



Lámpsakos

ISSN: 2145-4086

Universidad Católica Luis Amigó

Pech-May, Fernando; Sánchez Hernández, Julio Víctor;
Sánchez Jacinto, Honorio Guadalupe; Magaña Govea, Jorge

Análisis de zonas de cultivo y cuerpos de agua mediante el
cálculo de índices radiométricos con imágenes Sentinel-2

Lámpsakos, núm. 24, 2020, Julio-Diciembre, pp. 48-59

Universidad Católica Luis Amigó

DOI: <https://doi.org/10.21501/21454086.3601>

Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=613966750004>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org

Análisis de zonas de cultivo y cuerpos de agua mediante el cálculo de índices radiométricos con imágenes Sentinel-2

Analysis of growing areas and bodies of water by calculating radiometric indices with Sentinel-2 images

Fernando Pech-May*

Julio Víctor Sánchez Hernández**

Honorio Guadalupe Sánchez Jacinto***

Jorge Magaña Govea****

(Recibido el 30-04-2020. Aprobado el 18-08-2020)

Estilo de citación de artículo:

F. Pech-May, J. V. Sánchez Hernández, H. G. Sánchez Jacinto, and J. Magaña Govea, "Análisis de zonas de cultivo y cuerpos de agua mediante el cálculo de índices radiométricos con imágenes Sentinel-2", *Lámpsakos*, no. 24, pp. 48-59, julio-diciembre, 2020. DOI: 10.21501/21454086.3601

Resumen

Los cultivos y cuerpos de agua son un tema de interés para los países. Tener información sobre las zonas de cultivo, fuentes de agua y su comportamiento en las distintas temporadas del año es de utilidad para la producción agrícola y para la toma de decisiones. Por otra parte, actualmente se han generado gran cantidad de datos satelitales de la Tierra y herramientas para el procesamiento de grandes volúmenes de imágenes satelitales que son fundamentales para el monitoreo forestal, análisis multitemporal de zonas de cultivo y cuerpos de agua, clasificación del uso del suelo, entre otros usos. Sentinel-2 es un programa de observación de la Tierra que consta de 13 bandas espectrales que proporcionan imágenes de alta resolución espacial y calidad radiométrica. En este artículo se presenta un análisis multitemporal basado en el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada y el Índice de Agua de Diferencia Normalizada, obtenidos con imágenes del satélite Sentinel-2, para la identificación de cambios que se presentan en una zona del sureste de México en el periodo 2018-2020. Los resultados obtenidos demuestran un bajo rango del índice radiométrico en las áreas de estudio durante el 2018. Asimismo, los mayores cambios durante la temporada de lluvia fueron registrados en 2018; esto evidencia la provocación en la disminución en la calidad de los cultivos y en el cuerpo de agua.

Palabras clave: Sentinel-2; Google Earth Engine; Índices radiométricos; NDVI; NDWI; Imágenes satelitales; Balancán; Cultivos; Cuerpos de agua; Percepción remota.

* Doctor en Ciencias de la Computación, Cuerpo académico Cómputo Distribuido del Instituto Tecnológico Superior de los Ríos, Tabasco, México. Contacto: fernando.pech@cinvestav.mx

** Ingeniero en Sistemas Computacionales, Cuerpo académico Cómputo Distribuido del Instituto Tecnológico Superior de los Ríos, Tabasco, México. Contacto: hJulio288@gmail.com

*** Ingeniero en Sistemas Computacionales, Cuerpo académico Cómputo Distribuido del Instituto Tecnológico Superior de los Ríos, Tabasco, México. Contacto: honoriosanchezjacinto@gmail.com

**** Maestro en Administración en Tecnologías de la Información, Cuerpo académico Cómputo Distribuido del Instituto Tecnológico Superior de los Ríos, Tabasco, México. Contacto: totosas@hotmail.com

DOI: <https://doi.org/10.21501/21454086.3601>

Abstract

Crops and bodies of water are a topic of interest to countries. Having information about growing areas, water sources and their behaviour in the different seasons of the year is useful for agricultural production and decision-making. On the other hand, a large amount of Earth satellite data and tools for the processing of large volumes of satellite images have now been generated that are critical for forest monitoring, multitemporal analysis of growing areas and bodies of water, classification of land use, among others. Sentinel-2 is an Earth observation program consisting of 13 spectral bands that provide high spatial resolution and radiometric quality images. This article presents a multitemporal analysis based on the Standardized Difference Vegetation Index and Standardized Difference Water Index obtained with images of the Sentinel-2 satellite, for the identification of changes that occur in an area of south-eastern Mexico in the period 2018-2020. The results obtained demonstrate a low range of radiometric indexes in the study areas during 2018. In addition, the biggest changes during the rainy season were recorded in 2018; this shows the provocation in the decrease in crop quality and in the body of water.

Keywords: Sentinel-2; Google Earth Engine; Radiometric indices; NDVI; NDWI; Satellite images; Balancan; Crops; Bodies of water; Remote perception.

