

Estudio satelital en cebolla

Variables biofísicas como herramienta de fertilización nitrogenada

Alejandro Pezzola, Luciano Orden, Carolina Bellacomo

ISSN 0328-3399 Informe técnico N° 70



INTA | Ediciones

Colección
INVESTIGACIÓN, DESARROLLO E INNOVACIÓN



Estudio satelital en cebolla

Variables biofísicas como herramienta de fertilización nitrogenada



Ministerio de Agricultura,
Ganadería y Pesca
Argentina

Índice

Resumen	3
Abstract.....	3
1. Introducción.....	4
2. Materiales y métodos.....	7
2.1 Sitio experimental.....	7
2.2 Manejo del cultivo	9
2.3 Diseño experimental	14
2.4 Muestreo de variables biofísicas en campo	15
2.4.1 Clorofila y tejido vegetal.....	16
2.4.2 Medición de la cobertura vegetal	16
2.4.3 Medición del índice de área foliar	17
2.4.4 Vuelos con dron.....	18
2.4.5 Imágenes Sentinel-2 y productos de SNAP nivel 2A	19
2.4.6 Cosecha.....	21
3. Resultados y discusión	22
3.1 Cartografía de las variables biofísicas	22
3.2 Análisis de las variables biofísicas	26
3.2 Análisis de las variables de rendimiento	30
4. Consideraciones finales	31
5. Agradecimientos	32
6. Bibliografía.....	32

Resumen

En el Valle Bonaerense del Río Colorado, dentro de los cultivos intensivos, la cebolla cumple un rol importante teniendo gran participación en el PBI para los partidos de Villarino y Patagones de la provincia de Buenos Aires. La producción requiere elevada cantidad de insumos y aplicación de riego. Acorde a la demanda de buenas prácticas agrícolas, la agricultura de precisión permite mejorar la eficiencia en la fertilización nitrogenada a partir del desarrollo de técnicas a campo y con el análisis de imágenes satelitales. El objetivo es desarrollar métodos que proporcionen variables biofísicas como: índice de área foliar, factor de cobertura y contenido de clorofila en lotes de producción para utilizarlas como herramientas de diagnóstico y recomendación de fertilización nitrogenada en el cultivo de ciclo intermedio. Se realizó un ensayo de fertilización nitrogenada con diferentes dosis de urea granulada y donde se evaluaron las tres características biofísicas a campo y en imágenes satelitales de alta resolución Sentinel-2. Se calculó el rendimiento y se relacionaron todas las variables. En la correlación datos de campo/SNAP se obtuvo un R^2 de 0,40; 0,59 y 0,48 para LAI, Fcover y CCC respectivamente.

Palabras claves: variables biofísicas, LAI, cebolla, fertilización, Sentinel-2.

Abstract

In the Bonaerense Valley of the Colorado River, onion plays an important role among intensive crops, accounting for a large share of the GDP in the districts of Villarino and Patagones in Buenos Aires province. Production requires a large amount of inputs and irrigation. In line with the demand for good agricultural practices, precision agriculture allows for improved efficiency in nitrogen fertilisation through the development of field techniques and the analysis of satellite images. The aim of this project is to develop methods that provide biophysical variables such as leaf area index, coverage factor and chlorophyll content in production plots to be used as diagnostic tools and recommendations for nitrogen fertilisation in the intermediate cycle crop. A nitrogen fertilisation trial was carried out with different doses of granulated urea and where the three biophysical characteristics were evaluated in the field and in Sentinel-2 high resolution satellite images. Yield was calculated and all variables were related. In the field data/SNAP correlation, an R^2 of 0.40, 0.59 and 0.48 was obtained for LAI, Fcover and CCC respectively.

Key words: biophysical variable, LAI, onion, fertilization, Sentinel-2.

1. Introducción

En la actualidad el desafío es adaptar los sistemas de producción para lograr una agricultura sustentable. En este marco, optimizar el uso de fertilizantes y disminuir contaminantes tanto en el suelo como en el aire (FAO, 2011), favorece una disminución de los costos económicos y ambientales a largo plazo (FAO, 2015). En la agricultura, el principal gas de efecto invernadero es el dióxido de nitrógeno (NO_2). La proporción de las emisiones de NO_2 provenientes directamente de áreas cultivadas, inducida por la fertilización, son estimadas en aproximadamente un 23% a nivel mundial (Leyva Chinchay, 2015). Dentro de los principios científicos de las buenas prácticas agrícolas se encuentra el manejo de fertilizantes inorgánicos (FAO, 2002) y su base es: la fuente adecuada, en la dosis correcta, en el momento preciso, y con la localización correcta (Roberts, 2007). El desarrollo de tecnologías de la información y la comunicación, aplicadas a la agricultura, ha permitido el estudio cada vez más preciso de la fertilización nitrogenada de cultivos intensivos y extensivos (Bragachini, 2014).

Dentro de los cultivos intensivos con altos requerimientos de fertilizantes se encuentra la cebolla (*Allium cepa* L.) (Caracotche, 2019). Esta especie es la segunda hortaliza más producida a nivel mundial donde Argentina se destaca entre los exportadores de cebolla fresca y deshidratada de América Latina (FAOSTAT, 2020). En el Valle Bonaerense del Río Colorado (VBRC) en el sur de la provincia de Buenos Aires, en los distritos de Villarino y Patagones, (Casella et al., 2017), se siembran entre 8.000 y 10.000 ha año⁻¹, con un rendimiento promedio de 45 t ha⁻¹ (Lucanera et al., 2018).

En el cultivo de cebolla, el contenido de nitrógeno (N) es determinante en el inicio de la formación del bulbo, su tamaño y madurez (Lancaster, 1996). El N debe ser incorporado al suelo a modo de fertilizante para mejorar el crecimiento de la biomasa vegetal y proporcionar mayor contenido de clorofila (Cardoso Prieto, 2017). El vigor inicial y la homogeneidad de la emergencia se incrementan con los fertilizantes combinados de N y fósforo (P) y debe ser incorporado a la siembra. En cambio, la fertilización nitrogenada debe iniciarse a partir de la tercera hoja verdadera, en dos o tres aplicaciones fraccionadas. La última debe realizarse cuando comienza el proceso de “bulbificación” (cuando el diámetro del bulbo es el doble del diámetro del cuello) (Gaviola, 1996).

Los suelos livianos de la zona semiárida del VBRC poseen en su mayoría muy bajo tenor de materia orgánica (MO) y una pobre historia de rotaciones programadas. En tales condiciones se hace necesario el aporte de fertilizantes antes y durante el desarrollo del cultivo, a fin de garantizar una adecuada nutrición y por ende una alta producción de bulbos (Caracotche, 2019).

La agricultura de precisión permite mejorar la eficiencia en la fertilización nitrogenada a partir del desarrollo de técnicas no destructivas con instrumentos que miden en el terreno, variables de características biofísicas de la planta como la estructura del dosel,

la fracción verde, índice de área foliar (LAI, por sus siglas en inglés) y bioquímicas de la hoja como el contenido de clorofila (Chl) y N.

El LAI se define como el área total de hojas por unidad de área de suelo (Daughtry et al., 1992). y está asociado con procesos agronómicos, biológicos, ambientales y fisiológicos, que están relacionados con el análisis de crecimiento, la fotosíntesis, la transpiración, la interceptación de radiación y el equilibrio energético (Kucharik et al., 1998). Es por ello que hay un gran interés en la estimación frecuente de este parámetro debido a que proporciona información del crecimiento y salud de los cultivos, optimizando los procesos de riego y fertilización (Houlès et al., 2007).

Un parámetro relacionado con el LAI es el cálculo de la fracción de la cubierta verde de la vegetación (Fcover) en la dirección del nadir que se utiliza para separar la vegetación y el suelo en los procesos de equilibrio energético, incluida la temperatura y la evapotranspiración. El monitoreo de Fcover en los campos agrícolas desde principios de la temporada da una indicación de la tasa de desarrollo y vigor del cultivo. El aumento de Fcover da cuenta del desarrollo del área foliar o de la biomasa aérea (Li, et al., 2015), aunque en muchos casos esta relación es altamente no lineal (ESA, eo45d).

Por otro lado, el contenido de clorofila en el canopeo (CCC) se presenta como un método indirecto de evaluación del contenido de N (Baret et al., 2008; Houlès et al., 2007). La medida de CCC es importante por su función indicadora del estado de salud de la planta y de la productividad primaria, siendo considerada la propiedad vegetal más relevante para la estimación de la productividad (Gitelson et al., 2006). El CCC es el resultado del producto Chl hoja (gr m^{-2}) * LAI verde ($\text{m}^2 \text{ m de hoja}^{-1}$).

El manejo preciso de la fertilización N (Siliquini y Gaviola, 2015) ha llevado a desarrollar sistemas de diagnóstico y estimaciones basados en el uso de aplicaciones (app) para celulares inteligentes (smartphones) tales como PocketLai (<http://www.cassandralab.com/>) y Canopeo. (<http://www.canopeoapp.com/>).

La medida del LAI puede realizarse por métodos destructivos (tomando el dato del peso y escaneando de las hojas en un área conocida) o por medidas con instrumentación desarrollada para ello, como el LICOR-LAI (LI-COR, 2012), ceptómetro o la cámara hemisférica, que miden a partir de la radiación interceptada por la vegetación. Con el desarrollo de los smartphones se han desarrollado aplicaciones para móviles que permiten hacer una estimación de forma sencilla y económica (Confalonieri et al., 2013). La aplicación utiliza la cámara y el acelerómetro del dispositivo para adquirir automáticamente imágenes a 57.5° debajo del dosel.

La medida directa de Chl se realiza en laboratorio, con la extracción de Chl en una determinada área de hoja y su separación cromática en cromatografía líquida de alta eficiencia (HPLC). Sin embargo, para medidas más operativas se han desarrollado instrumentos sencillos, como el SPAD (Minolta®), que proporciona una medida

Estudio satelital en cebolla: variables biofísicas como herramienta de fertilización

nitrogenada | Alejandro Pezzola | pezzola.alejandro@inta.gov.ar | ISSN 0328-3399 Informe técnico N° 70
Junio 2021

correlacionada con la cantidad de Chl en hoja. La app “Canopeo” es una herramienta rápida y precisa para calcular el porcentaje de cobertura del dosel (Fcover). Esta aplicación cuantifica el porcentaje de cubierta vegetal verde viva de cualquier cultivo agrícola, a partir de fotografías o vídeos obtenidos con el móvil (Patrignani y Ochsner, 2015).

No obstante, a pesar de la sencillez de estas herramientas, el análisis solo puede realizarse en una porción de las parcelas de cultivo. Es por ello que la teledetección en el dominio solar proporciona mediciones indirectas del CCC, del LAI, el contenido Chl y N en toda la porción de territorio (Sylvain Jay et al., 2017).

Estos parámetros pueden ser estimados de manera eficiente, a partir de las imágenes de los satélites Sentinel-2 de la Agencia Espacial Europea (ESA, 2014).

Poseen un total de 13 bandas donde 4 de ellas corresponden al sensor MSI, de 10 m de resolución espacial, adecuada para el estudio operativo de los cultivos intensivos (Mulla, 2013), 6 bandas de 20 metros y 3 bandas para corrección atmosférica de 60 m y el periodo de revisita es de 5 días (Copernicus, ESA, 2014). Las bandas en la región de red-edge (705 nm, 740 nm y 783 nm) permiten determinar una serie de indicadores relacionados con el N y el contenido de Chl dado que en estas longitudes de onda la energía es absorbida por pigmentos como la Chl y los carotenoides (Gitelson et al., 2006; Delegido et al., 2011; Clevers et al., 2013).

Estos autores han propuesto índices de vegetación para la estimación de CCC, principalmente utilizando la región espectral situada en el red-edge (690-750 nm), entre el máximo de absorción de Chl en el rojo y máxima reflectividad en el infrarrojo cercano (NIR) producida por la abundancia de estructura celular en la hoja (LAI) (Padilla, 2015). Dentro del software SNAP (Sentinels Application Platform) de la Agencia espacial europea, se incorporan algoritmos basados en redes neuronales (ANN) que permiten calcular las variables biofísicas LAI, CCC y Fcover en imágenes S2 (Weiss et al., 2016). Estas variables fueron validadas en la zona de estudio sobre varios cultivos con una resolución de 20 m x 20 m de tamaño de pixel dando buenas correlaciones de acuerdo a los trabajos publicados por Pasqualotto et al. (2019) y en la cebolla, en particular durante el ciclo 2019 (LAI: $R^2 = 0,87$; Fcover: $R^2 = 0,96$ y CCC: $R^2 = 0,79$) (Bellacomo et al., 2020).

