiental. La observación de la tierra desde el espacio*. Editorial Planeta, S. A. Barcelona. ISBN: 978-84-344-8072-8. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/libro?codigo=630577>

Chuvieco, E. 2002. Fundamentos de teledetección espacial. 2a ed. Editorial Rialp, Madrid.

Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). (2012), Biodiversidad Mexicana. Consultado 10-10-2019 en <https://www.biodiversidad.gob.mx/usos/alimentacion/aguacate.html>

Cuoto, W. 1996. Adaptación de la metodología de zonificación agroecológica de la FAO para aplicaciones a diferentes niveles de zonificación en países de América Latina y el Caribe. FAO.

Cyta, 2005. Análisis multivariante. Consulta: 20 de marzo de 2018. http://www.cyta.com.ar/biblioteca/bddoc/bdlibros/guia_multivariante/guia_multivariante.htm

Cyta. 2005. Análisis multivariante. Recuperado de http://www.cyta.com.ar/biblioteca/bddoc/bdlibros/guia_multivariante/guia_multivariante.htm. Técnica Administrativa. Buenos Aires.

Du, Y., Chang, C., Ren, H., Chang, C., y Jensen, J. (2004). New hyperspectral discrimination measure for spectral characterization. *Optical Engineering*, 43(8), 1777-1786. doi:10.1117/1.1766301

Educación forestal. (2019). Consultado 22-02-2019 en: <http://almazcara.forestry.es/2017/06/bandas-satelite-sentinel-2.html>

Falla, G. J. 2012. Geoprosesamiento. Consulta: enero de 2019 en file:///C:/Users/Lenovo%20Ideapad%20320/Documents/DOCTORADO/MAPA%20DE%20APTITUD_AGUACATE/GeoProsesamiento_2012.pdf

FAO. (2017). *Perspectivas Mundiales de las principales frutas tropicales*. Recuperado el 15 de Diciembre de 2018, de http://www.fao.org/fileadmin/templates/est/COMM_MARKETS_MONITORING/Tropical_Fruits/Documents/Tropical_Fruits_Spanish2017.pdf

FAO. 1978. Report on the Agro-Ecological Zones Project. Vol. 1. Methodology and Results for Africa. Rome, FAO.

Gama, C. L. M. y Gómez, P. A. 1992. An ethnoecological approach for the study of Persea: a case study in the Maya area. Proceedings of Second World Avocado Congress: 11-17.

García, A. M., Méndez, V. M., y Morales, G. A. (1967). El Aguacatero: Plagas y Enfermedades. *Fitofilo*, 56, 5-30.

García, J. A. A. y Martínez, M. L. J. 2010. Método para identificación de cultivos de arroz (*Oryza sativa* L.) con base en imágenes de satélite. *Agronomía Colombiana*. 28(2).

García, S. A. (28 de julio de 2018). "Crece en un 50 por ciento el cultivo de aguacate en el Estado de México". *El Sol de Toluca*. Pp.

Gonzalez, H., Sosa, C., Gonzalez, M., Valle de la Paz, A. 1998. Selecting the color of adhesive traps for sampling thrips in avocado orchard (*Persea americana* Mill.). En *Advances in Research*, 1997. Phytosanitary Institute, College of Postgraduates. Montecillo, Mexico. pp. 209-210.

González, O. E. 2012. Estudio Geoestadístico de la distribución espacial de adultos de araña roja (*Oligonychus punicae* Hirst) y su daño sobre el cultivo de aguacate (*Persea americana* Mill.) en la

zona oriente del Estado de Michoacán, México. Tesis profesional, Facultad de Ciencias Agrícolas de la UAEMex.

Gran Diccionario Náhuatl [en línea]. Universidad Nacional Autónoma de México [Ciudad Universitaria, México D.F.]: 2012 [14 de junio de 2018]. Disponible en <<http://www.gdn.unam.mx>>

Gran Diccionario Náhuatl [en línea]. Universidad Nacional Autónoma de México [Ciudad Universitaria, México D.F.]: 2012 [ref del 14 de junio de 2018]. Disponible en la Web <<http://www.gdn.unam.mx>>

Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA). 2017. Recuperado de http://www.inta.es/WEB/INTA/es/blogs/copernicus/BlogEntry_1507278650016

Lanzelotti, S. L. y Buzai, G. D. 2012. Uso del espacio y construcción del paisaje agrícola en la cuenca del río Caspinchango, valle de Yocavil, provincia de Catamarca. Tesis de Doctorado inédita. Facultad de Filosofía y letras, Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires Argentina.

Lu, D. & Weng, Q., (2007). A survey of image classification methods and techniques for improving classification performance. *International Journal of Remote Sensing*, 28 (5), 823-870.

Luna, A, y Morales, H. 2018. Especificaciones técnicas de la transformación Tasseled Cap. IDECOR.

Maldonado, F. I., J. F. Ramírez, M. Rubí, N. Xanat, y V. Lara. 2016. Distribución espacial de trips en aguacate en Coatepec Harinas, Estado de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 7: 845-856

Mapping gis. (2019). <https://mappinggis.com/2019/05/combinaciones-de-bandas-en-imagenes-de-satelite-landsat-y-sentinel/>

México, líder mundial en cultivo de aguacate. (21 de octubre de 2015). Agrichem. Recuperado de <https://agrichem.mx/mexico-lider-mundial-en-cultivo-de-aguacate/>

Pérez de la Cruz, M., Hernández-May, M. A., De la Cruz-Pérez, A., y Sánchez-Saul, S. (2016). Scolytinae y Platypodinae (Coleoptera: Curculionidae) de dos áreas de conservación en Tabasco, México. *Revista de Biología Tropical*, 64(1), 335-342.

