



Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente • N.º 51 • 2024 • ISSN 2422-5703 • <https://revistas.unc.edu.ar/index.php/revista-asagai>
Beninato S., Holzman M.E., Rivas R.E. y Diez J.F.
Profundidad óptica de la vegetación (VOD): revisión de los productos de SMAP y perspectivas para sus aplicaciones agrícolas en el sudeste de la Región Pampeana de Argentina
e021, <https://doi.org/10.59069/24225703e021>

Profundidad óptica de la vegetación (VOD): revisión de los productos de SMAP y perspectivas para sus aplicaciones agrícolas en el sudeste de la Región Pampeana de Argentina

Vegetation optical depth (VOD): review of SMAP products and prospects for agricultural applications in the southeastern Argentine Pampas region

Sabrina Beninato^{1,2*} Mauro Ezequiel Holzman^{3,2}
 Raúl Eduardo Rivas⁴ Jorge Francisco Diez^{1,2}

* Contacto

Recibido: 9 de octubre de 2024 ▪ Aceptado: 21 de noviembre de 2024 ▪ Publicado: 12 de diciembre de 2024

Resumen

Las observaciones de microondas en las frecuencias entre los 1-2 GHz (banda L) son sensibles a la humedad de suelo superficial (SM) y al contenido de agua en la vegetación, el cual puede parametrizarse por medio de la profundidad óptica de la vegetación (VOD). El objetivo de este trabajo es presentar los principios físicos de las mediciones de microondas pasivas y un análisis preliminar sobre las dinámicas hídricas de la vegetación en el sudeste de la Región Pampeana por medio de la observación de las series temporales de VOD y SM de la misión Soil Moisture Active Passive mission (SMAP). Para complementar a estos análisis se incorporaron observaciones del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) y de la temperatura de superficie (LST) obtenidos en campo y derivados de medidas registradas por sensor Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS). Los resultados mostraron que la VOD presenta capacidad para determinar variaciones subsemanales relacionadas al contenido de agua en la vegetación mediante comportamientos acoplados con la SM y la LST bajo condiciones homogéneas de superficie. Durante las temporadas de verano se observaron, particularmente, que los aumentos localizados de LST coincidieron con bajas de VOD. Estas observaciones demostraron el potencial de VOD tanto para el seguimiento de la dinámica hídrica de la vegetación a escala subsemanal como para la detección de eventos puntuales de estrés hídrico.

¹Instituto de Hidrología de Llanuras "Dr. Eduardo J. Usunoff" (IHLLA), Tandil, Argentina

²Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)

³Instituto de Hidrología de Llanuras "Dr. Eduardo J. Usunoff" (IHLLA), Azul, Argentina

⁴Comisión de Investigaciones Científicas de la provincia de Buenos Aires, Tandil Argentina

Artículo publicado en el marco del Dossier Temático "Celebración del 40 aniversario de la creación del Instituto de Hidrología de Llanuras "Dr. Eduardo Jorge Usunoff" (Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas - Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires - Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires).

Palabras clave: condición hídrica de la vegetación, cultivos, déficit hídrico, microondas pasivas, teledetección.

Abstract

Microwave observations at frequencies between 1-2 GHz (L-band) are sensitive to surface soil moisture (SM) and vegetation water content, which can be parameterized by vegetation optical depth (VOD). The aim of this work is to present the physical basis of passive microwave measurements and a preliminary analysis of vegetation water dynamics in the southeastern Pampean Region by observing VOD and SM time series from the Soil Moisture Active Passive mission (SMAP). To complement these analyses, observations of normalized difference vegetation index (NDVI) and land surface temperature (LST) obtained in the field and derived from measurements recorded by Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) sensor were incorporated. The results showed that VOD has the capacity to determine sub-weekly variations related to water content in vegetation through coupled behaviors with SM and LST under homogeneous surface conditions. Localized increases in LST were observed, particularly, to coincide with decreases in VOD during summer seasons. These observations demonstrated the potential of VOD both for monitoring vegetation water dynamics at a sub-weekly scale and detecting punctual water stress events.

Keywords: vegetation water status, crops, water deficit, passive microwaves, remote sensing

INTRODUCCIÓN

La observación de la Tierra por medio microondas pasivas con frecuencias <15 GHz presenta ciertas ventajas con respecto a otras partes del espectro electromagnético como las del óptico-térmico (10^7 - 10^4 GHz). Entre ellas se puede mencionar que las mediciones son independientes de las condiciones atmosféricas debido a su alta transmisividad a la atmósfera, y están altamente relacionadas con las propiedades dieléctricas del medio por el que se propagan. Sin embargo, las mediciones de las microondas pasivas suelen presentar como desventaja que la resolución espacial ronda el orden de los km (~ 30 km). Los radiómetros son los sensores que miden la radiación emitida por la superficie terrestre en estas frecuencias (aproximación de Rayleigh-Jeans), la cual depende de las propiedades dieléctricas y de la temperatura. La intensidad de esa radiación observada se denomina temperatura de brillo (TB) y es definida como el producto entre la temperatura y la emisividad de la superficie (Ulaby et al., 2015). Para el caso de los radiómetros en órbita, la TB observada es una combinación de la radiación de la superficie del suelo atenuada por la vegetación más la de la vegetación (Jackson y Schmugge, 1991). Dicha combinación es determinada a partir de la solución de orden cero de las ecuaciones de transferencia radiativa, en donde se modela al suelo y a la vegetación como una capa homogénea, sin dispersión de acuerdo con el modelo *Tau-Omega*, (Mo et al., 1982).

Existen diferentes algoritmos que a partir del modelo *Tau-Omega* recuperan valores de la constante dieléctrica del suelo, para relacionarla posteriormente con la humedad de suelo (SM), y de otros parámetros biogeofísicos de la superficie como la profundidad óptica de la vegetación (VOD). VOD es un parámetro adimensional que está relacionado a la estructura y al contenido de agua de la vegetación (VWC, kg/m^2), presentando una relación directa con la atenuación que ésta provoca a las TB emitidas por el suelo (Jackson y Schmugge, 1991).

Diferentes estudios a lo largo de las últimas décadas han analizado la dinámica hídrica de la superficie por medio de VOD recuperado de diferentes algoritmos y con radiómetros que operan en diferentes frecuencias (Schmidt et al., 2023). Estos estudios han demostrado el potencial que presenta VOD sobre índices espectrales tradicionalmente utilizados para el seguimiento de la fenología y de la condición hídrica de la vegetación, como el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) (Frappart et al., 2020). Estos estudios abarcan desde los análisis de la variabilidad de la biomasa durante periodos de sequías en bosques tropicales (Konings et al., 2021), hasta seguimientos fenológicos en cultivos, estimación de rendimientos y evaluación de sequías agronómicas (Chaparro et al., 2018; Piles et al. 2017, Afshar et al., 2021). Sin embargo, como VOD es un parámetro de superficie difícil de validar debido a la dependencia que presenta con el contenido de agua en la vegetación, diversos trabajos se han centrado en estudiar qué parámetros afectan a las recuperaciones de VOD, y de qué manera lo hacen. Entre estos factores se puede mencionar a la estructura de la vegetación y a la heterogeneidad de las coberturas de superficie (Chaparro et al., 2018, Seo et al., 2010), a las rugosidades y a la dinámica de la porosidad del suelo durante periodos de sequía (Liu et al., 2010), y a la presencia de agua no permanente en superficie durante eventos de inundación (Bousquet et al., 2021). Por lo tanto, cada análisis de VOD debe realizarse de manera integrada con las condiciones de superficie regionales para evitar interpretaciones espurias (Gao et al., 2018).

Particularmente, las observaciones de las TB en las frecuencias entre los 1-2 GHz (banda L) son relacionadas directamente con la SM superficial (~ 5 cm), y presentan una atenuación lineal con valores de $\text{VWC} < 5 \text{ kg}/\text{m}^2$ (Ulaby et al., 2015). La Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio de Estados Unidos (NASA) lanzó en 2015 la misión Soil Moisture Active Passive (SMAP) con un radiómetro de banda L (1.4 GHz) abordo para medir la TB de la superficie y estimar la SM en los primeros 5 cm de profundidad (O'Neill

et al., 2020). SMAP brinda productos con acceso libre de SM y de otros parámetros biogeofísicos de la superficie, entre éstos la VOD, con resoluciones espaciales de entre 9 y 36 km, y con resoluciones temporales entre 2-3 días. Estudios a escala global han analizado las dinámicas hídricas del sistema suelo-planta por medio de relaciones entre SM y VOD en banda L, determinando las respuestas de la vegetación a la SM y a los cambios en los ecosistemas debido a la actividad antropogénica y el cambio climático (Feldman et al., 2018, Bueso et al., 2023). Feldman et al. (2018), a partir de datos brindados por la misión SMAP, han observado que relaciones negativas entre las diferencias de SM y VOD indican una absorción y almacenamiento de humedad por parte de la vegetación sobre regiones con coberturas de superficie de cultivos y vegetación natural. Sin embargo, estas relaciones dependen de las condiciones iniciales de humedad, porcentaje de arcilla en suelo y coberturas de superficie. A partir de esto, han estimado umbrales de SM según porcentajes de arcillas en suelo para determinar periodos de almacenamiento y pérdida de humedad en la vegetación. Por ejemplo, a partir de $SM < 0,10 \text{ m}^3/\text{m}^3$ en suelos con un 15-30% de arcilla la relación entre las diferencias de SM y VOD se vuelve positiva, indicando una disminución en la absorción de agua y una consecuente pérdida de humedad en la vegetación.

