

Mapping avocado in Michoacán with Sentinel-2 images and a mixed methodology

María Luisa España Boquera^{1*}
María José Castro Bleda²
Salvador España Boquera²

Abstract

Avocado is a fashionable superfood, and a very profitable crop. Mexico is the first world producer of avocado and Michoacán the first national producer. The objective was to map the avocado crops in Michoacán with Sentinel-2 images, as well as establishing the main coverages. The study area was divided into three zones (Tancítaro, Pátzcuaro and Zitácuaro) and for each one five recent Sentinel-2 images (2019-2020) were downloaded from Copernicus web site. A preprocessing was carried out to concentrate the information of each area in a 12-band image. Avocado and forest plots were identified in . An unsupervised k-means classification algorithm of 50 classes was applied and classes corresponding to avocado, forest, secondary vegetation, tropical dry deciduous forest, agriculture, soil, urban area or water covers were identified. A success rate of 89.58 % was obtained in the avocado and 92.12 % in the forest. In total, 149 729 ha of avocado were identified. The map obtained was compared with Series VI of INEGI, in which the orchards are classified as rainfed agriculture; the forests coincide in more than 70%, while the soil gathers very seasonal covers, and there is confusion in the discrimination of other types of vegetation.

Keywords: *Persea americana* Mill., Copernicus, Series VI, INEGI, classification.

Cartografía del aguacate en Michoacán con imágenes Sentinel-2 y una metodología mixta

Resumen

El aguacate es un superalimento de moda, muy rentable. México es el primer productor mundial y Michoacán el primero nacional. El objetivo fue cartografiar el cultivo del aguacate en Michoacán con imágenes Sentinel-2 e identificar las principales coberturas. El área de estudio se dividió en tres zonas (Tancítaro, Pátzcuaro y Zitácuaro) y para cada una se descargaron cinco imágenes Sentinel-2 (Copernicus) (2019-2020). Se realizó un preprocesamiento para concentrar la información de cada zona en una imagen de 12 bandas. Se identificaron en Google Earth parcelas de aguacate y de bosque. Se aplicó un algoritmo de clasificación no supervisada *k-means* de 50 clases, de las cuales se identificó el aguacate y las coberturas: bosque, vegetación secundaria, selva, agricultura, suelo, zona urbana o agua. Se obtuvo un porcentaje de aciertos del 89.58 % en aguacate y 92.12 % en bosque. En total se identificaron 149 729 ha de aguacate. El mapa obtenido se comparó con la Serie VI de INEGI, en la que las huertas son clasificadas como agricultura de temporal; los bosques coinciden en más del 70 %, el suelo reúne coberturas estacionales y existe confusión en la discriminación de otros tipos de vegetación.

Palabras clave: *Persea americana* Mill., Copernicus, Serie VI, INEGI, clasificación.

¹Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Instituto de Investigaciones Agropecuarias y Forestales, km 9.5 carretera Morelia-Zinapécuaro, Tarímbaro, Mich. C.P. 58880, México.

²Universitat Politècnica de València, Departamento de Sistemas Informáticos y Computación. Camino de Vera, s/n C. P. 46022. Valencia, España.

*Corresponding author: boquera@umich.mx 443 3223500 Ext. 5240 y 5241. ORCID ID: 0000-0001-6255-2802

Delivering date: February 25th, 2022

Accepting date: August 16th, 2022

Introduction

Due to its nutraceutical characteristics, avocado is considered a superfood (Imbert, 2020; Colilles-Cascallar, 2020) recommended to prevent different diseases, such as diabetes, obesity, cancer, cardiovascular and optical problems, osteoarthritis, and photo-ageing (Avilés-Gaxiola et al., 2020). These qualities, spread by important advertising campaigns, have made it a gastronomical, pharmaceutical and cosmetic fashionable product (Imbert, 2020) and a very profitable crop (Colilles-Cascallar, 2020).

Avocado (*Persea Americana* Mill.), originated in Central America, is a leafy evergreen tree, with medium height leaves, hermaphroditic flowers, and pulpy fruit, with a single spherical seed. It is cultivated in tropical and sub-tropical regions of the world, in at least 70 countries in all the continents, mainly in Latin America, being the Hass variety the most spread. Avocado world production yearly exceeds the 6.4 tons, being the 22nd position in the classification of main fruits. Mexico contributes the highest percentage of this production with a total of 34 %, followed by Dominican Republic with a 20 % and Peru with an 8 %. In Europe, there is a meaningful production in Spain (approximately 100 000 tons) and, with much lower volumes, in Portugal and Crete (Imbert, 2020).

Regarding the exportations, Mexico is world leader, with a participation of 43 %; Dominican Republic, in spite of being a great producer, does not figure in the international market, since they dedicate their production to the internal consumption; in contrast, Netherlands, without being producers, is the second worldwide exporter (16 %) concentrating the 63 % of the European importation, mainly of Peruvian avocado that is redistributed to all Europe; Peru is located third (12 %), followed by Spain (6 %), and Chile (5 %) (Criollo-Mendoza et al., 2020). Regarding the importations, the United States, with 1.1 million of tons, and the European Union, with 750 000 tons, concentrate around 80 % of international commerce of this fruit. The United States is mainly supplied from Mexico (almost 1 million of tons) and a little from Chile and Peru; while other suppliers of the European Union are Chile, Mexico, and Mediterranean countries (Spain, Israel, Morocco) in winter season, and Peru, South Africa, and Kenya during summer season (Imbert, 2020). Spain could become the first European avoca-

Introducción

Por sus características nutracéuticas, el aguacate es considerado un superalimento (Imbert, 2020; Colilles-Cascallar, 2020) recomendado para prevenir diferentes enfermedades, como diabetes, obesidad, cáncer, problemas cardiovasculares y oculares, osteoartritis y fotoenvejecimiento (Avilés-Gaxiola et al., 2020). Estas cualidades, difundidas en importantes campañas publicitarias, lo han convertido en un producto gastronómico, farmacéutico y cosmético de moda (Imbert, 2020) y en un cultivo muy rentable (Colilles-Cascallar, 2020).

El aguacate (*Persea americana* Mill.), originario de Centroamérica, es un árbol frondoso perennifolio, de hoja mediana, flores hermafroditas y fruto carnoso, con una única semilla esférica. Se cultiva en las regiones tropicales y subtropicales del mundo, en al menos 70 países de todos los continentes, principalmente América Latina, siendo la variedad Hass la más propagada. La producción mundial de aguacate supera anualmente los 6.4 millones de toneladas, ocupando la posición 22 en la clasificación de principales frutas. México aporta el mayor porcentaje de esta producción con un 34 %, seguido de República Dominicana con un 10 % y Perú con un 8 %. En Europa existe una producción significativa en España (aproximadamente 100 000 toneladas) y, con volúmenes mucho menores, en Portugal y Creta (Imbert, 2020).

En cuanto a las exportaciones, México es el líder mundial, con una participación del 43 %; la República Dominicana, pese a ser gran productora, no figura en el mercado internacional, pues dedica su producción al consumo interno; en contraste, los Países Bajos, sin ser productores, son el segundo exportador mundial (16 %), concentrando el 63 % de la importación europea, principalmente de aguacate peruano que redistribuyen a toda Europa; Perú se sitúa en tercer lugar (12 %), seguido de España (6 %) y Chile (5 %) (Criollo-Mendoza et al., 2020). En lo que corresponde a las importaciones, Estados Unidos, con 1.1 millones de toneladas, y la Unión Europea, con 750 000 toneladas, concentran alrededor del 80 % del comercio internacional de esta fruta. Estados Unidos se abastece principalmente de México (casi 1 millón de toneladas) y un poco de Chile y Perú; mientras que los países proveedores de la Unión Europea son Chile, México y países mediterráneos (España, Israel y Marruecos)

do supplier, since its cultivation has been replacing the traditional ones of vine, almond tree, olive, and citrus plants (Colilles-Cascallar, 2020; Imbert, 2020). With more than 14 000 hectares cultivated (Colilles-Cascallar, 2020), avocado has become an option of agricultural revalorization and rescue of abandoned plots, since their climatic, water, and type of soil necessities are very similar, especially with the citrus plants. However, the excessive consumption of water is worrying, an increasingly scarce resource in the southern of the peninsula, as well as the climatic limitations (Colilles-Cascallar, 2020; Imbert, 2020).

In Mexico, the Agri-food and Fisheries Information Service (SIAP) reports 234 000 hectares of avocado, of which, more than 70 % are located in Michoacán (SIAP, 2020). The coincidence between the agro ecological conditions that the crop and the temperate forests of Michoacán require, explains the great expansion of avocado in this state, at expenses of their forests and their biodiversity (Bravo-Espinoza et al., 2009). This also causes an alteration of the water cycle of the basins, for the use of the water for irrigation (Burgos et al., 2011) and because the refill of the aquifer is much greater through the forests (24.9 %) than through the orchard (18.1 %) (Gómez-Tagle Chávez et al., 2019) and the evapotranspiration of avocado trees (1 100 – 1 200 mm) that the conifers (750 – 950 mm) (De la Tejera-Hernández et al., 2013). The excessive use of agrochemicals in the orchards has a negative impact in the environment (Burgos et al., 2011) and in the people health and, in a not so long term, they can cause the decadence of the crop (De la Tejera-Hernández et al., 2013). The change in the pattern of crops threatens the alimentary security, because it has gone from the production of basic food for local consumption to a single product, destined mainly for export; this implies a high susceptibility to instability of commerce and eventual changes in commerce relations (De la Tejera-Hernández et al., 2013). There have been transformations in the social organization; although migration and poverty have decreased, the created employments are precarious and the benefits are focused on some producers, agribusiness and intermediaries (Toribio-Morales et al., 2019). The growth of the crop of avocado have also been linked to the increase of insecurity (Valdez and Sánchez, 2020) and agricultural conflicts (De la Tejera Hernández et al., 2013).

en la temporada de invierno, y Perú, Sudáfrica y Kenia durante la temporada de verano. (Imbert, 2020). España podría convertirse en el primer suministrador europeo de aguacate, ya que su cultivo ha ido sustituyendo a los tradicionales de la vid, el almendro, el olivo y los cítricos (Colilles-Cascallar, 2020; Imbert, 2020). Con más de 14 000 ha cultivadas (Colilles-Cascallar, 2020), el aguacate se ha convertido en una opción de revalorización agrícola y rescate de parcelas abandonadas, pues sus necesidades climatológicas, hídricas y de tipo de suelo son muy similares, en particular a las de los cítricos. Preocupa, sin embargo, el consumo excesivo de agua, un recurso cada vez más escaso en el sur de la península, así como las limitaciones climáticas (Colilles-Cascallar, 2020; Imbert, 2020).