El objetivo de este trabajo es evaluar la aplicación de tecnologías de sensores remotos para utilizarlas como herramientas de diagnóstico y recomendación de fertilización N en el cultivo de cebolla de ciclo intermedio.

2. Materiales y métodos

2.1 Sitio experimental

El sitio del ensayo se ubicó en la Estación Experimental Agropecuaria Hilario Ascasubi del INTA (EEA INTA H. Ascasubi). Se realizó la siembra de un cultivo de cebolla (*Allium cepa* L. cv Torrentina) en la temporada 2020, en un lote de 1,3 ha en un sector destinado a la producción agrícola a cargo de la Asociación Cooperadora de la EEA INTA H. Ascasubi (Fig. 1). Los cultivos antecesores fueron trigo (2019) y girasol (2018-2019).

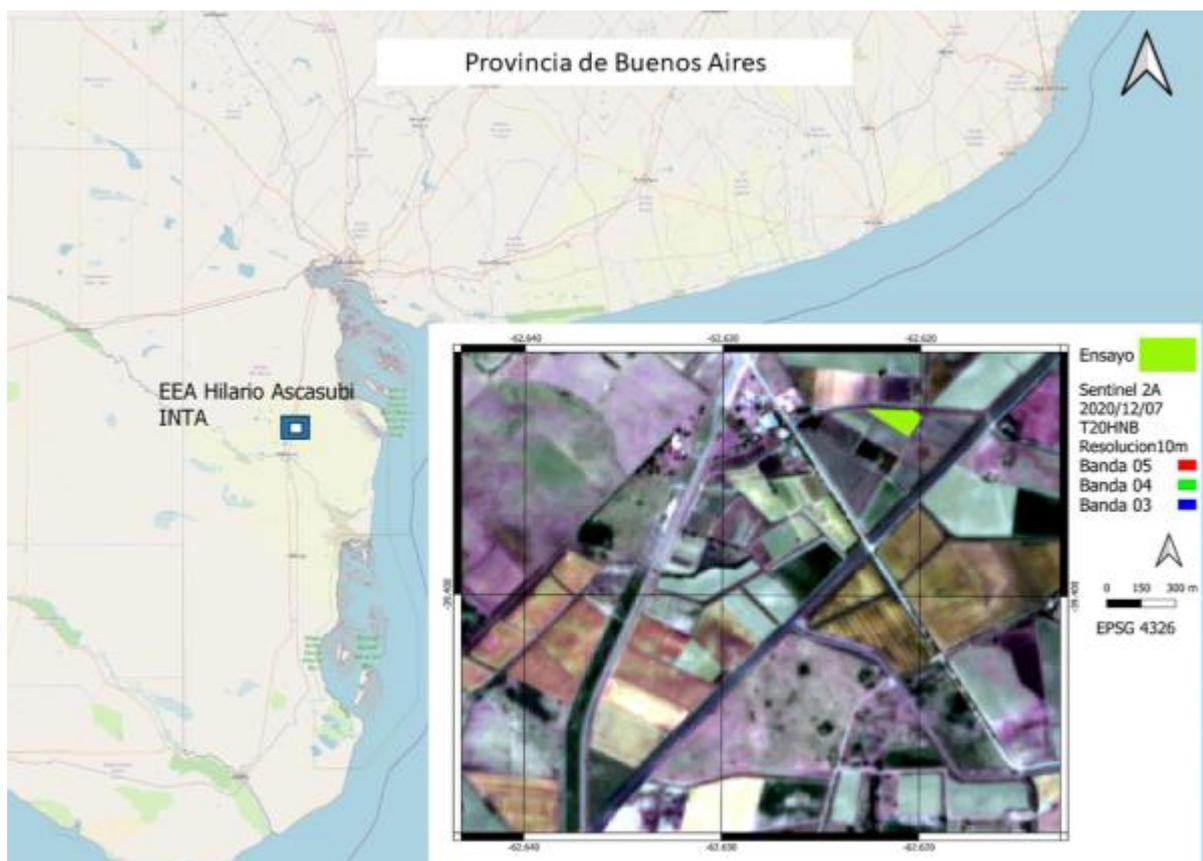


Figura 1. Ubicación del ensayo experimental sobre una imagen de alta resolución (Imagen del satélite Sentinel 2a).

El tipo de suelo es Hapludol Éntico de textura franco arenosa, perteneciente a la serie La Merced (Cappannini, 1966; Godagnone, 1991) y sus características pueden verse en la Tabla 1.

El perfil La Merced representa a suelos del ambiente fluvial principal (Afp) que aparecen en lomas y sectores planos, dentro de un paisaje de amplias planicies en el sur del partido de Villarino, provincia Buenos Aires. Tiene pendientes que oscilan entre el 0 y el 1 %.

Es un perfil profundo, formado a partir de materiales de textura franco arenosa

Estudio satelital en cebolla: variables biofísicas como herramienta de fertilización

nitrogenada | Alejandro Pezzola | pezzola.alejandro@inta.gov.ar | ISSN 0328-3399 Informe técnico N° 70
Junio 2021

franco arenosa. Presenta permeabilidad moderadamente rápida y es algo excesivamente drenado. Claro-suave; pardo grisáceo oscuro (10YR 3/3) en húmedo; bloques subangulares, medios débiles; friable en húmedo, no plástico, no adhesivo; con moderada cantidad de raíces (Rodríguez et al., 2018).

Tabla 1. Características físico-químicas del sitio de ensayo previo a la siembra

pH	C.E.	MO	Pe	Fracciones texturales			Densidad aparente
				%A	%L	%Ar	
	dS m ⁻¹	%	mg kg ⁻¹	%A	%L	%Ar	g cm ⁻³
6,8	0,89	2,16	36	5	15	80	1,4

C.E.: conductividad eléctrica, MO: materia orgánica, Pe: fósforo extraíble, A: arcilla, L: limo, Ar: arena (Datos provistos por Laboratorio de Suelo de la EEA Hilario Ascasubi)

La temperatura media anual es de 15° C y la precipitación media anual de 483,5 mm (1966-2020). En las Figuras 2, se muestran los registros medios de precipitación y temperaturas históricas, así como del ciclo productivo del ensayo.

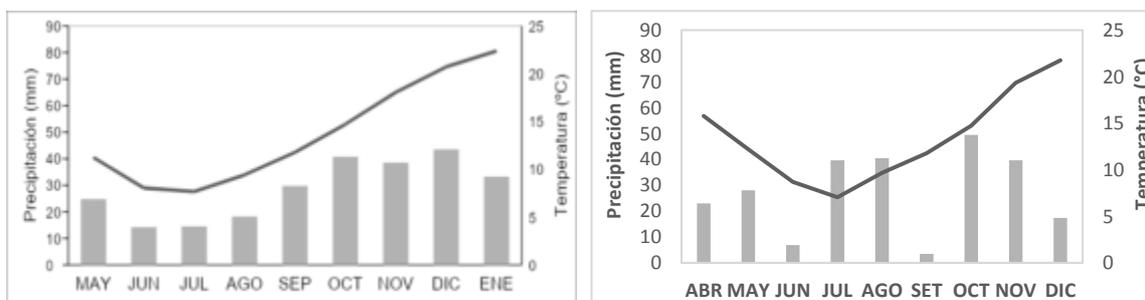


Figura 2. Diagramas ombrotérmicos: a) 1966-2020; b) 2020. Las barras grises corresponden a la precipitación y las líneas negras a la temperatura (Datos provistos por el Área de Meteorología EEA INTA Ascasubi).

Las labores de suelo previas a la siembra, se realizaron entre febrero y abril de 2020 (Tabla 3). La siembra se realizó en fombra directa el 20 de abril de 2020 mediante una sembradora hortícola neumática (El Pato Maquinarias Agrícolas) en 10 líneas sobre tablón de 1,6 m de ancho (Fig. 3).

La máquina estaba provista de una tolva fertilizadora con dosificadores tipo chevrón para la incorporación de fertilizantes granulados en línea. Se utilizó semilla de la variedad Torrentina, con un poder germinativo de 86% y un peso de mil semillas de 3,7 g (datos provistos por el Laboratorio de Semillas EEA INTA Ascasubi). La densidad de siembra fue de 5 kg ha⁻¹, junto con la semilla se incorporaron insecticida clorpirifós granulado (Dughetti, 2011) en una dosis de 7 kg ha⁻¹ y el fertilizante en una dosis de 160 kg ha⁻¹ de fosfato diamónico (18-46-0). Luego de la siembra se realizó la conformación de bordos para delimitar los diferentes tratamientos experimentales y facilitar el riego. El 13 de mayo se aplicó herbicida pre emergente mediante una pulverizadora de arrastre utilizando pendimetalin en una dosis de 3 l ha⁻¹.

Estudio satelital en cebolla: variables biofísicas como herramienta de fertilización

nitrogenada | Alejandro Pezzola | pezzola.alejandro@inta.gov.ar | ISSN 0328-3399 Informe técnico N° 70
Junio 2021



Figura 3. Regulación de la máquina sembradora hortícola. Siembra de cebolla en platabanda.

Para seguimiento del nacimiento y emergencia del cultivo, el 15 de julio se realizó el primer conteo de plantas (Fig. 4). Se eligieron 5 sitios al azar donde se identificaron el total de las plantas emergidas que tuvieran desarrolladas 1 o 2 hojas. Se obtuvo un promedio de emergencia de 100 plantas m^{-2} . Posteriormente, a los dos meses del primer conteo (15 de septiembre), se realizó el segundo conteo de plantas considerando el estado de 3 y 4 hojas alcanzando en promedio 76 plantas m^{-2} .



Figura 4. Seguimiento de plantas emergidas en los primeros estadios.

2.2 Manejo del cultivo

En la utilización de urea como fuente de N (46-0-0), se debe tener presente que en contacto con el suelo se producen una serie de reacciones químicas que generan su volatilización. Debido a eso debe ser incorporada al suelo lo más rápido posible para disminuir las pérdidas en forma gaseosa. Se recomienda en aplicaciones superficiales regar posteriormente a la fertilización, ya que el agua disuelve el fertilizante optimizando la incorporación.

El riego es uno de los factores que más incidencia tiene sobre el rendimiento (Baffoni et al., 2012). La cebolla posee un sistema radical de escasa profundidad y en consecuencia poco eficiente, por lo que necesita tener niveles de humedad adecuados en el suelo, próximos a la capacidad de campo, para favorecer la emisión de raíces y la absorción de nutrientes (Varela et al., 2014).

En este caso, debido a las precipitaciones ocurridas en esta campaña (Fig. 5) se regó por gravedad en 10 momentos durante el ciclo del cultivo, distribuyéndose desde fines de setiembre a diciembre (Fig.6).

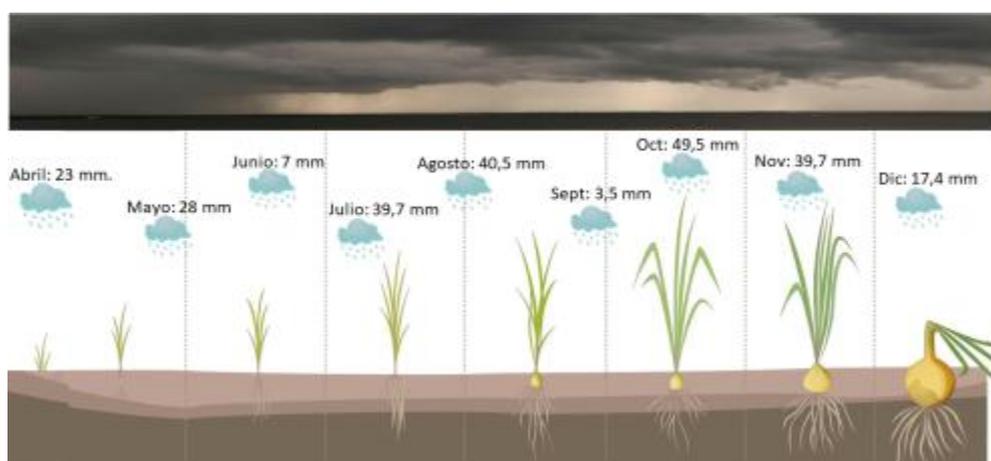


Figura 5. Precipitaciones durante el ciclo fenológico.

