

# Cebolla: monitoreo de la fertilización nitrogenada con imágenes satelitales

Análisis de variables biofísicas como indicadores de calidad nutricional

Alejandro Pezzola, Luciano Orden, Carolina Bellacomo



# Cebolla: monitoreo de la fertilización nitrogenada con imágenes satelitales

Análisis de variables biofísicas como indicadores de calidad nutricional



Ministerio de Agricultura,  
Ganadería y Pesca  
Argentina

# Índice

<b>Resumen</b>	<b>3</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>4</b>
<b>2. Materiales y métodos</b>	<b>8</b>
2.1 Sitio experimental	8
2.2 Manejo del cultivo	11
2.3 Diseño experimental y análisis estadísticos	16
2.4 Variables de muestreo	17
2.4.1 Clorofila y tejido vegetal	18
2.4.2 Medición de la cobertura vegetal	19
2.4.3 Medición del índice de área foliar	20
2.4.4 Vuelos con dron	20
2.4.5 Imágenes Sentinel-2 y productos de SNAP nivel 2A	22
2.4.6 Cosecha	23
<b>3. Resultados y discusión</b>	<b>24</b>
3.1 Análisis de las variables biofísicas	24
3.2 Análisis de las variables de rendimiento	33
<b>4. Conclusiones</b>	<b>35</b>
<b>5. Agradecimientos</b>	<b>36</b>
<b>6. Bibliografía</b>	<b>37</b>

## **Cebolla: monitoreo de la fertilización nitrogenada con imágenes satelitales. Análisis de variables biofísicas como indicadores de calidad nutricional.**

Alejandro Pezzola, Luciano Orden, Carolina Bellacomo, Cristina Winschel, INTA Hilario Ascasubi.  
Alejandra Casella, INTA Castelar.

### **Resumen**

En el valle bonaerense del río Colorado, dentro de los cultivos intensivos, la cebolla cumple un rol importante en el Producto Bruto Interno (PBI) de 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 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 fertilizante urea granulada + inhibidor de ureasa donde se evaluaron las tres características biofísicas a campo y en imágenes 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 0,87; 0,96 y 0,79 para LAI, Fcover y CCC respectivamente.

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

### **Abstract**

In the Buenos Aires valley of the Colorado river, within intensive crops, onion plays an important role having a large participation in the GDP for the districts of Villarino and Patagones in the province of Buenos Aires. Production requires a high quantity of inputs and irrigation application, according to demand for good agricultural practices. Precision agriculture allows improving the efficiency in nitrogen fertilization from the development of techniques in the field and with the analysis of satellite images. The objective is to develop methods that provide biophysical variables such as leaf area index, coverage factor and chlorophyll content in production batches to use them as diagnostic tools and recommendation of nitrogen fertilization in intermediate cycle cultivation. A nitrogen fertilization test was carried out with different doses of granulated urea and urea granulada + inhibidor de ureasa fertilizer, where the three biophysical characteristics were evaluated in the field and on high-resolution Sentinel-2 images. Yield was calculated and all the variables were related. The field data/SNAP correlation gave an  $R^2$  of 0,87; 0,96 and 0,79 for LAI, Fcover and CCC, respectively.

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

## 1. Introducción

La cebolla es un cultivo ampliamente extendido en todo el mundo. Es la segunda hortaliza más producida a nivel mundial. Se cultiva en más de 175 países. Argentina se destaca entre los exportadores de cebolla fresca y deshidratada de América Latina (FAOSTAT, 2020). Esta hortaliza tiene un mercado bastante dinámico en el MERCOSUR, siendo Brasil el principal importador y Argentina su mayor proveedor (Iurman, 2012). Las cebollas se exportan en grandes cantidades a considerables distancias dado que no son tan perecederas como otras hortalizas.

Argentina presenta ventajas comparativas para producir cebolla, ya que cuenta con distintas zonas con fotoperiodos variables permitiendo sembrar materiales con producción alternada asegurando el autoabastecimiento (Lozano, 2017). Se siembran anualmente entre 16 y 20 mil hectáreas de cebolla siendo la hortaliza argentina de mayor exportación en volumen y tercera en cuanto a su valor comercial. Las zonas productivas van ingresando al mercado en distintos momentos ofreciendo un 60-70% en el mercado interno y exportando el excedente. El principal destino histórico de las exportaciones de cebolla es Brasil, luego le siguen otros países de Sudamérica.

En el valle bonaerense del río Colorado (VBRC), provincia de Buenos Aires se siembran entre 8 y 10 mil ha de cebolla anualmente entre los partidos de Villarino y Patagones, (Casella *et al.*, 2017) con un rendimiento promedio de 45 t ha<sup>-1</sup> (Lucanera *et al.*, 2018). En los últimos años, a superficie sembrada decreció cerca de 16 mil ha a fines de la década pasada a los valores actuales. El 85% de la cebolla exportada por el país proviene de la región protegida patagónica de las provincias de Buenos Aires y de Río Negro, siendo el valle bonaerense del río Colorado la zona productora más importante. La cebolla es la actividad de mayor aporte al producto regional del valle.

El nitrógeno (N) es un nutriente fundamental en las especies vegetales por lo que en general debe ser incorporado al suelo a modo de fertilizante para mejorar el crecimiento de la masa vegetal y proporcionar mayor contenido de clorofila (Cardoso Prieto, 2017). Este nutriente es un determinante importante en el inicio de la formación del bulbo de la cebolla (*Allium sp*), su tamaño y la madurez son características claves en esta hortaliza (Lancaster, 1996).

El vigor inicial y la homogeneidad de la emergencia se incrementan con los fertilizantes combinados de N y fósforo (P). Esto impacta favorablemente en la capacidad productiva de cada planta. Por este motivo, y por ser el P de alto poder residual, se recomienda la aplicación de fosfato diamónico (PDA: 18-46-0) a la siembra. En cambio, la fertilización de N debe iniciarse a partir de la tercera hoja verdadera, en 2 o 3 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).

El desafío actual es optimizar el uso de fertilizantes y disminuir contaminantes tanto en el suelo como en el aire (FAO, 2000). En la agricultura, el principal gas de efecto invernadero (GEI) es el dióxido de nitrógeno ( $\text{NO}_2^-$ ). La proporción de las emisiones de  $\text{NO}_2^-$  provenientes directamente de áreas cultivadas, inducida por la fertilización, son estimadas en aproximadamente un 23% a nivel mundial (Leyva Chinchay, 2017).

Dentro de los principios científicos de las buenas prácticas agrícolas (BPA) se encuentra el manejo de fertilizantes. La base para un buen manejo descansa sobre los siguientes principios: la fuente adecuada, en la dosis correcta, en el momento preciso, y con la localización correcta.

En este contexto la agricultura de precisión permite mejorar la eficiencia en la fertilización N 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).

Además, el LAI 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., 2007a; 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 ( $\text{gr m}^{-2}$ ) / LAI verde ( $\text{m}^2 \text{ m}^2 \text{ de hoja}^{-1}$ ).

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 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. 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, el periodo de revisita es de 5 días (Copernicus, ESA, 2014). Las bandas en el borde rojo (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., 2012).

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), región 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).

Recientemente, dentro del software libre SNAP, 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 (LAI:  $R^2= 0,70$  y CCC:  $R^2= 0,75$ ) de acuerdo a los trabajos recientemente publicados por Pasqualotto et al. (2019).

Para desarrollar un método adecuado capaz de proporcionar el LAI de forma sistemática en lotes de producción de cebolla es necesario calibrar y validar esos índices en el cultivo con una resolución espacial más precisa y con medidas a lo largo del periodo vegetativo próximas al pasaje del satélite (Verrelst, 2015). De forma similar, para la estimación de Chl por teledetección es necesario medir la Chl en un determinado momento en diferentes condiciones de aporte de N, estrés hídrico, o enfermedades a lo largo del periodo vegetativo. Esto permite calibrar y validar índices que nos posibilita obtener mapas de Chl a partir de las imágenes satelitales (Pasqualotto et al., 2019).