En México, el Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP) reporta 234 000 hectáreas de aguacate, de las cuales, más del 70 % están en Michoacán (SIAP, 2020). La coincidencia entre las condiciones agroecológicas que requiere el cultivo y las del bosque templado michoacano, explica la gran expansión del aguacate en ese estado, a costa de sus bosques y su biodiversidad (Bravo-Espinoza et al., 2009). Esto provoca también la alteración del ciclo hidrológico de las cuencas, por el uso de agua en el riego (Burgos et al., 2011) y porque es mucho mayor la recarga de los acuíferos a través de los bosques (24.9 %) que de las huertas (18.1%) (Gómez-Tagle Chávez et al., 2019) y la evapotranspiración de los árboles de aguacate (1 100 - 1 200 mm) que de las coníferas (750 - 950 mm) (De la Tejera-Hernández et al., 2013). El uso excesivo de agroquímicos empleados en las huertas tiene un impacto negativo en el ambiente (Burgos et al., 2011) y en la salud de las personas y, en un plazo no tan largo, puede provocar la decadencia del cultivo (De la Tejera-Hernández et al., 2013). El cambio en el patrón de cultivos amenaza la seguridad alimentaria, pues se ha pasado de la producción de alimentos básicos de consumo local, a un solo producto, destinado mayoritariamente a la exportación; esto conlleva una alta susceptibilidad a la inestabilidad de los mercados y a eventuales cambios en las relaciones comerciales (De la Tejera-Hernández et al., 2013). Ha habido transformaciones en la organización social; si bien se ha reducido la emigración y la pobreza, los empleos creados son precarios y los beneficios se concentran en unos pocos productores, agronego-

In 2005, The Michoacán Avocado Commission (COMA) elaborated the pattern of producers, updated in 2007, to know the total of properties dedicated to that crop, their characteristics, surface, and geographic location (Bravo-Espinoza et al., 2009). With the census of COMA, the National Committee of Avocado Producers (CONAPA) have generated maps that have served as reference for various studies (Bravo-Espinoza et al., 2009; Toribio-Morales et al., 2019). However, for some applications it is required some mapping information more detailed that can be obtained from satellite images. Morales-Manilla et al., (2012) generated an avocado map, through the digitalization of World-View-2 images. This manual strategy results laborious, for this reason automatic methodologies are preferred, supervised or not.

In the supervised classifications, each pixel of the image is associated to one of the coverage present in the zone, exemplified by a group of samples that shows the spectral heterogeneity relevant among the coverages; this requires an a priori knowledge of the study zone (Egorov et al., 2015; Ma et al., 2020). On other hand, in the unsupervised classifications, the pixels with similar spectral characteristics are labeled in the same class, within a predetermined number of classes. The identification of classes and coverages is made a posteriori, and no field data is required for classification, but it is for the identification and validation, at least of the key coverages, among which it is necessary a clear spectral separability (Egorov et al., 2015). When the interest is focused on some of the present coverages, the sampling can be simplified using mixed methods: with an unsupervised classification the target coverages are isolated and with a supervised method the result is refined; if only one crop is looked, their specific characteristics can be taken into account and use analytic methods (Brinkhoff et al., 2020).

In Mexico, there is not a detailed and updated database of the crops, such as the Geographic Information System for the Identification of Agricultural Plots (SIGPAC), developed in Spain to make easier the review of the applications for the help program of Common Agricultural Policy (PAC) of the European Union (Campos-Taberner et al., 2019). The SIGPAC data allow the application of different supervised images classification algorithms from the Sentinel-2

crops e intermediarios (Toribio-Morales et al., 2019). El auge del cultivo de aguacate ha estado ligado también al aumento de la inseguridad (Valdez y Sánchez, 2020) y de los conflictos agrarios (De la Tejera Hernández et al., 2013).

En 2005, la Comisión Michoacana del Aguacate (COMA) elaboró el padrón de productores, actualizado en 2007, para conocer la totalidad de predios dedicados a ese cultivo, sus características, superficie y ubicación geográfica (Bravo-Espinoza et al., 2009). Con los censos del COMA, el Consejo Nacional de Productores de Aguacate (CONAPA) ha generado mapas que han servido como referencia para diversos estudios (Bravo-Espinoza et al., 2009; Toribio-Morales et al., 2019). Sin embargo, para algunas aplicaciones se requiere información cartográfica más detallada, que puede obtenerse a partir de imágenes satelitales. Morales-Manilla et al., (2012) generaron un mapa del aguacate, mediante la digitalización de imágenes WorldView-2. Esta estrategia manual resulta laboriosa, por lo que son preferibles las metodologías automáticas, ya sean supervisadas o no.

En las clasificaciones supervisadas, cada pixel de la imagen se asocia a una de las coberturas presentes en la zona, ejemplificadas con un conjunto de muestras que retrate la heterogeneidad espectral relevante entre coberturas; esto requiere un conocimiento *a priori* de la zona de estudio (Egorov et al., 2015; Ma et al., 2020). Por otra parte, en las clasificaciones no supervisadas, los pixeles con características espectrales similares son etiquetados en la misma clase, dentro de un número predeterminado de clases. La identificación entre clases y coberturas se realiza *a posteriori*, y no se requieren datos de campo para la clasificación, pero sí para la identificación y validación, al menos de las coberturas clave, entre las que es necesaria una clara separabilidad espectral (Egorov et al., 2015). Cuando el interés se centra en algunas de las coberturas presentes, se puede simplificar el muestreo utilizando métodos mixtos: con una clasificación no supervisada se aíslan las coberturas objetivo y con un método supervisado se afina el resultado; si se busca un solo cultivo, se pueden tomar en cuenta sus características específicas y emplear métodos analíticos (Brinkhoff et al., 2020).

En México no existe una base de datos detallada y actualizada de los cultivos, como por ejemplo, el sis-

(S) satellites of the Copernicus program of the European Space Agency (ESA) (Campos-Taberner et al., 2019; Segarra et al., 2020). The National Institute of Statistics, Geography and Informatics (INEGI) of Mexico generates coverage maps at national level, regularly updated (the last one correspond to the Series VI, with reference date 2014, elaborated with Landsat TM8 images, in vector format, with a scale 1 : 250 000), in which only different agriculture categories are distinguished (INEGI, 2017).

The aim of this research is mapping the avocado crop in Michoacán from S2 satellite images, using a mixed methodology, applicable when there is not a detailed data base of the use of soil; additionally the main coverages present in the zone are identified and the obtained map is compared with the Series VI of INEGI.

Materials and methods

The analysis was done with free access programs Sentinel Application Platform (SNAP) of ESA and Quantum Geographic Information System (QGIS).

Study zone

The fields of avocado in the state of Michoacán are distributed in the physiographic province of the Franja Volcánica Transmexicana (Ferrusquía-Villafranca, 1998), between the coordinates 18° 45' and 20° 06' north latitude and 101° 47' and 103° 13' west longitude. The zone is known as the Franja Aguacatera and covers 24 municipalities, gathered in ten of them the 90 % of the cultivated surface. Avocado is established over eight types of soil, mostly muddy. The climate of the region is temperate to semi-warm, sub humid with rains during summer (C (w2), (A) C (w1) and (A) C (w2)). The yearly average temperatures in the zone go from 12 °C to 27 °C, although the greater proportion of orchards are located in the range of 16 °C to 23 °C. The precipitations go from 900 to 1 700 mm by year. The elevations of the zone go from 900 to 4 000 masl, the highest peak being the Tancitaro to the west and the Monarch Butterfly Reserve to the east; the orchards are located between 1 050 and 2 650 masl (Burgos et al., 2011). The zone has forest vocation, predominating the pine and oak temperate forest, with a zone of disturbed forest or secondary vegetation, and tropical dry deciduous forests to

tema de Información Geográfica de Identificación de Parcelas Agrícolas (SIGPAC), desarrollado en España para facilitar la revisión de las solicitudes del programa de ayudas de la Política Agraria Común (PAC) de la Unión Europea (Campos-Taberner et al., 2019). Los datos del SIGPAC permiten aplicar diferentes algoritmos de clasificación supervisada de imágenes de los satélites Sentinel-2 (S2) del programa Copernicus de la Agencia Espacial Europea (ESA) (Campos-Taberner et al., 2019; Segarra et al., 2020). El Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI) de México genera mapas de coberturas a nivel nacional, actualizados periódicamente (el último corresponde a la Serie VI, con fecha de referencia 2014, elaborado con imágenes Landsat TM8, en formato vectorial, a escala 1:250 000), en los que solo se distinguen diferentes categorías de agricultura (INEGI, 2017).

El objetivo de este trabajo es cartografiar el cultivo del aguacate en Michoacán a partir de imágenes satelitales S2, utilizando una metodología mixta, aplicable cuando no se cuenta con una base de datos detallada de uso del suelo; adicionalmente se identifican las principales coberturas presentes en la zona y el mapa obtenido se compara con la Serie VI de INEGI.