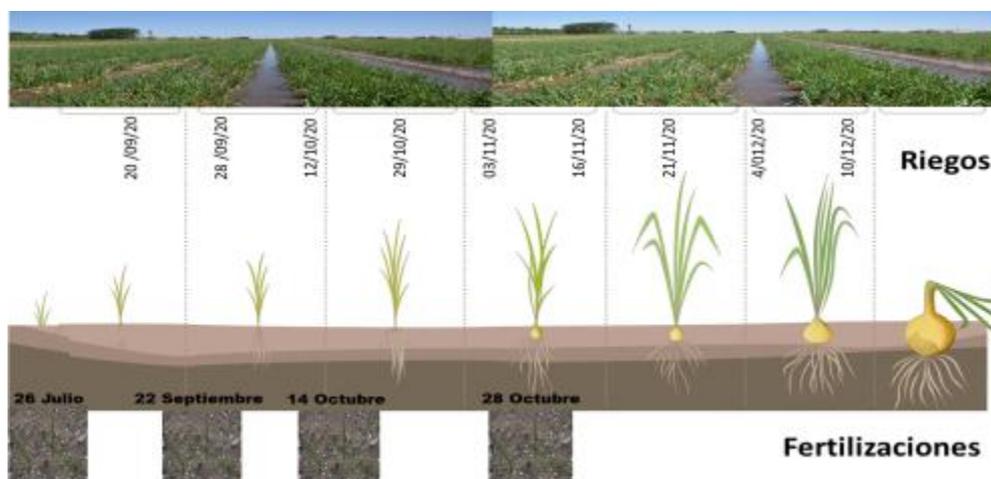


Figura 6. Fechas de riego y fertilización del cultivo de cebolla.

La calidad del agua de riego del río Colorado se observa en la Tabla 2 (Datos provistos por Laboratorio de Suelos y Aguas EEA INTA H. Ascasubi).

Tabla 2. Características fisicoquímicas de agua de riego usada en el ensayo.

Ciclo	pH	C.E.	Na ⁺	HCO ₃ ⁻ meq.L ⁻¹	Cl ⁻	RAS %
2020	8,21	1,89	7,61	1,87	6,58	3,87

pH: potenciometría, CE: conductividad eléctrica, conductimetría, HCO₃⁻ y Cl⁻: titulación ácido-base. RAS: relación adsorción de sodio, calculado a partir de los cationes.

El cultivo de cebolla, requiere de frecuencias de riego más altas para el mismo periodo de evapotranspiración aún con un LAI más reducido, debido a que las raíces solo exploran la zona no saturada del perfil (Sánchez, 2013). El riego por gravedad consiste en la aplicación de una lámina de agua que avanza sobre la superficie del suelo (Fig. 7), que se distribuye a lo largo y ancho de la parcela a medida que se infiltra (González-Esquiva, 2017).



Figura 7. Sistema de riego por gravedad del lote de cebolla.

La ventaja de este tipo de riego es que tiene relativamente bajos costos de inversión y no requiere consumo de energía (Steduto, 2009). Entre sus desventajas, se encuentra la necesidad de grandes volúmenes de agua y la nivelación del suelo (Cantamutto, 2010). Este tipo de siembra en tablón normalmente se utiliza con sistemas de riego presurizado, pero en la zona del VBRC los productores lo han adaptado al riego por gravedad en surcos o por manto (Bellacomo, 2011).

Estudio satelital en cebolla: variables biofísicas como herramienta de fertilización

nitrogenada | Alejandro Pezzola | pezzola.alejandro@inta.gov.ar | ISSN 0328-3399 Informe técnico N° 70
Junio 2021

Tabla 3. Prácticas de manejo realizadas en el ciclo productivo de la cebolla temprana.

Momento	Actividad	Labor	Implemento	Unidad	Dosis	
Pre siembra Febrero-Marzo 2020	Barbecho	Acondicionamiento del suelo	Cinzel	N° pasadas	1	
			Rastra de discos		2	
			Rastra de dientes		2	
			Bordos		1	
	Riegos	Sifones por gravedad	Lámina	mm	200	
Siembra 20-abril 2020	Siembra	Semilla	cv. Torrentina	kg ha ⁻¹	5	
		Fertilizante	PDA (18-46-0)		160	
		Insecticida	Clorpirifós		7	
Pre emergencia	Herbicida	Pulverización	Pendimetalin	l ha ⁻¹	3	
Vegetativo 2 hojas 26-may-2020			Cletodim	cm ³ ha ⁻¹	1200	
Vegetativo 6 hojas 10-sept-2020			Cletodim	cm ³ ha ⁻¹	1000	
			Oxifluorfen Bromoxinil Aclonifen		300 900 800	
			Pendimetalin		l ha ⁻¹	3
Vegetativo 7 hojas 15-oct-2020			Oxifluorfen	cm ³ ha ⁻¹	600	
Vegetativo 7 hojas 23 oct 2020			Insecticida	Fluroxipir	l ha ⁻¹	1
				Aclonifen	cm ³ ha ⁻¹	700
				Tiametoxam + lambdacialotrina	cm ³ ha ⁻¹	200
Bulbificación 20-nov-2020			Funguicida	Mancozeb + metalaxil	kg ha ⁻¹	2
Maduración 15-dic-2020	Cosecha manual		Arrancado e hilerado	N° pasadas	1	

Estudio satelital en cebolla: variables biofísicas como herramienta de fertilización

nitrogenada | Alejandro Pezzola | pezzola.alejandro@inta.gov.ar | ISSN 0328-3399 Informe técnico N° 70
Junio 2021

La aplicación de urea fue al voleo y sin incorporar, de forma manual en las unidades experimentales y mecanizada al voleo en el resto del lote (Fig. 8 y 9) con humedad en el suelo luego de un riego o previo a una lluvia. Como se mencionó anteriormente, las pérdidas de N por volatilización del amonio puede ser la principal causa de la baja eficiencia de algunos fertilizantes amoniacales (Orden, 2013). Se realizó de manera fraccionada en tres momentos durante la etapa vegetativa para que las plantas de cebolla puedan absorber el N de forma paulatina y disminuir el lixiviado a la capa freática (Ibáñez, 2010).



Figura 8. Aplicación mecanizada de fertilizantes N (primera fertilización: 26-jul-2020) sobre el lote de cebolla.



Figura 9. Aplicación de forma manual de urea granulada en las parcelas experimentales.

Las cebollas tienen un sistema radical poco profundo (Horneck, 2004) y sus hojas nunca cubren completamente el suelo, por lo que son malas competidoras de las malezas. Esto es especialmente evidente al comienzo del ciclo. Las malezas juegan un papel fundamental dentro de los factores que contribuyen a la pérdida de plantas de cebolla y

Estudio satelital en cebolla: variables biofísicas como herramienta de fertilización nitrogenada | Alejandro Pezzola | pezzola.alejandro@inta.gov.ar | ISSN 0328-3399 Informe técnico N° 70
Junio 2021

disminución del rendimiento (Caracotche, 2020). Para mitigar la pérdida de plantas se utilizaron herbicidas para el control de malezas de hoja ancha y gramíneas en dos momentos durante el desarrollo vegetativo (Tabla 3). También se realizaron carpidos manuales para el desmalezado de las plantas más resistentes. Las condiciones climáticas fueron favorables para la aparición de enfermedades de hojas por lo que se aplicó fungicidas de acción sistémica y de contacto de acuerdo a las recomendaciones de Delhey (2015).

2.3 Diseño experimental

El diseño experimental utilizado fue en bloques completos de tres tratamientos con tres repeticiones y una parcela testigo (Tabla 4).

La delimitación precisa y georreferenciación de cada una de las parcelas, se realizó con la colaboración del Departamento de Ingeniería de la Corporación de Fomento del río Colorado (CORFO). Se realizó la toma de puntos altimétricos y la localización de cada uno de los bordes para el riego y las platabandas con un GPS diferencial Spectra® SP60 sub milimétrico. Además, al inicio del ensayo, se realizó un vuelo fotográfico mediante un dron (DJI Phantom4® advance+) con cámara RGB, complementario a la medición con el GPS diferencial antes mencionado para realizar la cartografía de base.

La superficie de cada uno de los tratamientos fue de 235 m² (9 tablones de 30 m de longitud). Las unidades de muestreo (UM) estuvieron separadas mediante bordos para evitar la deriva del agua de riego y del fertilizante (Fig. 10).

Tabla 4. Detalle de fuente y dosis de N para cada tratamiento evaluado.

Tratamiento	Fertilizante	kg ha ⁻¹
T		0
U250	Urea Granulada	250
U500		500
U750		750

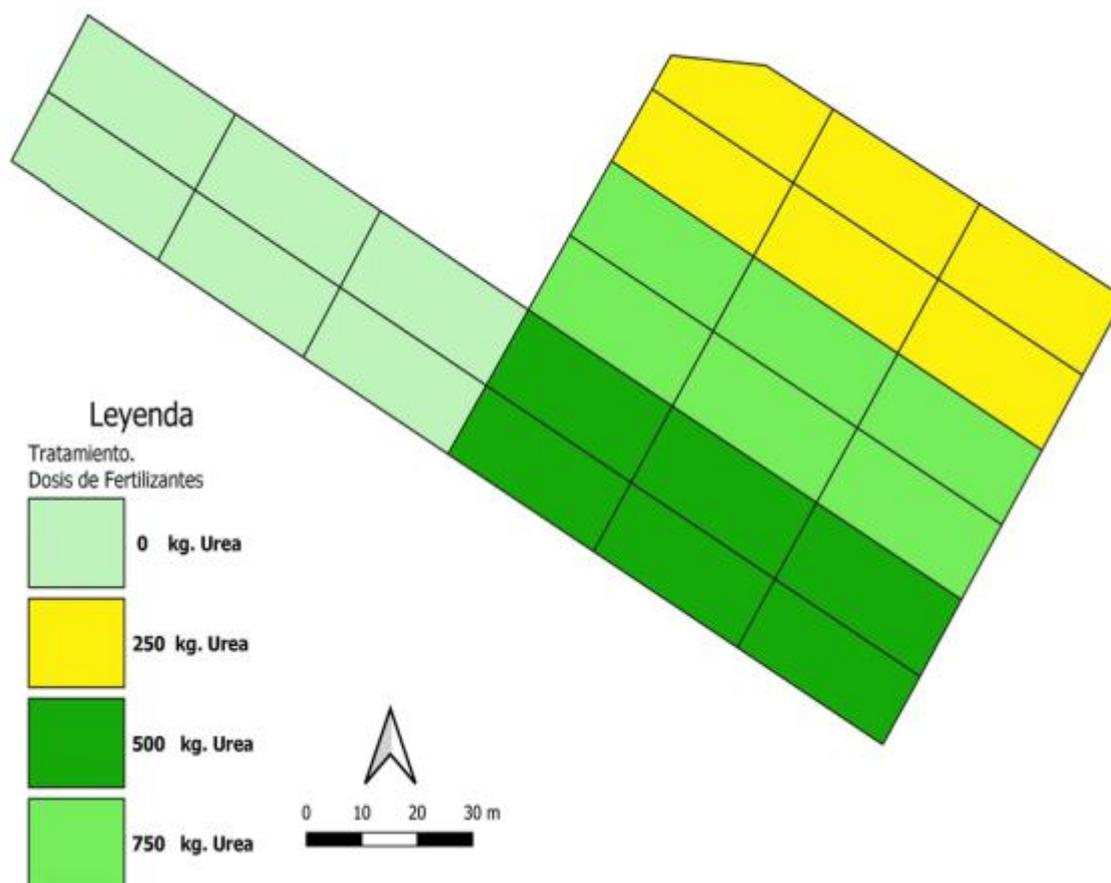


Figura 10. Ensayo experimental. Distribución espacial de los tratamientos

2.4 Muestreo de variables biofísicas en campo

Se midieron en el campo las variables biofísicas LAI, Fcover y LCC, durante el ciclo del cultivo tomándose como referencia el momento de adquisición de imágenes de acuerdo a la programación del pasaje (efeméride) del satélite Sentinel-2 (Tabla 5).

Tabla 5. Descripción de los muestreos biofísicos.

Muestreo	Fecha		Ciclo del Cultivo	
	Campo	Satélite		
1	22-sept-20	23-sept-20		4-6 hojas
2	14-oct-20	13-oct-20	Vegetativo, hojas	6-8 hojas
3	28-oct-20	02-nov-20	Inicio bulbificación	8-10 hojas
4	11-nov-20	7-nov-20	Bulbificación	
5	26-nov-20	27-nov-20		
6	09-dic-20	07-dic-20	Entrega	

Estudio satelital en cebolla: variables biofísicas como herramienta de fertilización nitrogenada | Alejandro Pezzola | pezzola.alejandra@inta.gov.ar | ISSN 0328-3399 Informe técnico N° 70
Junio 2021

2.4.1 Clorofila y tejido vegetal

Para la estimación de Chl, se utilizó el instrumental SPAD Minolta® 502 (Fig. 11). Se muestrearon, de forma destructiva, el área foliar de 5 plantas de cada parcela. Se identificó individualmente cada una, realizándose un corte longitudinal del área foliar de la lámina de mayor desarrollo, para poder obtener el registro de 5 puntos de muestreo referenciados desde la base al ápice de la misma. (Gamiely, 1991). Luego, cada una de las plantas (N= 60) se secó en una estufa a 60 °C para la determinación de N total en tejido vegetal (datos no publicados).



