

Metodología para obtener mapas del índice de área foliar en cultivos de caña de azúcar

RESUMEN: En los últimos años la teledetección se ha convertido en una herramienta fundamental para el desarrollo de la agricultura de precisión. A través de la información censada de los cultivos, se pueden desarrollar modelos de predicción de cosecha, estimar la capacidad fotosintética de la planta y entender la relación entre acumulación de biomasa y rendimiento, bajo ciertas condiciones ambientales. Lo anterior, se puede lograr a través de la estimación de un índice de vegetación llamado índice de área foliar (LAI, por sus siglas en inglés) utilizando técnicas de teledetección y a partir del mapa de la zona de interés. Sin embargo, la teledetección tiene algunas limitaciones en cuanto a resolución espacial, espectral y temporal de las imágenes disponibles. Los satélites de observación de la tierra ofrecen imágenes multitemporales que son usadas para evaluar y monitorear el estado de la vegetación. Los satélites Sentinel-2 de la Agencia Espacial Europea forman parte de estas tecnologías. En este artículo se propone una metodología con bibliotecas de software libre para el procesamiento de las imágenes obtenidas del Sentinel-2 para obtener el mapa de LAI del cultivo de la caña de azúcar. La metodología consta de tres fases, (1) descarga, (2) preprocesamiento y (3) modelo retrieval. Los resultados muestran que, a través de la metodología implementada, se puede obtener el mapa del LAI de la zona de interés sembrada con caña de azúcar.

PALABRAS CLAVE: Caña de azúcar, imágenes satelitales, mapas del LAI, procesamiento de imágenes, Sentinel-2, teledetección.



Colaboración

Rodrigo Rodríguez-Ramírez; María Guadalupe Sánchez-Cervantes; Daniel Fajardo-Delgado; Rubén Zepeda-García, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Cd. Guzmán; Himer Ávila-George; Centro Universitario de los Valles, Universidad de Guadalajara

ABSTRACT: In recent years, remote sensing has become a fundamental tool for the development of precision agriculture. Through crop information, crop prediction models can be developed, plant photosynthetic capacity can be estimated, and the relationship between biomass accumulation and yield under certain environmental conditions can be understood. It can be achieved through the estimation of a vegetation index called the leaf area index (LAI) using remote sensing techniques and from the map of the region of interest. However, remote sensing has some limitations in terms of spatial, spectral, and temporal resolution of the available images. Earth observation satellites offer multitemporal images that are used to assess and monitor the state of vegetation. Sentinel-2 satellites of the European Space Agency are part of these technologies. This article proposes a methodology with free software libraries for the processing of images obtained from Sentinel-2 to get the LAI map of the sugarcane crop. The methodology consists of three phases, (1) download, (2) preprocessing, and (3) retrieval model. The results show that through the methodology implemented, the LAI map of the area of interest planted with sugarcane can be obtained.

KEYWORDS: Sugarcane, satellite images, LAI maps, image processing, Sentinel-2, remote sensing.

INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, la teledetección se ha convertido en una herramienta fundamental para el desarrollo de la agricultura de precisión. A través de ella se puede censar el estado de los cultivos a través de imágenes capturadas desde sensores remotos ubicados en plataformas satelitales o vehículos aéreos tripulados y no tripulados [1]. Con lo anterior, se obtiene información de los cultivos a un bajo costo en comparación con otro tipo de medidas in situ. Hay varios satélites orbitando nuestro planeta perteneciente a diferentes empresas y países. El satélite Sentinel-2 forma parte de

un grupo de satélites del programa Copérnico coordinados por la Agencia Espacial Europea (ESA, por sus siglas en inglés) y es usado como una herramienta de teledetección para estimar los índices espectrales o parámetros biofísicos de la cubierta vegetal [2]. Este satélite proporciona información de alta resolución, basada en una constelación de dos satélites, Sentinel-2A y Sentinel-2B. Ambos satélites entregan datos con un tiempo efectivo de revisita en el ecuador de cinco días [3]. La resolución proporcionada es temporal, radiométrica y espacial. Cada satélite lleva un sensor multiespectral (MSI, por sus siglas en inglés) capaz de capturar imágenes a 10, 20 y 60 metros en 13 bandas distintas del espectro de luz [4].