Materiales y métodos

El análisis se realizó con los programas de libre acceso Sentinel Application Platform (SNAP) de la ESA y Quantum Geographic Information System (QGIS).

Zona de estudio

Las plantaciones de aguacate en el estado de Michoacán se encuentran distribuidas en la provincia fisiográfica de la Faja Volcánica Transmexicana (Ferrusquía-Villafranca, 1998), entre las coordenadas 18° 45' y 20° 06' latitud norte y 101° 47' y 103° 13' longitud oeste. La región es conocida como la Franja Aguacatera y abarca 24 municipios, concentrándose en diez de ellos el 90 % de la superficie cultivada. El aguacate se establece sobre ocho clases de suelo, mayoritariamente andosol. El clima en la región es templado a semicálido, subhúmedo con lluvias en verano (C(w2), (A)C(w1) y (A)C(w2)). Las temperaturas medias anuales en la zona van de 12 °C a 27 °C, si bien la mayor proporción de huertas se encuentra en el rango de 16 °C a 23 °C. Las precipitaciones van de 900 a 1 700 mm anuales. Las elevaciones en la zona van de los 900 a

the south (Rzedowski, 2006). Patches of lava flows can be distinguished (badlands) in the Tancítaro and the Paricutín. The main water bodies are the lakes of Pátzcuaro and Zirahuén. The main cities are Uruapan, Morelia, Hidalgo City and Zitácuaro (Durán and Sevilla, 2003).

Selection of images

Images of the S2 satellites were used, with twelve spectral bands distributed between 400 nm and the 1 800 nm, with spectral resolution of 10, 20, or 60 nm (Segarra et al., 2020). Three images are necessary to cover the study area, therefore, three analysis zones were considered: one centered in the top of the Tancítaro (T zone), another one centered in the Pátzcuaro's lake (P) and another one in Zitácuaro city (Z) (Figure 1). To capture the phenological variability of the different coverages (Brinkhoff et al., 2020), in each zone were downloaded, from the Copernicus official platform (<http://scihub.copernicus.eu>), five recent images, cloud free. The dates of the images are: 03/26/2019, 05/10/2019, 01/05/2020, 04/09/2020 and 11/05/2020 for T zone; 03/31/2019, 12/31/2019, 01/06/2020, 02/19/2020 and 11/05/2020 for P zone; and 02/19/2020, 03/25/2020, 04/14/2020, 11/05/2020 and 11/10/2020 for Z zone.

Preprocessing

For every single image, all the bands were resampled to 10 m and were trimmed to the size of the interest zone; a mask was applied corresponding to the altitudinal limit of 1 000 masl. The use of various images considerably increases the informatics necessities of calculation capacities. In order to select the relevant information and eliminate the redundant one, which helps to diminish the noise and the dimensionality of data, the analysis of main components was carried out (PCA) of each trimmed image, selecting the first two components for being the most meaningful ones (Ma et al., 2020). With the proposed method it is passed from 65 to 12 values per pixel, that is, as if working with a single image. On other hand, the NDVI of each date was calculated, according to the formula adapted to the S2 bands $((B8 - B4) / (B8 + B4))$ (Segarra et al., 2020). All the NDVI were gathered, forming a single image with five layers, to which a PCA was made, and the first two components were

los 4 000 msnm, siendo los picos más altos el Tancítaro al occidente y la Reserva de la Mariposa Monarca al oriente; los huertos se encuentran entre 1 050 y 2 650 msnm (Burgos et al., 2011). La zona tiene vocación forestal, predominando el bosque templado de pino y encino, con zonas de bosque perturbado o vegetación secundaria, y selvas caducifolias al sur (Rzedowski, 2006). Se distinguen manchones de coladas de lava (malpaís) en el Tancítaro y el Paricutín. Los principales cuerpos de agua son los lagos de Pátzcuaro y Zirahuén. Las principales ciudades son Uruapan, Morelia, Ciudad Hidalgo y Zitácuaro (Durán y Sevilla, 2003).

Selección de imágenes

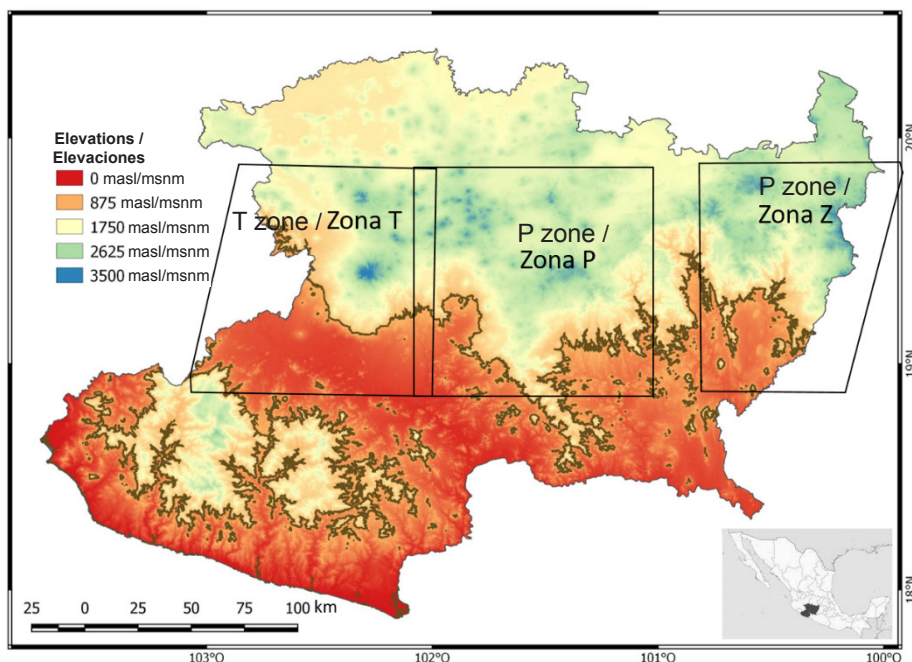
Se utilizaron imágenes de los satélites S2, con doce bandas espectrales repartidas entre los 400 nm y los 1 800 nm, con resolución espacial de 10, 20 o 60 m (Segarra et al., 2020). Se requieren tres imágenes para cubrir el área de estudio, por lo que se consideraron tres zonas de análisis: una centrada en el pico del Tancítaro (zona T), otra centrada en el lago de Pátzcuaro (P) y otra en la ciudad de Zitácuaro (Z) (Figura 1). Para capturar la variabilidad fenológica de las diferentes coberturas (Brinkhoff et al., 2020), en cada zona se descargaron, de la plataforma oficial de Copernicus (<http://scihub.copernicus.eu>), cinco imágenes recientes, libres de nubes. Las fechas de las imágenes son: 26/03/2019, 10/05/2019, 05/01/2020, 09/04/2020 y 05/11/2020 para la zona T; 31/03/2019, 31/12/2019, 05/01/2020, 19/02/2020 y 05/11/2020 para la zona P; y 19/02/2020, 25/03/2020, 14/04/2020, 05/11/2020 y 10/11/2020 para la zona Z.

Preprocesamiento

Para cada una de las imágenes, todas las bandas se remuestrearon a 10 m y se recortaron al tamaño de la zona de interés; se le aplicó una máscara correspondiente al límite altitudinal de 1 000 msnm. La utilización de varias imágenes incrementa considerablemente las necesidades informáticas de capacidad de cálculo. Con el fin de seleccionar la información relevante y eliminar la redundante, lo que ayuda a disminuir ruido y la dimensionalidad de los datos, se realizó el análisis de componentes principales (PCA) de cada imagen recortada, seleccionando los dos primeros

Figure 1. T, P, and Z study zones. In the background, the continuous of elevations of Michoacán (INEGI); the elevation intervals are indicated with colors; they correspond to climatic zones, from the warmest (red) to the coldest (blue). The level curve of 1 000 masl is highlighted. The polygons represent the extension of the Sentinel-2 images.

Figura 1. Zonas de estudio T, P y Z. Como fondo, el continuo de elevaciones de Michoacán (INEGI); los intervalos de elevación se indican en colores; se corresponden con zonas climáticas, de más cálidas (rojo) a más frías (azul). Se resalta la curva de nivel de 1 000 msnm. Los polígonos representan la extensión de las imágenes Sentinel-2.



selected. Finally, the first two main components of each date and of the NDVI were gathered in a composition of 12 bands, whose size is the same as that of a single S2 image, but that concentrate greater amount of information. The Figure 2 shows the pre-processing diagram.