Con respecto a estudios previos sobre Argentina, Beninato et al. (2023) han observado patrones espaciales concordantes entre las medias mensuales de VOD de SMAP, NDVI y el flujo de calor latente obtenidos por los productos MYD13Q1 y MOD16A2 derivados de MODIS sobre el sudeste de la Región Pampeana, demostrando el potencial de VOD para el seguimiento de la vegetación. En este contexto, este trabajo surgió con el fin de profundizar este análisis a mayores resoluciones temporales para contribuir al entendimiento de la dinámica del sistema suelo-planta, siendo los escasos análisis encontrados sobre esta región la principal motivación para llevarlo a cabo. El estudio tiene dos objetivos principales: 1) presentar los fundamentos físicos de las mediciones de los radiómetros y los principales algoritmos de recuperación utilizados por la misión SMAP para obtener datos de la SM y la VOD; y 2) presentar un caso de estudio en el que se analizaron dos productos de la VOD derivados de SMAP, junto con parámetros tradicionalmente utilizados para el seguimiento de la vegetación, con el fin de comprender las dinámicas hídricas en el sudeste de la Región Pampeana. Se utilizaron series temporales diarias de NDVI y de temperatura de superficie (LST) obtenidas de MODIS, además de mediciones de campo de SM, NDVI, LST y precipitaciones, tomadas por una estación de balance de energía durante una campaña de invierno (cebada 2019) y una de verano (soja 2020-2021).

METODOLOGÍA

Algoritmos de recuperación

El modelo *Tau-Omega* describe a la radiación emitida por la superficie terrestre a partir de la solución de orden

cero de las ecuaciones de transferencia radiativa (Mo et al., 1982, Ulaby et al., 2015). Así se representa a la TB como una combinación de la TB emitida por el suelo (TB^{soil}) y por la vegetación (TB^{veg}) (ecuación 1).

$$TB_p = TB_p^{\text{soil}} + TB_p^{\text{veg}} = T_s (1-r_p) \gamma + T_c (1-\omega) \cdot (1-\gamma) \cdot (1+r_p \gamma) \quad (1)$$

El sufijo p representa la polarización de observación de la señal de microondas (horizontal o vertical); ω es el albedo de dispersión simple de la vegetación; γ es la transmisividad de la vegetación; r_p es la reflectividad del suelo rugoso; y T_s y T_c se corresponde a la temperatura de suelo y de la canopia de la vegetación, respectivamente. Los algoritmos que serán descritos a continuación asumen a estas temperaturas iguales cuando la vegetación y la superficie del suelo están en equilibrio térmico, como en las primeras horas de la mañana, y las reemplazan por la temperatura efectiva del suelo (T_{eff}). Esta T_{eff} representa a la temperatura neta emitida por el suelo a distintas profundidades y depende de la frecuencia con la que se la observe (Choudhury et al., 1982).

La transmisividad de la vegetación (γ) cuantifica la atenuación de la TB del suelo cuando la radiación atraviesa una capa de vegetación (ecuación 2). Esta transmisividad está relacionada con la VOD y con el ángulo de medición del sensor (θ).

$$\gamma = \exp(-VOD / \cos(\theta)) \quad (2)$$

γ puede variar entre 0 y 1. Para valores de VOD igual a 0 γ es 1, e indica que la vegetación no atenúa a la señal de microondas, mientras que una γ cercana a 0 indica una alta atenuación por parte de la vegetación debido a un incremento en la VOD. Para este caso de estudio en donde las TB son medidas con sensores que funcionan en banda L, VOD suele asumirse linealmente proporcional al VWC como se muestra en la ecuación 3 (Jackson y Schmugge, 1991),

$$VOD = b \cdot VWC \quad (3)$$

donde b es una constante de proporcionalidad dependiente de la estructura de la vegetación y de la frecuencia de observación (Van De Griend et al., 2004). Para coberturas de superficie de cultivos, la misión SMAP (1,4 GHz) asume un valor de $b = 0,11$ (O'Neill et al., 2020).

En cuanto a la reflectividad del suelo rugoso r_p , se calcula a partir de un coeficiente de rugosidad (h), que parametriza la intensidad de los efectos de la rugosidad y es determinado a partir de la altura cuadrática media de la superficie, y de la reflectividad de una superficie lisa. Esta es modelada a partir de las ecuaciones de Fresnel, que dependen de la constante dieléctrica del suelo, que está sujeta a la humedad y textura del mismo (Ulaby et al., 1982).

La mayoría de los algoritmos de recuperación han sido desarrollados con enfoques muy similares, donde estiman la constante dieléctrica del suelo y demás parámetros geofísicos de la superficie a partir de minimizar la diferencia entre las TB modeladas con la ecuación 1 (TB^{model}) y las TB observadas por los radiómetros (TB^{obs}). Luego, esas constantes dieléctricas son relacionadas con las SM por medio de

diferentes modelos dieléctricos del suelo como el modelo de Mironov (Mironov et al., 2009). Las minimizaciones de las diferencias entre las TB^{model} y TB^{obs} son llevadas a cabo por medio de funciones de costo, las cuales presentan términos de regularización (también llamados de penalización) para evitar que los algoritmos sobre ajusten a los datos y se generen resultados espurios. Las diferencias de estos algoritmos de recuperación surgen en determinados datos auxiliares de entrada que utilizan y en sus métodos de regularización. En este trabajo se analizaron los productos de la VOD y la SM derivados de dos algoritmos de recuperación: el algoritmo de doble canal (DCA) y de doble canal multitemporal (MT-DCA). Ambos utilizan simultáneamente las TB^{model} y TB^{obs} en las polarizaciones horizontales y verticales, y datos auxiliares de entrada similares, como la T_{eff} y la clasificación de cobertura de superficie de MODIS International Geosphere-Biosphere Programme (LCC_IGBP) (Friedl y Sulla-Menashe, 2022). La principal diferencia entre estos algoritmos surge en los métodos de regularización que aplican y los parámetros de entrada que caracterizan a la vegetación (albedo, rugosidad y transmisividad). A continuación, se detallarán los principios básicos de éstos y los datos auxiliares de entrada más relevantes para una posterior comprensión de las discusiones planteadas en este trabajo.

DCA

El algoritmo DCA recupera simultáneamente la SM y la VOD a partir de minimizar la función de costo de la ecuación 4, la cual se basa en el método de Tikhonov (Chaubell et al., 2021).

$$F(sm, VOD) = (TB_V^{obs} - TB_V^{model})^2 + (TB_H^{obs} - TB_H^{model})^2 + \lambda^2 (VOD - VOD^*)^2 \quad (4)$$

El enfoque de regularización de Tikhonov presenta un parámetro de regularización (λ^2) y un término de regularización que contiene como información de entrada un valor inicial de VOD (VOD^* estimado a partir de promedios históricos derivados del NDVI de MODIS y del tipo de cobertura de superficie (O'Neill et al., 2020). Por lo tanto, este enfoque penaliza a que los valores de VOD obtenidos tiendan a los de VOD^* .

DCA requiere además como principales datos de entrada auxiliares a la T_{eff} , la ω y la h . La misión SMAP calcula esta T_{eff} a partir de medias de temperatura de suelo entre 5-15 cm y 15-35 cm derivadas de los modelos Goddard Earth Observing System de la Goddard Modeling and Assimilation Office de la NASA (GMAO GEOS-FP). Mientras que h y w son determinados a partir del producto LCC_IGBP y de textura de suelo (para una información más detallada ver O'Neill et al., 2020).

MT-DCA

MT-DCA utiliza un método de regularización multitemporal y recupera simultáneamente la SM, la VOD y el

ω (Konings et al., 2017). MT-DCA asume que las propiedades dieléctricas de la vegetación varían más lentamente que las del suelo. Por lo que, la VOD puede asumirse constante en dos pasos consecutivos de adquisición de SMAP. Además, MT-DCA supone que ω varía aún más lentamente que VOD por lo que propone recuperarlo junto con la SM y la VOD como se muestra en la ecuación 5.

$$F(sm, sm_2, VOD, \omega) = \sum_{t=1}^M (TB_V^{obs} - TB_V^{model})^2 + (TB_H^{obs} - TB_H^{model})^2 \quad (5)$$

A diferencia del DCA, MT-DCA no requiere valores de VOD^* para penalizar a la función de costo y establece un valor de h constante en todo el globo de 0,13 (Konings et al., 2016; Konings et al., 2017). Como se mencionó, algunos datos auxiliares de entrada en DCA y MT-DCA son similares, como lo es la T_{eff} y el producto LCC_IGBP para la determinación de, por ejemplo, las máscaras de áreas urbanas y zonas con nieve.

Datos satelitales

Para el análisis de este trabajo se utilizaron bases de datos pertenecientes a diferentes misiones satelitales con diferentes resoluciones temporales y espaciales (Tabla 1). Los productos de la SM y la VOD de SMAP (DCA y MT-DCA) presentan una resolución temporal de 2-3 días y espacial de 9 km para las pasadas descendentes (6 a.m.) y ascendentes (6 p.m.). Particularmente para este trabajo, se tomaron las pasadas descendentes, ya que son las utilizadas en MT-DCA. Los productos derivados del algoritmo DCA se descargaron desde la base de datos de NASA's *National Snow and Ice Data Center* (NSIC) (O'Neill et al., 2023), mientras que los derivados del MT-DCA de Feldman et al., 2021.

Como indicadores tradicionales relacionados al verdor de la vegetación y a su condición hídrica se tomaron series con resoluciones temporales diarias de NDVI y LST derivados de MODIS desde la plataforma *Google Earth Engine* (GEE). Las series temporales del NDVI con resolución espacial de 500 m se obtuvieron del producto MCD43A4 versión 6.1 (Schaaf y Wang, 2021). Mientras que las de LST con resolución espacial de 1 km se derivaron del producto MOD11A1 versión 6.1 (Wan et al., 2021). Además, se obtuvieron las series temporales de precipitaciones (PP) derivadas del producto *Climate Hazards Center InfraRed Precipitation with Station data* (CHIRPS), con una resolución temporal diaria y espacial de 5 km (Funk et al., 2015). Estas series se utilizaron para analizar las variaciones de la SM y la VOD de SMAP, y de la LST y el NDVI de MODIS en relación a las entradas de agua al sistema por parte de estas. Previo a su descarga, a las bases de datos de NDVI, de LST y del PP se les realizó un preprocesamiento para llevar sus resoluciones espaciales a una grilla con resolución de 9 km por medio del método de remuestreo bilineal.