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 (EEA) Hilario Ascasubi del INTA (*Allium cepa* L. cv Torrentina) en la temporada 2019-2020 en un lote de 2,2 ha en un sector destinado a la producción agrícola a cargo de la Asociación Cooperadora de la EEA Hilario Ascasubi del INTA (Fig. 1 y 2). Los cultivos precedentes fueron girasol (2018-19) y maíz (2017-18). El tipo de suelo es Hapludol Éntico de textura franco arenosa, perteneciente a la serie La Merced (Cappannini, 1966; Codagnone, 1991) y sus características pueden verse en la Tabla 1. (Rodríguez *et al.*, 2018). La temperatura media anual es de 15°C y la precipitación media anual de 483,5 mm (1966-2019). Los registros climatológicos históricos y del ciclo del ensayo consecutivo se muestran en la figura 3. El lugar de estudio fue considerado edafo-climáticamente representativo del VBRC (Sánchez *et al.*, 1998)

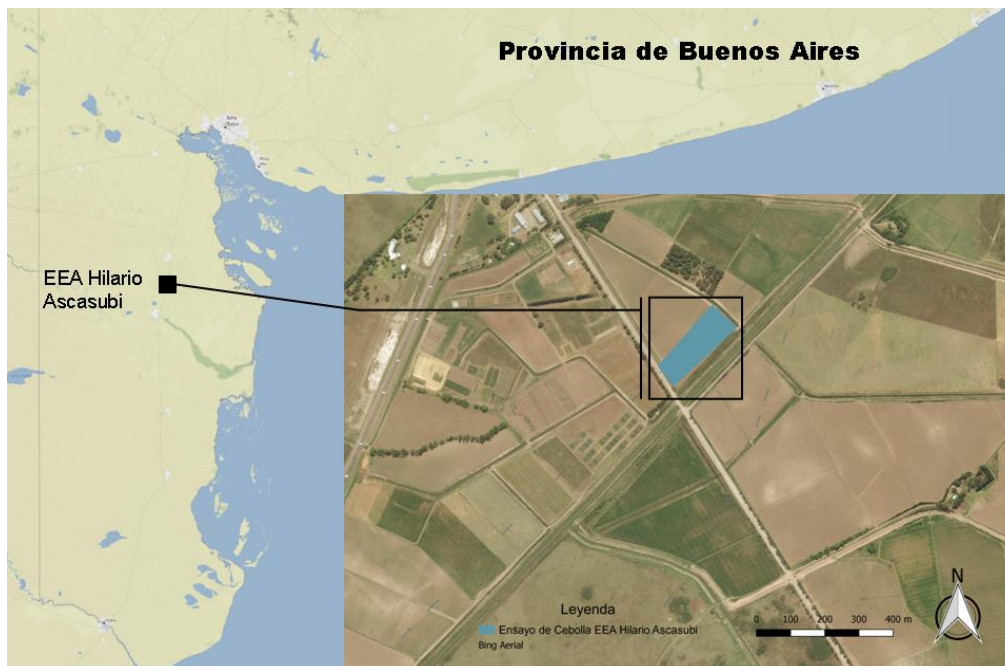


Figura 1. Ubicación geográfica del sitio de ensayo.

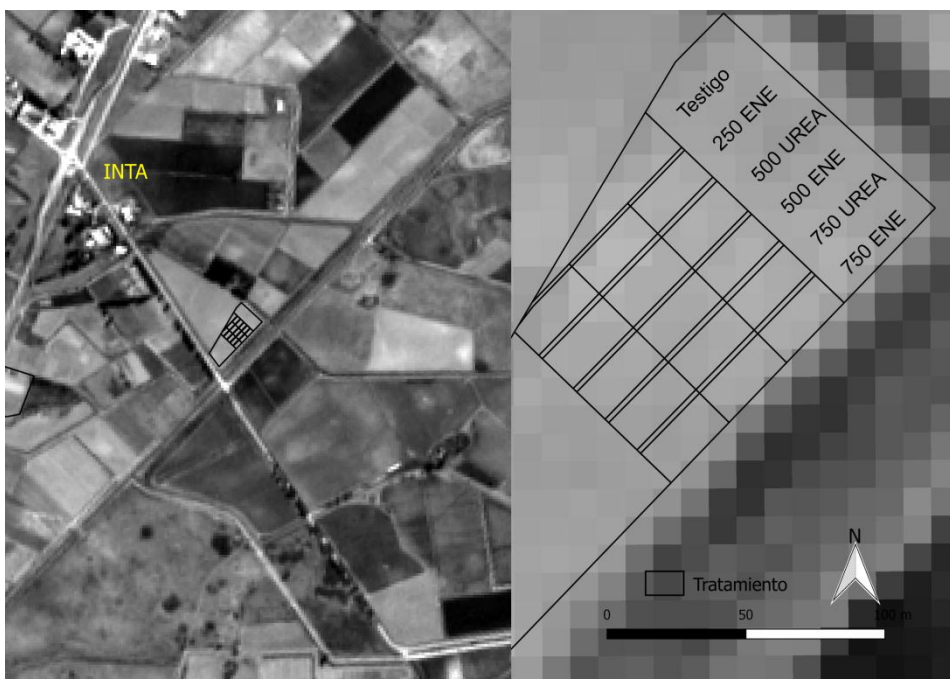


Figura 2. Ubicación del ensayo sobre una imagen de alta resolución (Google Earth®).

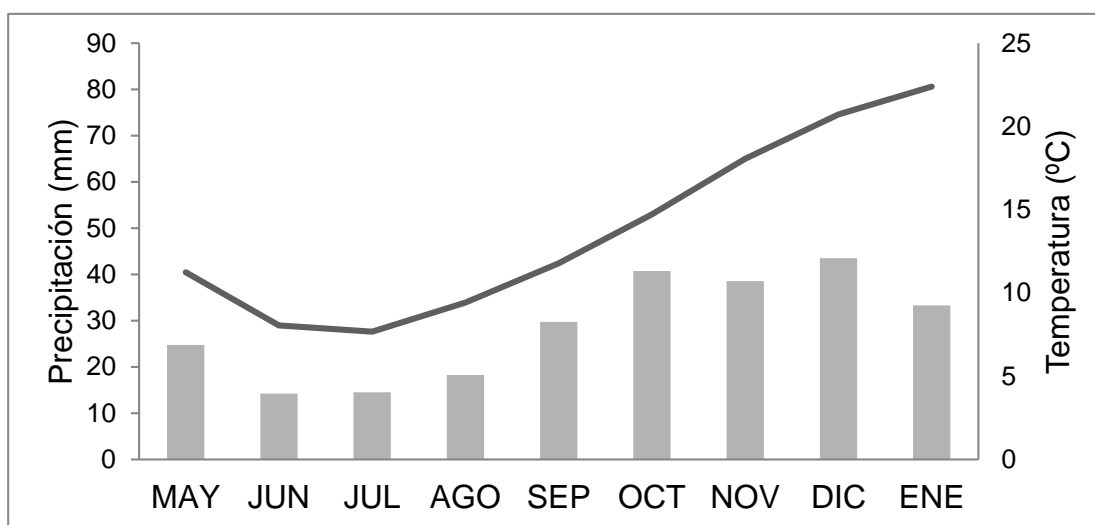
**Tabla 1:** Características edáficas del sitio de ensayo.

pH	C.E.	MO	N <sub>ot</sub>	Pe
	dS m <sup>-1</sup>		%	mg kg <sup>-1</sup>
7,8	0,70	1,35	0,35	13

C.E.: conductividad eléctrica, C<sub>ot</sub>: carbono orgánico, N<sub>ot</sub>: nitrógeno total Kjeldahl, Pe: fósforo extraíble.