Existe una gran cantidad de índices espectrales que estudian diferentes aspectos de la cubierta vegetal. Entre ellos se encuentran, el índice de área foliar (LAI, por sus siglas en inglés) [5], el índice de vegetación de diferencias normalizadas (NDVI, por sus siglas en inglés) [6], y el índice de estrés hídrico en cultivo (CWSI, por sus siglas en inglés) [7]. El LAI es un parámetro importante en la fisiología de la planta y está relacionado con el crecimiento, la actividad fotosintética y la evapotranspiración [7]. El LAI se definió por primera vez en 1947 [8] como el total de área de una cara de un tejido fotosintético por la unidad de superficie del terreno.

En el contexto de la agricultura de precisión, existe un gran interés por estimar este parámetro debido a que se puede obtener información del crecimiento y salud del cultivo a analizar. La teledetección juega un papel muy importante en la estimación del LAI debido a que se pueden adquirir imágenes a distintas escalas espaciales y de frecuencia temporal [9]. Para llevar a cabo un buen monitoreo de los cultivos se debe considerar una resolución espacial de al menos 20 m y una frecuencia de revisita semanal [10]. La misión Sentinel-2 cumple con estas características y además el acceso a los datos es libre, razones por las cuales se optó por su uso en este trabajo.

Hay diferentes métodos para estimar el LAI, entre los que se encuentran, métodos de regresión paramétrica y no paramétrica, inversión de modelos de transferencia radiativa (RTM, por sus siglas en inglés) y métodos híbridos de regresión [11]. En este estudio se utilizó el RTM generado con la herramienta ARTMO [12].

Cada día son más los investigadores que están aprovechando la información censada por las plataformas satelitales, estudiando y creando nuevos métodos para el estudio de los cultivos. Es posible crear toolboxes, scripts y software para automatizar la obtención e interpretación de la información capturada por los satélites [2]. Se han desarrollado métodos de censado remoto para mejorar las prácticas de cultivo de caña de azúcar, tal es el caso de Kibos- Miwani en Kenya, donde se planteó usar índices como el NDVI y el índice

de Agua de Diferencia Normalizada (NDWI, por sus siglas en inglés) para mapear parcelas de caña con la finalidad de proporcionar información confiable a la industria azucarera. El procesamiento se llevó a cabo por medio de imágenes satelitales del Landsat-8 con resoluciones de 15 metros por píxel y 8 bandas [13]. En [2] se propone una cadena de procesamiento de imágenes satelitales para estimar parámetros biofísicos utilizando datos del Sentinel-2. Los autores en [2] proporcionan una comparación sistemática de la precisión de la recuperación y la velocidad de procesamiento de varios métodos de recuperación paramétricos, y no paramétricos utilizando datos simulados del Sentinel-2. Se ha propuesto una metodología utilizando la inversión del modelo de transferencia radiativa PROSAIL a través del método de regresión de proceso gaussiano no lineal (GPR, por sus siglas en inglés) de última generación, para la recuperación del LAI de alta resolución a partir de los satélites Landsat y SPOT5 y se validaron los resultados utilizando series temporales de mediciones del LAI in situ recolectadas durante la temporada de arroz en España e Italia [14].

El monitoreo de los cultivos durante las etapas de su desarrollo es muy importante, porque a través de él se pueden detectar anomalías a tiempo y con ello minimizar las pérdidas en su productividad. Para llevar a cabo lo anterior, se debe obtener un mapa con la información suficiente de la zona de interés. Son pocos los agricultores que actualmente aprovechan las ventajas que ofrece la teledetección a través de satélites.

En este contexto, el objetivo de este trabajo es proponer una metodología cuya implementación se lleve a cabo con bibliotecas de software libre para obtener el mapa del LAI del cultivo de caña de azúcar a partir de imágenes obtenidas del Sentinel-2. Como caso de estudio se eligió el cultivo de caña de azúcar ya que Jalisco es el segundo mayor productor del país solo por debajo de Veracruz y hay pocos trabajos reportados en este sentido.