Para el análisis de las series temporales sobre las parce-

las en donde se tomaron los datos de campo, se obtuvieron los valores del píxel en donde se encontraban las mismas. Posteriormente, se seleccionaron aquellas fechas y horarios coincidentes satélite-campo, con el fin de visualizar sus comportamientos y calcular las métricas estadísticas tradicionales como el coeficiente de correlación de Pearson (r) y la diferencia cuadrática media (RMSD) (Gruber et al., 2020). Dicho procesamiento fue realizado en el lenguaje de programación *Python*.

Zona de estudio

El análisis de la VOD y demás información satelital se llevó a cabo a lo largo de los partidos de Azul, Tandil y Balcarce, pertenecientes a la provincia de Buenos Aires. Posteriormente, el análisis se centró sobre un área de estudio ubicada al sudeste del partido de Tandil en donde el Instituto de Hidrología de Llanuras “Dr. Eduardo Jorge Usunoff” (IHLLA) realizó el seguimiento de una campaña de cultivo de cebada durante julio-diciembre del año 2019, y de una campaña de cultivo de soja durante diciembre-abril de 2020-2021. En la Tabla 1 se resumen los detalles de los datos de satélite y de campo utilizados en este trabajo.

En la Figura 1 se muestra la clasificación de tipos de cobertura de superficie que presenta la zona de estudio. Esta clasificación deriva del LCC_IGBP que es utilizada por los algoritmos MT-DCA y DCA como dato auxiliar. Para el partido de Balcarce, se establece que un 52% pertenece a sabana con 10-30% de árboles con canopia mayores a 2 m, siendo el resto de las coberturas cultivos y vegetación natural. En el partido de Tandil, un 61% se clasifica como coberturas de cultivos y un 29% como pastizales. Mientras que en Azul, un 84% de la cobertura se corresponde a pastizales. La zona se

caracteriza por tener un clima subhúmedo a húmedo, con una clasificación de Köppen Cfb (C: condiciones templadas cálidas, f: precipitaciones totalmente húmedas, y b: verano cálido) (Kottek et al., 2006). Los suelos típicos son Argiulores con variaciones locales en las composiciones de arcilla fina e ilítica en sus horizontes.

Particularmente la zona ubicada al sudeste del partido de Tandil es apta para la agricultura presentando un horizonte A (0-25 cm) franco a franco-arcilloso con un contenido de arcilla entre el 25-40% que permite el desarrollo más abundante de las raíces (Lopez de Sabando 2021). La media anual de precipitación es de 940 mm, de humedad relativa del 70%, y de temperatura media anual de 14°C, con medias de 7°C y 20°C para las temperaturas mínimas y máximas, respectivamente (SMN, 2021). Aquí, los déficit hídricos son poco frecuentes y se producen principalmente durante los meses de verano. Los cultivos típicos de invierno son cebada y trigo, mientras que los de verano son soja y maíz.

Campañas de cultivos y datos de campo

Las campañas de cebada durante 2019 y soja durante 2020-2021 fueron llevadas a cabo en dos parcelas aledañas (37. 4897° S, 58.9035° O) y para su seguimiento durante todo su ciclo se instaló una estación de balance de energía (EBE). Esta EBE midió la SM a distintas profundidades (5 cm a 50 cm, con intervalos de 10 cm), y variables biofísicas de superficie. En la Tabla 1 se muestran las variables que fueron utilizadas para este estudio.

Particularmente, se observaron las series temporales a la hora de pasada de SMAP (~ 6 a.m.) de SM. Mientras que las series de NDVI fueron observadas al mediodía, con el fin de determinar cuál era el grado de cobertura del cultivo. Se

Tabla 1. Descripción de los datos satelitales y de campo analizados: variables, misiones y sensores de las que provienen, resoluciones y períodos de disponibilidad. Para más detalle sobre los datos de campo ver Faramiñán et al. (2020) y Olivera Rodríguez et al. (2024).

Datos	Variable	unidad	Misión / producto y Sensor	Resolución temporal	Resolución espacial	Período de disponibilidad
satelitales	LST	K	MODIS / MOD11A1 V6.1	diaria	1 km	02/2000 al presente
	NDVI	-	MODIS / MCD43A4 V6.1	diaria	500 m	02/2000 al presente
	SM y VOD	m ³ /m ³ y -	SMAP / DCA y MT-DCA	2-3 días	9 km	DCA: 04/2015 al presente MT-DCA: 04/2015 al 06/2021
	PP	mm	CHIRPS	diaria	5 km	01/1981 al presente
en campo	SM	m ³ /m ³	SoilVUE10	10 min	local	
	PP	mm	TE525MM	10 min	local	20/07/2019 al 05/12/2019
	NDVI	-	SNR-NDVI	10 min	local	05/12/2020 al 30/03/2021
	LST	°C	SI-111	10 min	local	

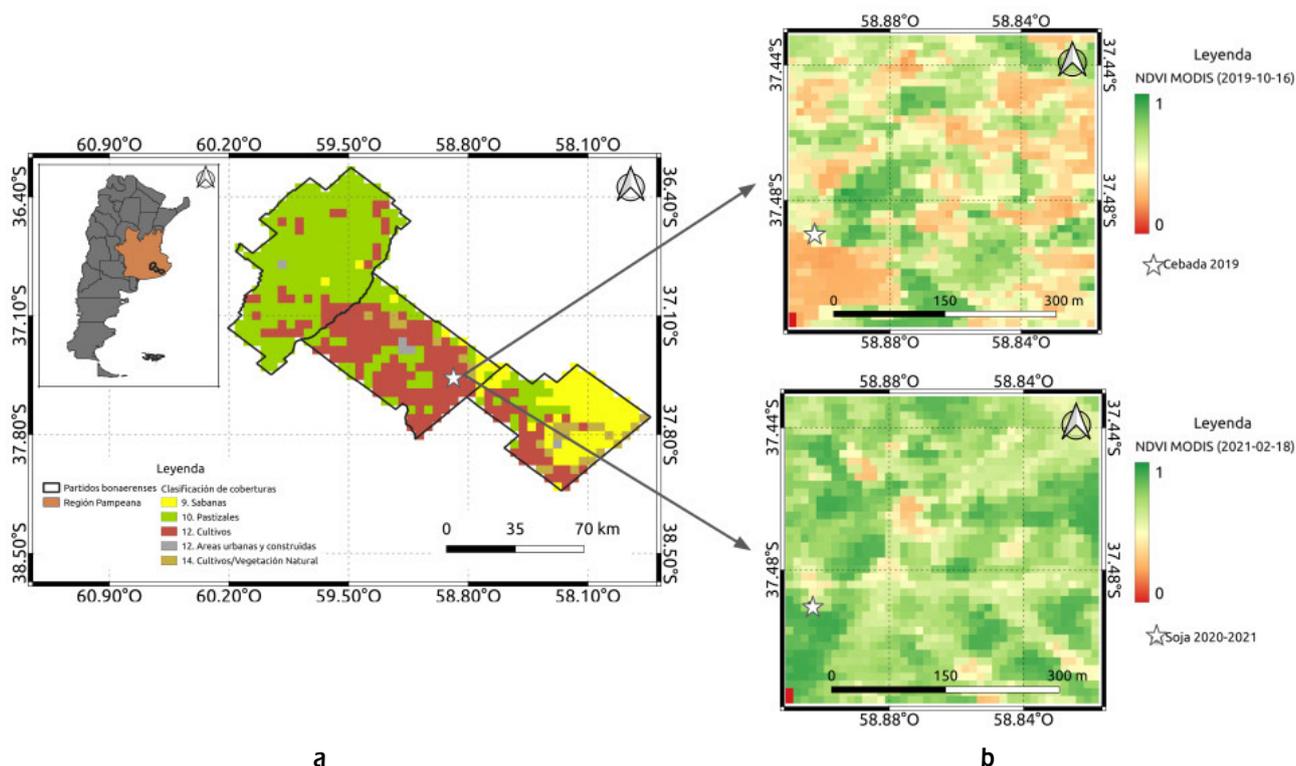


Figura 1. a) Mapa de clasificación de cobertura de superficie de la zona de estudio derivado de LCC_IGBP a una resolución espacial de ~5 km (Friedl et al., 2022). Incluye a los partidos de la provincia de Buenos Aires de Azul (noroeste), Tandil (centro), y Balcarce (sudeste). b) Distribución espacial del NDVI de MODIS a 250 m (NASA EOSDIS, 2023) correspondiente al área que abarca el píxel de SMAP (9km) en donde se encuentran las parcelas cultivadas. Las fechas mostradas corresponden al periodo crítico de cada ciclo de cultivo. La marca en estrella incluida indica la ubicación de las parcelas cultivadas.

consideraron las PP diarias adquiridas por la EBE con el fin de observar las respuestas de la VOD y la SM a estas entradas de agua al sistema, y para contextualizar las condiciones hídricas previas al comienzo de cada campaña. Para esto último se utilizaron además, las PP históricas y mensuales adquiridas en el aeropuerto de la ciudad de Tandil por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) (SMN, 2021).

La Figura 2 muestra las PP mensuales históricas (periodo 1991-2020) y las adquiridas por el SMN junto con las PP mensuales obtenidas por la EBE durante las campañas analizadas. Durante el 2019, las PP anuales fueron similares a las históricas, siendo superiores en un 3%, presentando una distribución del 77% y 23% durante el primer y segundo semestre, respectivamente. En 2020, las PP anuales estuvieron un 23% debajo de las PP históricas; mientras que durante enero-marzo de 2021 las PP fueron similares a las históricas. Estas PP incidieron en las condiciones previas a cada campaña, siendo más húmedas en 2019, reflejándose en las SM subsuperficiales (>10 cm) que serán discutidas en la sección de Resultados y discusiones.