Figura 11. Toma de datos sobre área foliar mediante SPAD.

2.4.2 Medición de la cobertura vegetal

Se midió la cobertura vegetal (%) del cultivo utilizando el software para smartphone Canopeo®. Esta aplicación fue desarrollada por Patrignani y Ochsner (2015) utilizando Matlab y se basa en relaciones de color de rojo a verde (R/G) y azul a verde (B/G) y un índice de exceso de verde (2G–R–B). Se tomaron fotografías a 1,50 m de altura desde el suelo en cada UM (Fig. 12). La aplicación presenta la imagen original y la imagen procesada, donde la cobertura vegetal se representa mediante píxeles blancos. En cada parcela se tomaron al azar 10 fotografías, se obtuvo el promedio cuyo resultado se expresa en porcentaje de cobertura.

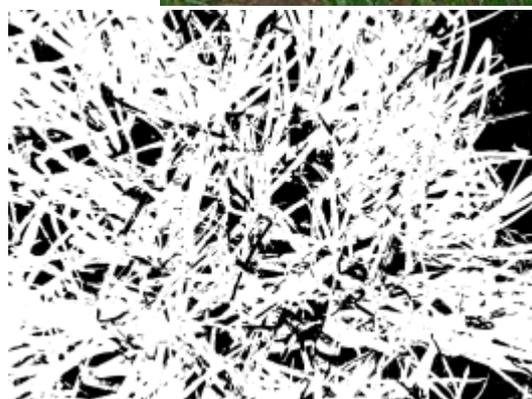


Figura 12. Medición de cobertura mediante la app “Canopeo”

2.4.3 Medición del índice de área foliar

La medición del índice de área foliar (LAI) a escala de planta (Mondal et al., 1986; Corcoles et al., 2013) se realizó con la app para smartphone denominada PocketLAI@ (Confalonieri, 2014). Las determinaciones se realizaron en cada UM de los distintos tratamientos. Se configuró la aplicación para realizar 5 lecturas por cada uno de esos sitios, obteniéndose el promedio (Orlando, 2014).

Se adquirieron automáticamente imágenes a 57.5° debajo del dosel mientras se giraba el dispositivo desde la base al final de la planta (Fig. 13). Estas imágenes fueron procesadas utilizando un algoritmo interno de segmentación que da como resultado un promedio de las 9 lecturas.



Figura 13. Medición del LAI mediante smartphone.

2.4.4 Vuelos con dron

Como trabajo adicional, se realizaron vuelos aéreos fotográficos exploratorios (dron DJI Phantom4®) (Fig. 14 y 15). Utilizando el software Pix4Dcapture® se planificaron los vuelos. La altura de vuelo fue de 50 m snm con el objetivo de obtener una resolución espacial de 3 cm. Se realizó el procesamiento de fotografías ortorrectificadas mediante software específico (OpenDronMap®) (Fig. 16).



Figura 14 y 15. Planificación de fotografías sobre lote experimental mediante dron.

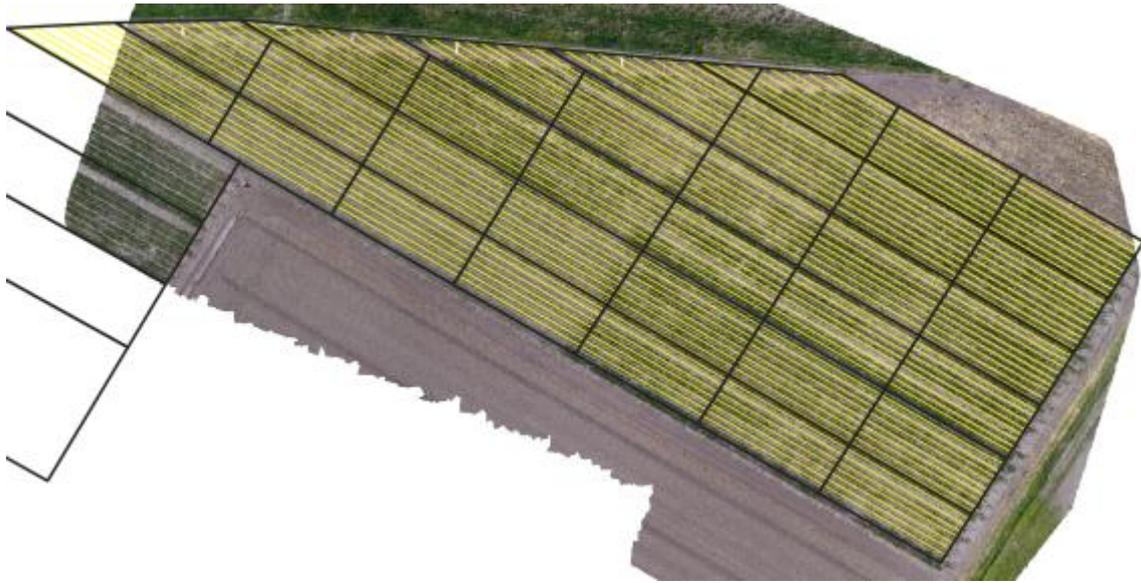


Figura 16. Mosaico de imágenes (6-noviembre-2020). Las líneas negras delimitan las UM del ensayo experimental.

2.4.5 Imágenes Sentinel-2 y productos de SNAP nivel 2A

Las imágenes empleadas pertenecen a los satélites Sentinel-2 a y b del programa Copernicus, de la Agencia Espacial Europea ESA). Para la programación de las actividades de campo, se revisa el plan de adquisición de imágenes (efeméride) provisto por la Agencia en su plataforma o en la app para celulares: Apps Copernicus Sentinel v4.20, durante el ciclo fenológico del cultivo (Fig. 17).

Este satélite provee imágenes en 13 bandas espectrales que abarcan desde el visible hasta el infrarrojo de onda corta (*short-wavelength infrared-SWIR*) (443 -2190 nm), con cuatro bandas de 10 m de resolución espacial (visible y NIR), seis bandas de 20 m (*red-edge* y SWIR) y tres bandas de 60 m para la corrección atmosférica.

Se eligieron las imágenes libres de nubes, más cercanas a las mediciones de terreno según se muestra en la Tabla 6. Fueron descargadas del servidor de la ESA (<https://scihub.copernicus.eu/>) en nivel 1C, corregidas geoméricamente, y mediante el complemento Sen2cor integrado en el programa SNAP 8.0 (Sentinel Application Platform) de la misma agencia, se realizó la corrección atmosférica llevando la imagen a nivel 2A que transforma la reflectividad en el techo de la atmósfera (top-of-atmosphere-TOA) a valores de reflectividad al nivel de la cubierta (top-of-canopy -TOC). Luego fueron remuestreadas para obtener píxeles en todas las bandas de 10 m. Se trabajó en formato Beam-Dimat propio de SNAP con el objeto de mantener todos los datos físicos y geométricos que componen cada imagen.

Mediante la caja de herramientas de SNAP, *BiophysicalOp Operator* se obtuvieron los productos de LAI, Fcover y CCC para cada UM, escogiendo tan solo aquellos en los que el indicador de calidad era óptimo.

Finalmente, se extrajo el valor radiométrico obtenido de los 12 píxeles centrales de cada UM, en las seis fechas asociadas a la medición de campo (Fig. 18) más una fecha previa (29-ago-2020) como referencia de suelo sin cobertura.

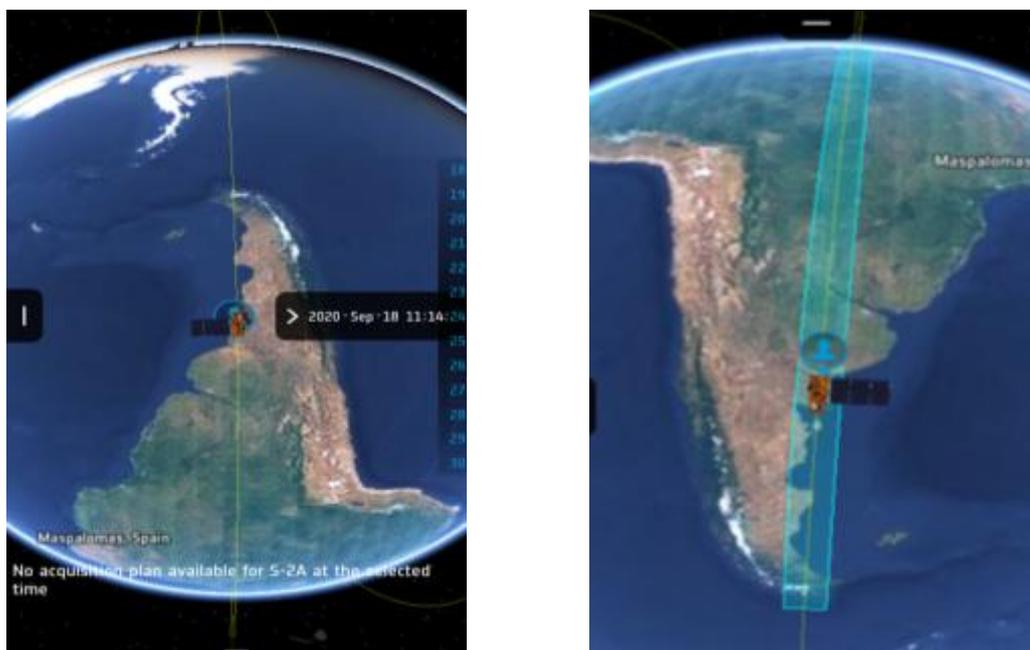


Figura 17. Plan de adquisición de Copernicus - Sentinel 2

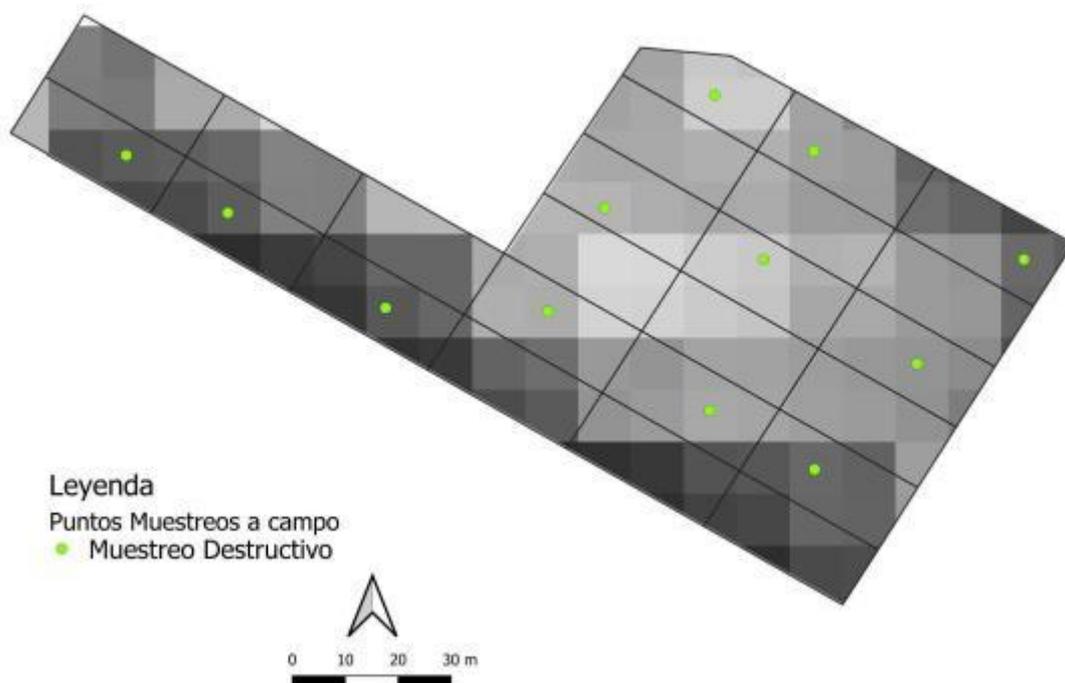


Figura 18. Ubicación de las 12 UM correspondiente a cada repetición del diseño experimental.

2.4.6 Cosecha

El 15 de diciembre de 2020 se tomaron las muestras para determinar el rendimiento en cada UM. Para ello se cosechó 1 m lineal del tablón central de cada parcela (N=12). Luego del muestreo, se cosechó la totalidad del lote de forma manual (Fig. 19). Los bulbos muestreados se colocaron en bolsas de red plástica monofilamento en un sitio con adecuada ventilación natural para asegurar el secado de las capas externas del bulbo, cuello y raíces (curado), mientras que la cebolla del lote comercial se conservó tapada con plástico a campo hasta el momento de su comercialización (Fig. 20). Una vez cumplido este proceso se realizó la limpieza extrayendo hojas secas y raíces (descolado). Los bulbos se clasificaron de acuerdo al calibre según norma del MERCOSUR, Resolución IASCAV N° 88/95. El rendimiento obtenido se extrapola para cada tratamiento a $t\ ha^{-1}$.