La Merced es un perfil que 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 de Buenos Aires, con pendientes que oscilan entre el 0 y el 1 %. Es un perfil profundo, formado a partir de materiales de textura areno franca a franco arenosa. Presenta permeabilidad moderadamente rápida y es algo excesivamente drenado. Claro-suave; pardo grisáceo oscuro (10YR 3/3) en húmedo; arenoso franco; bloque subangulares, medios débiles; friable en húmedo, no plástico, no adhesivo; con moderada cantidad de raíces.

a)



b)

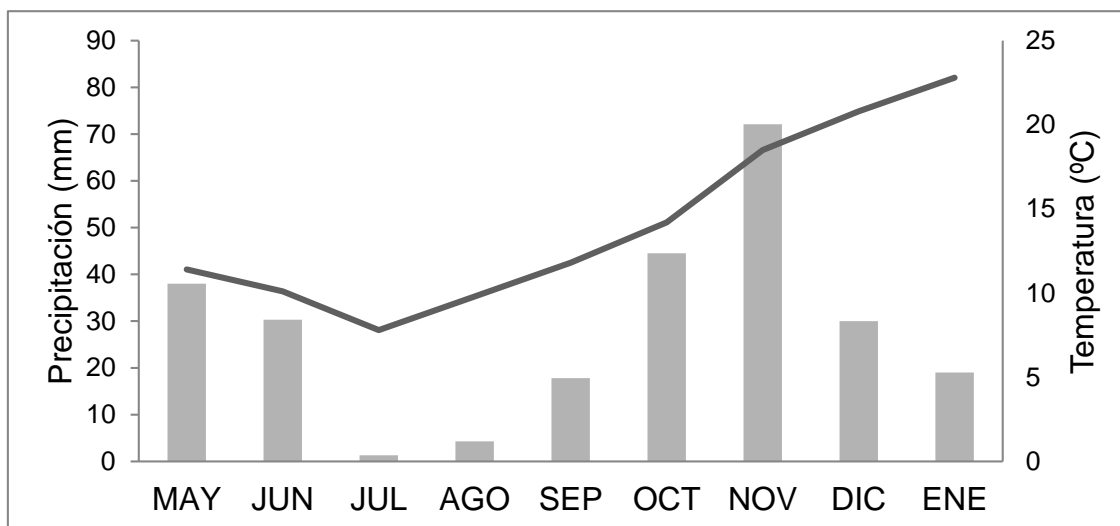


Figura 3. Diagramas ombrotérmicos: a) 1966-2020; b) 2019-2020. Las barras grises corresponden a la precipitación y las líneas negras a la temperatura. Datos provistos por el área de meteorología del INTA Hilario Ascasubi.

Se realizaron labores previas a la siembra en el lote durante el mes de marzo y abril de 2019 con el objeto de controlar las malezas y acondicionar el suelo, estas incluyeron: rastra de discos, cincel y rastra de dientes. Además, se realizó la conformación de bordos para delimitar los diferentes tratamientos experimentales y facilitar el riego.

La siembra se realizó el 3 de mayo de 2019 de forma mecanizada con una sembradora para hortalizas con dosificación mecánica con rodillo cilíndrico de eje horizontal y capacidad variable, en 12 líneas sobre tablón de 1,2 m de ancho. La máquina estaba provista de una tolva fertilizadora con dosificadores tipo chevrón para la incorporación de fertilizantes granulados en

línea y una tolva para la aplicación de insecticidas granulados de distribución junto a la semilla (Fig. 4). Se utilizó semilla de la variedad Torrentina, con un poder germinativo de 86% y un peso de mil semillas de 3,7g (datos provistos por el Laboratorio de Semillas NTA H. Ascasubi). La densidad de siembra fue de 5 kg ha<sup>-1</sup>, junto con la semilla se incorporó insecticida clorpirifós (Lorsban 10 G) (Dughetti, 2011) en una dosis de 7,8 kg ha<sup>-1</sup> y se incorporó el fertilizante en ese mismo momento en una dosis de 160 kg ha<sup>-1</sup> de PDA (Fig. 5 y 6). El 13 de mayo se aplicó herbicida pre emergente mediante una pulverizadora de arrastre utilizando pendimetalin (Herbadox) en una dosis de 3 l ha<sup>-1</sup>.



Figura 4. Regulación y calibración de la máquina sembradora hortícola.



Figura 5. Siembra del lote de cebolla. Verificación de la densidad y profundidad de siembra.

## 2.2 Manejo del cultivo

Como la urea es la principal fuente de N (46%) se debe tener presente que en contacto con el suelo se producen una serie de reacciones químicas que generan su volatilización (se pierde de forma gaseosa). Debido a eso debe ser incorporada al suelo lo más rápido posible para aumentar la eficiencia. Es por eso que el sistema de aplicación al voleo o en cobertura es eficiente si se riega inmediatamente para que el agua disuelva y se incorpore en el suelo el

fertilizante. Los surcos permiten la incorporación del fertilizante al enterrarlo con el aporcado, mientras que las siembras en plano (tablones) que se realizan en el VBRC se encuentran limitadas de esta posibilidad.

El riego es uno de los factores que más incidencia tiene sobre el rendimiento (Baffoni *et al*, 2012) (Fig. 7). La cebolla posee un sistema radical de escasa profundidad y en consecuencia poco eficiente, 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).



Figura 7. Riego por gravedad del lote de cebolla.

Las prácticas de manejo del cultivo fueron representativas del manejo convencional de lotes de cebolla productivos en el VBRC (Tabla 2). Se aplicaron riegos por gravedad en 5 momentos durante el ciclo del cultivo, distribuyéndose desde fines de agosto a diciembre (Fig. 8). La calidad del agua de riego del río Colorado se observa en la Tabla 3 (Datos provistos por el Laboratorio de Suelos y Aguas del INTA H. Ascasubi). Las condiciones de Hilario Ascasubi son:  $ET_0 \cong 1-3 \text{ mm día}^{-1}$  en los meses de fin de invierno principio de primavera y frecuencia de riego mayor a una vez por semana, el  $K_c$  (inicial)  $\cong 0,4- 0,7$ .

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, distribuyendo a lo largo y ancho de la parcela a medida que se infiltra (González-Esquiva, 2017).

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) (Fig. 9).

Tabla 2: Características físico químicas de agua de riego del ensayo.

Ciclo	pH	CE dS m <sup>-1</sup>	ST	Ca <sup>+</sup>	Mg <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	RAS %
						mg L <sup>-1</sup>				
2019/20	8,23	1,37	917	120	24	178	4,2	117	210	3,52

pH: potenciometría, CE: conductividad eléctrica, conductimetría, ST: Sales totales, calculado a partir de la CE, Ca y Mg: complejometría, Na y K: fotometría, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> y Cl<sup>-</sup>: titulación ácido-base. RAS: relación adsorción de sodio, calculado a partir de los cationes.



Figura 8. Detalles de los sifones utilizados para los riegos por gravedad.

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

Momento	Actividad	Labor	Implemento	Unidad	Dosis
Pre siembra	Barbecho	Acondicionamiento del suelo	Cinzel		2
			Rastra de discos	Nº pasadas	1
			Rastra de dientes		1
			Bordos		1
	Riegos	Sifones por gravedad	Lámina	mm	200
Siembra	Siembra	Semilla	cv. Torrentina	kg ha <sup>-1</sup>	5

	Fertilizante	PDA (18-46-0)		160
	Insecticida	Clorpirifós		7,8
Pre emergencia		Pendimetalin	l ha <sup>-1</sup>	3
Vegetativo 6-8 hojas 30-sept-2019	Herbicida	Fluroxipyr	cm <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup>	700
		Oxifluorfen		300
Vegetativo 8-10 hojas 05-nov-2019	Pulverización	Fluroxipir	l ha <sup>-1</sup>	1
		Aclonifen	cm <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup>	700
		Insecticida	Tiametoxam + lambdacialotrina	cm <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup>
Bulbificación 22-nov-2019	Funguicida	Mancozeb + metalaxil	kg ha <sup>-1</sup>	2
Maduración 03-ene-2019	Cosecha mecanizada	Arrancado e hilerado	Nº pasadas	1

La siembra en planos se realiza sobre tablonces de 1,60 metros (ancho útil de 1,20 metros). La aplicación de urea y urea granulada + inhibidor de ureasa fueron al voleo y sin incorporar de forma manual en las unidades experimentales y mecanizada en el resto del lote (Fig. 10 y 11), con humedad en el suelo luego de un riego o previo a una lluvia para su mejor disolución y evitar grandes pérdidas por volatilización ya que como se mencionó anteriormente las pérdida de N por volatilización del gas amoníaco (NH<sub>3</sub>) puede ser la principal causa de la baja eficiencia de algunos fertilizantes amoniacales (Orden, 2013).

La aplicación se realizó fraccionada para que no haya pérdidas por lixiviación y la planta de cebolla, que cuenta con escaso desarrollo radicular, pueda absorber el N de forma escalonada y evitar el lixiviado a la napa freática. (Ibáñez, 2010).