Con el fin de contextualizar y analizar la representatividad de los cultivos analizados a escala de partido, la Tabla 2 muestra los rangos de porcentajes de áreas cultivadas declaradas con cebada durante la temporada 2019 y con soja

durante la temporada 2020-2021. Estos porcentajes fueron obtenidos de los informes del Sistema de Información Simplificado Agrícola (SISA) del Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca de Argentina (SISA 2019, 2020).

Tabla 2. Superficie cultivada declarada (ssd) con cultivos de cebada y soja durante las temporadas 2019 y 2020-2021 (fuente: SISA)

Partido	Cebada 2019	Soja 2020-2021
	ssd (%)	ssd (%)
Tandil	5,4 – 9,5	15,8 – 30,8
Azul	1,6 – 4,0	4,3 – 11,8
Balcarce	2,6 – 6,5	6,9 – 18,9

RESULTADOS Y DISCUSIONES

La Figura 3 muestra las relaciones espacio temporales entre los valores de la VOD recuperados de MT-DCA y DCA en el periodo abril 2015-2021. En rasgos generales se observó que ambos algoritmos recuperan valores similares de la

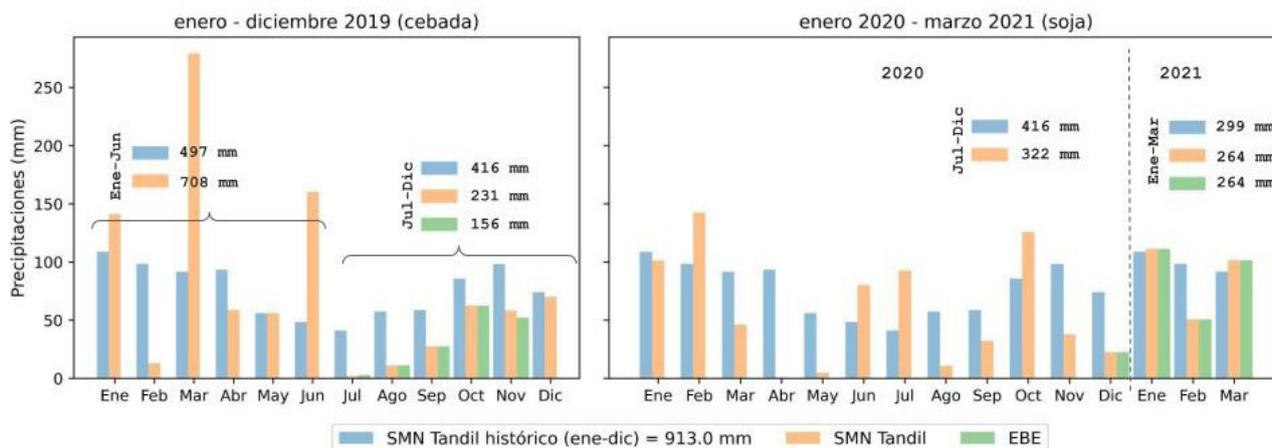


Figura 2. Precipitaciones históricas y para el año 2019, 2020 y hasta abril 2021 obtenidas del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) en Tandil, junto con las precipitaciones medidas por la estación de balance de energía (EBE) durante las campañas de cebada 2019 y soja 2020-2021.

VOD, así como también su variabilidad. En los tres partidos (Figura 3a), los algoritmos presentaron una correlación (r) moderada a alta con valores entre 0,63 y 0,95, y valores de RMSD entre 0,02 y 0,06. Las distribuciones espaciales de r y RMSD presentaron un patrón similar al de la clasificación de cobertura de superficie mostrada en la Figura 1. Esto es, zonas establecidas como cultivos tendieron a presentar un mayor valor de r y un menor RMSD, como en el partido de Tandil y en el sudoeste del partido de Azul ($r > 0,85$ y $\text{RMSD} < 0,04$). Mientras que los valores de r y RMSD entre la VOD DCA y MT-DCA disminuyeron y aumentaron respectivamente hacia aquellas zonas con coberturas de pastizales y presencia de árboles. Particularmente en el partido de Balcarce, en donde las coberturas presentan una mayor heterogeneidad, los valores de r fueron menores y los más frecuentes se distribuyeron entre 0,63 y 0,85, mientras que los RMSD llegaron a sus valores máximos alrededor de 0,06. Según Chaparro et al. (2022), aproximadamente el 70% de estas diferencias podrían explicarse por las diferencias del parámetro de rugosidad h que utilizan como dato auxiliar de entrada ambos algoritmos de recuperación.

Para comprender cómo se distribuyeron los valores de la VOD DCA y MT-DCA en los tres partidos, la Figura 3b muestra las dispersiones entre ambos algoritmos y sus respectivos diagramas de caja. En rasgos generales se observó que ambos algoritmos recuperan valores de la VOD con distribuciones normales. La DCA presentó una mayor variabilidad con respecto a los valores de la VOD recuperados por MT-DCA, a excepción del partido de Tandil en donde un 63% de su superficie se corresponde a superficie con cultivos. Particularmente, los valores de la VOD DCA $> 0,25$ presentaron una mayor variabilidad debido a que la propagación de errores que se produce en el algoritmo es mayor que en el de MT-DCA (Feldman et al., 2018). Por último, se observó que MT-DCA recupera valores atípicos tanto altos como bajos.

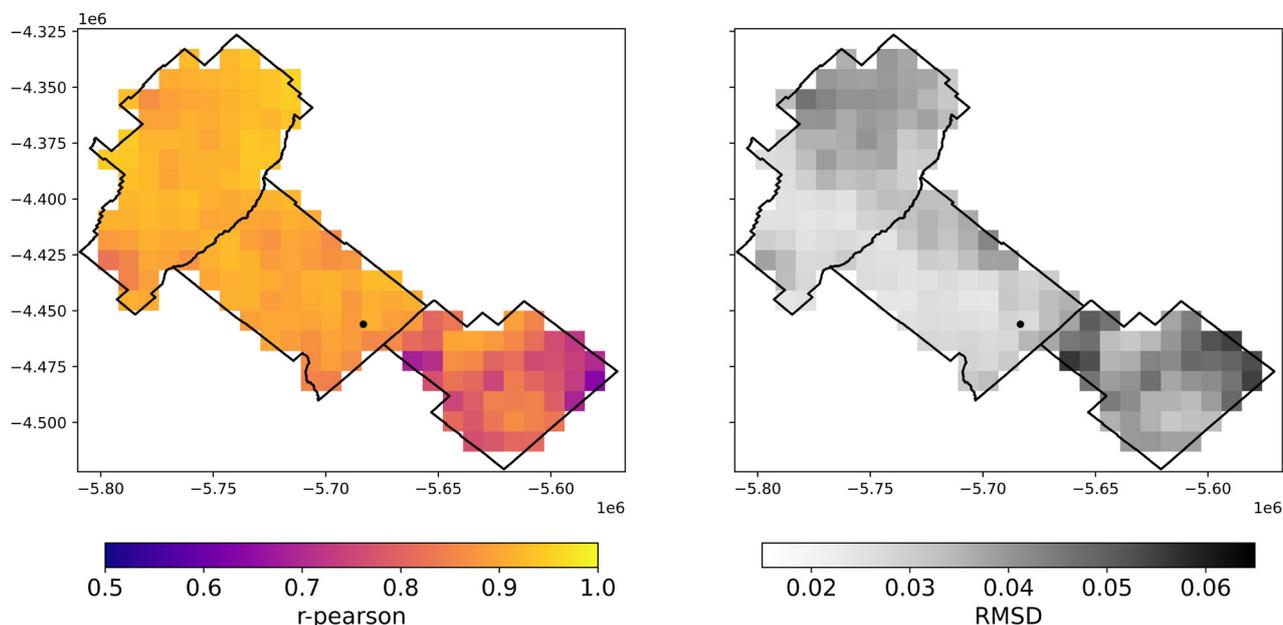
La Figura 4 muestra las series temporales de la VOD y la SM de SMAP, y las series diarias de la LST y del NDVI de-

rivado de MODIS, y del PP de CHIRPS entre abril de 2015 y abril de 2021 sobre el píxel en donde se llevaron a cabo los seguimientos de cultivo de cebada 2019 y soja 2020-2021. Las series de la VOD (DCA y MT-DCA) y de la LST presentaron variaciones estacionales, siendo más evidentes en esta última, con mínimos en invierno y máximos en verano. Las series de la VOD DCA y MT-DCA presentaron diferencias mínimas entre sí, siendo concordante con los análisis espacio temporales mostrados en la Figura 3.