1. INTRODUCCIÓN

El estudio del medio ambiente es cada vez más relevante, debido a los cambios y estragos causados por la explotación desmedida de los recursos y el cambio climático. Las principales preocupaciones a escala mundial son la agricultura y la conservación de los cuerpos de agua. Desde los años sesenta, la producción mundial de alimentos ha mantenido el paso del crecimiento demográfico mundial, suministrando más alimentos per cápita a precios cada vez más bajos en general, pero a costa de los recursos hídricos. De acuerdo a la FAO [1], en el siglo XX la agricultura empleaba el 70 % de toda el agua utilizada en el mundo y para el 2030 se estima que aumentará el 14 %; sin embargo, la escasez del agua cada vez será mayor en el mundo y, afecta directamente la producción de los alimentos.

En México, donde el sector primario es la agricultura, la demanda de alimentos es cada vez mayor; lo que implica llevar un adecuado balance entre la producción agrícola y el consumo de agua. Por tal motivo es importante conocer la dinámica y el estado de los suelos agrícolas y cuerpos de agua para crear estrategias e iniciativas que promuevan el buen uso y conservación de estos recursos vitales.

Por otra parte, distintos gobiernos y organizaciones han desarrollado herramientas para llevar a cabo el seguimiento de los procesos ambientales, es decir, análisis multitemporales que permitan detectar cambios en la cobertura terrestre. La percepción remota (PR) o teledetección es una herramienta que permite el estudio de la cubierta terrestre, desde las superficies continentales hasta los cuerpos de agua como mares, ríos, etc. [2] Estos estudios son utilizados en diversas actividades como la minería, para la detección de minerales; la hidrología, para el monitoreo de los cuerpos de agua; la agricultura, para la detección de zonas de cultivo, entre otros. Para ello, ha sido necesario el uso de satélites que proporcionan datos globales de la superficie de la Tierra [3].

En este artículo se presenta un análisis multitemporal basado en los Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) e Índice de Agua de Diferencia

Normalizada (NDWI) obtenidos con imágenes del satélite Sentinel-2, para la identificación de cambios que se presentan en una zona de cultivo y cuerpo de agua del municipio de Balancán, Tabasco, México, en el periodo 2018-2020.

El documento se conforma de la siguiente manera: en la sección 2 se presentan el marco teórico y trabajos relacionados; en la sección 3, los materiales y métodos empleados para la realización de la investigación; en la sección 4, los resultados de la investigación; por último, las conclusiones en la sección 5.

2. MARCO TEÓRICO Y TRABAJOS RELACIONADOS

Marco teórico

Percepción remota

La información adquirida con sensores remotos ha resultado de gran utilidad para muchas áreas como la agricultura, la minería, el medio ambiente, la hidrología, entre otras. Al conjunto de técnicas y herramientas que permiten obtener información/datos de un objeto o fenómeno sin estar en contacto con él, se le conoce como percepción remota (PR) o teledetección [4] [5]. En los últimos años esta ciencia ha estado en constante evolución, ha pasado por el conocimiento de las características de la superficie terrestre y atmósfera, hasta el estudio oceánico y del sistema solar [6] [7]. La obtención de información mediante esta ciencia se logra a través de un conjunto de cámaras o sensores acoplados en un vehículo aéreo (aviones o satélites), los cuales miden la energía electromagnética, longitud de onda reflejada por el Sol o emitida por la superficie terrestre [3] [8]. Las imágenes obtenidas por estos sensores poseen diferentes características que dependen de los sensores con las que son obtenidas, los cuales son: resolución espacial, que determina el área sobre la Tierra que cubre cada pixel de la imagen; resolución espectral, que indica el número y anchura de las regio-

DOI: <https://doi.org/10.21501/21454086.3601>

nes del espectro para las cuales capta datos el sensor; resolución temporal, que determina el tiempo en el que podemos obtener una imagen del mismo lugar con el mismo satélite; resolución radiométrica, indica la sensibilidad del sensor, es decir la capacidad de discriminar entre pequeñas variaciones en la radiación que capta.

Satélites para el monitoreo terrestre

Los satélites de observación terrestre son instrumentos que orbitan en el planeta y registran la radiación electromagnética que emite la superficie terrestre. Su funcionamiento se basa en la llamada firma espectral, es decir, la capacidad que tienen determinados objetos o sustancias para reflejar o emitir energía electromagnética [9]. Mediante la firma espectral se pueden identificar diferentes tipos de cultivos, cuerpos de agua, suelos, y otras características de la corteza terrestre. Actualmente, se encuentran activos un gran número de programas satelitales dedicados a la observación terrestre tales como:

- **Landsat.** Es una serie de misiones dedicadas a la observación terrestre conformada por 8 satélites, de los cuales solo se encuentran activos el Landsat 5 y 8. Su mantenimiento y operación está a cargo de la Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio (NASA, del inglés *National Aeronautics and Space Administration*). Asimismo, la producción y comercialización de las imágenes depende del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS, del inglés *United States Geological Survey*) [9].
- **Sentinel.** Es un proyecto multisatélite desarrollado por la Agencia Espacial Europea (ESA, del inglés *European Space Agency*) en el marco del Programa Copernicus [10]. Se conforma por cinco satélites con diferentes objetivos que van, desde la vigilancia terrestre hasta la observación marina: 1) Sentinel-1, tiene como objetivo la observación de la Tierra y los océanos; 2) Sentinel-2, su principal objetivo es la observación terrestre, y se compone de dos satélites que proporcionan imágenes de alta resolución; 3) Sentinel-3, tiene como objetivo principal la observación

marina; 4) Sentinel-4, dedicado al monitoreo de la calidad del aire; 5) Sentinel-5, al igual que su antecesor, se dedica al monitoreo de la calidad del aire.