Avocado identification

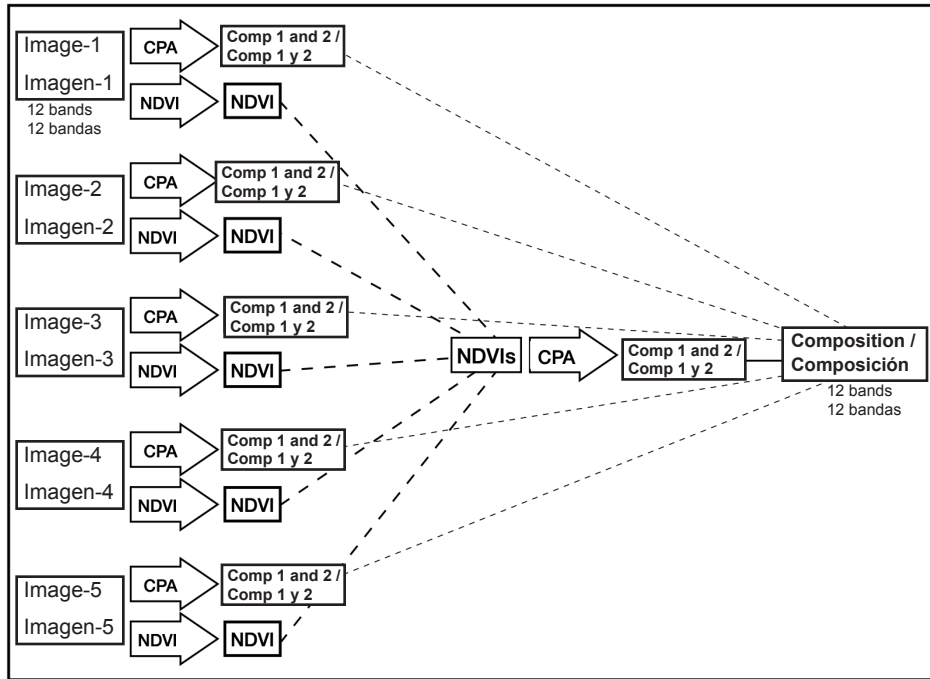
For the construction of the avocado map of each zone, the composition of twelve bands resulting from the preprocessing was the starting point and the algorithm presented in the Figure 3 was followed, which starts with a PCA and its unsupervised classification k-means of 50 classes. In Google Earth avocado plots in each zone were manually selected, which could be identified thanks to the crop plantation pattern, which allows to distinguish the top of the trees ordered in plots; in some cases the Google Earth tool which allows to visualize the historical register of images was used, in order to corroborate that in any moment it was deforested and avocado was

componentes por ser los más significativos (Ma et al., 2020). Con el método propuesto se pasa de 65 a 12 valores por pixel, es decir, como si se trabajara con una única imagen. Por otra parte, se calculó el NDVI de cada fecha, según la fórmula adaptada a las bandas S2 $((B8 - B4)/(B8 + B4))$ (Segarra et al., 2020). Todos los NDVI se unieron, formando una sola imagen de cinco capas, a la que se realizó un PCA, y se seleccionaron los dos primeros componentes. Finalmente, los dos primeros componentes principales de cada fecha y de los NDVI se unieron en una composición de 12 bandas, cuyo tamaño es el mismo que el de una sola imagen S2, pero que concentra mayor cantidad de información. La Figura 2 muestra el esquema del preprocesamiento.

Identificación del aguacate

Para la construcción del mapa de aguacate de cada zona, se partió de la composición de doce bandas resultante del preprocesamiento y se siguió el algo-

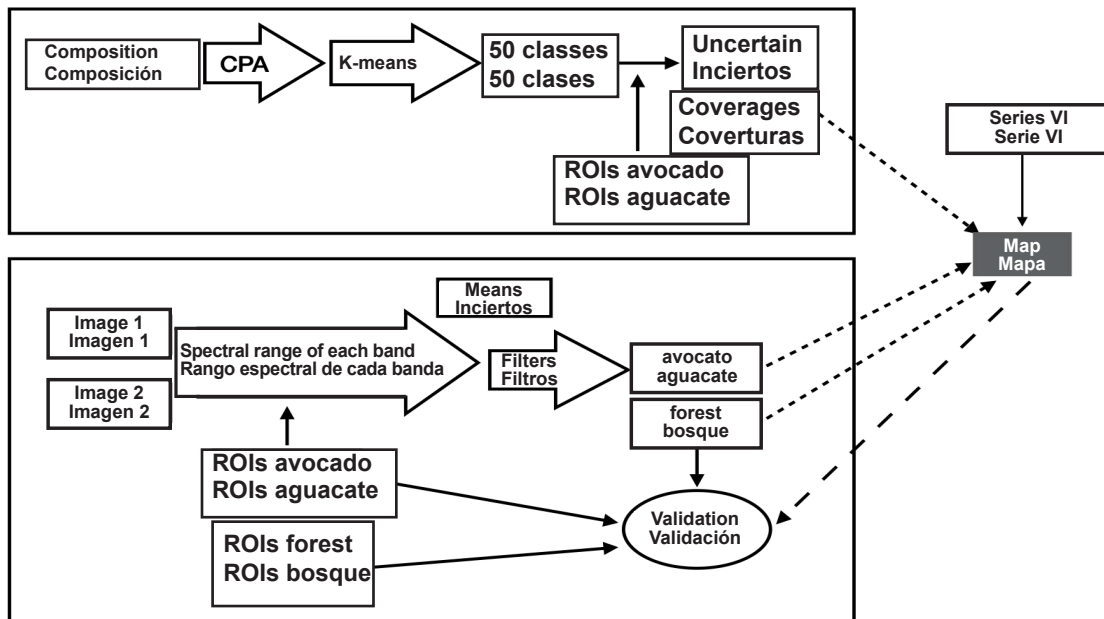
Figure 2. Preprocessing diagram
Figura 2. Esquema del preprocesamiento



planted. In the T zone, 457 plots were identified, corresponding to 397 682 pixels (3 976 ha), in the P zone, 717 plots (266 333 pixels, 2 663 ha) and in Z zone, 192 plots (35 387 pixels, 353 ha). In the case of Z zone, the avocado plots are not in all the image, but in a sma-

ritmo representado en la Figura 3, que inicia con una PCA y su clasificación no supervisada *k-means* de 50 clases. En Google Earth se seleccionaron manualmente parcelas de aguacate en cada zona, que se pudieron identificar gracias al padrón de plantación

Figure 3. Diagram of the map construction algorithm.
Figura 3. Esquema del algoritmo de construcción del mapa.



ller subzone that was defined from the level curves between 2 000 and 2 600 masl. Among the 50 classes obtained from the unsupervised classification, those that, according to the sample plots, correspond to the avocado orchards were identified (6 in T, 4 in P, and 3 in Z). These classes can contain both avocado and forest pixels, since these two coverages present similar spectral characteristics; for this reason, these classes are considered as potentially of avocado or "uncertain". In order to separate avocado from forest in the "uncertain" pixels, samples of the forest zones of the three zones were manually selected in Google Earth, easily identifiable in screen: 223 in T zone (1 157 190 pixels), 282 in P (1 200 927 pixels) and 380 in Z (909 334 pixels). In two of the five used images, the value ranges of avocado and forest were established in each spectral band, those "uncertain" pixels with spectral values within the avocado range were selected. In order to improve the finish of the final map, various consecutive low-pass of 3 x 3 filter were used, to eliminate the "salt and pepper" effect that is, the presence of isolated pixels of a class in another one, which correspond to some hole in soil of a plot or to some tree out of it. The result of this process makes the avocado map.

Construction of coverage maps

As reference for the identification of coverages, the inscription of Series VI of INEGI (2017) was simplified, considering: forests (of oyamel, pine, and oak, and their respective arboreal vegetation), secondary vegetation (arboreal and bushy), tropical dry deciduous forests (including secondary dry deciduous forest vegetation), agriculture (of irrigation, rainfed, yearly rainfed and moisture), water covers, urban zones, in addition of meadows, tular, and no vegetation zones (Figure 4).

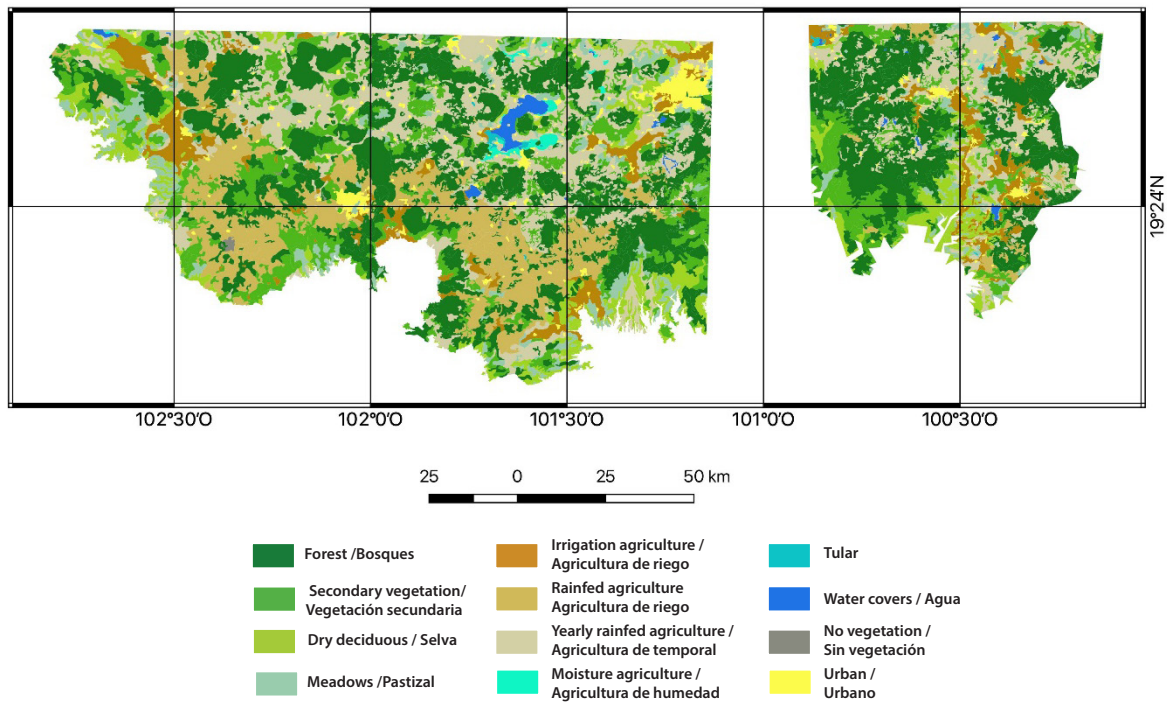
In the T and P zones, each of the 50 classes obtained from the classification, except for the "uncertain" ones, was assigned to one of the general coverages present in the zone (forest, secondary vegetation, tropical dry deciduous forest, agriculture, soil, urban zone, water covers and badlands), visually choosing the one with the greatest spatial coincidence. The "uncertain" pixels no identified as avocado, as well as those discarded by the filter, were considered as forest. In Z zone, the assignation of all the classes to