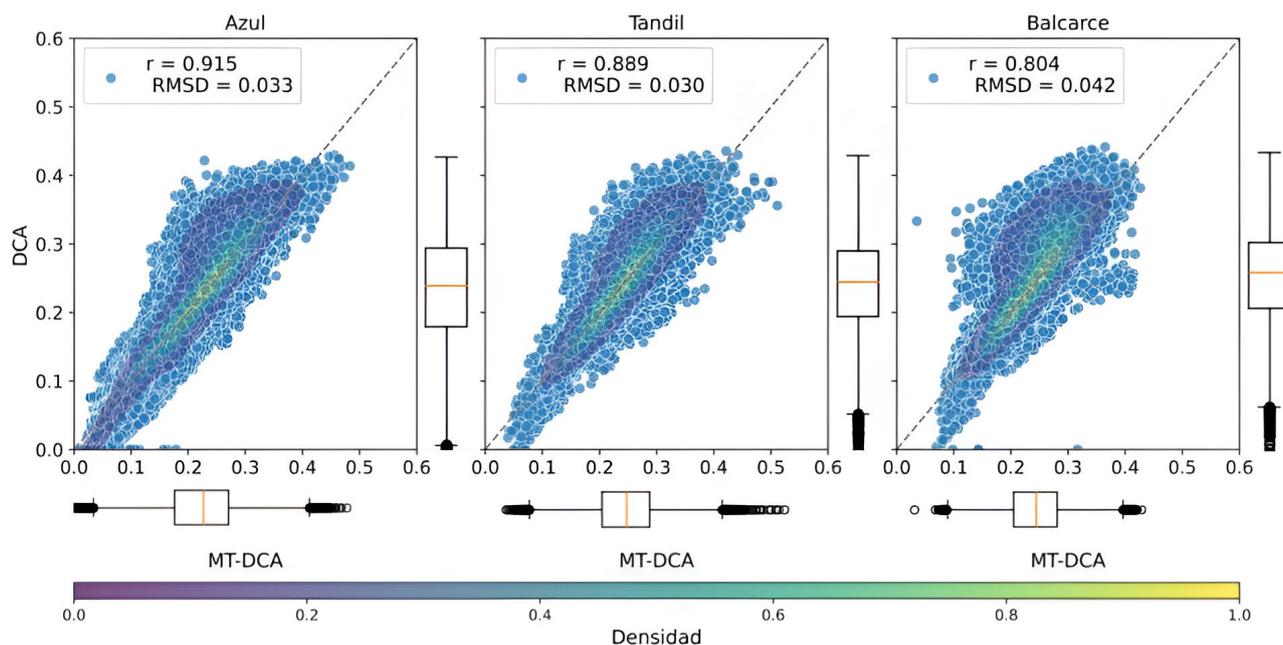
Las variaciones entre máximos y mínimos de la VOD (Figura 4) presentaron una estacionalidad como las series de NDVI, aunque fue más evidente en este último indicador relacionado al vigor de la vegetación. Estas variaciones estacionales de la VOD y el NDVI se asociaron a los ciclos fenológicos de los cultivos de la región y a los cambios de cobertura debido a la cosecha-siembra entre las campañas de cultivos de invierno y de verano. Los valores máximos coinciden con los periodos críticos de los cultivos de verano (febrero-marzo) y los máximos relativos con los de las campañas de invierno (octubre). Mientras que los valores mínimos se encontraron entre los meses de mayo-agosto y diciembre. Se observó que los valores máximos de la VOD se aproximaron a un valor de 0,40 durante las campañas de verano sin evidenciar diferencias significativas entre sus valores a excepción del periodo enero-marzo 2017, en donde la VOD presentó un valor medio de 0,32. Por otro lado, los valores de NDVI mostraron diferencias entre sus valores máximos durante los mismos periodos.

La SM superficial capaz de ser observada por SMAP tiene una sustancial variabilidad temporal asociada a los procesos evaporativos de la atmósfera. Sin embargo, se observaron variaciones generalizadas con una tendencia estacional inversa a las observadas en las series de la VOD y la LST. Los aumentos hacia los meses invernales fueron asociados a la baja demanda evaporativa de la atmósfera y a la senescencia de la vegetación. Los descensos hacia los meses de verano fueron asociados principalmente a una mayor demanda

VOD MTDCA vs DCA (abril 2015-2021)



a



b

Figura 3. Relaciones entre los valores de VOD DCA y MT-DCA entre abril 2015 y abril 2021: a) distribución espacial de r-pearson y RMSD, y b) dispersión espaciotemporal y las métricas r-pearson (r) y RMSD para cada uno de los partidos de la zona de estudio.

evaporativa (reflejada además en aumentos de la LST) y a la actividad de la vegetación. A partir de estos análisis acoplados entre las series de la VOD y la SM se observaron las dinámicas naturales del sistema suelo-planta relacionadas al consumo de agua disponible por parte de los cultivos, en donde aumentos generalizados de la VOD coincidieron con disminuciones generalizadas de la SM. En particular estos acoplamientos fueron más evidentes entre los meses enero

y marzo, los cuales se corresponden a los ciclos de los cultivos de verano, como lo es el de soja (Feldman et al., 2018, Feldman et al., 2022).

Particularmente, durante el periodo enero-marzo 2017 los valores de NDVI presentaron máximos superiores a 0,7, mientras que los máximos de VOD no superaron un valor de 0,32. Durante este mismo periodo los valores de LST obser-

La Alcira (-58.903449,-37.489685)

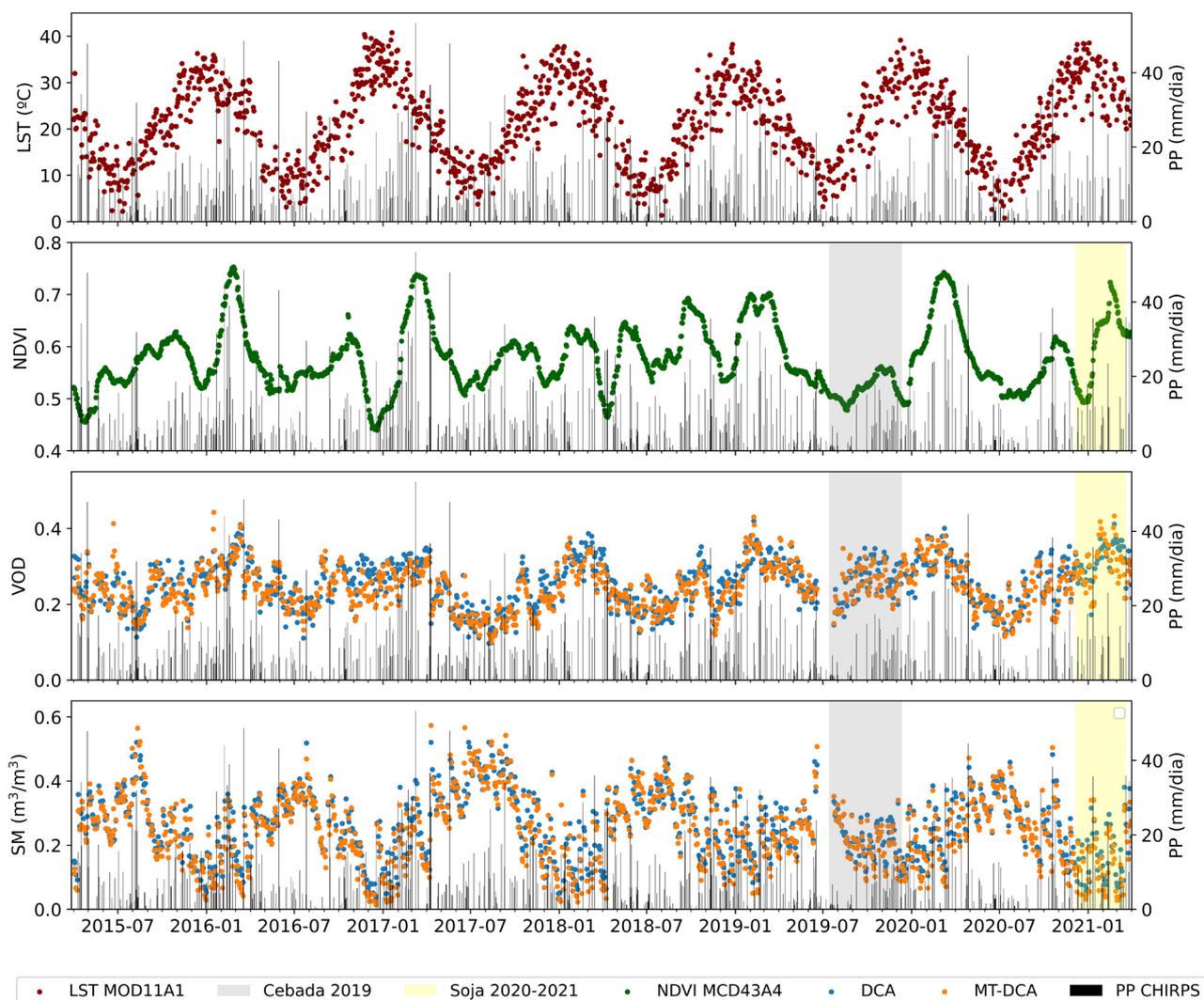


Figura 4. Series temporales entre abril 2015 y abril 2021 de la LST y del NDVI derivado de MODIS, la VOD y la SM (DCA y MT-DCA) de SMAP junto con las PP de CHIRPS sobre el píxel en donde se encontraron los cultivos estudiados. Las barras de colores indican los periodos de las campañas de cebada 2019 (gris) y soja 2020-2021 (amarillo).

vados se encontraron por encima de la media, coincidiendo con las anomalías positivas de temperaturas ($\sim +5^{\circ}\text{C}$) y con las olas de calor registradas durante el mes de febrero de 2017 (SMN, 2017). Esta respuesta conjunta con la LST y diferenciada con el NDVI sugiere la sensibilidad de la VOD a la condición hídrica de los cultivos con relación a la demanda evaporativa de la atmósfera.