- **Aqua.** Satélite para la observación de la Tierra dedicado al estudio del ciclo del agua. Fue puesto en órbita el 4 de mayo de 2002 desde la base de Vandenberg por un cohete Delta II a una distancia de 705 km de altura [11].

Por otra parte, el proyecto Copernicus Sentinel-2 [12] comprende una constelación de dos satélites de órbita polar colocados de forma sincrónica con el Sol. Su principal objetivo es monitorear las variaciones de la superficie terrestre y ofrecer imágenes de alta resolución de la misma zona cada 10 días. Los satélites incorporan un sensor óptico llamado “*MultiSpectral Instrument*” (MSI) que cuenta con 13 bandas espirales (ver Tabla 1); 4 de ellas cuentan con una resolución espacial de 10 metros, 6 con resolución de 20 metros y 3 con resolución de 60 metros [13].

Las imágenes Sentinel-2 se encuentran disponibles para su descarga, visualización y procesamiento de forma gratuita por la ESA¹.

Tabla 1. Distribución de bandas espirales de Sentinel-2.

Bandas	Longitud de onda (micrómetros)	Resolución (metros)
1. Aerosol costero	0.43	60
2. Azul	0.49	10
3. Verde	0.56	10
4. Rojo	0.66	10
5. Infrarrojo cercano (NIR)	0.7	20
6. Infrarrojo cercano (NIR)	0.74	20
7. Infrarrojo cercano (NIR)	0.78	20
8. Infrarrojo cercano (NIR)	0.84	10
8a. Rojo de borde (RedEdge)	0.86	20
9. Vapor de agua	0.94	60
10. Cirrus	1.37	60
11. Onda corta infrarroja (SWIR)	1.61	20
12. Onda corta infrarroja (SWIR)	2.19	20

¹ <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>

Índices radiométricos

Los índices radiométricos se definen como una categoría de las transformaciones de imágenes obtenidas por satélites. Consisten de un conjunto de operaciones matemáticas entre las bandas espectrales con el objetivo de resaltar las diferencias entre coberturas; así como de atenuar efectos atmosféricos o del suelo. Los índices más utilizados en los estudios terrestres son:

- Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI, del inglés *Normalized Difference Vegetation Index*). Es un indicador de biomasa fotosintéticamente activa, propuesto inicialmente por Rouse *et al.* [14]. Es uno de los índices de vegetación más utilizados en la PR ya que ayuda a diferenciar la vegetación de otros tipos de cobertura del suelo (artificial) y determinar su estado general. También permite definir y visualizar áreas con vegetación en el mapa y detectar cambios anormales en el proceso de crecimiento. Este índice se calcula siguiendo la ecuación:

$$\text{NDVI} = \frac{\text{NIR} - \text{RED}}{\text{NIR} + \text{RED}}$$

- NIR corresponde a la banda del infrarrojo cercano y RED a la banda roja. Por definición, los valores del NDVI varían entre -1 y 1 con valores más altos para la vegetación densa y los valores negativos para áreas con superficie de agua, rocas, y nubes.
- Índice de Agua de Diferencia Normalizada (NDWI, del inglés *Normalized Difference Water Index*). Representa un índice de medición de cantidad de agua presente en la vegetación o suelo. Se calcula a partir de imágenes adquiridas por los sensores satelitales y de las bandas espectrales [15]. Constituye una variación del NDVI. El cálculo de los valores se realiza aplicando el método de McFeeters [16] mediante la siguiente ecuación:

$$\text{NDWI} = \frac{\text{NIR} - \text{GREEN}}{\text{NIR} + \text{GREEN}}$$

NIR corresponde a la banda del infrarrojo cercano y GREEN a la banda verde. Los valores de NDWI varían entre +1 y -1 con valores más altos para la presencia de agua y valores muy bajos para superficies sin presencia de vegetación o agua [15].

Google Earth Engine

Los datos de teledetección requieren de altos recursos informáticos, los cuales se traducen en altos costos y limitan la investigación en este campo. *Google Earth Engine* (GEE) ofrece una solución a esta limitante. GEE es una plataforma basada en la nube que permite acceder y utilizar recursos informáticos de alto rendimiento dedicados al análisis de enormes colecciones de datos geoespacial [17]. Además, la plataforma posee un robusto conjunto de datos que incluyen imágenes satelitales, como las colecciones Landsat, Sentinel, datos climáticos y de cobertura terrestre, entre otros [18]. La arquitectura de la plataforma permite la ejecución de algoritmos complejos en extensiones espaciales considerables de manera rápida, demostrando ser una herramienta eficiente en diferentes aplicaciones geoespaciales como el mapeo de tierras de cultivo, detección de cambios temporadas y análisis ambientales.