Figura 19. Cosecha de muestra para rendimiento, embolsado y toma de datos.



Figura 20. Vista de cebollas en pilas a campo. Foto aérea del lote cosechado.

3. Resultados y discusión

3.1 Cartografía de las variables biofísicas

En principio se obtuvieron los mapas de las variables LAI, Fcover y CCC totales en las imágenes de las 6 fechas de muestreo (Tabla 5). Además, se adicionó una imagen del inicio del ciclo del cultivo (29-agosto-2020) como referencia de suelo desnudo (Fig. 21, 22 y 23).

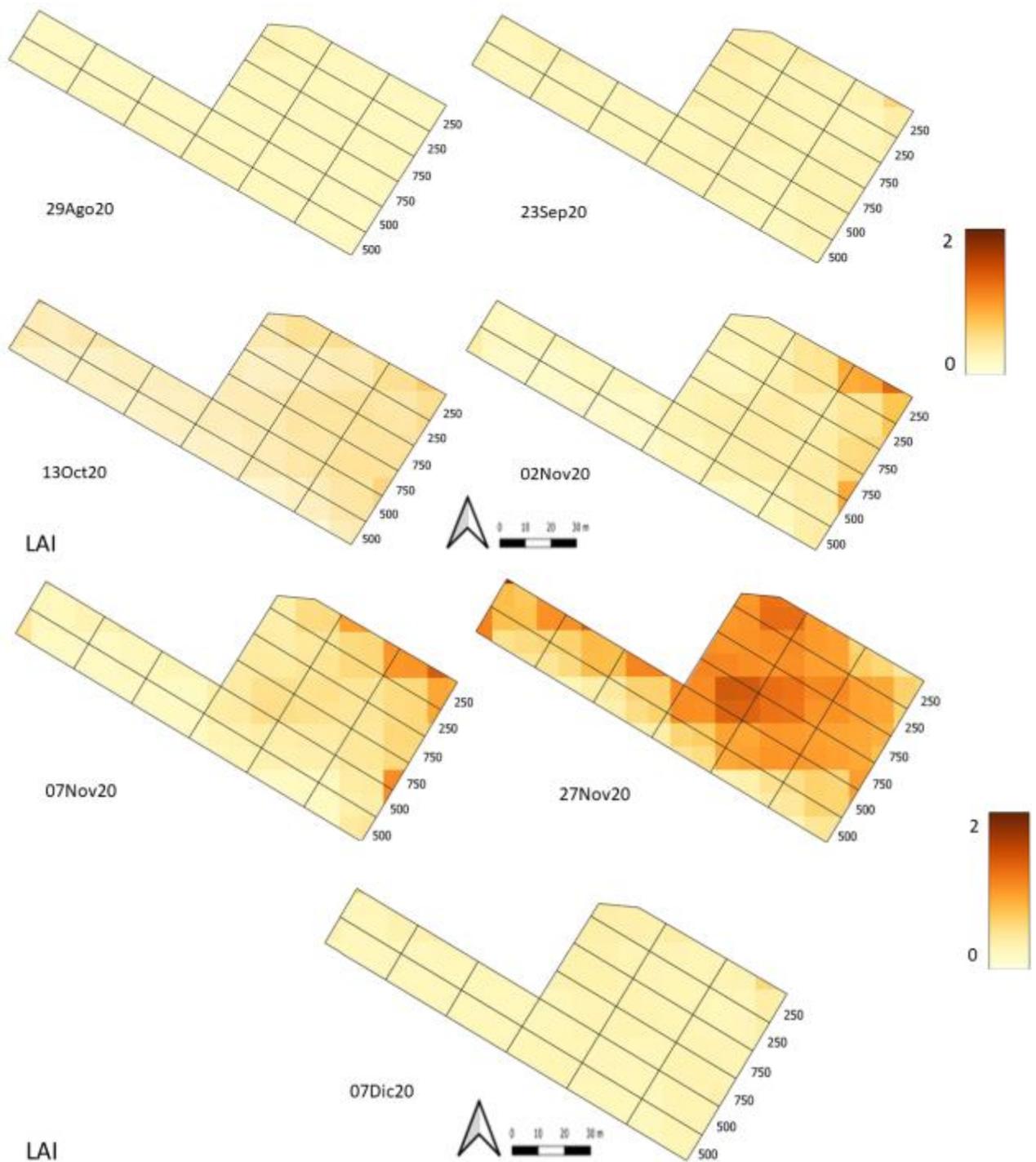


Figura 21. Serie temporal del LAI durante el ciclo del cultivo de cebolla.

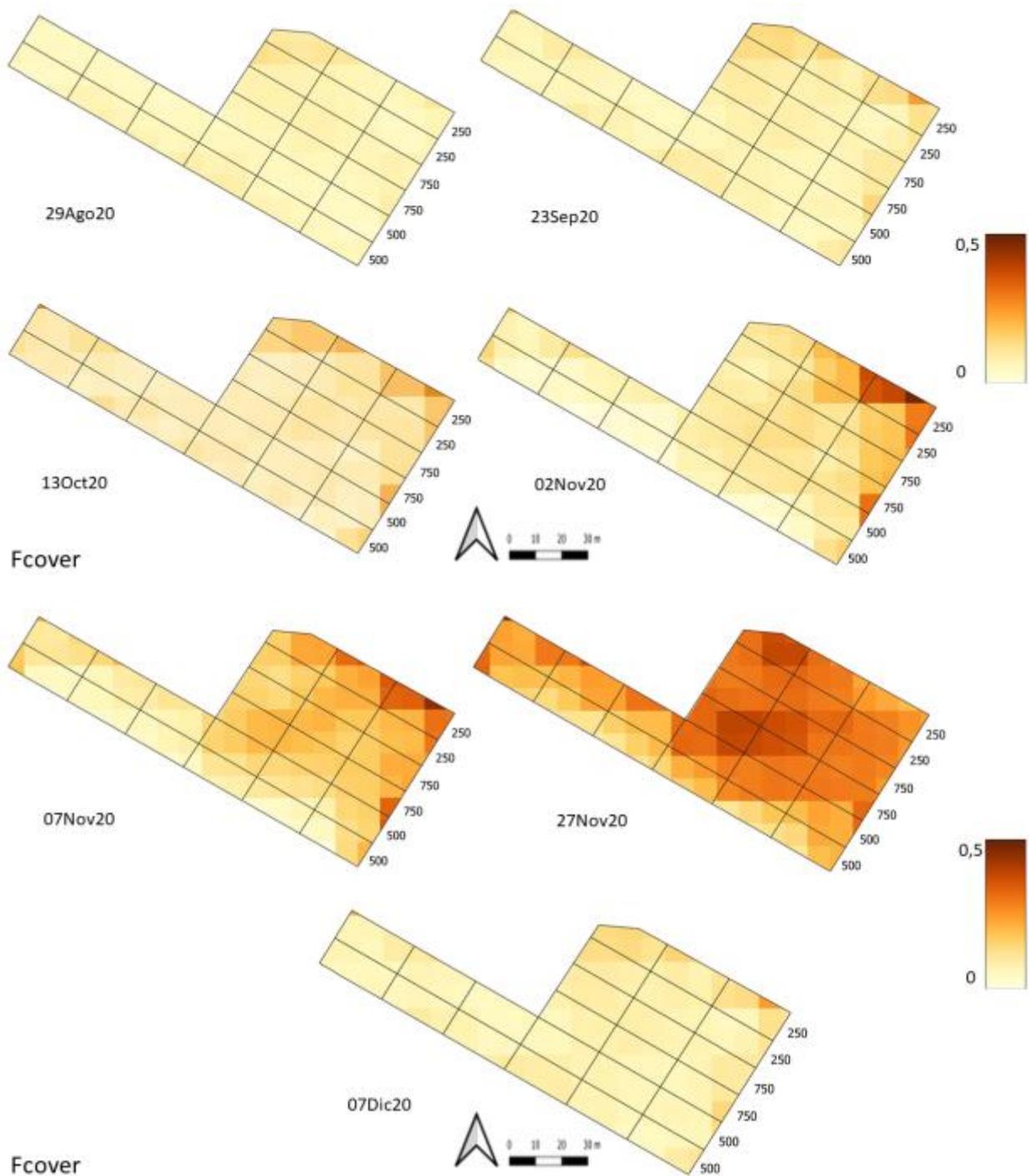


Figura 22. Serie temporal de imágenes Fcover durante el ciclo del cultivo de cebolla.

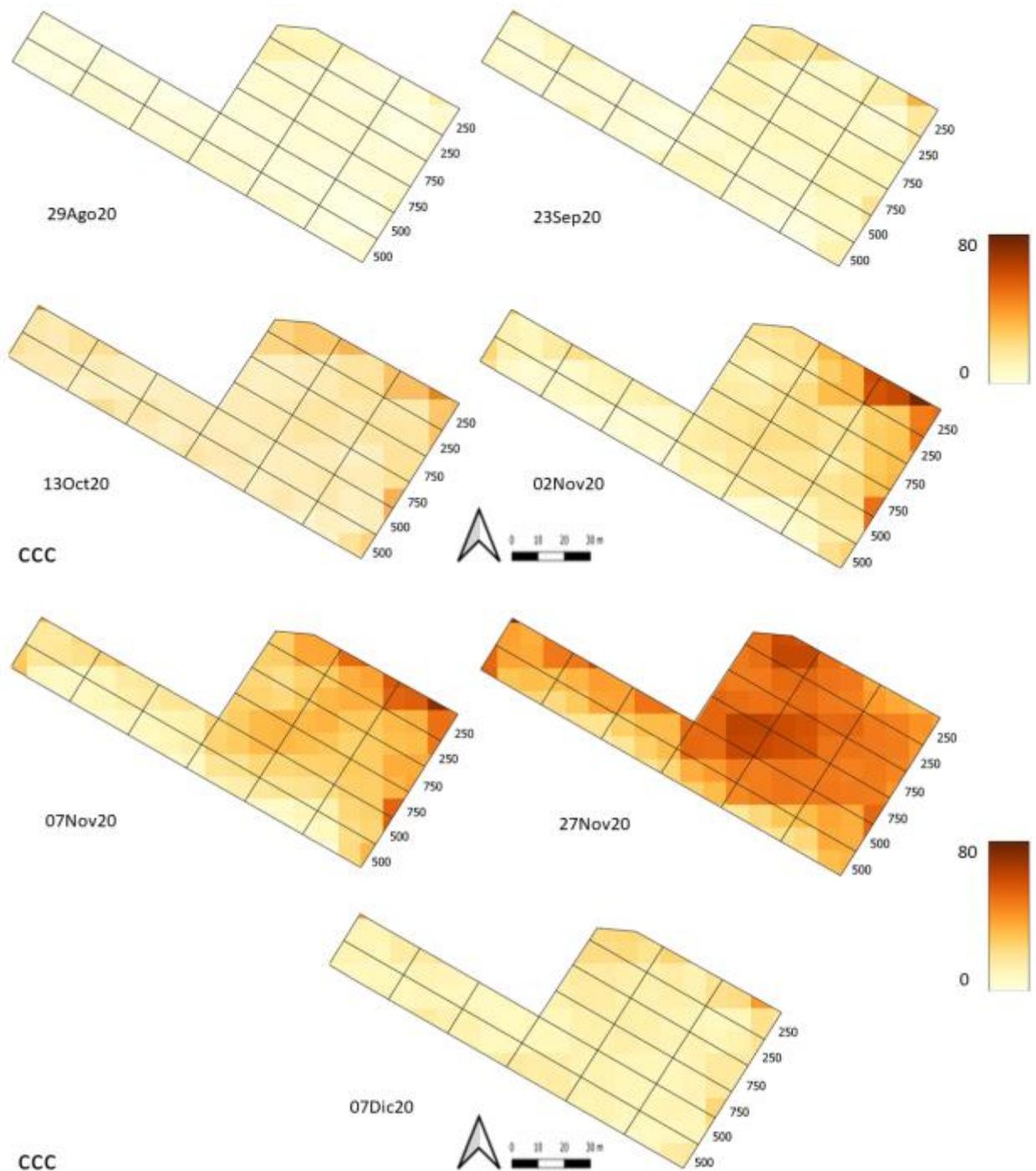


Figura 23. Serie temporal de imágenes CCC durante el ciclo del cultivo de cebolla.