La metodología utilizada la componen tres fases: la descarga de las imágenes, el pre-procesamiento y el modelo retrieval.

El artículo está organizado de la siguiente manera: en el capítulo 2 se presenta la metodología empleada para el procesamiento de las imágenes con la finalidad de obtener los mapas del LAI; en el capítulo 3 se presentan los resultados obtenidos del trabajo y por último en el capítulo 4 se dan a conocer las conclusiones a las que se llegó.

MATERIAL Y MÉTODOS

Con el fin de obtener los mapas del LAI de la zona de interés, se definieron tres fases: descarga de imágenes, pre-procesamiento y modelo retrieval (ver Figura 1). A continuación, se explica a detalle cada una de ellas.

Al finalizar esta fase, las imágenes se encuentran descargadas y en formato comprimido.

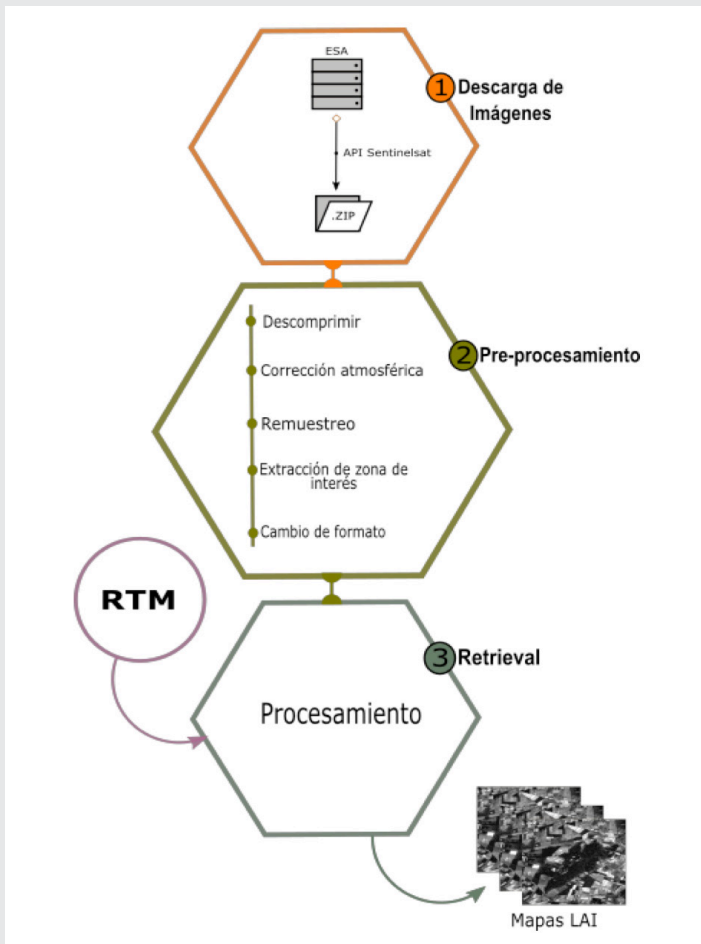


Figura 1. Metodología empleada para obtener mapas del LAI.

Fase de descarga de imágenes

Las imágenes se descargaron de los servidores de la ESA, donde se encuentran almacenadas todas las imágenes censadas por los satélites, a través de la API Sentinelsat. Se tomó como caso de estudio el cultivo de la caña de azúcar sembrada en la zona centro-norte del estado de Jalisco, específicamente en el municipio de Ameca (ver Figura 2).

El mapa está dividido por "tiles", para identificar cada región en el mapa, por ejemplo, los "tiles" etiquetados con 13QDC, 13QEC, 13QFC de la figura 2, pertenecen a ciertas zonas del estado de Jalisco. Estos "tiles" permiten elegir zonas específicas sin la necesidad de tener que descargar una imagen de gran tamaño.

Se descargaron las imágenes del "tile" identificado como "13QFC" que comprenden la zona del municipio de Ameca, Jal., con coordenadas (-103.91212463378906, 20.558384822815057; -103.8823413848877, 20.558384822815057; -103.8823413848877, 20.578554992113766; -103.91212463378906, 20.578554992113766; -103.91212463378906, 20.558384822815057).