Trabajos relacionados

El empleo de estos recursos es considerado una herramienta muy importante en el campo de la investigación ya que contribuye a la obtención de datos homogéneos y precisos para su aplicación en diversas áreas. Tal es el caso de Lodoño *et al.* [19] quienes realizaron una clasificación automática de las coberturas de suelo a partir de imágenes satelitales utilizando un método de aprendizaje automático basado en Redes Neuronales Convolucionales (CNN); obtuvieron una exactitud promedio de 83.52 % en entrenamiento y 91.02 % en validación. De igual manera, Morales [20] presenta la actualización de la cartografía de la cobertura del suelo; realizó el cálculo de Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) sobre un mosaico de imágenes satelitales Sentinel 2B-1C utilizando la plataforma *Google Earth Engine* (GEE); posteriormente realizó una clasificación no su-

DOI: <https://doi.org/10.21501/21454086.3601>

pervisada por clusters obteniendo como resultado una exactitud del 83 %. Aliaga et al. [21] realizaron un análisis de imágenes satelitales de distintas resoluciones espaciales para interpretar el comportamiento de seis lagunas de una región mediante el Índice Estandarizado de Precipitación (IEP).

3. MATERIALES Y MÉTODOS

La metodología aplicada para el análisis de las zonas de cultivo y cuerpos de agua se dividió en 5 apartados (ver Figura 1): 1) se establecieron las áreas de interés, 2) se determinaron las series de tiempo basadas en un conjunto de características, 3) se adquirieron las colecciones de imágenes de las áreas de interés acorde a las series de tiempo, 4) se preprocesaron digitalmente las imágenes para realizar correcciones atmosféricas y, finalmente, 5) se aplicaron los algoritmos correspondientes para calcular los índices radiométricos.



Figura 1. Metodología propuesta para el análisis de zonas de cultivo y cuerpos de agua.

La zona de estudio corresponde al municipio de Balancán, localizado en la región Ríos del estado de Tabasco, México. La región se encuentra en las coordenadas 17°48' latitud norte y entre 91°32' longitud oeste. Esta población se asienta en los márgenes del río Usamacinta, en donde convergen otros ríos más pequeños. El territorio se caracteriza por ser hábitat de una rica flora y fauna silvestre. El clima es cálido-húmedo con abundantes lluvias en verano; tiene una temperatura media anual de 32° C y la mínima absoluta alcanza los 20° C. El régimen de precipitaciones se caracteriza por un total de caída de agua de 1,500 milímetros en el mes de septiembre y las mínimas en el mes de abril. La humedad relativa se estima en un máximo de 90 % en los meses de septiembre y octubre, un mínimo de 74 % en abril y mayo [22].

Se seleccionaron dos áreas de la región para su estudio: 1) espacio geográfico de la zona de cultivo Palo Verde ubicada en las coordenadas geográficas 17°44'33,928" latitud norte y 91°33'3,119" longitud oeste, la cual posee una dimensión aproximada de 4500 m² y los principales cultivos son sorgo y maíz; 2) el espacio geográfico de la laguna Santana, tiene una dimensión de aproximadamente 2286 m², sus coordenadas geográficas son 17°43'56,109" latitud norte y 91°27'5,191" longitud oeste.

En la Figura 2 se muestra la localización geográfica de las áreas de estudio mediante una imagen obtenida de GEE. Se establecieron series de tiempo anuales (2018 – 2020 para la zona de cultivo y 2017 – 2020 para la laguna) tomando en cuenta algunas características como clima de la región, ciclos de siembra/cosecha y temporadas de lluvias. Esto con el objetivo de realizar el análisis multitemporal de ambas áreas de estudio.

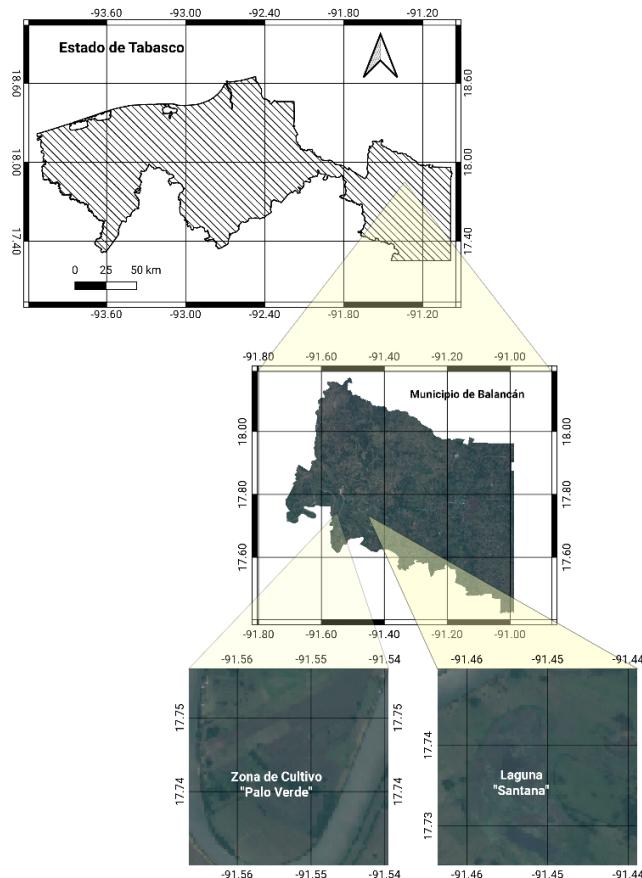


Figura 2. Ubicación geográfica de las áreas de estudio.