3.2 Análisis de las variables biofísicas

Se realizaron los análisis estadísticos mediante comparación múltiples de medias post-hoc (LSD Fisher) de los datos de campo (Tabla 6) y satelitales (Tabla 7) para cada una de las variables en cada una de las fechas de muestreo utilizando software estadístico Infostat (Di Rienzo et al., 2010).

Además, se realizó el análisis estadístico mediante modelos de regresión utilizando los datos de septiembre a diciembre, correspondientes a los estadios de mayor desarrollo de la biomasa aérea del cultivo, entre el período vegetativo y la bulbificación (Fig. 24). La correlación datos de campo/satélite, para el ciclo de cultivo estudiado, mostró como resultado un coeficiente de determinación para LAI $R^2 = 0,40$, Fcover $R^2 = 0,59$ y CCC $R^2 = 0,48$ (Tabla 8).

Tabla 6. Análisis de variables obtenidas en los muestreos de campo.

Tratamiento	SPAD		Fcover		LAI	
			%			
Septiembre						
T	26,51 ± 2,83	a	3,42 ± 0,35	a	0,12 ± 0,05	ab
U250	30,26 ± 1,93	b	5,24 ± 1,82	b	0,11 ± 0,05	ab
U500	29,71 ± 1,25	ab	3,06 ± 0,20	a	0,04 ± 0,02	a
U750	31,90 ± 1,22	b	3,11 ± 0,31	a	0,13 ± 0,03	b
14- Octubre						
T	25,82 ± 3,27	a	5,33 ± 0,61	a	0,14 ± 0,09	a
U250	33,90 ± 0,92	b	13,79 ± 5,98	b	0,26 ± 0,07	ab
U500	36,01 ± 1,89	b	7,09 ± 1,82	a	0,32 ± 0,06	b
U750	37,47 ± 2,15	b	21,89 ± 2,73	c	0,32 ± 0,08	b
28- Octubre						
T	26,58 ± 0,76	a	11,79 ± 2,59	a	0,57 ± 0,18	a
U250	31,47 ± 1,57	b	26,01 ± 8,54	b	0,45 ± 0,08	a
U500	32,92 ± 2,66	b	19,90 ± 3,32	ab	0,43 ± 0,12	a
U750	34,22 ± 1,05	b	22,84 ± 3,34	b	0,39 ± 0,04	a
11- Noviembre						
T	26,82 ± 2,05	a	19,75 ± 0,03	a	0,27 ± 0,03	a
U250	32,02 ± 0,74	b	44,35 ± 0,15	bc	0,48 ± 0,15	b
U500	37,30 ± 1,03	c	32,34 ± 0,06	ab	0,48 ± 0,06	b
U750	37,93 ± 1,74	c	54,26 ± 0,03	c	0,89 ± 0,03	c
26- Noviembre						
T	29,00 ± 2,29	a	11,93 ± 0,09	a	0,38 ± 0,09	a
U250	30,90 ± 1,28	a	38,41 ± 0,13	b	0,99 ± 0,13	b
U500	33,55 ± 4,40	a	48,23 ± 0,25	b	1,00 ± 0,25	b
U750	33,87 ± 1,31	a	45,92 ± 0,1	b	0,84 ± 0,1	b
Diciembre						
T	25,28 ± 1,34	a	13,46 ± 0,06	a	0,54 ± 0,06	a
U250	28,64 ± 1,49	a	32,83 ± 0,25	bc	0,77 ± 0,25	a
U500	29,18 ± 4,30	a	33,45 ± 0,28	ab	0,94 ± 0,28	a
U750	34,71 ± 8,93	a	50,72 ± 0,34	c	0,72 ± 0,34	a

Se muestran valores medios ± DE (desvío estándar). Letras diferentes en una misma columna indican diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0,05$). Referencias de las abreviaturas utilizadas se indican en la Tabla 4.

Estudio satelital en cebolla: variables biofísicas como herramienta de fertilización

nitrogenada | Alejandro Pezzola | pezzola.alejandro@inta.gov.ar | ISSN 0328-3399 Informe técnico N° 70
Junio 2021

Tabla 7. Análisis de variables obtenidas de las imágenes satelitales.

Dosis	LAI		Fcover %		CCC	
Septiembre						
T	0,26 ± 0,01	a	6,26 ± 0,58	a	0,03 ± 0,01	a
U250	0,35 ± 0,04	c	12,13 ± 2,36	c	0,13 ± 0,06	b
U500	0,32 ± 0,03	bc	9,60 ± 0,97	b	0,09 ± 0,01	ab
U750	0,29 ± 0,02	ab	6,68 ± 0,57	a	0,06 ± 0,01	a
14- Octubre						
T	0,50 ± 0,02	a	13,9 ± 1,25	a	0,09 ± 0,01	a
U250	0,73 ± 0,10	b	22,91 ± 4,85	b	0,22 ± 0,07	b
U500	0,67 ± 0,11	b	16,24 ± 2,66	a	0,15 ± 0,06	ab
U750	0,66 ± 0,07	b	13,74 ± 0,72	a	0,15 ± 0,03	ab
28- Octubre						
T	0,18 ± 0,01	a	3,68 ± 0,77	a	0 ± 0	a
U250	0,52 ± 0,22	b	19,2 ± 9,25	b	0,19 ± 0,1	b
U500	0,42 ± 0,15	ab	13,69 ± 3,99	b	0,1 ± 0,09	ab
U750	0,36 ± 0,03	ab	10,83 ± 0,40	ab	0,05 ± 0,01	a
11- Noviembre						
T	0,21 ± 0,01	a	6,00 ± 1,17	a	0,03 ± 0,04	a
U250	0,71 ± 0,22	c	25,28 ± 5,26	c	0,31 ± 0,07	c
U500	0,53 ± 0,09	bc	19,71 ± 3,29	bc	0,24 ± 0,05	bc
U750	0,39 ± 0,03	ab	14,97 ± 2,20	b	0,20 ± 0,04	b
26- Noviembre						
T	0,59 ± 0,02	a	17,95 ± 1,60	a	0,20 ± 0,01	a
U250	1,01 ± 0,32	b	31,83 ± 6,30	b	0,38 ± 0,09	b
U500	1,13 ± 0,17	b	32,71 ± 3,38	b	0,41 ± 0,07	b
U750	0,95 ± 0,24	ab	28,72 ± 4,56	b	0,34 ± 0,09	b
Diciembre						
T	0,39 ± 0,07	a	13,78 ± 3,08	a	0,13 ± 0,06	a
U250	0,72 ± 0,21	b	30,13 ± 7,12	b	0,27 ± 0,09	b
U500	0,76 ± 0,11	b	32,08 ± 4,09	b	0,30 ± 0,05	b
U750	0,66 ± 0,09	b	28,10 ± 3,30	b	0,25 ± 0,05	b

Se muestran valores medios ± DE (desvío estándar). Letras diferentes en una misma columna indican diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0,05$). Referencias de las abreviaturas utilizadas se indican en la Tabla 4.

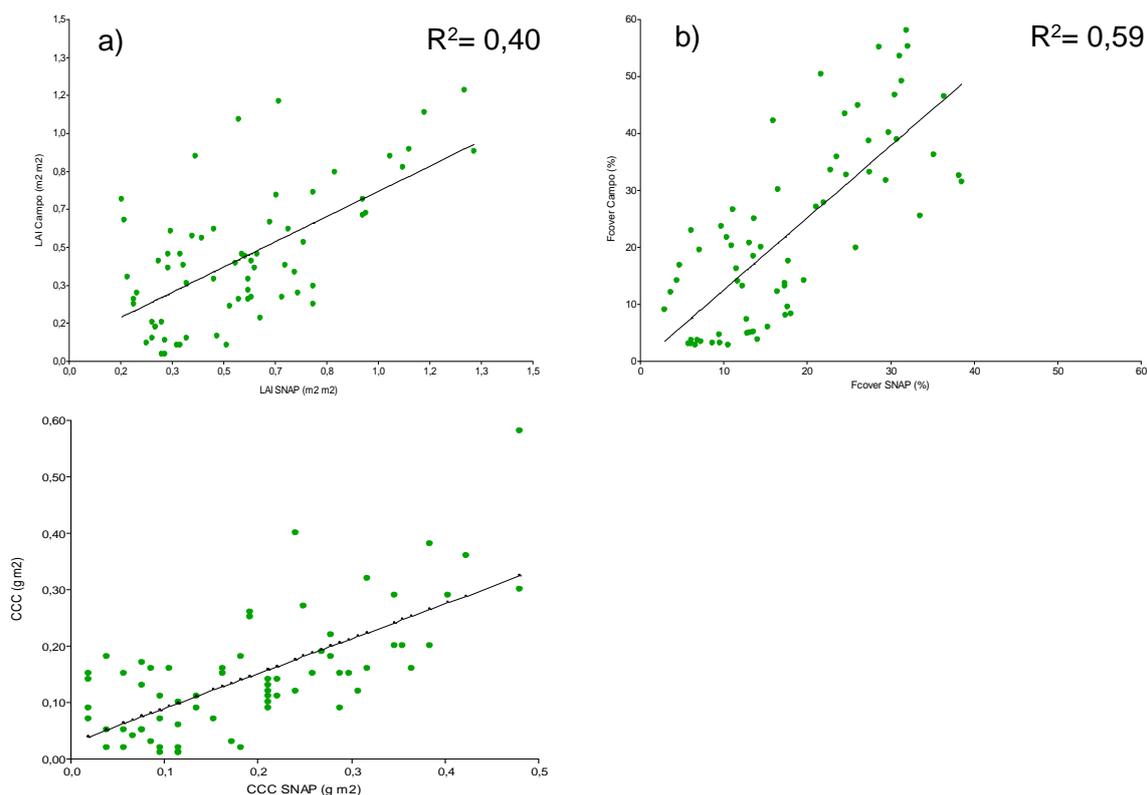


Figura 24. Modelo de regresión lineal ajustado para las variables analizadas: a) LAI b) Fcover c) CCC.

Tabla 8. Estadísticos de las regresiones ajustadas para el ciclo de cultivo 2020.

Variable	N	R ²	p-valor	RMSE	Modelo
LAI	68	0,40	<0,0001	0,28	$y = 0,09 + 0,64 x$
Fcover	68	0,59	<0,0001	14,02	$y = - 0,13 + 1,27 x$
CCC	68	0,48	<0,0001	0,10	$y = 0,04 + 0,59 x$

En este ciclo de ensayos, la tendencia en la correlación es semejante a los resultados obtenidos en el ciclo de cultivo del año anterior (2019). El Fcover es la variable que mejor correlaciona con los datos de campo. No obstante, las tres variables tienen una tendencia positiva conforme avanza el ciclo fenológico, con la máxima expresión en el mes de noviembre (Fig. 25).

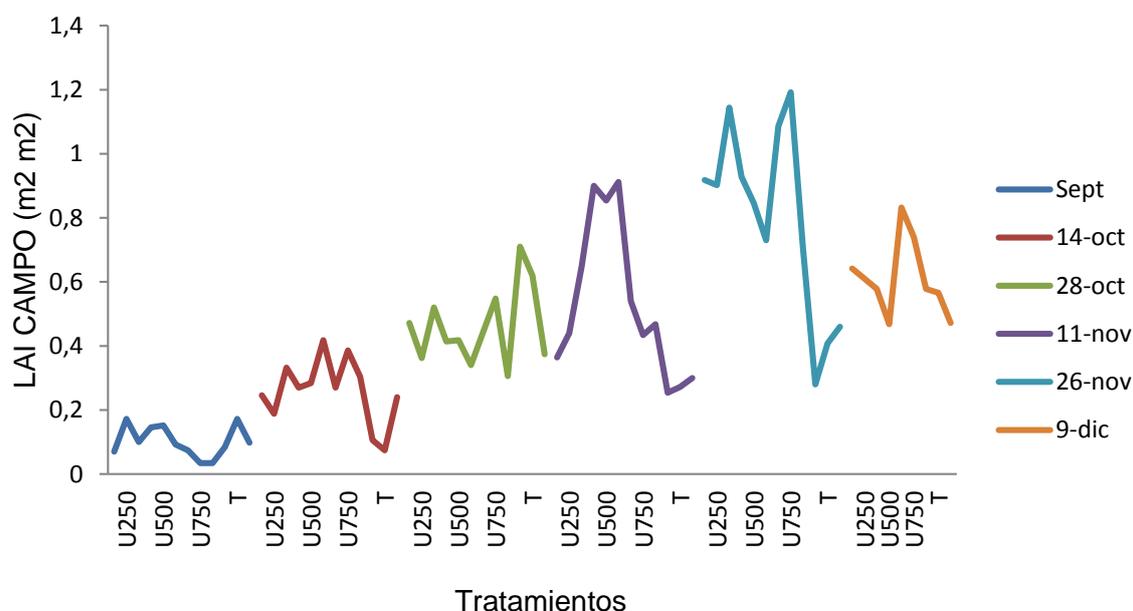
El LAI junto con el contenido de Chl, son indicadores del desarrollo vegetativo y de salud del cultivo. Puede ayudar a los productores, en cuanto a su variabilidad espacial dentro del lote, a programar la distribución de la fertilización N (Houlès et al., 2007; Delegido et al., 2011).