Finalmente, se analizaron las series temporales de la VOD y la SM junto con los datos de campo medidos por la EBE de SM a 5 cm y una media entre los 10-30 cm de profundidad, las PP y las LST durante los ciclos de cebada 2019 y soja 2020-21 (Figura 5). Como se mencionó anteriormente, los algoritmos de recuperación estiman de manera conjunta SM y VOD, por lo que como primera instancia se evaluaron las variaciones entre las SM de SMAP y las medidas en campo. Las series de SM de SMAP tendieron a sobreestimar a las series de SM a 5 cm de campo en ambas campañas de culti-

vos analizadas. Para la campaña de cebada 2020 se observó un sesgo húmedo de $\sim 0,17 \text{ m}^3/\text{m}^3$ en las SM recuperadas por DCA y MT-DCA. Mientras que para la campaña de soja 2020-2021 se observaron sesgos húmedos de $\sim 0,06 \text{ m}^3/\text{m}^3$ y $\sim 0,03 \text{ m}^3/\text{m}^3$ para DCA y MT-DCA, respectivamente. Al comparar las series de SM de SMAP con las series de SM entre los 10-30 cm de campo, se observó un sesgo seco de $\sim 0,08 \text{ m}^3/\text{m}^3$ para DCA y MT-DCA durante la campaña de cebada 2019. Mientras que durante la campaña de soja 2020-2021 se observó un sesgo húmedo de $\sim 0,030 \text{ m}^3/\text{m}^3$ para las SM recuperadas por DCA y $\sim 0,002 \text{ m}^3/\text{m}^3$ para las SM MT-DCA. Estos comportamientos fueron similares a los observados en otras zonas a lo largo de la Región Pampeana (Degano et al., 2024), y en parte pueden explicarse a partir de la física de la emisión de las TB en donde la profundidad de emisión aumenta a medida que la humedad superficial disminuye (Choudhury et al., 1982). Las variaciones de SM de SMAP fueron consistentes con las observadas en campo, así como también sus respues-

tas a las PP. Estos comportamientos dan indicios de que las mediciones de las TB con resoluciones espaciales en el orden de los km presentan sensibilidad a las dinámicas naturales de la superficie.

Las series de VOD DCA y MT-DCA (Figura 5) durante el periodo de la campaña de cebada 2019 mostraron mayores variaciones subsemanales que durante la campaña de soja 2020-2021. Parte de estas variaciones son explicadas desde la heterogeneidad de cobertura de superficie en esta zona de estudio, la cual suele ser mayor durante las campañas de cultivos de invierno debido a la presencia de suelo desnudo y/o en barbecho. Por otro lado, durante el verano las coberturas tienden a una mayor homogeneidad tanto por superficie vegetada como por tipo de cultivo (Tabla 2, Figura 1) (Beninato et al., 2023). Esto explicaría los cambios más armónicos de la serie de VOD en soja, en comparación con la de cebada. Parte de esta discusión también fue analizada por medio del cálculo de la media de VOD durante los periodos críticos de los cultivos, determinando que la extinción que provocó la vegetación a la TB emitida por el suelo fue de alrededor un 30% y 36% para la campaña de invierno y verano, respectivamente. En relación con las diferencias observadas entre VOD DCA y MT-DCA, debe destacarse que estas no fueron significativas. Sin embargo, durante la etapa final del período crítico de la campaña de soja 2020-2021 las variaciones de

VOD MT-DCA fueron más evidentes que las de VOD DCA. Estas diferencias podrían explicarse desde las restricciones que presenta DCA al utilizar un valor inicial de VOD* calculado a partir de un NDVI histórico (Feldman et al., 2022).

A lo largo de los ciclos de los cultivos de ambas campañas se observaron los comportamientos acoplados entre SM y VOD durante los periodos de desecamiento de SM (marcadores negros, Figura 5). Estos periodos fueron establecidos a partir cuatro observaciones consecutivas de SM (DCA y MT-DCA) decreciente, representando aproximadamente 12 días de desecamiento (Feldman et al., 2018). Al enfocarse en los puntos de desecamiento ocurridos en días previos, durante y posteriores a los periodos críticos de los cultivos, las disminuciones generalizadas de SM de SMAP, así también como de SM a 5 cm y 10-30 cm de la EBE, se correspondieron con aumentos generalizados en VOD. Sin embargo, estas relaciones fueron más evidentes durante la campaña de soja 2020-2021. Particularmente a comienzos y finales del periodo crítico de esta campaña se observaron disminuciones de VOD junto con disminuciones de SM, coincidiendo con periodos de escasas PP y SM que llegaron a valores cercanos a 0,1 m³/m³. Esto es consistente con los resultados encontrados en Feldman et al. (2018), que determinaron umbrales de SM a partir de los cuales las relaciones VOD-SM se invertían, indicando disminuciones en el contenido de agua de vegetación.

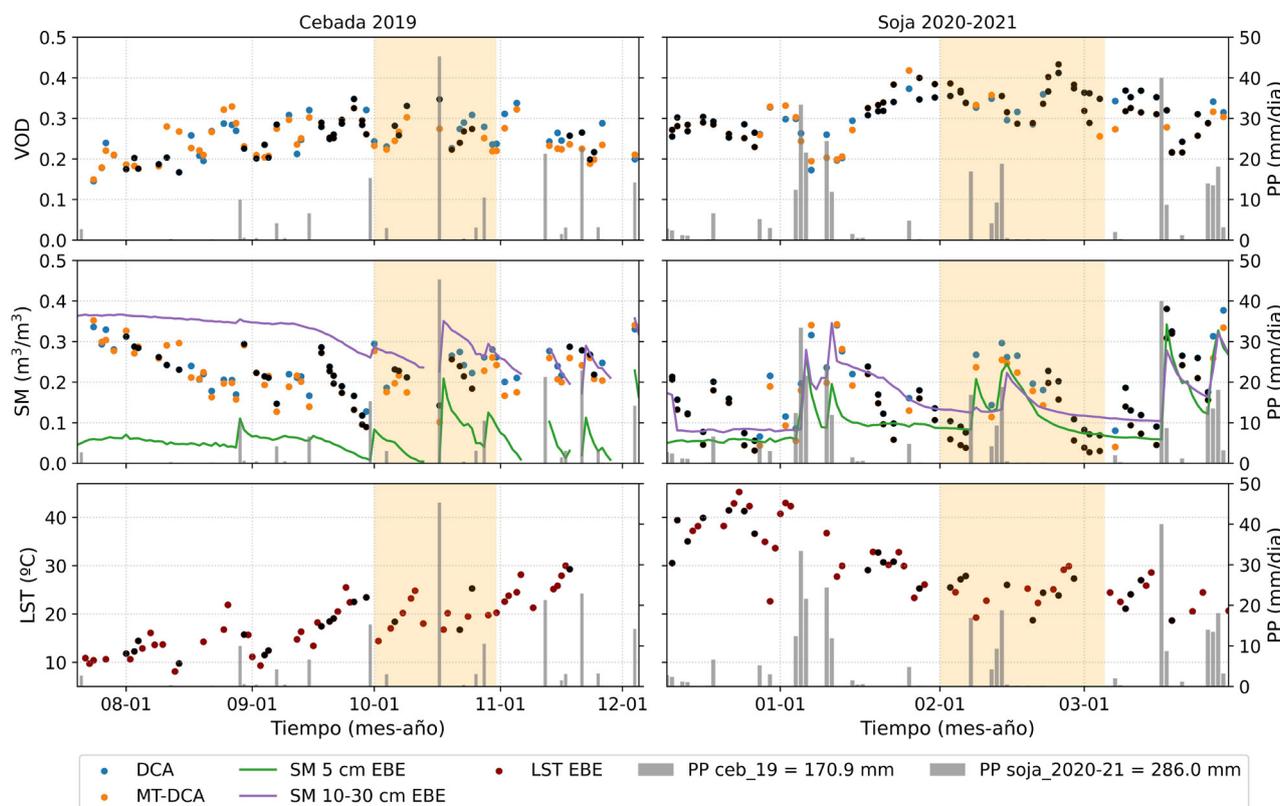


Figura 5: Series temporales de la VOD y la SM (DCA y MT-DCA) de SMAP, SM a 5 cm de profundidad, la LST y las PP medidas en campo por la EBE durante los ciclos de cultivos de cebada 2019 y soja 2020-2021. Las barras de color naranja indican los periodos críticos de los cultivos y los puntos negros destacan aquellas mediciones durante los desecamientos de suelo ($SM < SM_i$)

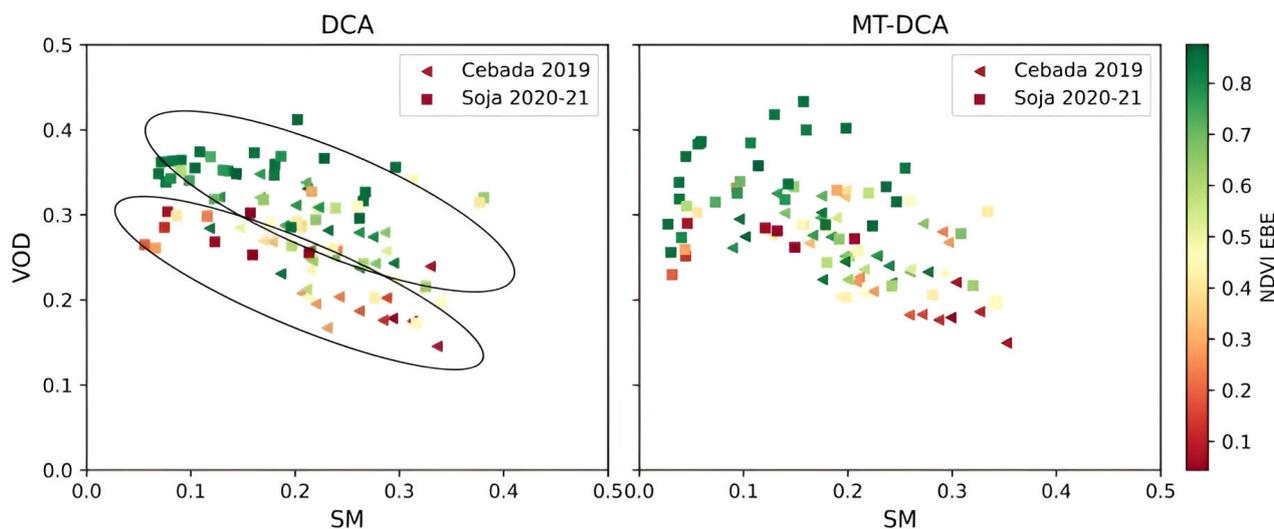


Figura 6. Dispersiones de las series temporales de las campañas cebada 2019 (triángulo) y soja 2020-21 (cuadrado) de la VOD y la SM SMAP DCA (izquierda) y MT-DCA (derecha). Además se indica el valor de NDVI medido por la EBE para cada punto dentro de la dispersión.