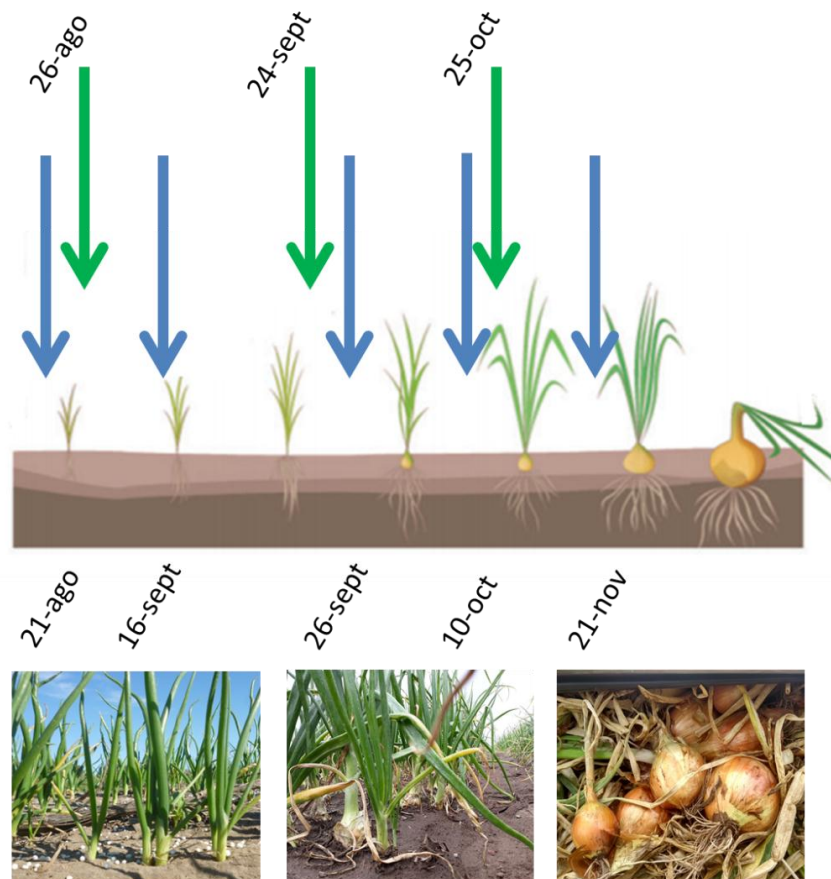


Figura 9: Ciclo fenológico del cultivo de cebolla. Con flechas azules se indican las fechas de riegos y con flechas verdes las fechas de fertilización nitrogenada.

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, ya que las cebollas crecen más lentamente que las malezas. Las malezas juegan un papel fundamental dentro de los factores que contribuyen a la pérdida de plantas de cebolla y disminución del rendimiento (CORFO, 1996, Caracotche, 2020).

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. Dadas las condiciones climáticas fueron favorables para la aparición de enfermedades de hojas, para la prevención y cura se aplicó fungicidas de acción sistémica y de contacto (Delhey, 2015).





Figura 10. Aplicación de forma manual de fertilizantes N en las parcelas experimentales.



Figura 11. Aplicación mecanizada de fertilizantes N (primera fertilización: 26-ago-2019) sobre el lote de cebolla.

### 2.3 Diseño experimental y análisis estadísticos

El diseño experimental utilizado fue en bloques completos de cinco tratamientos con tres repeticiones y una parcela control (Tabla 4). La superficie de cada uno de los tratamientos fue de 450 m<sup>2</sup> (10 tablones de 30 m de longitud). Las unidades experimentales estuvieron separadas mediante bordos para evitar la deriva de fertilizante N (Fig. 12). Las aplicaciones de fertilizante N se realizaron manualmente, fraccionadas en tres momentos durante la etapa vegetativa.

Para todas las variables muestreadas se realizó la comparación de medias utilizando el test de DMS de Fischer, mediante el software Infostat (Di Rienzo et al., 2016). Se ajustaron modelos de regresión entre las variables de campo y las de satélite utilizando software Curve Expert Professional v.2.4.0 (Hyams, 2016).

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

Tratamiento	Fertilizante	kg N ha <sup>-1</sup>
T	Control	0
U250	Urea Granulada	250
U500		500
U750		750
E500	Urea Granulada + Inhibidor de Ureasa	500
E750		750

## 2.4 Variables de muestreo

Se realizó el seguimiento de variables biofísicas durante el ciclo del cultivo tomándose como referencia el momento de adquisición de imágenes de acuerdo a la efeméride del satélite Sentinel-2 (Tabla 5).

Tabla 5: Descripción de los muestreos biofísicos.

Muestreo	Fecha		Ciclo del Cultivo	
	Campo	Satélite		
1	25-sept-19	24-sept-19	Vegetativo hojas	4-6 hojas
2	24-oct-19	24-oct-19		6-8 hojas
3	15-nov-19	18-nov-19		8-10 hojas
4	06-dic-19	08-dic-19	Bulbificación	
5	06-ene-20	02-ene-20	Cosecha	

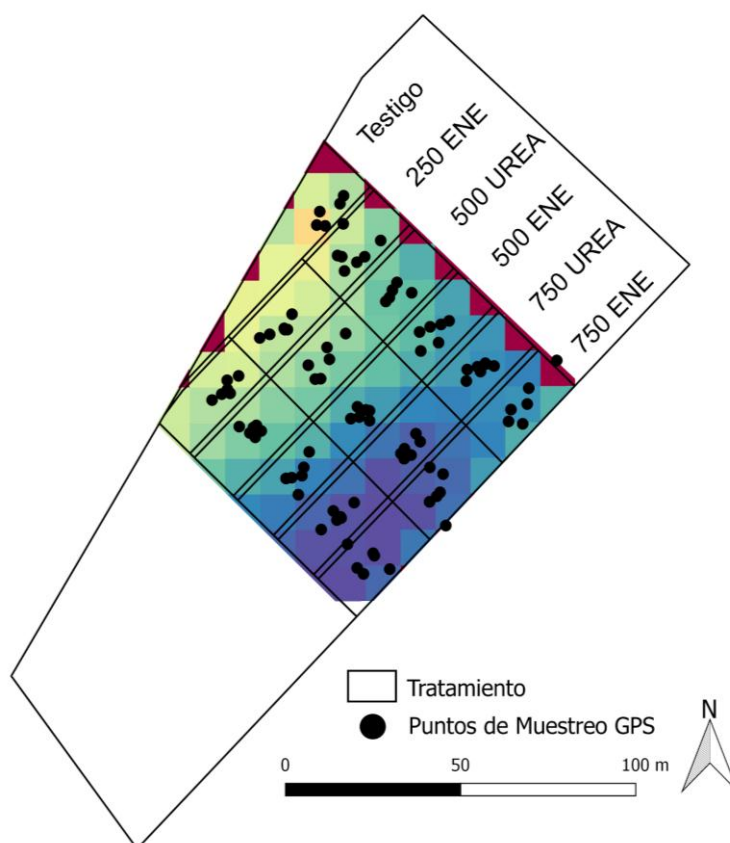


Figura 12. Ensayo experimental y puntos de muestreo de variables biofísicas delimitadas sobre una imagen de Sentinel-2.

### 2.4.1 Clorofila y tejido vegetal

Para la estimación de Chl, se utilizó el instrumental SPAD Minolta® 502 (Fig. 13). 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 con el instrumental SPAD de 6 puntos de muestreo referenciados desde la base al ápice de la misma. (Gamiely, 1991).

Esta medición no se realizó en el mes de noviembre debido a la falta de disponibilidad del instrumental de campo y la coordinación con la efeméride del satélite para comparar con el indicador correspondiente. Luego, cada una de las plantas (N= 90) se secó en una estufa a 60 °C para la determinación de N total en tejido vegetal (datos no publicados) (Fig.14).



Figura 13. Toma de datos sobre área foliar mediante SPAD.



Figura 14. Toma de muestras tejido vegetal área foliar.

## 2.4.2 Medición de la cobertura vegetal

El porcentaje de cobertura vegetal que alcanzó el cultivo se midió utilizando la app Canopeo. Esta aplicación fue desarrollada por Patrignani y Ochsner (2015) utilizando Matlab y se basó en relaciones de color de rojo a verde (R/G) y azul a verde (B/G) y un índice de exceso de verde ( $2G-R-B$ ). En el ensayo se tomaron fotografías y videos a una altura desde el suelo a 60 cm para todas las parcelas experimentales (Fig. 15). En cada parcela se tomó al azar una fotografía y se obtuvo un video con el resultado del porcentaje de cobertura que arrojó la secuencia de 20 fotografías. La aplicación presenta la imagen original y la imagen procesada, donde la cobertura vegetal se representa mediante píxeles blancos (Fig. 16 y 17).



Figura 15. Medición de cobertura mediante app.