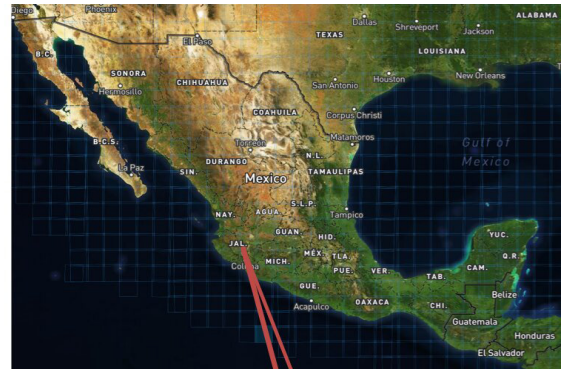


Figura 2. Localización de las zonas de estudio. Zona centro-norte de Jalisco

Fase de Pre-procesamiento

Para llevar a cabo el pre-procesamiento de las imágenes descargadas se utilizó el software SNAP. El pre-procesamiento consistió de 3 etapas, (a) corrección atmosférica, (b) re-muestreo y (c) extracción de la zona de interés. Antes de iniciar con la corrección atmosférica, las imágenes se tuvieron que descomprimir, pues las imágenes de entrada a esta fase se encuentran en formato comprimido. A continuación, se explica cada una de estas etapas.

a) Corrección atmosférica. Las imágenes descargadas pueden contener información no deseada como nubosidad, por lo que es importante eliminar este tipo de información. Se filtró la imagen con el porcentaje de nubosidad de 0-50%.

b) Remuestreo. El remuestreo consistió en homogeneizar la resolución espacial de las imágenes descargadas, pues se encuentran en 10, 20 y 60 metros por píxel. Para este artículo se eligió homogeneizarlas a la resolución de 10 m.

c) Extracción de la zona de interés. La zona que abarcan las imágenes descargadas es una extensión de terreno muy grande (ver Figura 3). Con la finalidad de reducir el tamaño, peso y para que el procesamiento sea más rápido, se extrajo sólo la zona de interés donde se encuentra el cultivo de caña de azúcar.

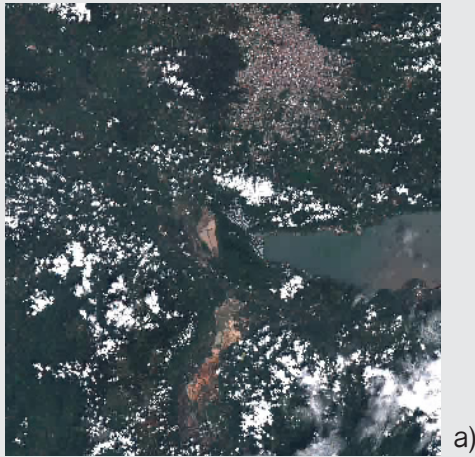


Figura 3. Imágenes capturadas desde el satélite Sentinel-2: a) Zona del 05/10/2018. b) Zona del 01/08/2019.

Fase Retrieval

Esta fase recibió, por un lado, el modelo de transferencia radiativa (RTM, por sus siglas en inglés) generada en ARTMO y, por otro lado, las imágenes pre-procesadas. Al finalizar esta fase se generaron los mapas del LAI correspondiente a las zonas de interés.

RESULTADOS

Con el objetivo de implementar la metodología propuesta, se ejecutaron los experimentos en una computadora personal con las siguientes características en hardware: Intel Core i7 8700 (hexa-core), 8 GHz en RAM, y bajo el sistema operativo Windows 10 Pro de 64 bits. Se codificaron las fases de la metodología utilizando el lenguaje de programación Python 3.7 y se utilizó la herramienta SNAP.

Como caso de estudio se consideró el cultivo de caña de azúcar en el estado de Jalisco para generar los mapas de LAI. Se tomó en cuenta dos días de los meses de octubre

de 2018 y agosto de 2019, ya que son meses en que la caña está en crecimiento.