del cultivo, que permite distinguir las copas de los árboles ordenadas en las parcelas; en algunos casos se recurrió a la herramienta de Google Earth que permite visualizar el registro histórico de imágenes, para corroborar que en algún momento se deforestó y se plantó aguacate. En la zona T se identificaron 457 parcelas, correspondientes a 397 682 píxeles (3 976 ha), en la zona P, 717 parcelas (266 333 píxeles, 2 663 ha) y en Z, 192 parcelas (35 387 píxeles, 353 ha). En el caso de la zona Z, las parcelas de aguacate no se encuentran en toda la imagen, sino en una subzona más pequeña, que se definió a partir de las curvas de nivel entre 2 000 y 2 600 msnm. Entre las 50 clases obtenidas de la clasificación no supervisada, se identificaron aquellas que, de acuerdo con las parcelas muestra, corresponden a las huertas de aguacate (6 en T, 4 en P y 3 en Z). Estas clases pueden contener tanto píxeles de aguacate como de bosque, dado que estas dos coberturas presentan características espectrales similares; por esta razón, esas clases se consideran como potencialmente de aguacate o "incierto". Con el fin de separar el aguacate del bosque en los píxeles "incierto", se seleccionaron manualmente en Google Earth ejemplos de zonas forestales de las tres zonas, fácilmente identificables en pantalla: 223 en la zona T (1 157 190 píxeles), 282 en P (1 200 927 píxeles) y 380 en Z (909 334 píxeles). En dos de las cinco imágenes utilizadas se establecieron los rangos de valor del aguacate y el bosque en cada banda espectral, se seleccionaron aquellos píxeles "incierto" con valores espectrales dentro del rango de aguacate. Para mejorar el acabado del mapa final, se utilizaron varios filtros consecutivos, paso-bajo de 3 x 3 para eliminar el efecto "sal y pimienta" es decir, la presencia de píxeles aislados de una clase en otra, que corresponden, a algún hueco de suelo al interior de una parcela o a algún árbol fuera de esta. El resultado de este proceso conforma el mapa del aguacate.

Construcción del mapa de coberturas

Como referencia para la identificación de las coberturas, se simplificó la leyenda de la Serie VI de INEGI (2017), considerando: bosques (de oyamel, pino y encino y sus respectivas vegetaciones arbóreas), vegetaciones secundarias (arbóreas y arbustivas), selvas (incluyendo vegetaciones secundarias de selva), agricultura (de riego, de temporal, de temporal anual

Figure 4. Map of the Series VI of INEGI, with the inscription simplified to consider general types of coverages.
Figura 4. Mapa de la Serie VI de INEGI, con la leyenda simplificada para considerar tipos generales de coberturas.



coverages was made, including those corresponding to uncertain pixels, and afterwards the pixels identified as such were changed to avocado, that is, the uncertain ones purified and filtered. In order to ensure the coherence between coverages in a zone and between the three zones, it was established as a working hypothesis that the histograms of the NDVIs of the five used dates must be unimodal for all the coverages (except for agriculture) in each zone, and that the histograms of the NDVI of the common date (11/05/2020) must be similar in the three zones. This criteria was taken into account when assigning the classes to the coverages, in such a way that in each coverage, classes with similar NDVIs in the different seasons of the year met.

Validation

In order to value of the precision level of the result, it was calculated the number of good and bad decisions in the detection of the sample avocado plots and forests, since during the classification process the spectral characteristics of these plots were taken into account, without using explicitly their position. The rest of the coverages do not constitute a main

y de humedad), agua y zonas urbanas, además de pastizal, tular y zonas sin vegetación (Figura 4).

En las zonas T y P, cada una de las 50 clases obtenidas de la clasificación, salvo las “inciertas”, se asignó a una de las coberturas generales presentes en la zona (bosque, vegetación secundaria, selva, agricultura, suelo, zona urbana, agua y malpaís), eligiendo visualmente aquella con la que tuviera mayor coincidencia espacial. Los píxeles “inciertos” no identificados como aguacate, así como los descartados por los filtros, se consideraron bosque. En la zona Z, se realizó la asignación de todas las clases a coberturas, incluyendo las correspondientes a los píxeles inciertos, y posteriormente se cambiaron a aguacate los píxeles identificados como tal, es decir, los inciertos depurados y filtrados. Para procurar la coherencia entre coberturas dentro de una zona y entre las tres zonas, se estableció como hipótesis de trabajo que los histogramas de los NDVIs de las cinco fechas utilizadas deben ser unimodales para todas las coberturas (salvo agricultura) en cada zona, y que los histogramas del NDVI de la fecha común (5/11/2020) deben ser similares en las tres zonas. Este

study aim, so only their coincidence with Series VI was analyzed.

Surfaces calculation

Multiplying for the pixel size (10 m), the surface of each coverage in each zone and in total was calculated, particularly the crop surface of the avocado. The result was compared with the Series VI.

Results and discussion

The Figure 5 shows the obtained map, highlighting in red the avocado.

Validation

The precision of the detection of avocado and forests, the only coverages for which field reality samples were taken in Google-Earth, is summarized in Chart 1. The percentage of success of the avocado pixels is 88.20 % in T zone, 91.85 % in P zone, and 87.7 % in Z zone, which represents a total precision of 89.58 %. In T zone, 4.19 % of the avocado pixels were wrongly classified as tropical dry deciduous forest, 3.48 % as forests, and 2.67 % as secondary vegetation; in P zone, 7.57 % of avocado pixels were wrongly classified as forests and there was no notable confusion with other coverages; in Z zone, 7.42 % of the avocado pixels were wrongly classified as forest, and 2.44 % as secondary vegetation. On other hand, the valida-

criterio se tomó en cuenta al asignar las clases a las coberturas, de tal forma que en cada cobertura coincidieran clases con NDVIs similares en las diferentes épocas del año.

Validación

Para valorar el nivel de precisión del resultado, se calculó el número de aciertos y de errores en la detección de las parcelas muestra de aguacate y bosque, ya que en el proceso de clasificación se tomaron en cuenta las características espectrales de estas parcelas, sin utilizar explícitamente su posición. El resto de las coberturas no constituyen un objetivo principal del estudio, por lo que únicamente se analizó su coincidencia con la Serie VI.

Cálculo de superficies

Multiplicando por el tamaño de pixel (10 m), se calculó la superficie de cada cobertura en cada zona y en total, en particular la superficie de cultivo del aguacate. El resultado se comparó con la Serie VI.

Resultados y discusión

La Figura 5 muestra el mapa obtenido, destacando en rojo el aguacate.

Validación

La precisión de la detección del aguacate y el bosque, únicas coberturas para las que se tomaron en

Figure 5. Map obtained from the analysis of the Sentinel-2 images with a mixed classification algorithm.
Figura 5. Mapa obtenido del análisis de imágenes Sentinel-2 con un algoritmo de clasificación mixta.

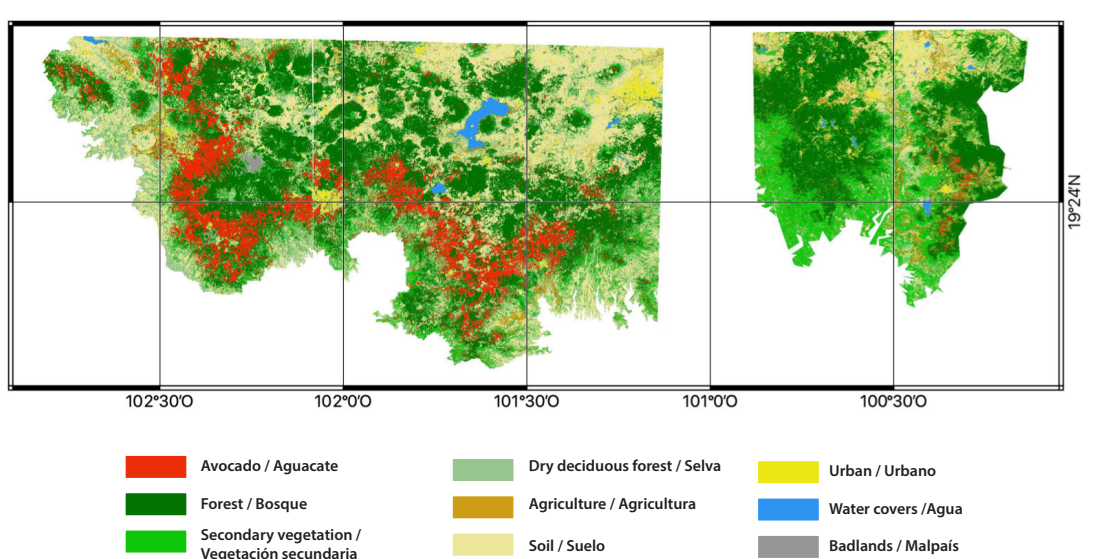


Chart 1. Precision of the identification of avocado and forest coverages: Coincidence in percentages of pixels, between samples taken in Google Earth (GE) and the map generated from Sentinel-2 (S2) images, for each one of the study zones (T: Tancítaro, P: Pátzcuaro, Z: Zitácuaro).

Cuadro 1. Precisión de la identificación de las coberturas aguacate y bosque: Coincidencia, en porcentaje de píxeles, entre las muestras tomadas en Google Earth (GE) y el mapa generado a partir de las imágenes Sentinel-2 (S2), para cada una de las zonas de estudio (T: Tancítaro, P: Pátzcuaro, Z: Zitácuaro)

S2 GE	S2	Avocado/ Aguacate	Forest/ Bosque	Secondary vegetation/ Vegetación secundaria	Dry deciduous forest / Selva	Agriculture / Agricultura	Soil / Suelo
Avocado/ Aguacate	T Zone	88.2	3.48	2.67	4.19	0.73	0.71
	P Zone	91.85	7.52	0.07	0.33	0.13	0.08
	Z Zone	87.97	7.42	2.44	0	1.75	0.41
	TOTAL	89.58					
	T Zone	2.07	92.79	3.76	1.17	0.04	0.17
Forest / Bosque	P Zone	1.92	92.85	3.28	1.31	0.21	0.44
	Z Zone	0.9	90.32	7.6	0.18	0.97	0.01
	TOTAL		92.12				

tion made with the plots of forest showed a general percentage of success of 92.12 %, being superior to the 90% in all the zones. The forests pixels wrongly classified as avocado represent 2 % in T and P zones, and 1% in Z zone.