Figura 16. Canopeo 16% de cobertura (24-oct-2019)



Figura 17. Canopeo 41% de cobertura (15-nov-2019)

### 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). Se eligieron 3 lugares al azar en cada una de las parcelas de los distintos tratamientos. Se configuró la aplicación para realizar lecturas de 9 repeticiones por cada uno de esos sitios y de las cuales solo se obtiene 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. 18). Estas imágenes fueron procesadas utilizando un algoritmo interno de segmentación que da como resultado un promedio de las 9 lecturas.



Figura 18. Medición del LAI mediante la app utilizando un smartphone

### 2.4.4 Vuelos con Dron

Como trabajo adicional, el 14 de noviembre de 2019 se realizó un vuelo fotográfico exploratorio con un vehículo aéreo no tripulado de ala fija (UAV por sus siglas en inglés) Sensefly eBee Classic® (Fig. 19). La altura de vuelo fue de 130 m snm con el objetivo de obtener una resolución espacial de 6 cm. Se empleó una cámara fotográfica Cannon® modificada donde la

banda roja es reemplazada por la IRC (Von Bueren, 2015) para obtener imágenes RGB, NIR y NDVI (La Casa, 2016). Esta modificación permite a la cámara capturar la luz azul, verde e infrarrojo cercano para el uso en análisis de estrés de la vegetación (Fig. 20 a y b).

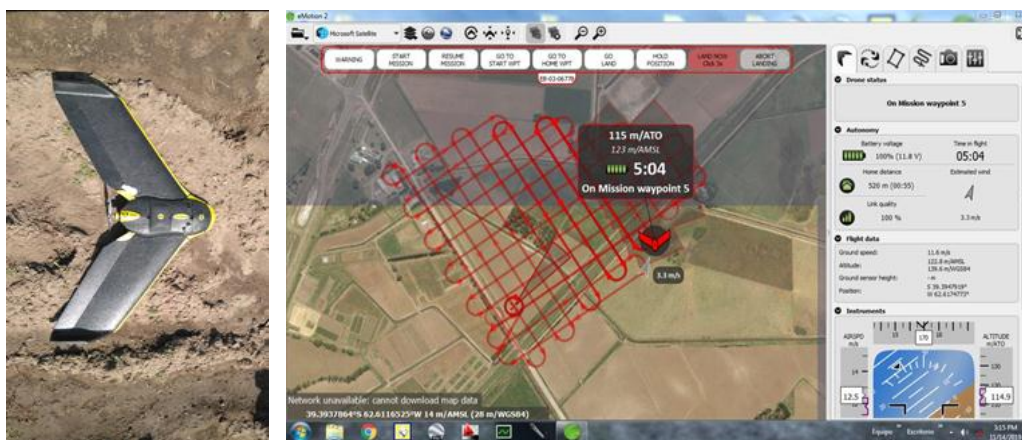
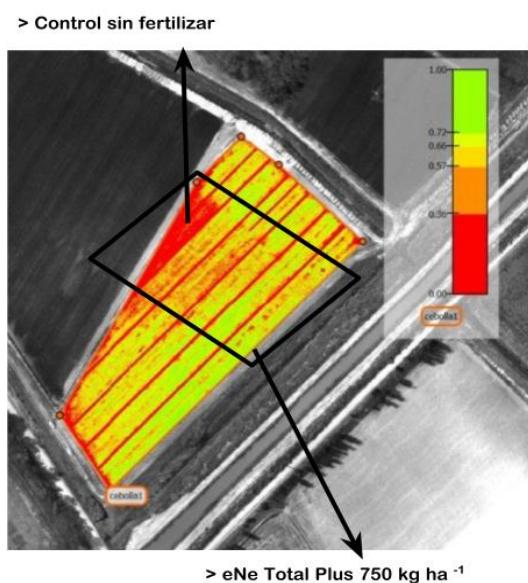


Figura 19. Dron UAV antes del despegue. Detalle del plan de vuelo.

a)



b)

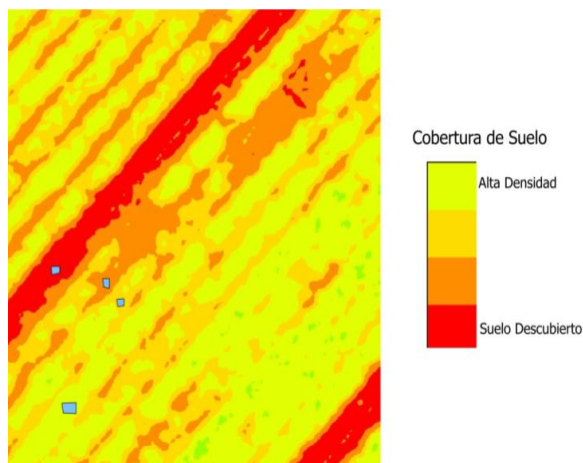


Figura 20. a) Delimitado con un cuadro color negro se observa el sitio de ensayo, con flechas se indican tratamientos contrastantes: T y E750. b) Índices de NDVI realizadas con el sensor del Dron-UAV.

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

Durante el ciclo fenológico de la cebolla, libre de nubes y con fecha relacionada con las actividades y mediciones de terreno se trabajó sobre imágenes del satélite Sentinel-2 (Copernicus, ESA) según se muestra en la (Tabla 5). 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.

Las imágenes 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 7.0 (Sentinel Application Platform) de la misma agencia, se obtuvieron las imágenes de nivel 2A corregidas atmosféricamente 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 geoméricos que componen cada imagen dado que sin ellos los algoritmos no pueden calcular las variables biofísicas.

El valor radiométrico se tomó del punto central de cada unidad de muestreo (UM) por parcela de la imagen más cercana a la fecha de obtención de la información en el terreno (Fig. 21). Finalmente, 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.

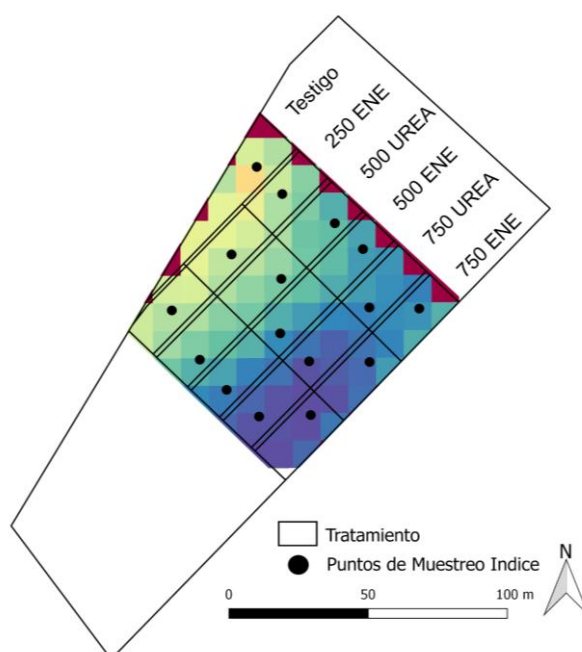


Figura 21. Ubicación de las 16 UM.

### 2.4.6 Cosecha

El 3 de enero de 2019 se tomaron las muestras para determinar rendimiento del ensayo experimental. Para ello se cosechó 1 m lineal del tablón central de cada parcela (N=18). Luego del muestreo, se cosechó la totalidad del lote de forma mecanizada (Fig. 22 a y b). 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. 23 a y b). 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, presentado en la Tabla 6. El rendimiento obtenido se extrapoló para cada tratamiento a t ha<sup>-1</sup>.

Tabla 6. Clasificación comercial de calibres de bulbo según Norma Mercosur.

Calibre N°	Diámetro mayor ecuatorial (mm)
2	> a 35 y hasta 50
3	> a 50 y hasta 70
4	> a 70 y hasta 90
5	> a 90

a)



b)



Figura 22. a) Cosecha de muestra para rendimiento; b) Cosecha mecanizada.





Figura 23. a) Muestras de cebollas embolsadas, toma de datos de rendimiento. b) Hilerado de cebolla a campo: protección con cubierta plástica para su conservación a hasta la fecha de comercialización.

### 3. Resultados y discusión

#### 3.1 Análisis de las variables biofísicas

En principio se obtuvieron los mapas de las variables LAI, Fcover y CCC totales en las imágenes en 5 fechas de muestreo (Tabla 5), además se adicionó una imagen del inicio del ciclo del cultivo (12-mayo-2019) como referencia de suelo desnudo (Fig. 24 y 25 y 26).

Se realizó el análisis de los datos de campo (Tabla 7) y de las variables satelitales (Tabla 8) para cada una de las fechas de muestreo.