Para el análisis de la tierra de cultivo se utilizaron los ciclos de cosechas primavera – verano, que comprenden del mes de mayo a septiembre y otoño – invierno, que inicia en el mes de noviembre y termina en abril. Para la laguna se utilizaron las temporadas de seca (marzo-mayo); lluvias (junio – noviembre) y media (diciembre – febrero).

Las escenas disponibles del satélite Sentinel-2 constituyen un recurso valioso debido a su cobertura mundial, adecuada resolución espacial y registro radiométrico. Dichas imágenes se obtuvieron mediante la plataforma GEE con una filtración de 20 – 40 % de nubosidad. Las escenas obtenidas fueron preprocesadas para su corrección atmosférica a la extracción de información relevante para su análisis, mediante SNAP-Sen2Cor² que convierte la reflectividad TOA

(Top Of Atmosphere) a reflectividad BOA (Bottom Of Atmosphere). Finalmente, se aplicaron los algoritmos sugeridos por Rouse et al. [14] y McFeeters [16] con el objetivo de obtener los cálculos multitemporales de los índices radiométricos para, posteriormente, evaluar el comportamiento que han sufrido las áreas de estudio en los últimos años.

4. RESULTADOS

Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)

Disponer de imágenes satelitales permitió estimar la variación de los cultivos en el área de estudio durante los años 2018 – 2020. En la mayoría los valores de NDVI entre 0.2 y 0.4 corresponden a vegetación escasa; la vegetación moderada tiende a variar entre 0.4 y 0.6; cualquier valor por encima de 0.6 indica mayor densidad de vegetación en la zona de estudio. En la Figura 3 se representan los valores obtenidos mediante el análisis NDVI de las imágenes satelitales Sentinel-2, en el periodo enero – diciembre del 2018 a 2020. Durante el periodo, el NDVI se encontró en rangos entre 0.2 y 0.6, indicando la presencia de vegetación y sus variaciones.

La Figura 3a corresponde a las variaciones en el periodo enero – marzo; en la gráfica se observa que el índice obtuvo su valor más alto en marzo de 2020, mientras que el más bajo fue en la segunda mitad de febrero de 2018. El alto índice en el 2020 puede atribuirse a las abundantes lluvias suscitadas en el área de cultivo; como consecuencia, los cultivos pueden presentar alteraciones por saturación de agua, dando como resultados índices elevados.

La Figura 3b corresponde al periodo abril – junio, con rangos entre 0.2 y 0.5. En la gráfica se observa que el valor más alto del índice se obtuvo en el mes de junio de 2018 y el más bajo fue a finales de mayo del mismo año; los resultados obtenidos del periodo en cuestión son consecuencia de la temporada seca en la región, en la cual la mayor parte de los trabajadores agrícolas

² Software para corregir, procesar y formatear imágenes Sentinel-2A

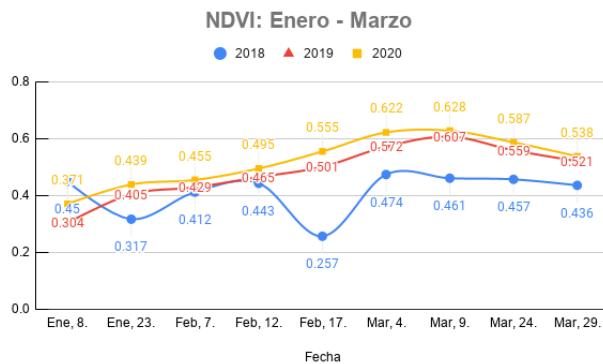
DOI: <https://doi.org/10.21501/21454086.3601>

preparan las tierras de cultivo para la siembra del ciclo otoño – invierno; como resultado, presenta bajo índice de vegetación.

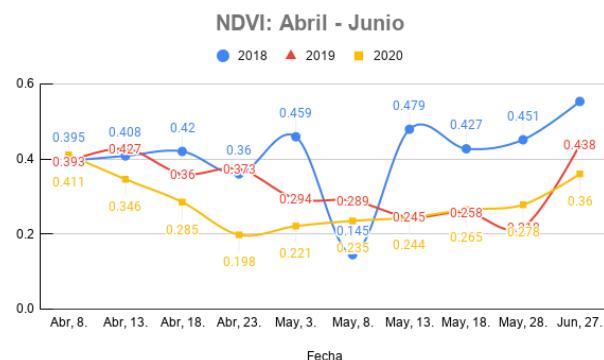
La Figura 3c corresponde al periodo julio – septiembre, en la gráfica se observa que el valor más alto del índice fue a mediados de julio de 2019 y el más bajo fue a inicios de julio de 2018; en este periodo fue notorio la disminución de la calidad de los cultivos; estos resultados pueden atribuirse a las pocas precipitaciones ocurridas en este periodo, de igual manera en este periodo las tierras de cultivo aún se encuentran en labores de preparación para el próximo ciclo de siembra.