These precision levels are in concordance with the ones reported in other similar works. In general, the classification of S2 images using different algorithms gives results with total precisions close to 90 % (Segarra et al., 2020). The classification of crops in Valencia with SIGPAC data and S2 images showed a total precision of 91.18 %, which increased to 93.96 % when incorporating S1 images; the precision in the identification of individual crops goes from 82 % in meadows to 99 % in citrus trees (Campos-Taberner et al., 2019). Figueroa-Figueroa et al. (2020) got 85 % of precision in the identification of avocado in the Estado de México with S2 images.

Cultivated Surface and coverages distribution

Chart 2 shows the distribution of the coverages by zone and for the entire study area. Altogether, the avocado plantations identified in the Franja Agua-

Google Earth muestras de realidad de campo, se resume en el Cuadro 1. El porcentaje de aciertos de los píxeles de aguacate es de 88.20 % en la zona T, 91.85 % en la zona P y 87.7 % en la Z, lo que representa una precisión total del 89.58 %. En la zona T, el 4.19 % de los píxeles de aguacate fueron clasificados erróneamente como selva, el 3.48 % como bosque y el 2.67 % como vegetación secundaria; en la zona P, el 7.51 % de los píxeles de aguacate fueron clasificados erróneamente como bosques y no hubo confusión destacable con otras coberturas; en la zona Z el 7.42 % de los píxeles de aguacate fueron clasificados erróneamente como bosque y el 2.44 % como vegetación secundaria. Por otra parte, la validación realizada con las parcelas de bosque arrojó un porcentaje general de aciertos del 92.12 %, siendo superior al 90 % en todas las zonas. Los píxeles de bosque clasificados erróneamente como aguacate representan un 2 % en las zonas T y P y un 1 % en la zona Z.

Estos niveles de precisión están en concordancia con los reportados en otros trabajos si-

Chart 2. Surface (Hectares and percentages) occupied by each coverage in the map generated from the analysis of the Sentinel-2 (S2) images, for each one of the study zones (T: Tancítaro, P: Pátzcuaro, Z: Zitácuaro).

Cuadro 2. Superficie (hectáreas y porcentaje) ocupada por cada cobertura en el mapa generado a partir del análisis de las imágenes Sentinel-2 (S2), para cada una de las zonas de estudio (T: Tancítaro, P: Pátzcuaro, Z: Zitácuaro).

S2	Avocado/ Aguacate	Forest / Bosque	Second- ary Vege- tation / Vegeta- ción secunda- ria	Dry decidu- ous fores / Selva	Agricul- ture / Agricul- tura	Soil/Suelo	Urban/ Urbano	Water covers/ Agua	Badlands/ Malpaís
T Zone/ Zona T	70816.71 (16.56 %)	129791.93 (30.34 %)	46153.6 (10.79 %)	80822.15 (18.90%)	12814.44 (3.00 %)	79 221.86 (18.52 %)	4 605.46 (1.08 %)	806.11 (0.19 %)	2 684.71 (0.63 %)
P Zone/ Zona P	73806.27 (9.03 %)	280944.21 (34.38 %)	72269.05 (8,84 %)	130399.07 (15.96 %)	23848.02 (2.92%)	209493.89 (25.64 %)	17188.16 (2.10 %)	9089.44 (1.11 %)	0
Z Zone/ Zona Z	5106.44 (1.13 %)	172248.08 (38.25 %)	127880,34 (28,39 %)	29480.48 (6.55 %)	43058.45 (9.56 %)	62527.72 (13.88 %)	7497.23 (1.66 %)	2575.9 (0.57 %)	0
Total	149729.42	582984.22	246302,99	240701.7	79720.91	351243.47	29290.85	12471.45	2 684.71

catara represent an area close to 150 000 ha, with more than 70 000 ha in the T (where it represents 16 %) and P (9 %) zones, while in Z zone it is a little more than 5 000 ha (1 %). According to official data (SIAP), the avocado surface cultivated in Michoacán in 2020 was 169 939.45 ha, and the harvested one 166 062.90 ha. The CONAPA registered in Michoacán 159 328 ha in production in 2005. In the map of Morales-Manilla et al., (2012) 153 000 ha of cultivated surface of avocado are identified. The difference between the cultivated surfaces is consistent with the error level of the obtained map (10 %), and it can also be explained for the election of the study zone, that excludes some municipalities in which there is little avocado.

Forest is the majority coverage in all the zones, covering 30 % of T zone, 34 % of P zone, and 38 % of Z zone. Regarding the other coverages, in T zone tropical dry deciduous forest and soil each one occupies 19 % of the surface and secondary vegetation, 11%; in P zone soil (26 %) predominates, and in Z zone, secondary vegetation does (28 %). Urban zones and water bodies are more abundant in P zone, due to the presence of the cities of Morelia and Uruapan, as well as the lakes of Pátzcuaro and Zirahuén.

milares. En general, la clasificación de imágenes S2 utilizando diferentes algoritmos, da resultados con precisiones totales cercanas al 90 % (Segarra et al., 2020). La clasificación de cultivos en Valencia con datos SIGPAC e imágenes S2 arrojó una precisión total de 91.18 %, que subió a 93.96 % al incorporar imágenes S1; la precisión en la identificación de cultivos individuales va de 82 % en pastizales a 99 % en cítricos (Campos-Taberner et al., 2019). Figueroa-Figueroa et al. (2020) obtuvieron un 85 % de precisión en la identificación de aguacate en el Estado de México con imágenes S2.

Superficie cultivada y distribución de coberturas

El Cuadro 2 muestra la distribución de las coberturas por zona y para toda el área de estudio. En conjunto, las plantaciones de aguacate identificadas en la Franja Aguacatera representan una superficie cercana a las 150 000 ha, con más de 70 000 ha en las zonas T (donde representa un 16 %) y P (9 %), mientras que en la zona Z es de un poco más de 5 000 ha (1 %). De acuerdo con los datos oficiales (SIAP), la superficie de aguacate cultivada en Michoacán en 2020 fue de 169 939.45 ha, y la cosechada de 166 062.90 ha. La CONA-

Comparison with Series VI

In its general appearance, there is a good match between the generated map and the simplified Series VI (Figures 3 and 4). It can be observed a greater agreement between T and P zones, than with Z zone (Chart 3).

In T and P zones, 50 % of what INEGI catalogues as rainfed agriculture and more than 15 % of irrigation agriculture, have been classified as avocado in the S2 images; this is coherent with the fact that avocado is mostly considered a rainfed crop or with a low potential water consumption (Burgos et al., 2011). In Z zone, avocado is minority and coincides with 6 % of the rainfed agriculture and 4 % of the irrigation one. Agriculture identified in S2 images corresponds in 20 % with irrigation agriculture in T and P zones, and with 34 % in Z zone, where also incorporates 36 % of tular.

Regarding forests, in T and P zones more than 70 % of the different types of forest identified by INEGI, as well as more than 34 % of secondary vegetation, have been classified as forests; in the Z zone, 77.55 % of the forests and 24 % of secondary vegetation have been classified as forest. Although it is one of the best identified coverages, a confusion between forests and secondary vegetation (or disturbed forests) can be observed, which can be an interpretative matter, both in the generated map and in the one of Series VI and in the way its legend has been summarized.

In Z zone, 55 % of secondary vegetation, 32.6 % of meadows, 29 % of rainfed agriculture, 22 % of yearly rainfed agriculture, and, particularly, 66 % of tropical dry deciduous forests, have been classified as tropical dry deciduous forests. An inevitable confusion between tropical dry deciduous forest and secondary vegetation is evident, by being a transition zone between these two types of ecosystems. Unfortunately, the dates of the analyzed images are not distributed along the year, which is common in the tropical zones, where the presence of clouds does not allow to have images of rainy season. With the available information, the separability between the two coverages is low, which complicated the assignation of classes. If more classes were included in the tropical dry deciduous forest, instead of secondary vegetation, perhaps a greater coincidence between the surfaces would have been achieved.; however, the histograms

PA registró en Michoacán, 159 328 ha en producción, en 2005. En el mapa de Morales-Manilla et al., (2012) se identifican 153 000 ha de superficie cultivada de aguacate. La diferencia entre superficies cultivadas es consistente con el nivel de error del mapa obtenido (10 %), y también puede explicarse por la elección de la zona de estudio, que excluye algunos municipios en los que hay poco aguacate.

El bosque es la cobertura mayoritaria en todas las zonas, cubriendo el 30 % de la zona T, 34 % de la P y 38 % de la Z. En cuanto a las otras coberturas, en la zona T la selva y el suelo ocupan cada una un 19 % de la superficie y la vegetación secundaria un 11 %; en la zona P predomina el suelo (26 %) y en la Z la vegetación secundaria (28 %). Las zonas urbanas y los cuerpos de agua son más abundantes en la zona P, por la presencia de las ciudades de Morelia y Uruapan, así como de los lagos de Pátzcuaro y Zirahuén.

Comparación con la Serie VI

En su aspecto general, se aprecia una buena coincidencia entre el mapa generado y la Serie VI simplificada (Figuras 3 y 4). Se observa mayor acuerdo entre las zonas T y P, que con la Z (Cuadro 3).