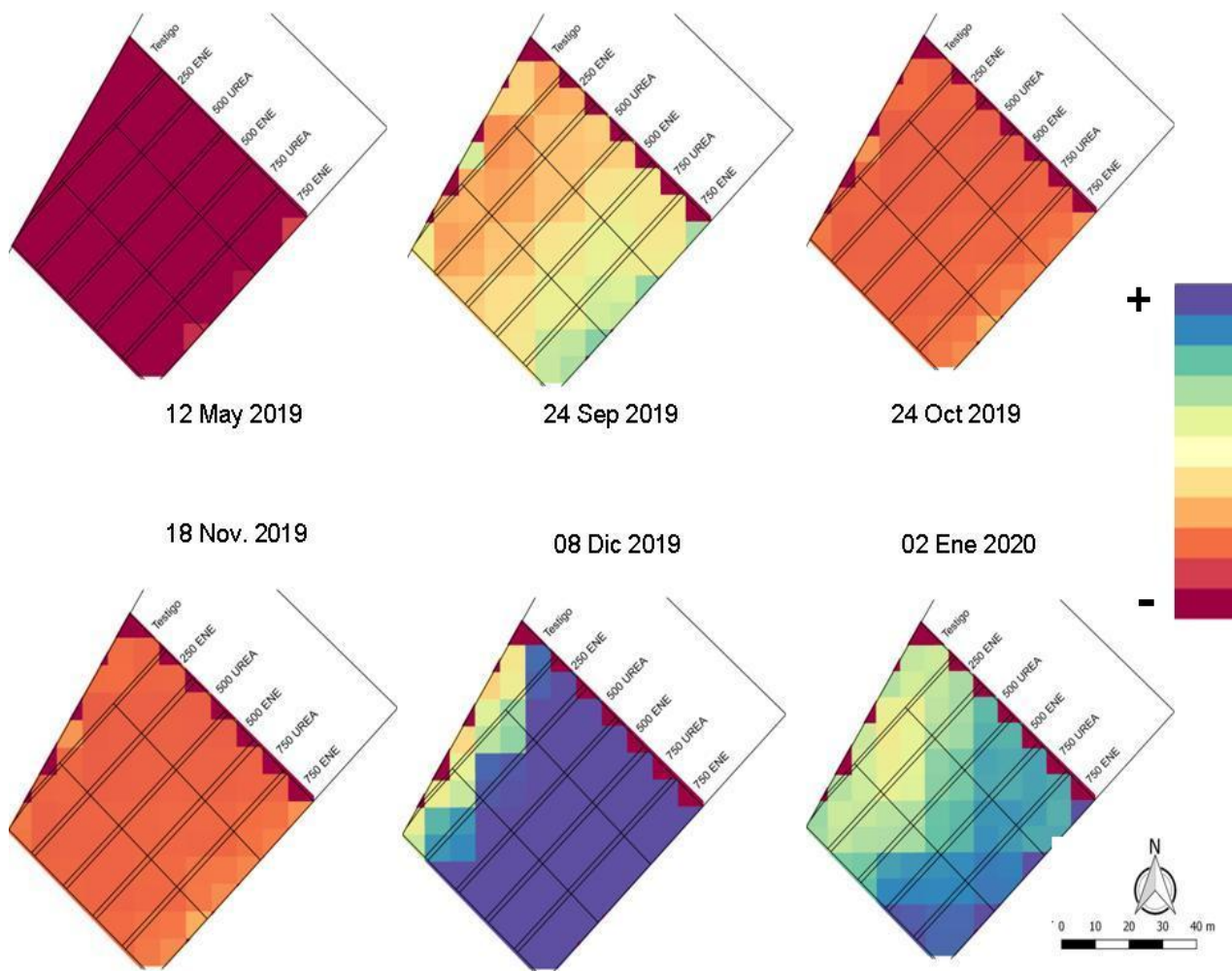


Figura 24. Serie temporal de imágenes LAI durante el ciclo del cultivo de cebolla.

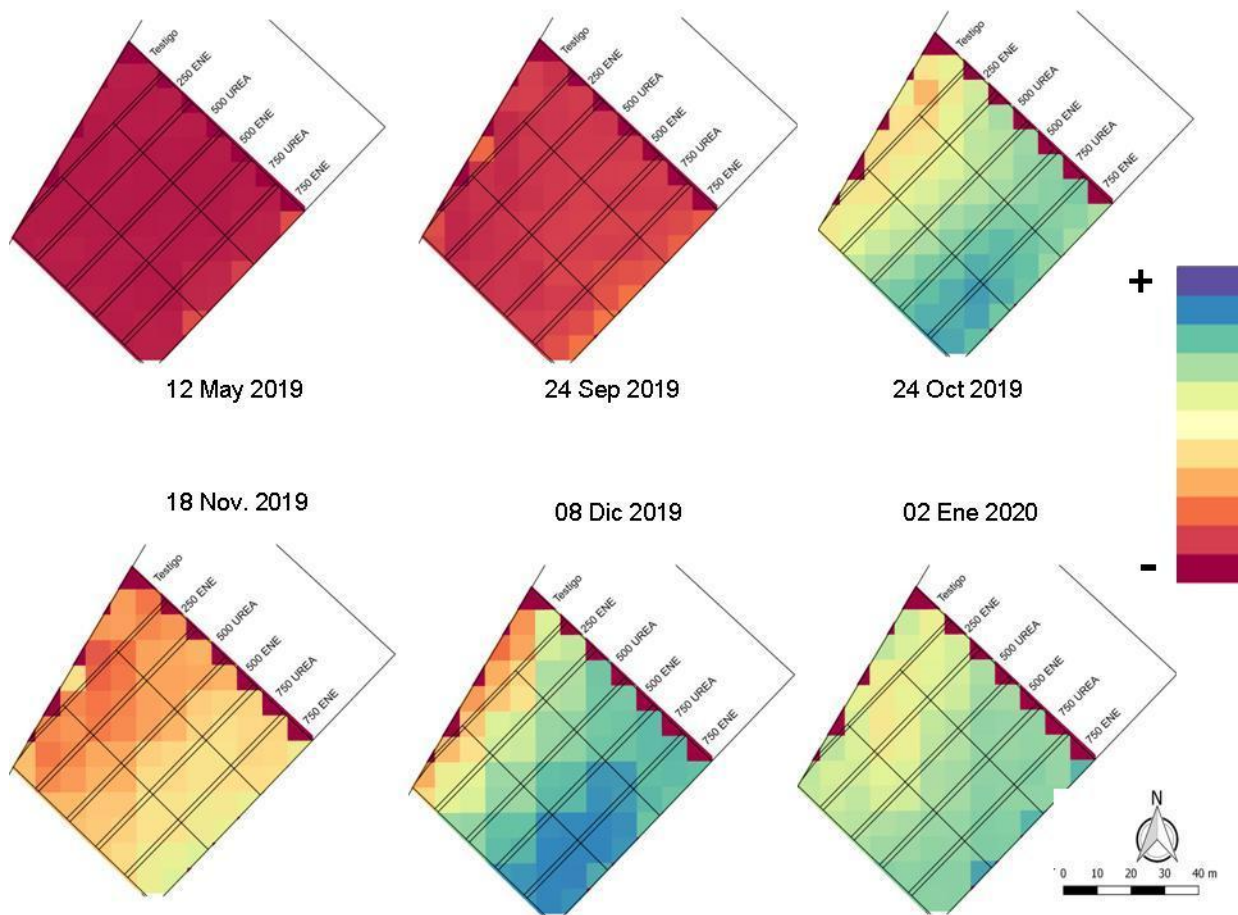


Figura 25. Serie temporal de imágenes Fcover durante el ciclo del cultivo de cebolla.