Estudio satelital en cebolla: variables biofísicas como herramienta de fertilización nitrogenada | Alejandro Pezzola | pezzola.alejandro@inta.gov.ar | ISSN 0328-3399 Informe técnico N° 70
Junio 2021

Como se puede observar en la serie temporal de la Figura 21, en el mapa de la imagen del 29-agosto-2020, a pocos días de la siembra, el LAI muestra que no hay masa vegetal verde, lo mismo ocurre con el Fcover y el CCC (Fig. 22 y 23). A medida que avanza el proceso vegetativo el valor del índice aumenta mostrando las diferencias según la dosis de N aplicada. En la medición de diciembre, vuelve a decrecer dado que, a pesar de estar la planta en el campo, se encuentra totalmente senescente y a pocos días de la cosecha (15-dic-2020).

En la Figura 25a se muestra la evolución del LAI en la imagen satelital. Se puede apreciar que en el mes de septiembre los valores de LAI son <0,40, aumenta hacia finales de noviembre con un rango entre 0,60 y 1,31 en el tratamiento U750 y disminuye en diciembre cercano a la cosecha.

Con respecto a los datos de campo mostrados en la Figura 26b se observa una sobreestimación de los datos en los meses de septiembre y octubre. Esto se explica dado que en esos meses la cobertura por malezas supera a la cobertura por las hojas de la cebolla.



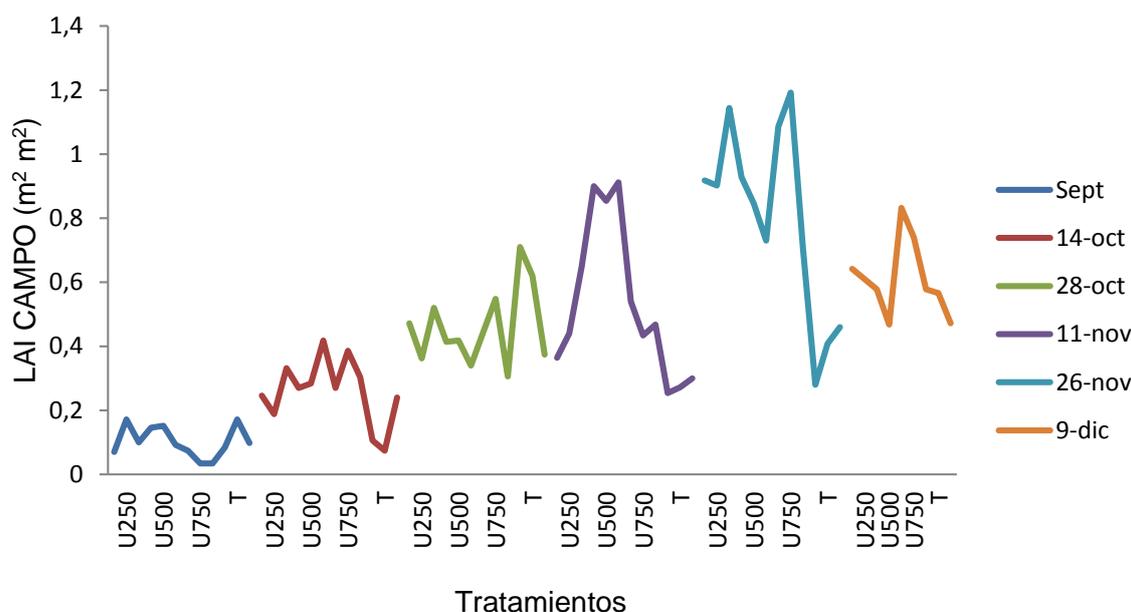


Figura 25. Evolución del índice LAI a lo largo del ciclo de cultivo del ensayo de cebolla 2020: a) LAI SNAP, b) LAI Campo.

3.2 Análisis de las variables de rendimiento

Se analizaron los componentes de rendimiento (N° de bulbos y peso) de los calibres comerciales de bulbos de cebolla (N° 2, 3, 4 y 5 norma MERCOSUR) de cada una de las parcelas (N= 12).

No se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos y el número de bulbos ($p > 0,05$) de las muestras cosechadas. El número de bulbos no se relaciona con el aporte de N aplicado fraccionadamente a partir de 2 o 3 hojas verdaderas, ya que la implantación del cultivo se realiza con PDA incorporado a la siembra (Caracotche, 2019). El N aplicado a partir de la tercera hoja verdadera es el que aporta al desarrollo de fotoasimilados en las hojas que luego se trasloca al bulbo.

Tabla 9. Rendimiento promedio de cebolla ($t\ ha^{-1}$) en el ciclo de cultivo.

Tratamiento	Rendimiento	
	$t\ ha^{-1}$	
T	17,00 ± 6,08	A
U250	52,67 ± 2,89	B
U500	57,00 ± 0,00	B
U750	68,33 ± 4,93	C

Se muestran valores medios ± DE. Letras diferentes en una misma columna indican diferencias significativas entre tratamientos ($p > 0,05$). Referencias de las abreviaturas utilizadas se presentan en la Tabla 5.

En cuanto al peso de los bulbos se encontraron diferencias significativas ($p < 0,0001$) entre los distintos tratamientos (Fig. 27). El T (17 t ha^{-1}) estuvo muy por debajo del promedio productivo zonal (45 t ha^{-1}) (Lucanera, 2018), y se diferenció estadísticamente de los tratamientos fertilizados con N, demostrando que la fertilización nitrogenada influye directamente en el rendimiento de la cebolla con un efecto directo en el desarrollo y calidad de los bulbos (Cardoso Prieto, 2017). Los tratamientos U500 (57 t ha^{-1}) y U250 (53 t ha^{-1}) fueron similares en cuanto a su rendimiento comercial.

El tratamiento U750 (68 t ha^{-1}) fue el que mayor rendimiento obtuvo diferenciándose de U250 y coincide con los valores obtenidos en lotes de cebolla de productores con alta adopción de tecnología (Galmarini et al, 2011; Orden, 2013). En este segundo año de ensayo la diferencia en valores absolutos entre la aplicación de U500 y U750 ha sido mayor que en la campaña 2019 debido a algunas cuestiones de manejo.

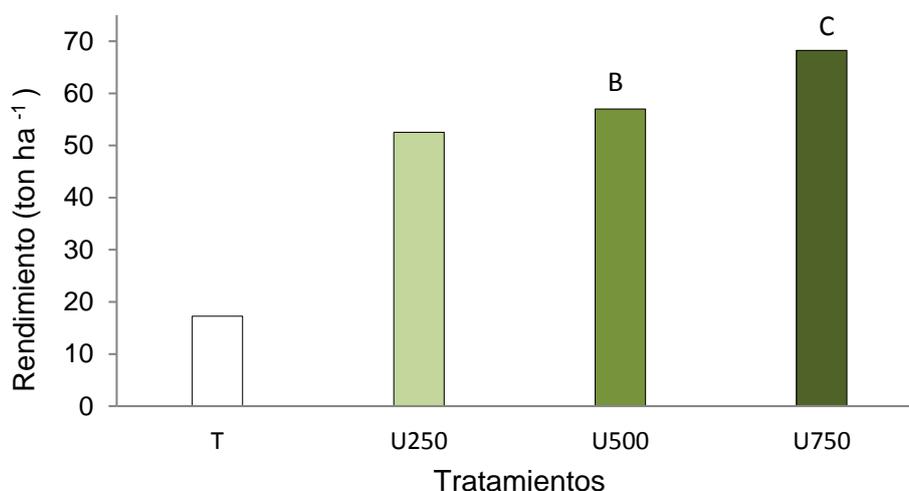


Figura 26. Rendimiento promedio de cebolla de día corto (t ha^{-1}) durante el ciclo de cultivo 2020.

4. Consideraciones finales

El segundo año de ensayo demostró que la metodología es adecuada y la resolución de 10 m del satélite Sentinel-2 es buena para estudios precisos en cultivos intensivos bajo riego. Las determinaciones de Chl en tejido vegetal en laboratorio no se ha podido realizar debido a la situación de la pandemia COVID-19. Dichos análisis, permitirán obtener un modelo de calibración más ajustado respecto a los datos que ofrece la imagen satelital (Gitelson et al., 2006; Hueles et al., 2007; Sylvain et al., 2017). Por otro lado, se deben calcular los índices de vegetación en diferentes condiciones meteorológicas y de suelo. Debido a que los índices están relacionados con la reflectancia de la luz solar del canopy del cultivo (Delegido et al., 2013) y las diferentes condiciones de iluminación, tipo de suelo, condiciones variables de manejo (riego, fertilización) producen diferencias en el crecimiento vegetativo y como consecuencia en la reflectividad (Houles et al., 2007), esto produce variaciones en los índices de vegetación, por lo que es necesario que sean ajustados y recalibrados para una aplicación generalizada en el cultivo de cebolla de un valle irrigado.

Estudio satelital en cebolla: variables biofísicas como herramienta de fertilización

nitrogenada | Alejandro Pezzola | pezzola.alejandro@inta.gov.ar | ISSN 0328-3399 Informe técnico N° 70
Junio 2021

5. Agradecimientos

A la empresa Profertil por el financiamiento del ensayo

A la Asociación Cooperadora de la EEA INTA Hilario Ascasubi, para la realización y ejecución de tareas de campo a través de la colaboración de Gustavo Urrutia, Paulo Mamani y César Lamas.

A José Moreno, Jesús Delegido y Nieves Pasqualotto del Laboratorio de Procesamiento de Imágenes, de la Universidad de Valencia, España; por estar presentes cada vez que se los consultó en un interesante intercambio de opiniones.

A Ramiro Vergara y Samanta Silva de CORFO por su buena predisposición para colaborar de forma interinstitucional en este ensayo.

A la empresa Grupo Cuatro S.A. por facilitarnos el equipamiento para la toma de imágenes aéreas mediante dron.

6. Bibliografía

Acquisition Plans Copernicus:

<https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-2/acquisition-plans>

BAFFONI P; P Varela y C Zelaya. 2012. Estudio preliminar de dos sistemas de riego por gravedad y su efecto sobre el rendimiento y la incidencia de podredumbre blanda en cebolla. Actas VI Jornadas de Actualización en Riego y Fertirriego. Mendoza, Argentina, 7 al 9 de noviembre de 2012.

BARET F., Buis S. 2008. Estimating Canopy Characteristics from Remote Sensing Observations: Review of Methods and Associated Problems. In: Liang S. (eds) Advances in Land Remote Sensing. Springer, Dordrecht.

BELLACCOMO, C.; Orden, L.; Pezzola, A.; Winschel, C.; Casella, A. 2020. Analysis of biophysical variables in onion crops (*Allium cepa*) with nitrogen fertilization by remote sensing. Horticultura Argentina 39 (100): 7-24.

BELLACCOMO, C. 2011. Siembra de cebollas en platabandas. Ed. INTA.

BRAGACHINI, M. 2014. Rol de las TICs y de la Agricultura y Ganadería de Precisión en el desarrollo del Sector Agroalimentario y Agroindustrial de Argentina. INTA EEA Manfredi. <https://inta.gob.ar/documentos/rol-de-las-tics-y-de-la-agricultura-y-ganaderia-de-precision-en-el-desarrollo-del-sector-agroalimentario-y-agroindustrial-de-argentina>.

CANTAMUTTO, M. 2010. Balance hidrosalino 2006-2009 Valle Bonaerense del Río Colorado. Corporación de Fomento del Valle Bonaerense del Río Colorado.

CAPPANNINI, D. A.; Lores, R. R. 1966. Los suelos del valle inferior del río Colorado (Provincia de Buenos Aires); Buenos Aires, Argentina.

CARACOTCHE, V. 2019. Recomendaciones técnicas para el cultivo de cebolla.

CARACOTCHE, V. 2020. Cebolla temprana en el valle bonaerense del río Colorado. Aspectos a considerar a la hora de tomar decisiones. Campaña 2020/21.

CARDOSO Prieto C. E., 2017. Evaluación de abonos orgánicos en el cultivo biológico de la cebolla (*Allium cepa* L.) en el sur de la provincia de Buenos Aires, Argentina.