Este comportamiento demuestra el potencial que presentan las observaciones de las diferencias entre SM y VOD para detectar las dinámicas hídricas en superficies con coberturas homogéneas.

Como se observó en la Figura 4, la LST medida en campo (Figura 5) también presentó una influencia estacional con tendencias positivas hacia los meses de verano durante la campaña cebada 2019, y negativas hacia los meses de otoño durante la campaña de soja 2020-2021. Los comportamientos acoplados entre VOD y LST fueron más evidentes durante la campaña de soja 2020-2021. Los aumentos de VOD observados días previos al periodo crítico de la campaña de soja coincidieron con una disminución de LST. Otro comportamiento evidente se observó hacia final de este mismo periodo con un aumento de la LST y una disminución de VOD. Estas variabilidades en conjunto sugieren la sensibilidad que presentan tanto VOD como LST a las resistencias estomáticas de la vegetación asociadas a la regulación de la transpiración. Con respecto a los tiempos de respuesta entre VOD y LST, no se pudieron analizar debido a que las resoluciones temporales fueron discordantes dado que la medida de la LST está limitada a la cobertura de nubes.

Finalmente, en la Figura 6 se muestran las dispersiones de la VOD y SM (DCA y MT-DCA) de SMAP correspondientes a las series temporales de la Figura 5. Además se muestran los valores de NDVI (EBE) con el fin de poder orientar la interpretación a la etapa fenológica en la que se encontraba el cultivo y evitar hacer lecturas espurias de la dispersión en aquellas etapas en que, en general, los cultivos de la zona se encuentran emergiendo o en senescencia ($NDVI < 0,5$). A partir de la Figura 6 se observaron relaciones negativas entre VOD y $SM > 0,1 \text{ m}^3/\text{m}^3$ para ambas campañas de cultivo, reforzando las observaciones ya discutidas anteriormente con respecto a la dinámica suelo-planta. Sin embargo, de esta correlación se debe destacar el agrupamiento que presentaron los valo-

res de VOD DCA con respecto al NDVI. Los valores de VOD DCA tendieron a presentar mayores valores para $NDVI > 0,5$ en comparación a aquellos valores correspondientes a un $NDVI < 0,5$ (contornos negros, Figura 6), mientras que en los valores de VOD MT-DCA no se observó de manera evidente esta agrupación. Esta observación ratifica, nuevamente, que la influencia del NDVI para el cálculo de VOD DCA debe ser analizada para determinar si el grado de las variaciones observadas son consecuencia de este dato auxiliar de entrada o de un cambio en la condición hídrica de la vegetación.

CONCLUSIONES

Este trabajo tuvo como objetivos principales presentar los principios físicos de las mediciones de microondas pasivas y los productos derivados de VOD y SM (DCA y MT-DCA) de la misión SMAP. Además, analizar estos productos sobre el sudeste de la Región Pampeana de Argentina con el fin de aportar al entendimiento de la dinámica de la humedad en el sistema suelo-planta. En primera instancia se evaluaron las distribuciones espaciales entre la VOD DCA y MT-DCA, observando que ambos algoritmos recuperan valores similares, así como también su variabilidad. Particularmente se observaron mayores similitudes entre VOD DCA y MT-DCA en las zonas con coberturas clasificadas como cultivos por el producto LCC-IGBP.

Posteriormente, el análisis se enfocó sobre un área de estudio con cobertura de superficie correspondiente a cultivos en el sudeste del partido de Tandil (provincia de Buenos Aires, Argentina), sobre áreas de referencia. A partir de la serie temporal entre abril 2015 y abril 2021, se observó que la VOD (DCA y MT-DCA) presenta una variabilidad relacionada a la fenología de la vegetación. Los comportamientos acoplados entre la VOD y la SM permitieron observar las dinámicas de la humedad en el sistema suelo-planta. En este sentido,

se observaron valores menores de la VOD correspondientes con mayores de SM durante las temporadas de otoño-invierno consecuencia de la senescencia de la vegetación y a la menor demanda evaporativa de la atmósfera. A su vez, durante las temporadas de primavera-verano, se observaron aumentos en los valores de VOD y descensos en SM debido a la mayor demanda evaporativa de la atmósfera y a los ciclos de la vegetación.

Finalmente, los análisis durante los periodos correspondientes a una campaña de cultivo de invierno (cebada, agosto-diciembre 2019) y una de verano (soja, diciembre-marzo 2020-2021) en sitios de referencia con medidas in situ permitieron observar las dinámicas de la VOD a escala subsemanal. Durante el periodo de soja 2020-2021 se observaron menores variaciones subsemanales de VOD consecuencia de la mayor homogeneidad que presentan las superficies en cuanto a coberturas y tipo de cultivo. Al analizar en conjunto las variaciones de la VOD con la SM y la LST medidas en campo, se observó que la VOD es capaz de determinar periodos de almacenamiento de agua en la vegetación durante periodos de desecamiento de SM. De manera más evidente en la campaña de verano, se observó que pérdidas de humedad en vegetación, representadas por disminuciones de la VOD, coincidieron con aumentos en la LST y periodos de disminución de la SM por debajo del umbral establecido por Feldman et al., 2018.

Estos análisis preliminares, en complemento con información óptica y térmica, mostraron la sensibilidad de la VOD a la condición hídrica de la vegetación y su respuesta a eventos puntuales de déficit hídricos en el sudeste de la Región Pampeana. Teniendo presente las limitaciones de las resoluciones espaciales, este estudio demostró la aptitud que tiene la VOD para el seguimiento de la disponibilidad de agua en el sistema suelo-planta a escalas regionales y su importancia de aplicación en contextos de variabilidades climáticas que

implican condicionantes para la condición hídrica y sistemas productivos de secano. Sin embargo, estos análisis se deben profundizar con más casos de estudio, bajo condiciones de superficie (tanto en cobertura como en tipos de cultivos) y climáticas diferentes para evaluar de forma integrada las dinámicas de la VOD, sus errores y los parámetros que afectan a su recuperación.

AGRADECIMIENTOS/FINANCIAMIENTO

Este estudio contó con el apoyo del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) y del Instituto de Hidrología de Llanuras «Eduardo J. Usunoff» (IHLLA). Parte de los instrumentos de datos de campo fueron proporcionados por los proyectos FONARSEC n°19 y PICT-2019-04425.

CONTRIBUCIÓN DE AUTORÍA

Todos los autores contribuyeron a la concepción y al análisis del trabajo. El procesamiento de los datos fue realizado por Sabrina Beninato. El análisis y discusión de los mismos fueron realizados por Sabrina Beninato, Mauro Ezequiel Holzman, Raúl Eduardo Rivas y Jorge Francisco Diez. El primer borrador del manuscrito fue escrito por Sabrina Beninato y todos los autores comentaron las versiones anteriores del manuscrito. Todos los autores leyeron y aprobaron el manuscrito final.

DECLARACIÓN DE CONFLICTOS DE INTERESES

Los autores declaran que no existe algún conflicto de interés

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Afshar, M. H., Al-Yaari, A., & Yilmaz, M. T. (2021). Comparative evaluation of microwave L-band VOD and optical NDVI for agriculture drought detection over central Europe. *Remote Sensing*, 13(7). <https://doi.org/10.3390/rs13071251>
- Beninato, S., Holzman, M., Taveira, G., y Rivas, R. (2023). Crop monitoring with L-Band Vegetation Optical Depth (VOD): Investigation in southeastern of Argentine Pampas. In *2023 XX Workshop on Information Processing and Control (RPIC)* (pp. 1-4). IEEE. <https://doi.org/10.1109/RPIC59053.2023.10530700>
- Bousquet, E., Mialon, A., Rodriguez-Fernandez, N., Prigent, C., Wagner, F. H., Kerr, Y. H., y Wag-, F. H. (2021). *Influence of surface water variations on VOD and biomass estimates from passive microwave sensors*. 257, 34–4257. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112345>
- Bueso, D., Piles, M., Ciaís, P., Wigneron, J.-P., Moreno-Martínez, Á., y Camps-Valls, G. (2023). Soil and vegetation water content identify the main terrestrial ecosystem changes. *National Science Review*, 10(5), nwad026. <https://doi.org/10.1093/nsr/nwad026>