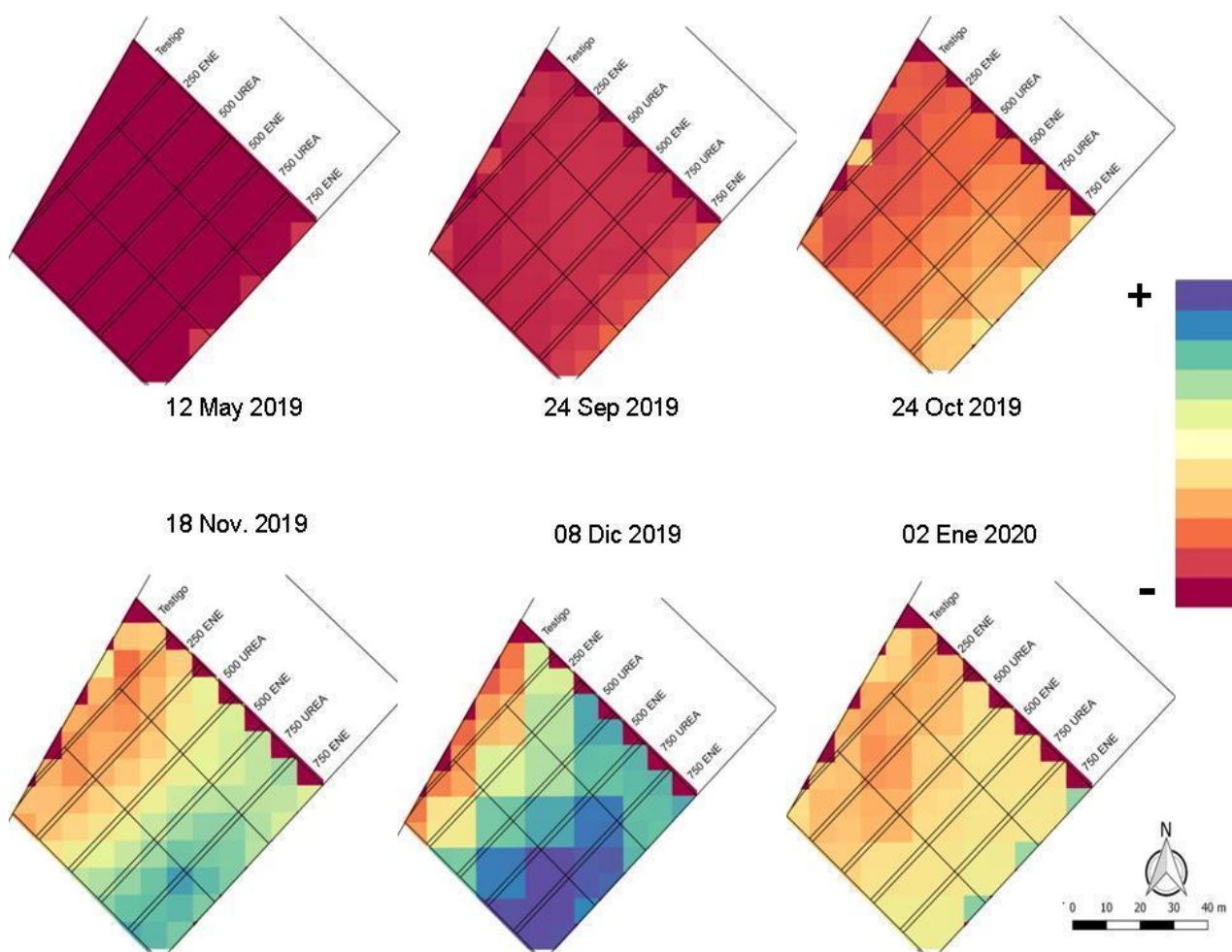


Figura 26. Serie temporal de imágenes CCC durante el ciclo del cultivo de cebolla.

Tabla 7. Análisis de variables obtenidas de los muestreos de campo.

Dosis	SPAD		Fcover		LAI	
	%					
<b>Septiembre</b>						
T	29,19 ± 0,00	a	2,77 ± 0,00	a	0,35 ± 0,00	ab
U250	30,55 ± 2,55	a	2,55 ± 1,00	a	0,40 ± 0,20	ab
U500	31,63 ± 1,76	a	2,79 ± 0,30	a	0,20 ± 0,13	a
U750	32,46 ± 3,61	a	6,93 ± 1,52	b	0,33 ± 0,04	a
E500	32,39 ± 1,26	a	7,38 ± 0,67	b	0,32 ± 0,12	a
E750	34,26 ± 1,70	a	7,47 ± 1,50	b	0,63 ± 0,13	b
<b>Octubre</b>						
T	26,07 ± 0,00	a	9,67 ± 0,00	a	0,55 ± 0,00	a
U250	30,63 ± 1,27	ab	18,67 ± 6,49	ab	0,77 ± 0,14	a
U500	31,18 ± 2,10	ab	18,55 ± 5,05	ab	0,82 ± 0,19	a
U750	32,58 ± 4,06	ab	32,40 ± 5,02	c	0,66 ± 0,14	a
E500	32,04 ± 4,82	ab	25,22 ± 4,02	abc	0,57 ± 0,16	a
E750	34,47 ± 0,67	b	28,05 ± 9,23	bc	0,55 ± 0,05	a
<b>Noviembre</b>						
T			15,33 ± 0,00	a	0,84 ± 0,00	a
U250			37,12 ± 2,75	b	1,22 ± 0,25	ab
U500			54,67 ± 11,68	c	1,24 ± 0,10	ab
U750			62,88 ± 9,63	c	1,72 ± 0,14	c
E500			59,67 ± 5,03	c	1,60 ± 0,24	bc
E750			60,67 ± 8,50	c	1,51 ± 0,38	bc
<b>Diciembre</b>						
T	23,85 ± 0,00	a	11,70 ± 0,00	a	1,30 ± 0,00	a
U250	24,55 ± 2,84	a	33,18 ± 9,31	b	1,77 ± 0,37	ab
U500	25,74 ± 1,08	a	51,67 ± 7,65	c	2,55 ± 0,40	c
U750	28,49 ± 4,70	a	67,83 ± 2,57	d	2,55 ± 0,45	c
E500	25,62 ± 1,27	a	63,22 ± 7,98	cd	2,37 ± 0,57	bc
E750	25,78 ± 0,93	a	61,34 ± 6,34	cd	1,87 ± 0,10	abc
<b>Enero</b>						
T	15,45 ± 0,00	ab	10,50 ± 0,00	a	0,93 ± 0,00	a
U250	19,53 ± 3,69	ab	11,17 ± 2,36	a	1,34 ± 0,35	a
U500	19,96 ± 3,70	b	25,67 ± 9,24	bc	1,31 ± 0,46	a
U750	32,58 ± 2,25	ab	26,00 ± 5,77	bc	1,56 ± 0,29	a
E500	14,85 ± 2,06	a	26,50 ± 3,04	c	1,51 ± 0,29	a
E750	15,52 ± 1,33	ab	16,75 ± 0,75	ab	1,41 ± 0,29	a

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 indican en la Tabla 4.

Tabla 8. Análisis de variables obtenidas de las imágenes satelitales.

Dosis	LAISNAP		FCoverSNAP		LCCSNAP %	
<b>Septiembre</b>						
<b>T</b>	0,29 ± 0,00	c	7,08 ± 0,00	bc	8,33 ± 0,00	ab
<b>U250</b>	0,25 ± 0,0045	a	4,88 ± 0,85	a	6,28 ± 1,66	a
<b>U500</b>	0,26 ± 0,01	ab	5,97 ± 0,43	b	7,58 ± 1,32	a
<b>U750</b>	0,28 ± 0,0044	c	7,18 ± 0,43	c	8,08 ± 0,90	a
<b>E500</b>	0,26 ± 0,01	b	6,55 ± 0,59	bc	7,90 ± 1,02	a
<b>E750</b>	0,31 ± 0,0038	d	8,93 ± 0,54	d	10,90 ± 0,68	b
<b>Octubre</b>						
<b>T</b>	0,54 ± 0,00	ab	18,56 ± 0,00	ab	17,60 ± 0,00	a
<b>U250</b>	0,43 ± 0,05	a	15,91 ± 2,55	a	15,70 ± 3,01	a
<b>U500</b>	0,51 ± 0,01	a	20,04 ± 1,46	b	20,15 ± 0,93	ab
<b>U750</b>	0,67 ± 0,04	cd	27,29 ± 1,01	cd	28,06 ± 2,10	cd
<b>E500</b>	0,61 ± 0,03	bc	25,08 ± 1,25	c	24,53 ± 0,78	bc
<b>E750</b>	0,73 ± 0,09	d	28,99 ± 2,93	d	31,96 ± 4,61	d
<b>Noviembre</b>						
<b>T</b>	0,54 ± 0,00	a	21,29 ± 0,00	a	20,49 ± 0,00	a
<b>U250</b>	0,75 ± 0,04	a	31,84 ± 0,88	b	32,61 ± 1,62	a
<b>U500</b>	0,95 ± 0,06	b	38,45 ± 1,59	c	45,17 ± 3,84	b
<b>U750</b>	1,34 ± 0,11	d	47,27 ± 2,54	d	65,61 ± 6,40	d
<b>E500</b>	1,16 ± 0,04	c	43,33 ± 1,44	d	55,87 ± 3,14	c
<b>E750</b>	1,31 ± 0,14	cd	46,49 ± 3,74	d	64,93 ± 7,39	d
<b>Diciembre</b>						
<b>T</b>	0,67 ± 0,00	a	19,25 ± 0,00	a	25,04 ± 0,00	a
<b>U250</b>	1,23 ± 0,18	b	35,02 ± 4,06	b	50,77 ± 7,99	b
<b>U500</b>	1,57 ± 0,11	c	42,90 ± 1,86	c	66,86 ± 7,75	c
<b>U750</b>	1,93 ± 0,06	cd	52,03 ± 0,86	e	88,40 ± 5,43	d
<b>E500</b>	1,72 ± 0,07	d	46,84 ± 0,96	cd	75,37 ± 5,72	cd
<b>E750</b>	1,82 ± 0,18	d	51,22 ± 3,49	de	83,07 ± 10,75	d
<b>Enero</b>						
<b>T</b>	0,77 ± 0,00	a	34,67 ± 0,00	a	36,38 ± 0,00	ab
<b>U250</b>	0,76 ± 0,08	a	32,62 ± 2,85	a	30,38 ± 3,81	a
<b>U500</b>	0,99 ± 0,06	b	38,95 ± 1,61	b	38,63 ± 2,72	b
<b>U750</b>	1,17 ± 0,08	c	42,39 ± 0,39	c	43,94 ± 2,05	c
<b>E500</b>	1,08 ± 0,07	bc	40,77 ± 1,17	bc	41,67 ± 1,51	bc
<b>E750</b>	1,15 ± 0,09	c	42,76 ± 0,83	c	45,27 ± 1,37	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 4.