En las zonas T y P, el 50 % de lo que INEGI etiqueta como agricultura de temporal y más del 15 % de la agricultura de riego, han sido clasificados como aguacate en las imágenes S2; esto es coherente con el hecho de que el aguacate se considera mayoritariamente un cultivo de temporal o con un consumo potencial de agua bajo (Burgos et al., 2011). En la zona Z, el aguacate es minoritario y coincide con un 6 % de la agricultura de temporal y un 4 % de la de riego. La agricultura identificada en las imágenes S2 corresponde en un 20 % con la agricultura de riego en las zonas T y P, y con un 34 % en la Z, donde también incorpora el 36 % del tular.

En cuanto al bosque, en T y P más del 70 % de los diferentes tipos de bosque identificados por INEGI, así como más del 34% de las vegetaciones secundarias, han sido clasificados como bosque; en la zona Z, el 77.55 % de los bosques y el 24 % de las vegetaciones secundarias han sido clasificados como bosque. Si bien es una de las coberturas mejor identificadas, se aprecia una confusión entre bosque y vegetación secundaria (o bosque perturbado), que puede deberse a una cuestión interpretativa, tanto en el mapa

Chart 3. Comparison between the generated map from Sentinel-2 (S2) images and the Series VI of INEGI: Coincidence between coverages (in pixel percentages), for each one of the study zones (T: Tancítaro, P: Pátzcuaro, Z: Zitácuaro). In bold the values over 25 %.

Cuadro 3. Comparación entre el mapa generado a partir de imágenes Sentinel-2 (S2) y la Serie VI de INEGI: coincidencia entre coberturas (en porcentaje de píxeles), para cada una de las zonas de estudio (T: Tancítaro, P: Pátzcuaro, Z: Zitácuaro). En negritas valores superiores al 25 %.

S2 Series VI / Serie VI		Avocado / Aguacate	Forest/ Bosque	Secondary vegetation/ Vegetación secundaria	Dry deciduous forest/ Selva	Agriculture / Agricultura	Soil/ Suelo	Urban / Urbano	Water covers / Agua	Badlands / Malpais
Rainfed Agriculture/ Agricultura de temporal	T	55.44	18.83	7.41	8.86	2.08	6.7	0.55	0	0.11
	P	49.02	18.54	4.29	14.03	2.85	10.66	0.55	0.05	0
	Z	5.99	17.47	28.79	6.08	21.4	19.2	1.04	0.02	0
Forests/Bosques	T	7.49	71.23	11.06	7.1	0.66	2.28	0.06	0	0.1
	P	3.48	70.52	10.47	9.57	0.14	5.7	0.12	0	0
	Z	0.88	77.55	16.75	1.02	2.89	0.81	0.08	0.01	0
Secondary Vegetation/ Vegetaciones secundarias	T	6.16	34.27	17.89	26.24	1.35	11.57	0.23	0	2.28
	P	2.82	37.41	16.46	21.83	1.34	19.77	0.35	0.03	0
	Z	0.46	23.87	55.04	8.54	6.12	5.61	0.33	0.04	0
Dry Deciduous Forests/Selvas	T	0.59	1.86	8.25	52.28	1.35	34.9	0.68	0.04	0.03
	P	0.26	7.58	18.74	29.34	1.17	42.36	0.51	0.02	0
	Z	0	3.75	65.47	18.71	4.4	7.48	0.15	0.02	0
Tular/Vegetaciones secundarias	T	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	P	2.14	16.67	5.85	62.07	3.72	6.63	0.1	2.82	0
	Z	0	22.92	21.06	4.95	35.66	4.45	0.4	10.56	0
Irrigation Agriculture/ Agricultura de riego	T	17.89	8.09	10.17	15.9	21.25	23.42	3.03	0.01	0.24
	P	15.46	15.53	8.49	30.15	20.03	6.84	3.42	0.08	0
	Z	4.15	12.58	18.14	3.96	33.75	24.54	2.37	0.51	0
Meadows/ Pastizal	T	0.84	1.95	5.96	32.67	1.2	56.45	0.83	0.03	0.07
	P	1.00	8.24	10.43	22.04	1.33	55.48	1.44	0.04	0
	Z	0	5.23	32.62	18.71	6.6	33.82	2.33	0.69	0
Yearly rainfed Agriculture/ Agricultura de temporal anual	T	6.79	13.49	9.21	22.00	3.54	43.19	1.66	0.02	0.09
	P	2.42	14.59	4.57	18.41	4.31	54.18	1.49	0.05	0
	Z	1.11	12.93	21.59	9.73	15.07	36.03	3.42	0.11	0
Moisture Agriculture/ Agricultura de humedad	T	0.56	3.62	1.84	7.46	13.51	52.99	3.01	15.07	1.94
	P	2.24	4.84	1.42	24.75	10.12	53.46	2.25	0.91	0
	Z	0	0	1.03	2.22	22.4	71.81	2.23	0.3	0
No vegetation/ Sin vegetación	T	2.59	21.37	14.26	28.11	0.1	2.19	0.09	0	31.28
	P	1.4	10.59	4.7	45.96	3.52	26.21	5.25	2.36	0
	Z	0	0	1.21	2.92	17.23	78.23	0	0	0
Urban zones/ Zonas urbanas	T	2.37	5.57	4.72	10.46	8.66	33.16	35.04	0	0.02
	P	0.88	4.88	0.95	10.15	5.25	38.83	39.05	0.01	0
	Z	0.21	3.57	8.37	3.16	15.01	38.72	30.74	0.22	0
Water covers/ Agua	T	1.41	3.43	1.86	4.32	0.93	1.14	0.02	85.85	1.04
	P	0.37	2.64	0.74	5.8	0.49	2.95	0.19	86.82	0
	Z	0.02	1.32	4.09	2.71	4.07	4.21	1.57	82.02	0

of NDVI would not have been unimodal (which is a working hypothesis), which would indicate a lack of homogeneity between the classes associated to the same coverage.

On other hand, in T zone more than 50 % of the tropical dry deciduous forests and 33 % of meadows have been classified as tropical dry deciduous forest, as well as 30 % of the tropical dry deciduous forests and of the irrigation agriculture, 62 % of tular and 45 % of no apparent vegetation zones of the P zone.

Regarding the soil, in T and P zones correspond to what INEGI catalogues as yearly rainfed agriculture, moisture agriculture, meadows, urban zones, in addition of tropical dry deciduous forests, and areas with no apparent vegetation in Z zone. Badlands coincide with 31 % of the no vegetation zones in T zone; however, in the map of the Series VI, the zone of San Juan Nuevo does not stand out, that is identified as secondary vegetation, probably because it already presents a certain level of colonization by some vegetable species. In the same way, the sub representation of the phenology of the vegetation with a marked seasonality complicates the identification of the coverages that have been included in the soil, as well as tropical dry deciduous forests.

The identified urban areas, even including constructions and greenhouses, only occupy between 30 % and 40 % of the urban zones of INEGI, due to the greater level of detail of the built map and the vector format of the Series VI. Water cover is the coverage that has the best coincidence between both maps, with more than 82 %.

Conclusions

In this paper, a methodology to obtain and update the mapping of the Franja Aguacatera Michoacana is proposed, analyzing Sentinel-2 images with a mixed classification algorithm that allows to distinguish the avocado and forest with a precision of 90 %, in spite of the spectral similarity between both coverages. The proposed methodology allows to concentrate a great amount of information in a volume equal to a single image, which makes possible to perform the calculations without a great informatics capacity. The real field data required have been taken from Google Earth and they are limited to the interest coverage and to the most spectrally similar to it.

generado como en el de la Serie VI y en la forma en que se ha resumido su leyenda.

En la zona Z, el 55 % de las vegetaciones secundarias, el 32.6 %, del pastizal, el 29 % de la agricultura de temporal, el 22 % de la agricultura de temporal anual y, en particular, el 66 % de las selvas, se han clasificado como vegetación secundaria, mientras que solo el 19 % de las selvas se han clasificado como selvas. Se evidencia una confusión entre selva y vegetación secundaria que resulta inevitable, por tratarse de una zona de transición entre los dos tipos de ecosistemas. Lamentablemente, las fechas de las imágenes analizadas no están distribuidas a lo largo del año, lo que es común en las zonas tropicales, donde la presencia de nubes impide contar con imágenes de la época de lluvias. Con la información disponible, la separabilidad entre las dos coberturas es baja, lo que complica la asignación de las clases. De incluirse más clases en la selva, en lugar de la vegetación secundaria, quizá se habría logrado una mayor coincidencia entre las superficies; sin embargo, los histogramas de NDVI no habrían sido unimodales (que es una hipótesis de trabajo), lo que indicaría una falta de homogeneidad entre las clases asociadas a la misma cobertura.

Por otra parte, en la zona T más del 50 % de las selvas y el 33 % de los pastizales han sido clasificados como selva, así como el 30 % de las selvas y de la agricultura de riego, el 62 % del tular y el 45 % de las zonas sin vegetación aparente de la zona P.

En cuanto al suelo, en las zonas T y P corresponde a lo que INEGI etiqueta como agricultura de temporal anual, agricultura de humedad, pastizal, zonas urbanas, además de las selvas, y a las zonas sin vegetación aparente en Z. El malpaís coincide con el 31 % de las áreas sin vegetación en la zona T; sin embargo, en el mapa de la Serie VI no se señala la zona de San Juan Nuevo, que se identifica como vegetación secundaria, probablemente porque ya presenta cierto grado de colonización por algunas especies vegetales. También en este caso, la subrepresentación de la fenología de la vegetación con marcada estacionalidad complica la identificación de las coberturas que han quedado incluidas en el suelo, así como de las selvas.