Carta de suelos de la República Argentina: partido de Villarino: provincia de Buenos

Estudio satelital en cebolla: variables biofísicas como herramienta de fertilización

nitrogenada | Alejandro Pezzola | pezzola.alejandro@inta.gob.ar | ISSN 0328-3399 Informe técnico N° 70
Junio 2021

Aires / Darío Rodríguez [et al.]; editado por Darío Rodríguez; Guillermo Schulz; Lucas Moretti. - 1a ed. - Hurlingham, Buenos Aires: Ediciones INTA, 2018. Libro digital, PDF.

CASELLA A.; Pezzola A.; Horlent M.; Winschel C.; Ibañez G.; Silva S.; Loyra I. 2017. Segmentación de imágenes spot a partir de índices de vegetación para la cuantificación de cultivo de cebolla bajo riego en el Valle Inferior del Río Colorado”- SELPER 2016: XVII Simposio Internacional en Percepción Remota y Sistemas de Información Geográfica; - Luján: Ed UnLu, 2017.

CLEVERS, J.G., Gitelson A.A. 2013. Remote estimation of crop and grass chlorophyll and nitrogen content using red-edge bands on Sentinel-2 and -3. *Int. Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 23 (2013) 344–351.

CONFALONIERI R. 2013. Development of an app for estimating leaf area index using a smartphone. Trueness and precision determination and comparison with other indirect methods. *Computers and Electronics in Agriculture*, 96, 67-74

CONFALONIERI, R.; Francone, C.; Foi, M. 2014 The PocketLAI smartphone app: An alternative method for leaf area index estimation. In *Proceedings of the Copernicus. ESA*. <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-2/acquisition-plans> International Environmental Modelling and Software Society (iEMSs), San Diego, CA, USA, 15–19 June 2014; p. 6.

CORCOLES, J.F. Ortega, D. Hernandez, y M.A. Moreno, 2013. Estimation of leaf area index in onion (*Allium cepa* L.) using an unmanned aerial vehicle. *Biosystems Engineering*. 15: 31e42.

CORFO Río Colorado, UN Comahue, CURZA. 1996. Manejo de malezas y uso mínimo de herbicidas. CORFO UNC-CURZA.

DAUGHTRY, C.S.T., Gallo, K.P., Goward, S.N., Prince, S.D., Kustas, W.P., 1992. Spectral estimates of absorbed radiation and phytomass production in corn and soybean canopies. *Remote Sensing of Environment*, 39(2), pp. 141-152.

DELEGIDO, J., Verrelst, J., Alonso, L., Moreno, J. 2011. Evaluation of Sentinel-2 red-edge bands for empirical estimation of green LAI and chlorophyll content. *Sensors* 11, 7063–7081.

DELEGIDO J. Verrelst C.M. Meza J. P. Rivera L. Alonso J. Moreno. 2013. A red-edge spectral index for remote sensing estimation of Green LAI over agroecosystems. *European journal of Agronomy* 46 42-52.

DELHEY, R., Kiehr, M. y Frayssinet, S. 2015. Diagnóstico y manejo de enfermedades de cebolla. (a. el, Ed.) Bahía Blanca, Buenos Aires, Argentina.

DI RIENZO, J.A.; F., Casanoves; M.G., Balzarini; L., González; M., Tablada; C.W., ROBLEDO. 2010. InfoStat version (2016). Grupo InfoStat, FCA. Universidad Nacional de Córdoba. Córdoba, Argentina.

DUGHETTI, A. 2011. El manejo de las plagas de la cebolla en el Valle Bonaerense del Río Colorado. INTA H. Ascasubi. Hilario Ascasubi: INTA.

FAO. 2002 Marco para las buenas prácticas agrícolas. Segunda versión 2002. FAO <http://www.fao.org/ag/esp/revista/faogapes.pdf>

FAO. 2011. The State of the World's Land and Water Resources for Food and Agriculture. Managing systems at risk. Publicado por FAO y Earthscan, 2011. ISBN FAO: 978-92-

Estudio satelital en cebolla: variables biofísicas como herramienta de fertilización

nitrogenada | Alejandro Pezzola | pezzola.alejandro@inta.gov.ar | ISSN 0328-3399 Informe técnico N° 70
Junio 2021

- FAO. 2015. La FAO y la agenda Post 2015 y Objetivos de desarrollo Sostenible. http://www.fao.org/fileadmin/user_upload/post2015/14_themes_Issue_Papers/SP/Full
- FAOSTAT. 2020. Disponible en <http://www.fao.org/faostat/es/?#data/QC>.
- GALMARINI C 2011. Manual del cultivo de cebolla. Ed. INTA
- GAMIELY S., Randle W. M., Mills H. A., Smittle D.A. 1991. Rapid and non-destructive method for estimating leaf area of onions Hortscience, 26.
- GAVIOLA, Silvia. 1996. Influencia de la fertilización y el riego sobre aspectos cuali-cuantitativos de la reproducción de cebolla (*Allium cepa* L.) para la industria del deshidratado: (Tesis de Maestría). Mendoza, Universidad Nacional de Cuyo. Facultad de Ciencias Agrarias, INTA (Argentina).
- GITELSON, A.A., Keydan, G.P., Merzlyak, M.N., 2006. Three-band model for Noninvasive estimation of chlorophyll, carotenoids, and anthocyanin contents in higher plant leaves. Geophysical Research Letters 33, L11402,
- GODAGNONE, R. 1991. Carta detallada de suelos de la Estación Experimental Agropecuaria Hilario Ascasubi, Provincia de Buenos Aires. Escala 1:10000. Instituto de Suelos - CIRN - INTA Castelar.
- GONZÁLEZ-Esquiva. J.M.; J. Oates G.; García-Mateos C.B.; Moros-Vallec J.M.; Molina -Martínez A. Ruiz - Canalesb. 2017. Development of a visual monitoring system for water balance estimation of horticultural crops using low cost cameras.
- HORNECK. 2004. El manejo de nutrientes en cebolla. Ed. IPNI.
- HOULES, V., Guerif, M., Mary, B., 2007. Elaboration of a nitrogen nutrition indicator for winter wheat based on leaf area index and chlorophyll content for making nitrogen recommendations. European Journal of Agronomy, 27(1), pp. 1-11.
- IBÁÑEZ J. 2010. Fertilizantes Nitrogenados, Óxido Nitroso, Contaminación y Cambio Climático. <https://www.madrimasd.org/blogs/universo/2010/02/23/135447>
- KUCHARIK, C. J.; Norman, J. M.; Gower, S. T. 1998. Measurements of branch area And adjusting leaf area index to indirect measurements Agricultural and Forest Meteorology, pp. 69-88
- LANCASTER J. E., Triggs C. M., De Ruiter J. M, Gandar P. W. 1996. Bulbing in Onions: Photoperiod and Temperature Requirements and Prediction of Bulb Size and Maturity, Annals of Botany, Volume 78, Issue 4, Pages 423–430,
- LEYVA Chinchay, Lucas Saúl. 2015. Buenas prácticas agrícolas: uso de los fertilizantes nitrogenados en la minimización de la emisión de gases de efecto invernadero. Revista científica ingetecno. Vol. 4, núm. 1. (2015). Perú.
- LI, W.; Weiss, M.; Waldner, F.; Defourny, P.; Demarez, V.; Morin, D.; Hagolle, O.; Baret, F. 2015. A Generic Algorithm to Estimate LAI, FAPAR and FCOVER Variables from SPOT4_HRVIR and Landsat Sensors: Evaluation of the Consistency and Comparison with Ground Measurements. Remote Sens.7, no. 11: 15494-15516.
- LI-COR, 2012. Licor 2200 instruction manual, System.
- LUCANERA, G.M., Castellano, A.S. y Barbero, A. 2018. Banco de datos socioeconómicos de la zona de CORFO - Río Colorado, Estimación del P.B.I. Agropecuario Regional. Campaña 2018.
- MONDAL M. F., Brewster J. L, Morris G. E, Heather A. Butler B. 1986. Development in Onion (*Allium cepa* L.) III. Effects of the Size of Adjacent Plants, Shading by Neutral and

Estudio satelital en cebolla: variables biofísicas como herramienta de fertilización

nitrogenada | Alejandro Pezzola | pezzola.alejandro@inta.gob.ar | ISSN 0328-3399 Informe técnico N° 70
Junio 2021

Leaf Filters, Irrigation and Nitrogen Regime and the Relationship between the Red: Far-red Spectral Ratio in the Canopy and Leaf Area Index, *Annals of Botany*, Volume 58, Issue Pages 207–219.

MULLA, D.J., 2013. Twenty-five years of remote sensing in precision agriculture: Key advances and remaining knowledge gaps. *Biosystems engineering*, 114(4), pp. 358-371

ORDEN L., Bellacomo C., Caracotche V., Mairosser A., García D., Dunel L., Toribio M. 2013. Pérdidas de nitrógeno por volatilización y lixiviado: consecuencias en el rendimiento del cultivo de cebolla en el Valle Bonaerense del río Colorado. XXXVI Congreso Argentino de Horticultura 24 al 26 de septiembre de 2013 Tucumán, Argentina

ORLANDO, F.; Movedi, E.; Coduto, D.; Parisi, S.; Brancadoro, L.; Pagani, V.; Guarneri, T.; Confalonieri, R. Estimating leaf area index (LAI) in vineyards using the PocketLAI smart-app. *Sensors* 2016, 16, 2004. [CrossRef]

PADILLA, F., Peña-Fleitas, M., Gallardo, M., & Thompson, R. 2014. Evaluation of optical sensor measurements of canopy reflectance and of leaf flavonols and chlorophyll contents to assess crop nitrogen status of muskmelon. *European Journal of Agronomy*.

PASQUALOTTO, N.; D'Urso, G.; Bolognesi, S.F.; Belfiore, O.R.; Van Wittenberghe, S.; Delegido, J.; Pezzola, A.; Winschel, C.; Moreno, J. 2019. Retrieval of Evapotranspiration from Sentinel-2: Comparison of Vegetation Indices, Semi-Empirical Models and SNAP Biophysical Processor Approach. *Agronomy*, 9, 663.

PATRIGNANI, A. y Ochsner, T. 2015. Canopeo: A Powerful New Tool for Measuring Fractional Green Canopy Cover. *Agronomy Journal*, 107: 2312-2320.

SÁNCHEZ R. M. 2013. Estimación de los requerimientos hídricos de los principales cultivos en el valle bonaerense del río colorado informe técnico nº 40.

SILIQUNI, O. 2015. Evolución de algunos parámetros fisiológicos y productivos en cebolla (*Allium Cepa* L.) sembrada en forma directa a dos densidades y dosis de nitrógeno.

STEDUTO, P.; Hsiao T.C., Raes D., Fereres E. 2009. AquaCrop the FAO crop model to simulate yield response to water: I. Concepts and underlying principles *Agronomy Journal*, 101, pp. 426-437.

SYLVAIN Jay, Fabienne Maupas, Ryad Bendoula, Nathalie Gorretta. 2017. Retrieving LAI, chlorophyll and nitrogen contents in sugar beet crops from multi-angular optical remote sensing: Comparison of vegetation indices and PROSAIL inversion for field phenotyping. *Field Crops Research*, Elsevier, 2017, 210, pp.33-46. HAL Id: hal-01730271.

VARELA, P; Bongiovanni, M; Arbizu, S y Sánchez, R 2014 Evaluación de la eficiencia del riego gravitacional en el cultivo de cebolla. XXIV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo en Bahía Blanca Bs. As.

WEISS, M., Baret, F. 2016. S2toolbox Level 2 products: LAI, FAPAR, FCover Version 1 9ATBD) INRA. S2ToolBox Level 2 product.

Estudio satelital en cebolla: variables biofísicas como herramienta de fertilización

nitrogenada | Alejandro Pezzola | pezzola.alejandro@inta.gov.ar | ISSN 0328-3399 Informe técnico N° 70
Junio 2021

Acorde a la demanda de buenas prácticas agrícolas, la agricultura de precisión permite mejorar la eficiencia en la fertilización nitrogenada a partir del desarrollo de técnicas a campo y con el análisis de imágenes satelitales.

El objetivo es desarrollar métodos que proporcionen variables biofísicas como: índice de área foliar, factor de cobertura y contenido de clorofila en lotes de producción para utilizarlas como herramientas de diagnóstico y recomendación de fertilización nitrogenada en el cultivo de ciclo intermedio. Se realizó un ensayo de fertilización nitrogenada con diferentes dosis de urea granulada y donde se evaluaron las tres características biofísicas a campo y en imágenes satelitales de alta resolución Sentinel-2. Se calculó el rendimiento y se relacionaron todas las variables. En la correlación datos de campo/SNAP se obtuvo un R² de 0,40; 0,59 y 0,48 para LAI, Fcover y CCC respectivamente.

ISSN 0328-3399 Informetécnico N° 70



Ministerio de Agroindustria
Presidencia de la Nación