En la Figura 4 se muestran las imágenes obtenidas del satélite correspondientes al 5 de octubre del 2018 y del 1 de agosto del 2019. Como puede observarse, la vegetación ha cambiado en esta zona de interés ya que se muestra un cambio en la coloración. Para analizar mejor esta diferencia, se obtiene el mapa de LAI de ellas.

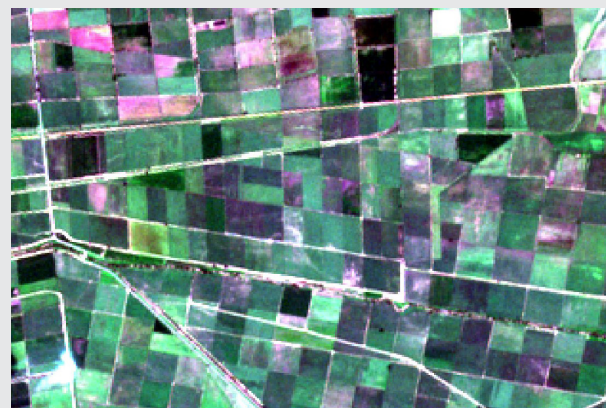


Figura 4. Imágenes para procesar:

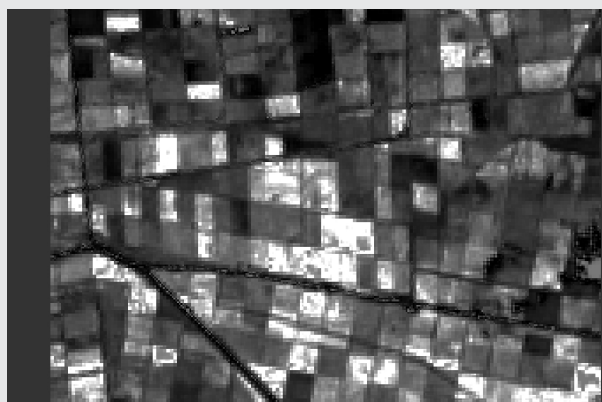
a) Fecha: 05-10-2018, b) Fecha: 01-08-2019.

En la Figura 5 se muestran los mapas de LAI de las imágenes capturadas correspondiente a estas fechas, y en la Tabla 1 se compara el índice de área foliar tomando en cuenta 10 píxeles de cada una de ellas. Es importante mencionar que cada píxel corresponde a 10 m² de la superficie terrestre. Como se puede observar en esta tabla, el LAI disminuyó transcurridos los 10 meses.

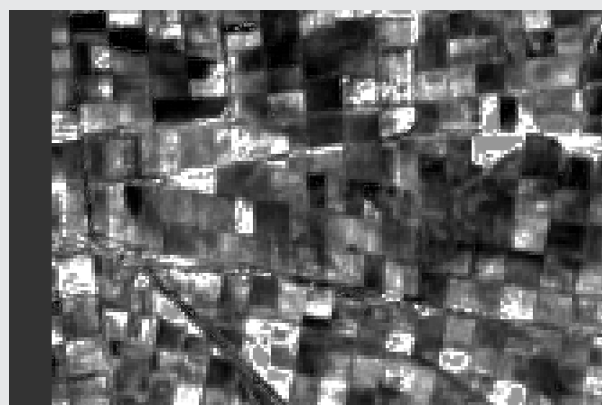
En la Figura 6 se muestra gráficamente los resultados obtenidos del LAI global de las imágenes para las dos fechas de los casos de estudio. Como se puede ver en esta figura, el índice de área foliar de esta zona disminuyó, de 6.81 a 5.57. Esto nos indica que hubo un decremento del 18% en el dosel de la vegetación y, por lo tanto, de la capacidad de captura de luz. Esta disminución pudo haberse producido por varios factores, falta de agua,

deficiencia bioenergética, plagas, enfermedades en el follaje, entre otros.

tinel-2 para obtener los mapas de LAI del cultivo de caña de azúcar.



a)



b)

Figura 5. Mapa de LAI:

a) Fecha: 05-10-2018, b) Fecha: 01-08-2019.

A partir de la obtención de este índice, el agricultor puede tomar decisiones importantes para incrementar su producción, tomando en cuenta las ventajas que ofrece el sentinel-2.