La Figura 3d corresponde al periodo octubre – diciembre el cual presentó un rango de valores entre 0.2 y 0.6, en la gráfica se observa que el valor mínimo obtenido fue a mediados de noviembre de 2018 y el valor más alto se obtuvo a finales de octubre del mismo año. Estos resultados se deben a que este periodo de tiempo corresponde al ciclo de siembra otoño – invierno.

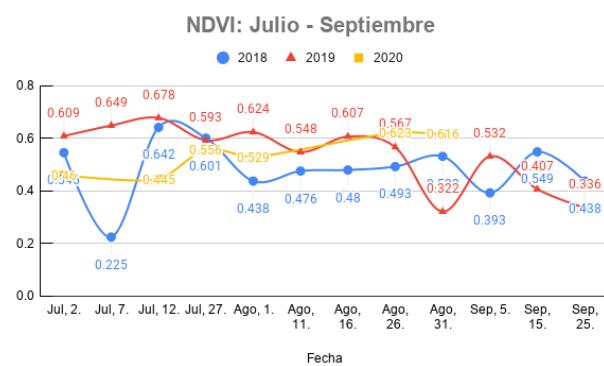
a) NDVI: enero – marzo del 2018 a 2020



b) NDVI: abril – junio del 2018 a 2020



c) NDVI: julio – septiembre del 2018 a 2020



d) NDVI: octubre – diciembre del 2018 a 2019

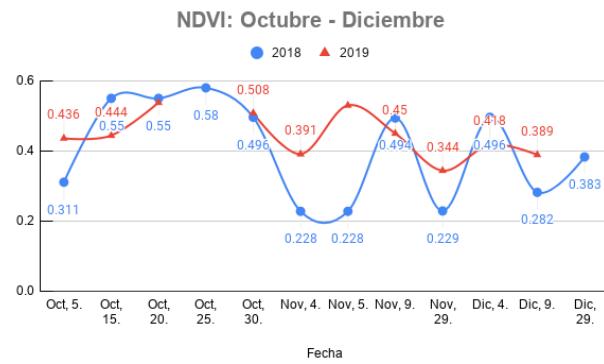


Figura 3. Valores obtenidos mediante el análisis NDVI.

Índice de Agua de Diferencia Normalizada (NDWI)

En el municipio de Balancán la temporada de lluvias dura alrededor de 5 meses (mayo a octubre) con una probabilidad de lluvia de más del 40 % y para el mes de septiembre las probabilidades aumentan hasta el 70 %. Por otra parte, la temporada seca dura 7 meses (octubre a mayo) en los cuales las probabilidades de lluvia son menores al 15 %.

El cálculo del NDWI ayuda a detectar cuerpos de agua y zonas sometidas a estrés hídrico, para ello se utilizan las bandas Verde y NIR, las cuales maximizan la reflectividad del agua. En la Figura 4 se muestran los resultados obtenidos del cálculo NDWI sobre la Laguna Santana en el periodo diciembre 2017 – agosto 2020, la media de los valores obtenidos del índice varía entre -0.2 y -0.5.

La Figura 4a corresponde al periodo diciembre – febrero; en este periodo de tiempo los valores del índice varían de -0.5 a -0.2, esto indica que la laguna en estudio no contiene agua ya que el periodo estudiado corresponde al tiempo de seca en la región haciendo que los cuerpos de agua pierdan su contenido.

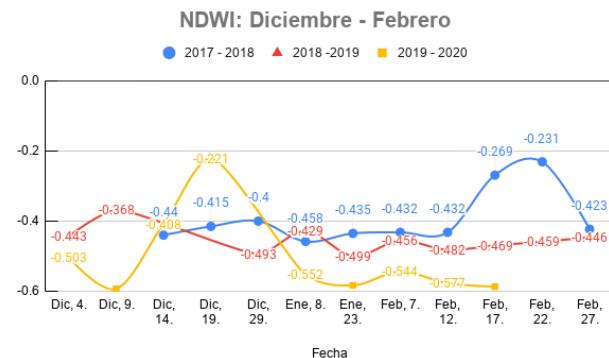
La Figura 4b corresponde al periodo marzo – mayo con rangos entre -0.4 y -0.2; en la gráfica se observa que el índice más bajo fue a inicios mes de marzo del 2018 y el más alto fue en abril de 2019. Estos resultados pueden deberse a la temporada de sequía, que afectó a la zona en 2018, provocando una disminución considerable en su NDWI.

La Figura 4c corresponde al periodo junio – agosto con rangos entre -0.4 y -0.1; en la gráfica se observa que el lago presentó los índices más altos de la temporada en 2020 y el índice más bajo a inicios del mes de agosto de 2019, esto se debe a que en el mes de junio de 2020 la tormenta tropical "Cristóbal" azotó a el municipio de Balancán y dejó severas inundaciones en algunas zonas.