- Chaparro, D., Feldman, A., Chaubell, J., Yueh, S., & Entekhabi, D. (2022). Robustness of vegetation optical depth retrievals based on L-band global radiometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, PP(1), 1-1. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2022.3201581>
- Chaparro, D., Piles, M., Vall-Ilossera, M., Camps, A., Konings, A. G., & Entekhabi, D. (2018). L-band vegetation optical depth seasonal metrics for crop yield assessment. *Remote Sensing of Environment*, 212, 249–259. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.04.049>
- Chaubell, J., Yueh, S., Chan, S., Dunbar, S., Colliander, A., Entekhabi, D., Chen, F., Bindlish, R., y O'Neill, P. (2021). Implementation and analysis of the dual-channel algorithm for the retrieval of soil moisture and vegetation optical depth for SMAP. In *2021 International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)* (pp. 6104–6107). <https://doi.org/10.1109/IGARSS47720.2021.9553883>
- Choudhury, B., Schmugge, T., y Mo, T. (1982). A parameterization of effective soil temperature for microwave emission. *Journal of Geophysical Research*, 87, 1301-1304.
- Degano, M.F, Beninato, S., Holzman M.E., Bayala, M., Rivas R.E y Massari, C. (2024). *Soil Moisture: analysis of SMAP satellite products in plain zones*. In IEEE Biennial Congress of Argentina (ARGENCON), San Nicolás de los Arroyos, Argentina, pp. 1-8. [10.1109/ARGENCON62399.2024.10735898](https://doi.org/10.1109/ARGENCON62399.2024.10735898).
- Faramiñán, A., Carmona, F., Rivas, R., Silicani, M., Olivera Rodriguez, P., & Degano, M. F. (2020, noviembre). Estación móvil de balance de energía para el monitoreo integral de cultivos: Caso de estudio en cebada. *XVIII Reunión Argentina y IX Latinoamericana de Agrometeorología*, Paraná, Entre Ríos.
- Feldman, A., Chaparro, D., & Entekhabi, D. (2021). Error propagation in microwave soil moisture and vegetation optical depth retrievals. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 14, 11311–11323. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2021.3124857>
- Feldman, A. F., Chaparro, D., & Entekhabi, D. (2022). Quantifying and reducing uncertainty in microwave vegetation optical depth and soil moisture retrievals. In *2022 International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)* (pp. 5586–5589). <https://doi.org/10.1109/IGARSS46834.2022.9883833>
- Feldman, A.F., Short Gianotti, D.J., Konings, A.G. et al. (2018). Moisture pulse-reserve in the soil-plant continuum observed across biomes. *Nature Plants* 4, 1026–1033. <https://doi.org/10.1038/s41477-018-0304-9>
- Frappart, F., Wigneron, J. P., Li, X., Liu, X., Al-Yaari, A., Fan, L., Wang, M., Moisy, C., le Masson, E., Lafkih, Z. A., Vallé, C., Ygorra, B., y Baghdadi, N. (2020). Global monitoring of the vegetation dynamics from the vegetation optical depth (VOD): A review. In *Remote Sensing* (Vol. 12, Issue 18). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/RS12182915>
- Friedl, M., y Sulla-Menashe, D. (2022). MODIS/Terra+Aqua Land Cover Type Yearly L3 Global 0.05Deg CMG V061 [Data set]. NASA EOSDIS Land Processes Distributed Active Archive Center. Accessed 2024-09-16 from <https://doi.org/10.5067/MODIS/MCD12C1.061>
- Funk, Chris, Pete Peterson, Martin Landsfeld, Diego Pedreros, James Verdin, Shraddhanand Shukla, Gregory Husak, James Rowland, Laura Harrison, Andrew Hoell & Joel Michaelsen (2015). The climate hazards infrared precipitation with stations-a new environmental record for monitoring extremes. *Scientific Data* 2, 150066. <https://doi.org/10.1038/sdata.2015.66>
- Gao, Y., Bindlish, R., & Jackson, T. (2018). Evaluation of the Tau–Omega model for passive microwave soil moisture retrieval using SMAPEX datasets. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 11(3), 888-895. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2018.2796546>
- Gruber, A., De Lannoy, G., Albergel, C., et al. (2020). Validation practices for satellite soil moisture retrievals: What are (the) errors? *Remote Sensing of Environment*, 244, 111806. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111806>
- Jackson, T. J., y Schmugge, T. J. (1991). Vegetation effects on the microwave emission of soils. *Remote Sensing of Environment*, 36(3), 203-212. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(91\)90057-D](https://doi.org/10.1016/0034-4257(91)90057-D)
- Konings, A. G., Piles, M., Rötzer, K., McColl, K. A., Chan, S. K., & Entekhabi, D. (2016). Vegetation optical depth and scattering albedo retrieval using time series of dual-polarized L-band radiometer observations. *Remote Sensing of Environment*, 172, 178–189. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.11.009>
- Konings, A. G., Piles, M., Das, N., & Entekhabi, D. (2017). L-band vegetation optical depth and effective scattering albedo estimation from SMAP. *Remote Sensing of Environment*, 198, 460–470. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.037>
- Konings, A. G., Holtzman, N. M., Rao, K., Xu, L., y Saatchi, S. S. (2021). Interannual Variations of Vegetation Optical Depth are

- Due to Both Water Stress and Biomass Changes. *Geophysical Research Letters*, 48(16). <https://doi.org/10.1029/2021GL095267>
- Kottek, M., Grieser, J., Beck, C., Rudolf, B., & Rubel, F. (2006). World map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorologische Zeitschrift*, 15, 259–263. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2006/0130>
- Liu, Y. Y., Evans, J. P., McCabe, M. F., de Jeu, R. A. M., van Dijk, A. I. J. M., y Su, H. (2010). Influence of cracking clays on satellite-estimated and model-simulated soil moisture. *Hydrology and Earth System Sciences*, 14, 979–990. <https://doi.org/10.5194/hess-14-979-2010>
- López de Sabando, M. (2021). *Suelos de Mar y Sierras: Partido de Tandil*. Buenos Aires: Ediciones INTA, Agencia de Extensión Rural Tandil. ISBN 978-987-8333-89-2 (digital).
- Mironov, V. L., Kosolapova, L. G., y Fomin, S. V. (2009). Physically and mineralogically based spectroscopic dielectric model for moist soils. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 47(7), 2059–2070.
- Mo, T., Choudhury, B. J., Schmugge, T. J., Wang, J. R., y Jackson, T. J. (1982). A model for microwave emission from vegetation-covered fields. *Journal of Geophysical Research*, 87, 11229–11237.
- NASA EOSDIS Land Processes DAAC. (2023). MOD13Q1.061 Terra Vegetation Indices 16-Day Global 250m. NASA EOSDIS Land Processes DAAC. doi: <https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD13Q1.061>
- Olivera Rodríguez P., Holzman M.E., Aldaya M.M., Rivas R.E. (2024). Water footprint in rainfed summer and winter crops: The role of soil moisture. *Agricultural Water Management* 296:108787, <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2024.108787>
- O'Neill, P. E., Chan, S., Njoku, E. G., Jackson, T., Bindlish, R., Chaubell, J., y Colliander, A. (2023). SMAP Enhanced L3 Radiometer Global and Polar Grid Daily 9 km EASE-Grid Soil Moisture. Boulder, Colorado, USA: NASA National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center. <https://doi.org/10.5067/M200XIZHY3RJ>
- O'Neill, P., Bindlish, R., Chan, S., et al. (2020). Soil moisture active passive (SMAP) algorithm theoretical basis document level 2 & 3 soil moisture (passive) data products (ATBD). [Online]. Available: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:16348925>
- O'Neill, P. E., Chan, S., Njoku, E. G., Jackson, T., Bindlish, R., Chaubell, J. & Colliander, A. (2023). *SMAP Enhanced L3 Radiometer Global and Polar Grid Daily 9 km EASE-Grid Soil Moisture*. (SPL3SMP_E, Version 6). [Data Set]. Boulder, Colorado USA. NASA National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center. <https://doi.org/10.5067/M200XIZHY3RJ>. Date Accessed 04-29-2024.
- Piles, M., Camps-Valls, G., Chaparro, D., Entekhabi, D., Konings, A. G., y Jagdhuber, T. (2017). Remote sensing of vegetation dynamics in agro-ecosystems using SMAP vegetation optical depth and optical vegetation indices. In 2017 *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)* (pp. 4346–4349). <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2017.8127964>
- Secretaría de Agricultura, Ganadería y Pesca - SISA - Argentina. (2021). *Informe final sobre la producción de cebada en la campaña 2020*. Recuperado de https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/informe_cebada2020.pdf
- Secretaría de Agricultura, Ganadería y Pesca - SISA - Argentina. (2020). *Informe final sobre la producción de soja en la campaña 2020-2021*. Recuperado de https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/if_sisa_final_soja_2020_2021.pdf
- Schmidt, L., Forkel, M., Zotta, R. M., Scherrer, S., Dorigo, W. A., Kuhn-Régnier, A., van der Schalie, R., & Yebra, M. (2023). Assessing the sensitivity of multi-frequency passive microwave vegetation optical depth to vegetation properties. *Biogeosciences*, 20(5), 1027–1046. <https://doi.org/10.5194/bg-20-1027-2023>
- Seo, D., Lakhankar, T., & Khanbilvardi, R. (2010). Sensitivity analysis of b-factor in microwave emission model for soil moisture retrieval: A case study for SMAP mission. *Remote Sensing*, 2, 1273-1286. <https://doi.org/10.3390/rs2051273>
- Schaaf, C., & Wang, Z. (2021). MODIS/Terra+Aqua BRDF/Albedo Nadir BRDF Adjusted Ref Daily L3 Global - 500m V061 [Data set]. NASA EOSDIS Land Processes Distributed Active Archive Center. Accessed 2024-09-16 from <https://doi.org/10.5067/MODIS/MCD43A4.061>
- Servicio Meteorológico Nacional - SMN. (2017). *Informe especial por ola de calor (16 de febrero al 2 de marzo de 2017)*. Recuperado de <http://hdl.handle.net/20.500.12160/893>
- Servicio Meteorológico Nacional - SMN. (2021). Servicio Meteorológico Nacional de Argentina. URL: <https://www.smn.gob.ar/descarga-de-datos>, accessed June 2, 2021.
- Ulaby, F. T., Aslam, A., y Dobson, M. C. (1982). Effects of vegetation cover on the radar sensitivity to soil moisture. *IEEE Tran-*

sactions on Geoscience and Remote Sensing, GE-20, 476–481.

- Ulaby, F. T., Long, D. G., Blackwell, W. J., Elachi, C., Fung, A. K., Ruf, C., Sarabandi, K., Van Zyl, J., y Zebker, H. (2015). *Microwave radar and radiometric remote sensing*. University of Michigan Press.
- Van De Griend, A. A., & Wigneron, J. P. (2004). The b-factor as a function of frequency and canopy type at H-polarization. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 42(4), 786–794.
- Wan, Z., Hook, S., & Hulley, G. (2021). MODIS/Terra Land Surface Temperature/Emissivity Daily L3 Global 1 km SIN Grid V061 [Data set]. NASA EOSDIS Land Processes Distributed Active Archive Center. Accessed 2024-09-16 from <https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD11A1.061>