Las áreas urbanas identificadas, aun incluyendo construcciones e invernaderos, solo ocupan entre el 30 y el 40 % de las zonas urbanas de INEGI, por el ma-

This allows to reduce the necessary database, as it does not require sampling all the coverages present in the zone; in addition, the field visits, which results expensive in time and resources, even dangerous, are avoided. The comparison of the obtained map with the series VI shows that avocado orchards are classified by INEGI as rainfed agriculture; the class with a greater coincidence is water (82 %), followed by forests (70 %), while soil gathers various coverages, all of them with high seasonality. A confusion between secondary vegetation and tropical dry deciduous forest is observed, particularly in the orient zone. A way to improve the results would be the use of images that correspond to seasons of the year with more contrasting phenology, which is hindered by the frequent presence of clouds in the images of the rainy season. Having detailed mapping of the avocado plots is a base for numerous studies, related to the ecological impact of the crop or the effect of the climatic change.

End of English version

=====

References/Referencias

- Avilés-Gaxiola, S., Gutiérrez-Grijalva, E. P., Contreras-Angulo, L., y Heredia, J. B. (2020). Propiedades nutritivas y nutraceuticas del aguacate. In A. Namesny, C. Conesa, I. Hormaza, y G. Lobo (Eds.), *Cultivo, poscosecha y procesado del aguacate* (pp. 381–397). España. https://issuu.com/horticulturaposcosecha/docs/cultivo_poscosecha_y_procesado_del_aguacate
- Bravo-Espinoza, M., Sánchez-Pérez, J. L., Vidales-Fernández, J. A., Sáenz-Reyes, J. T., Chávez-León, J. G., Madrigal-Huendo, S., Muñoz-Flores, H. J., Tapia-Vargas, L. M., Orozco-Gutiérrez, G., Alcantar-Rocillo, J. J., Vidales-Fernández, I., y Venegas-González, E. (2009). *Impactos ambientales y socioeconómicos del cambio de uso del suelo forestal a huertos de aguacate en Michoacán*. INIFAP. Primera edición. Texcoco, Estado de México, México. 88 p.
- Brinkhoff, J., Vardanega, J., y Robson, A. J. (2020). Land cover classification of nine perennial crops using Sentinel-1 and 2 data. *Remote Sensing*, 12(96),1–26. <https://doi.org/10.3390/rs12010096>

yor nivel de detalle del mapa construido y el formato vectorial de la Serie VI. El agua es la cobertura que tiene la mejor coincidencia entre ambos mapas, con más del 82 %.

Conclusiones

En este trabajo se propone una metodología para obtener y actualizar la cartografía de la Franja Aguacatera michoacana, analizando imágenes Sentinel-2 con un algoritmo de clasificación mixta, que permite distinguir el aguacate y el bosque con precisiones del 90 %, a pesar de la similitud espectral entre ambas coberturas. La metodología propuesta permite concentrar una gran cantidad de información en un volumen equivalente a una sola imagen, lo que posibilita realizar los cálculos sin contar con una gran capacidad informática. Los datos reales de campo requeridos se han tomado de Google Earth y se limitan a la cobertura de interés y a la más parecida a esta, espectralmente. Esto permite reducir la base de datos necesaria, al no requerir muestrear todas las coberturas presentes en la zona; además se evitan las visitas de campo, que resultan costosas en tiempo y recursos, e incluso peligrosas. La comparación del mapa obtenido con la Serie VI muestra que las huertas de aguacate son clasificadas por INEGI como agricultura de temporal; la clase con más coincidencia es el agua (82 %), seguida por los bosques (más del 70 %), mientras que el suelo reúne varias de las coberturas, todas con alta estacionalidad. Se observa una confusión entre la vegetación secundaria y la selva, en particular en la zona del oriente. Una forma de mejorar el resultado sería utilizar imágenes que correspondan a épocas del año con fenologías más contrastantes, lo que se ve dificultado por la frecuente presencia de nubes en las imágenes de la época de lluvias. Contar con una cartografía detallada de las parcelas de aguacate es la base para numerosos estudios, relacionados con el impacto ecológico del cultivo o el efecto del cambio climático.

Fin de la versión en español

=====

- Burgos, A., Anaya, C., y Solorio, I. (2011). *Evaluación del impacto ecológico del cultivo de aguacate a nivel regional y de parcela en el estado de Michoacán: Definición de una tipología de productores*.

- Informe final a la Fundación Produce Michoacán (FPM) y la AALPAUM.* Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental (CIGA/UNAM Campus Morelia). Morelia, Michoacán, México. 90 p.
- Campos-Taberner, M., García-Haro, F. J., Martínez, B., Sánchez-Ruiz, S., y Gilabert, M. A. (2019). A Copernicus Sentinel-1 and Sentinel-2 classification framework for the 2020+ European Common Agricultural Policy: A case study in València (Spain). *Agronomy*, 9(556), 1–20. <https://doi.org/10.3390/agronomy9090556>
- Colilles-Cascallar, E. (2020). El aguacate en la Península Ibérica. In A. Namesny, C. Conesa, I. Hormaza, y G. Lobo (Eds.), *Cultivo, poscosecha y procesado del aguacate* (pp. 381–397). España. https://issuu.com/horticulturaposcosecha/docs/cultivo__poscosecha_y_procesado_del_aguacate
- Criollo-Mendoza, M. S., Gutiérrez-Grijalva, E. P., Vázquez-Olivo, G., y Basilio-Heredia, J. (2020). Tecnologías convencionales y emergentes para el procesamiento e industrialización de aguacate. In A. Namesny, C. Conesa, I. Hormaza, y G. Lobo (Eds.), *Cultivo, poscosecha y procesado del aguacate* (pp. 381–397). España. https://issuu.com/horticulturaposcosecha/docs/cultivo__poscosecha_y_procesado_del_aguacate
- De la Tejera-Hernández, B., Santos, A., Santamaría, O. H., Gómez, Q. T., y Olivares, M. C. (2013). El oro verde en Michoacán: ¿un crecimiento sin fronteras? Acercamiento a la problemática y retos del sector aguacatero para el Estado y la sociedad. *Economía y Sociedad*, 17(29), 15–40 <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5371180>
- Durán, C. V., y Sevilla, P. F. (2003). *Atlas geográfico del estado de Michoacán*. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, El Colegio de Michoacán, Secretaría de Educación en el estado de Michoacán. EDDISSA (eds.) Morelia, México. 308 p.
- Egorov, A. V., Hansen, M. C., Roy, D. P., Kommareddy, A., y Potapov, P. V. (2015). Image interpretation-guided supervised classification using nested segmentation. *Remote Sensing of Environment*, 165, 135–147 <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.04.022>
- Ferrusquía-Villafranca, I. (1998). Geología de México: una sinopsis. In T.P. Ramamoorthy, R. Bye, A. Lot, y J. Fa (Eds.), *Diversidad biológica de México: orígenes y distribución* (pp. 3–108), México.
- Figueroa-Figueroa, D. K., Ramírez-Dávila, J. F., Antonio-Némiga, X., y González-Huerta, A. (2020). Cartografía del aguacate en el sur del estado de México mediante tratamiento digital de imágenes Sentinel2. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 11(4), 865–879. <https://doi.org/10.29312/remexca.v11i4.2173>
- Gómez-Tagle Chávez A., Morales-Chávez, R., García-González, Y., y Gómez-Tagle Rojas, A. F. (2019). Partición de la precipitación en cultivo de aguacate y bosque de pino-encino en Michoacán, México. *Biológicas*, 21(1), 1–18. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.24281.06247>
- Imbert, E. (2020). El aguacate en el mundo. In: Cultivo, poscosecha y procesado del aguacate. In A. Namesny, C. Conesa, I. Hormaza, y G. Lobo (Eds.), *Cultivo, poscosecha y procesado del aguacate* (pp. 381–397). España. https://issuu.com/horticulturaposcosecha/docs/cultivo__poscosecha_y_procesado_del_aguacate
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2017). *Guía para la interpretación de cartografía: uso del suelo y vegetación: escala 1:250, 000 : serie VI*. México. 74 p. http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/Productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/702825092030.pdf
- Ma, Z., Liu, Z., Zhao, Y., Zhang, L., Liu, D., Ren, T., Zhang, X., y Li, S. (2020). An unsupervised crop classification method based on principal components isometric binning. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9(11), 648. <https://doi.org/10.3390/ijgi9110648>
- Morales-Manilla, L. M., Reyes-González, A., Cuevas-García, G., y Onchi-Ramuco, M. (2012). Inventario 2011 del cultivo del aguacate y evaluación del impacto ambiental forestal en el estado de Michoacán. CIGA, UNAM-COFUPRO. México. 108 p. <http://lae.ciga.unam.mx/aguacate2/Informe%20Final%202011%20Aguacate%20Etapa%202%20Componente%201.pdf>
- Rzedowski, J., (2006). 1ra. Edición digital, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México. https://www.academia.edu/9142430/VEGETACION_DE_MEXICO_Jerzy_Rzedowski

- Segarra, J., Buchailot, M. L., Arous, J. L., y Kefauver, S. C. (2020). Remote sensing for precision agriculture: Sentinel-2 improved features and applications. *Agronomy*, 10(5), 641. <https://doi.org/10.3390/agronomy10050641>
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). (2020). <https://www.gob.mx/siap/>
- Toribio-Morales, M., Ramírez-Miranda, C., y Núñez-Vera, M. (2019). Expansión del agronegocio aguacatero sobre los territorios campesinos en Michoacán. *Eutopía. Revista de Desarrollo Económico Territorial*, 16(12), 51–72. <https://doi.org/10.17141/eutopia.16.2019.4117>
- Valdez, A., y Sánchez, M. (2020). “Oro verde”, educación e inseguridad en ciudades medias: Ciudad Guzmán y Uruapan, México. *Revista de Ciencias Sociales*, (Ve), XXVI((Número especial 2), 414–425. <https://produccioncientificaluz.org/index.php/racs/index>