Por qué el aguacate es considerado el “oro verde” por el crimen organizado. (3 de abril de 2018). Infobae. Recuperado de <https://www.infobae.com/america/mexico/2018/04/03/por-que-el-aguacate-mexicano-es-considerado-oro-verde-por-el-crimen-organizado/>

Ramírez, J. F., V. Solares, D. Figueroa, y J. Sánchez. 2013a. Comportamiento especial de Trips (Insecta: Thysanoptera), en plantaciones comerciales de aguacate (*Persea americana* Mill.) en Zitácuaro, Michoacán, México. *Acta Zoológica Mexicana* (n. s.) 29: 545-562.

Reyes Alemán JC. 2015. Comunicación personal.

Rivera, M. R. 2019. Análisis espacial de las poblaciones de barrenador de la rama (*Copturus aguacatae*) en el cultivo de aguacate en el estado de México. SOCOLEN.

Rodríguez, L., E.S., González, P., J.M. Y Mayek, P., N. 2009. La Infección de *Colletotrichum gloeosporioides* (Penz.) Penz. y Sacc. en Aguacatero (*Persea americana* Mill.): Aspectos Bioquímicos y Genéticos. *Revista Mexicana de Fitopatología* 27:53-63.

Rodríguez, S. (1992). *El Aguacate*. (S.A., Ed.) México.D.F: AGT.

Sacristán, R. F. (2006). La teledetección satelital y los sistemas de protección ambiental. *Revista AquaTIC*. 24, 13-41. <http://www.revistaaquatic.com/aquatic/art.asp?t=p&c=196>

SAGARPA. 2017. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. Sitio web: <https://www.gob.mx/sagarpa>. (Consulta: 10 de octubre 2017).

Sangerman, J.D. M., Larqué, S. B.S., Omaña, S. J. M., Shwenstesius, R. R., y Navarro, B. A. (2014). Tipología del productor de aguacate en el Estado de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 5(6), 1081-1095. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=263131532014>

Scora R, W., y Bergh , O. (1992). Origin of the taxonomic relationships within the genus *Persea*. (págs. 5005-514). *Proceedings of the Second World Avocado Congress*.

Scora, R. W., y Bergh, B. O. (1992). *Origin of the taxonomic relationships within the genus Persea* . *Proceedings of the Second World Avocado Congress* .

Sentinel Hub. Consultado 14-06-2017 en https://www.sentinel-hub.com/develop/documentation/eo_products/Sentinel2EOproducts

Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). (2017). Consultado 07-11-2017 en <http://www.siap.gob.mx/>

Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. (SIAP). (2018) Consultado: 10-11-2018 en <http://www.siap.gob.mx/>

SIAP. (2019). *Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera*. Recuperado el 28 de septiembre de 2019, de <https://www.gob.mx/siap/documentos/boletin-mensual-de-avances-de-la-produccion-de-aguacate-103935>

Storey W.B., Bergh B., Zentmyer G.A. 1986. The Origin, indigenous range and dissemination of the avocado. *Calif. Avoc. Soc. Yearbook* 70: 127-143.

Suárez, V. M. 2014. Apuntes sobre zonificación agroecológica de los cultivos. Particularidades en Cuba. *Cultivos tropicales*. 35(4).

Téliz, D., y Marroquin, F. 2007. Importancia histórica y socioeconómica del aguacate. Mundi-Prensa. México. p. 1-28.

Téliz, O. D. (2000). *El Aguacate y su Manejo Integrado*. D.F, México: Mundi-Prensa.

Urquiza, P. L. S., Rebollar, R. S., Callejas, J. N., Hernández, M. J., Gómez, T. G. (2015). Análisis de viabilidad económica para la producción comercial de aguacate Hass. *Revista Mexicana de Agronegocios*, 36. (fecha de Consulta 05 de noviembre de 2019). ISSN: 1405-9282. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=141/14132408018>

Valencia, A. J., Muñoz, A. L. F, y Vera, M.W. Y. (2013). Sistema de información geografico para la administración de proyectos de la secretaria de agricultura de Caldas. Universidad de Manizales, Facultad de Ciencias e Ingeniería.

Vergara-Olaya, J. D., Orozco-Hoyos, J., Bustillo-Pardey, Á. E., y Chaves-Córdoba, B. (2001). Dispersión *Phymastichus coffea* en un lote de café infestado de *Hypothenemus hampei*. *Cenicafé*, 52(2), 104-110.

Williams, L. O. 1977. The avocado, a synopsis of the genus *Persea*, subg. *Persea*. *Econ. Bot.* 31:315-320.

Wysoki M., van der Berg M. A., Ish-Am G, Gazit S., Peña J. E., Waite G. 2002. Pests and pollinators of avocado, p.223-294. In Peña J E, Sharp J L, Wysoki M (eds) *Tropical fruit pests and pollinators: biology, economic importance, natural enemies and control*. United Kingdom, CABI Publishing, 448p.