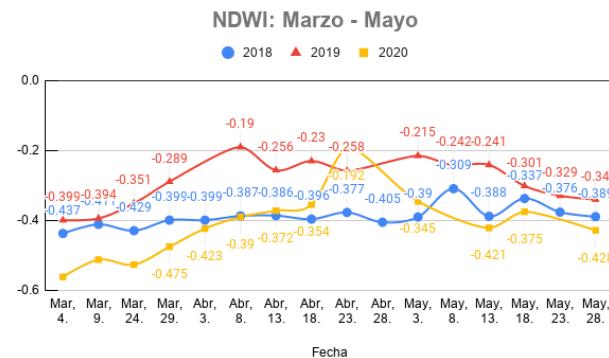
La Figura 4d corresponde al periodo septiembre – noviembre; en la gráfica se observa que los índices del lago se mantuvieron altos durante 2018, y fueron afectado en el mes de octubre del 2019 (con el índice más bajo de la temporada y del año).

En los índices NDVI y NDWI obtenidos, de los años en cuestión, se aprecia que los niveles más bajos se presentaron en el año 2018. Se puede inferir que en estos años los cultivos y el cuerpo de agua se vieron afectados por la sequía que presentó la zona durante ese periodo. Los datos obtenidos reflejan los cambios que presentaron las zonas de estudio, permitiendo determinar la afectación que tiene el cambio climático sobre ellos.

a) NDWI: diciembre – febrero del 2017 a 2020

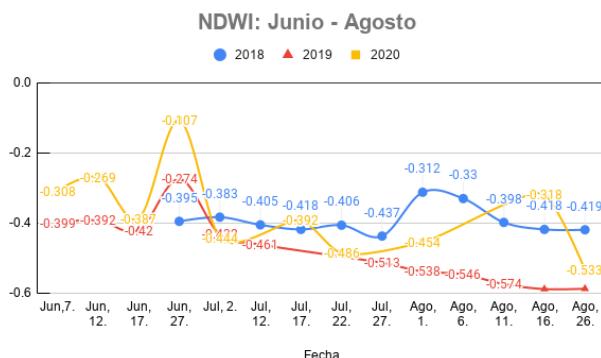


b) NDWI: marzo – mayo del 2018 a 2020



DOI: <https://doi.org/10.21501/21454086.3601>

c) NDWI: junio – agosto del 2018 a 2020



d) NDWI: septiembre – noviembre del 2018 a 2019

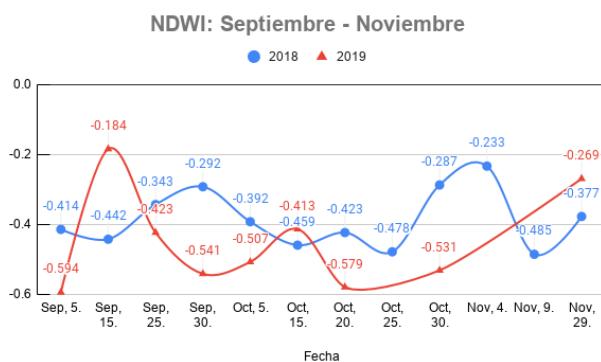


Figura 4. Valores obtenidos mediante el análisis NDVI.

5. CONCLUSIÓN

Los resultados expuestos anteriormente demuestran un bajo índice radiométrico en las áreas de estudio durante el 2018. Asimismo, los mayores cambios durante la temporada de lluvia fueron registrados en 2018; esto evidencia la provocación en la disminución en la calidad de los cultivos y en el cuerpo de agua.

Los cambios pueden atribuirse a efectos causado por cambios climáticos presentados en la zona de estudio, que provocan modificaciones en los ciclos de cultivo y disminuyen la producción de alimentos de origen agrícola. Debido a esto, es de gran importancia

el monitoreo de los cultivos que permita observar las anomalías y corregirlas en un corto plazo. Además, es posible recolectar datos que pueden influir en la toma de decisiones que permitan el desarrollo de estrategias que contrarresten los efectos del cambio climático y fortalezcan el sector agrícola. Esto puede mejorar el uso de los cuerpos de agua, además de mantener el rendimiento de los cultivos.

6. CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran la inexistencia de conflicto de interés con institución o asociación comercial de cualquier índole.

7. REFERENCIAS

- [1] Food and Agriculture Organization, "El agua y la agricultura.", Organización de las Naciones Unidad para la Agricultura y la Alimentación, 2002. <http://www.fao.org/worldfoodsummit/sideevents/papers/y6899s.htm>. (Accedido: 10-mar-2020)
- [2] L. Coutiño Román, "Análisis multitemporal de imágenes satelitales para conocer la calidad del agua en la presa: Valle de Bravo.", Tesis de pregrado, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, 2012. <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/2500/tesis.pdf.pdf?sequence=1>
- [3] J. González Bernal, "La percepción remota.", Noche de las Estrellas, 2017. https://www.nochedelasestrellas.org.mx/docs/Articulos/2017/5_1_PercepcionRemota.pdf. (Accedido: 10-mar-2020)
- [4] J. Lira, *La Percepción Remota: Nuestros Ojos desde el Espacio*. Ciudad de México: Fondo de Cultura Económica, 2003. <http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen1/ciencia2/33/htm/percep.htm>