La obtención del mapa de LAI y el LAI utilizando teledetección a través de satélites, tiene algunas ventajas y desventajas respecto a otras tecnologías. Como ventajas se puede mencionar que es más económico (las imágenes se descargan de manera gratuita en sentinel-2), y es recomendable aplicarlo para cultivos extensivos que no necesiten informes muy precisos. Por otro lado, es dependiente de la climatología y posee un máximo de 10m de precisión.

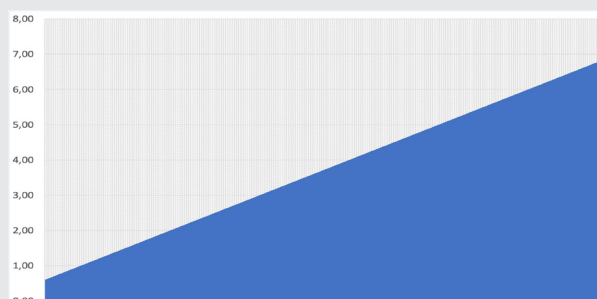
El sentinel-2 permite un mayor nivel de detalle con su resolución espacial, en comparación con otras tecnologías satelitales.

CONCLUSIONES

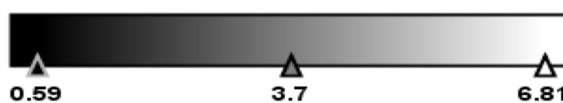
En este artículo se presenta una metodología del procesamiento de las imágenes obtenidas del satélite sen-

Tabla 1. LAI de 10 píxeles.

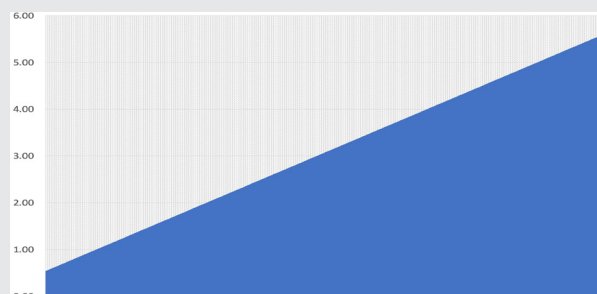
Píxel	LAI 05-10-2018	LAI 01-08-2019
1	6.60	5.39
2	6.62	5.41
3	6.64	5.43
4	6.66	5.45
5	6.68	5.47
6	6.71	5.49
7	6.74	5.51
8	6.76	5.53
9	6.79	5.55
10	6.81	5.57



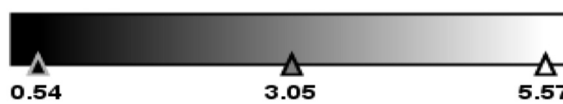
band_1 [-]



a)



band_1 [-]



b)

Figura 6. LAI: a) Fecha: 05-10-2018, b) Fecha: 01-08-2019.

Los resultados obtenidos de la metodología propuesta muestran la generación de los mapas de LAI considerando dos fechas específicas con un intervalo de 10 meses. El LAI obtenido trascurrido este intervalo, disminuyó en un 18% con respecto al LAI de la primera fecha, lo que indica que hubo un decremento en el dosel del cultivo de la caña de azúcar. A partir de esto, se tendría que hacer un análisis más detallado de los factores que influyeron en esta disminución.

Las fases que comprende la metodología propuesta pueden aplicarse a cualquier otro cultivo y a cualquier

otra parte del planeta tierra. Esta metodología es de gran apoyo a la agricultura de precisión, pues se puede obtener información útil de los cultivos y apoyar en la toma de decisiones para incrementar la producción. Además, el uso del sentinel-2 es más económico que otras tecnologías de teledetección, y permite mayor nivel de detalle con su resolución espacial respecto a otros satélites.

Como trabajo futuro se pretende realizar el estudio temporal del cultivo de la caña de azúcar de la zona centro-norte de Jalisco, considerando el índice de área foliar y las etapas fenológicas de dicho cultivo.