- [5] T. Lillesand, R. Kiefer, y J. Chipman, "Remote Sensing and Image Interpretation.", USA: John Wiley & Sons Inc, 2015, pp. 1 – 3.
- [6] E. Chuvieco, "Teledetección Ambiental: La Observación de la Tierra Desde el Espacio.", España: Ariel Ciencia, 2002, pp. 17 – 18.
- [7] J. Jensen, "Remote Sensing of the Environment: An Earth Resource Perspective.", USA: Pearson Prentice Hall, Prentice Hall Series in Geographic Information Science, 2007, pp. 2 – 4.
- [8] R. Torres, L. Campillo y H. López, "Percepción remota: Elementos básicos", Kuxulkab, vol. XXI, nº 40, pp. 23 – 29, 2015. <https://revistas.ujat.mx/index.php/kuxulkab/article/download/1001/860>
- [9] A. Berdugo Muñoz, y G. Reales López, "Análisis multiespectral de imágenes satelitales para evaluar variaciones espacio-temporales en la calidad del agua del embalse el Guájaro, Atlántico", Tesis de pregrado, Facultad de Ciencias Ambientales, Universidad de La Costa (CUC), Barranquilla, 2016.
- [10] European Space Agency, "Sentinel Missions.", Sentinel Online. <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions;jsessionid=5393A7312C49C41754494D43E518898F.jvm2>. (Accedido: 11-mar-2020)
- [11] N. F. Bravo Morales, "Teledetección espacial Landsat, Sentinel2, Aster L1T y MODIS.", Universidad Nacional Agraria de la Selva, Facultad de Recursos Naturales Renovables, Escuela Profesional de Ingeniería Forestal, 2017. https://acolita.com/wp-content/uploads/2018/01/Teledeteccion_espacial_ArcGeek.pdf
- [12] European Space Agency, "Sentinel-2 Mission." Sentinel Online. <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-2>. (Accedido: 11-mar-2020)
- [13] J. Delegido, C. Tenjo, y A. Ruiz-Verdu, "Aplicaciones de Sentinel-2 a estudios de vegetación y calidad de aguas continentales." XVII Simposio Internacional en Percepción Remota y Sistemas de Información Geográfica (SELPER), Puerto Iguazú, Argentina, 2016.
- [14] J. Rouse, R. Haas, J. Schell, y D. Deering, "Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS.", 3rd ERTS Symposium, Washington D.C., 1973.
- [15] M. Delpino Aguayo, V. Portillo Sosa, y C. Mora Stanley, "Evaluación de índices espectrales derivados de sensores remotos para la caracterización de ambientes de humedales." 7º Simpósio de Geotecnologias no Pantanal, Brasil, 2018.
- [16] S. McFeeters, "The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features." International Journal of Remote Sensing, vol. 17, no. 7, pp. 1425 – 1432, 1996, doi: <https://doi.org/10.1080/01431169608948714>.
- [17] B. Liss, M. Howland, and T. Levy, "Testing Google Earth Engine for the automatic identification and vectorization of archaeological features: A case study from Faynan, Jordan.", *Journal of Archaeological Science: Reports*, vol. 15, pp. 299 – 304, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2017.08.013>
- [18] J. Xiong, P. Thenkabail, M. Gumma, P. Teleguntla, J. Poehnelt, R. Congalton, K. Yadav, and D. Thau, "Automated cropland mapping of continental Africa using Google Earth Engine cloud computing.", *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 126, pp. 225 – 244, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2017.01.019>
- [19] A. Suárez Lodoño, A. Jiménez, M. Castro-Franco, y A. Cruz-Roa, "Clasificación y mapeo automático de coberturas del suelo en imágenes satelitales utilizando Redes Neuronales Convolucionales.", *Orinoquia*, vol. 21, pp. 64 – 75, 2017, <https://doi.org/10.1016/j.orinoquia.2017.01.001>

DOI: <https://doi.org/10.21501/21454086.3601>

- www.researchgate.net/publication/334551585_Clasificacion_y_mapeoAutomatico_de_coberturas_del_suelo_en_imagenes_satelitales utilizando_Neuronales_Convolucionales.
- [20] M. C. Morales Poclava, M. J. Mosciaro, y H. J Elena, "Determinación de cobertura de suelo con imágenes Sentinel 2B-1C en entorno Google Earth Engine.", presentado en 1° Encuentro Nacional sobre PERIURBANOS E INTERFACES, 2° Reunión Científica de PNNAT y 3° Reunión de la Red PERIURBAN, Córdoba, Argentina, 2018, https://inta.gob.ar/sites/default/files/inta_resumen_ampliado_sentinel.pdf
- [21] V. S. Aliaga, F. Ferrelli, V. Bohn, y M. C. Piccolo, "Utilización de imágenes satelitales para comprender la dinámica lagunar en la Región Pampeana.", Revista de la Asociación Española de Teledetección, no. 46, pp. 133 – 145, 2016, doi: <https://doi.org/10.4995/raet.2016.5196>.
- [22] Gobierno de Tabasco, "Balancán.", Tabasco- <https://tabasco.gob.mx/balancan>