AGRADECIMIENTOS

El primer autor agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la subvención financiera otorgada a través de la beca # 626527 y el 2do., 4to. y 5to. autor, agradecen al Tecnológico Nacional de México por el apoyo otorgado con número 5826.19-P.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Zuleta, A. M. P., & Sanjuán, E. D. J. Z. (2018). Agricultura de Precisión en Colombia utilizando Teledetección de Alta Resolución. *Suelos Ecuatoriales*, 48(1 y 2), 41-49.

[2] Rodríguez-Ramírez, R., Sánchez, M. G., Rivera-Cañedo, J. P., Fajardo-Delgado, D., & Ávila-George, H. (2018, October). Automating an Image Processing Chain of the Sentinel-2 Satellite. In *International Conference on Software Process Improvement* (pp. 216-224). Springer, Cham.

[3] Sentinel.esa.int, 2019. Sentinel-2 - Overview - Sentinel Online, [Online]. Available: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-2/overview>

[4] Sandoval, M. P., Urrego, E. P., Ruiz-Verdu, A., Gil, N. C. T., Delegido, J., Perpiñá, J. S., ... & Méndez, J. M. (2019). Calibration and validation of algorithms for the estimation of chlorophyll-a concentration and Secchi depth in inland waters with Sentinel-2. *Limnetica*, 38(1), 471-487.

[5] Nafarrate-Hecht, A. C., Dupuy-Rada, J. M., George-Chacón, S. P., & Hernández-Stefanoni, J. L. (2018). Modelización y mapeo estacional del índice de área foliar en un bosque tropical seco usando imágenes de satélite de alta resolución. *Madera y bosques*, 24(3).

[6] Robinson, N., Allred, B., Jones, M., Moreno, A., Kimball, J., Naugle, D., ... & Richardson, A. (2017). A dynamic Landsat derived normalized difference vegetation index (NDVI) product for the conterminous United States. *Remote Sensing*, 9(8), 863.

[7] Camino, C., Zarco-Tejada, P., & González-Dugo, V. (2018). Effects of heterogeneity within tree crowns

on airborne-quantified SIF and the CWSI as indicators of water stress in the context of precision agriculture. *Remote Sensing*, 10(4), 604.

[8] Watson, D. J. (1947). Comparative physiological studies on the growth of field crops: I. Variation in net assimilation rate and leaf area between species and varieties, and within and between years. *Annals of botany*, 11(41), 41-76.

[9] Caballero, G. R. (2018). Estimación del LAI de la vegetación a partir de la sinergia Sentinel 1-Sentinel 2.

[10] Pasqualotto, N., Delegido, J., Pezzola, A., Winschel, C., & Moreno, J. (2019, September). Estimación del contenido de clorofila a nivel de cubierta (CCC) en cultivos: Comparativa de índices de vegetación y el producto de nivel 2A de Sentinel-2. In *Proceedings of the XVIII Congreso de la Asociación Española de Teledetección, Valladolid, Spain* (pp. 24-27).

[11] Verrelst, J., Malenovský, Z., Van der Tol, C., Camps-Valls, G., Gastellu-Etchegorry, J. P., Lewis, P., ... & Moreno, J. (2019). Quantifying vegetation biophysical variables from imaging spectroscopy data: a review on retrieval methods. *Surveys in Geophysics*, 40(3), 589-629.

[12] Verrelst, J., & Rivera, J. P. (2017). A global sensitivity analysis toolbox to quantify drivers of vegetation radiative transfer models. In *Sensitivity Analysis in Earth Observation Modelling* (pp. 319-339). Elsevier.

[13] Verrelst, J., Malenovský, Z., Van der Tol, C., Camps-Valls, G., Gastellu-Etchegorry, J. P., Lewis, P., ... & Moreno, J. (2019). Quantifying vegetation biophysical variables from imaging spectroscopy data: a review on retrieval methods. *Surveys in Geophysics*, 40(3), 589-629.

[14] Campos-Taberner, M., García-Haro, F. J., Camps-Valls, G., Grau-Muedra, G., Nutini, F., Crema, A., & Boschetti, M. (2016). Multitemporal and multiresolution leaf area index retrieval for operational local rice crop monitoring. *Remote Sensing of Environment*, 187, 102-118.