El análisis para el ajuste de modelos de regresión se realizó con 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. A partir del desarrollo del bulbo, el follaje verde comienza a senescer. En este momento se inicia el manejo del lote para programar la cosecha por lo que ya no se realizan riegos.

Se tomaron los puntos de muestreo para LAI, Fcover (N= 60) y para CCC (N= 43) (Fig. 27 a, b y c). La correlación datos de campo/SNAP dio como resultado un coeficiente de determinación para LAI  $R^2= 0,87$ , Fcover  $R^2= 0,96$  y CCC  $R^2= 0,79$  (Tabla 9). Como se puede observar, los resultados son muy promisorios para evaluar las características biofísicas del cultivo de cebolla, durante el periodo vegetativo, empleando imágenes del satélite Sentinel-2.

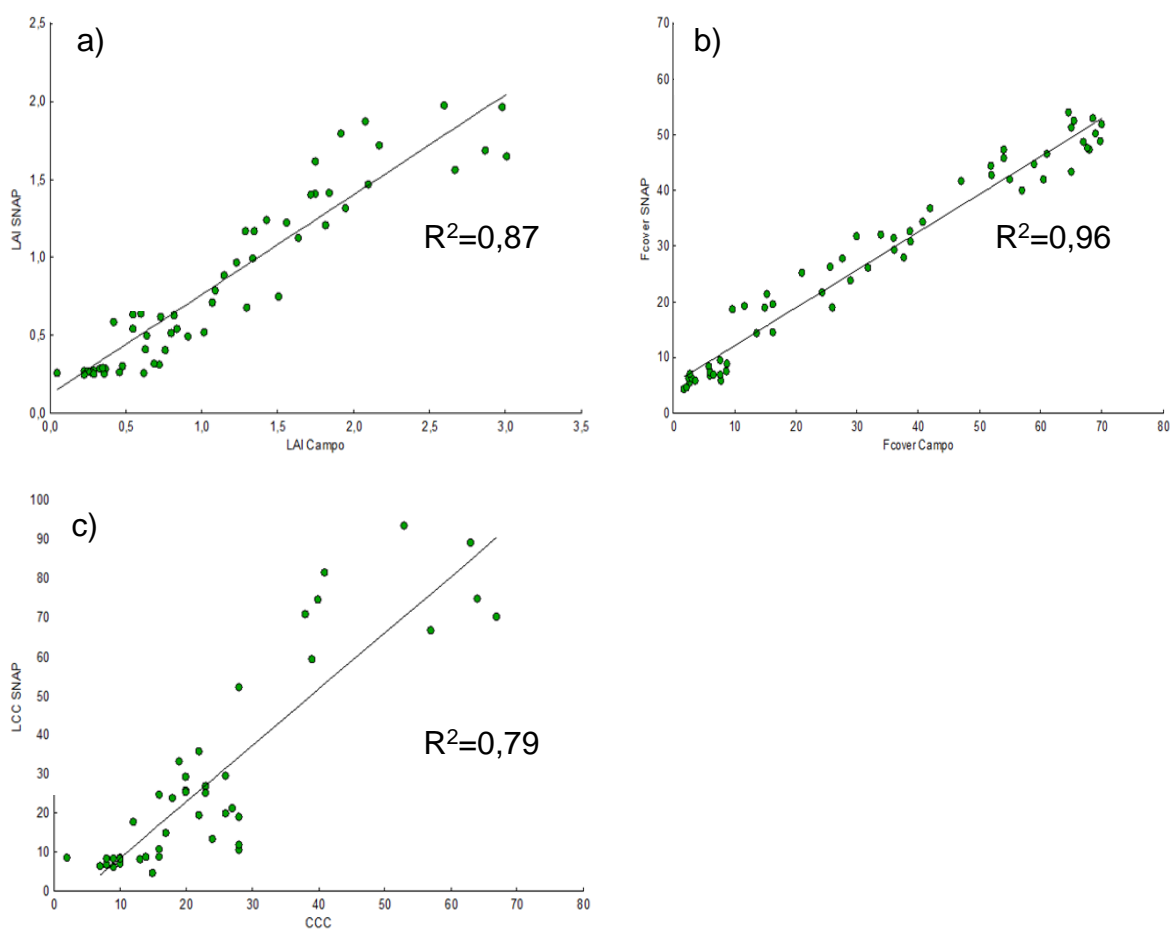


Figura 27. a) Modelo de regresión lineal ajustados para las variables analizadas:  
a) LAI. b) Fcover. c) CCC.

Tabla 9: Estadísticos de las regresiones ajustadas.

Variable	N	R <sup>2</sup>	p-valor	EMC	Modelo
LAI	60	0,87	<0,0001	0,04	$y = 0,12 + 0,64 x$
Fcover	60	0,96	<0,0001	10,87	$y = 5,32 + 0,68 x$
CCC	43	0,79	<0,0001	149,40	$y = -5,77 + 1,43 x$

El menor valor en el número de datos de la variable CCC se debe a la falta de muestreo mediante SPAD en el mes de noviembre, periodo de importante crecimiento de hojas, con el correspondiente aumento del contenido de Chl, esto se puede observar en el LAI y Fcover. Si bien una sola campaña no es suficiente, se encontró un ajuste lineal significativo para cada una de las variables analizadas, lo que demuestra que con las imágenes del satélite Sentinel-2 y los productos del paquete SNAP se pueden obtener buena relación de CCC con el contenido de N del canopeo (CNC) en plantas de cebolla, así como fue demostrado para otras especies (Clevers y Gitelson, 2012; Delloye et al., 2018).

Por otro lado, el LAI es un buen indicador del desarrollo vegetativo, de salud del cultivo y puede ayudar, junto con el contenido de Chl, en cuanto a su variabilidad espacial, a los productores para programar la distribución de la fertilización N (Houlès et al., 2007; Delegido et al., 2012). Como se puede observar en la Figura 24, en el mapa de la imagen del 12-mayo-2019, 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. 25 y 26) en la misma fecha.

A medida que avanza el proceso vegetativo el valor del índice aumenta en relación con la dosis de N aplicada siendo las parcelas de los tratamientos U750 y E750 donde se produce el crecimiento más acelerado. En el mes de enero, ya la vegetación se encuentra senescente cerca de la cosecha por lo que el LAI disminuye. En la Figura 28 se puede apreciar que en el mes de setiembre el valor es <0,5 aumentando hasta los primeros días de diciembre llegando cerca de 2,00 (8-dic-2019), disminuyendo significativamente en los primeros días de enero (02-ene-2020) a valores <1,3.



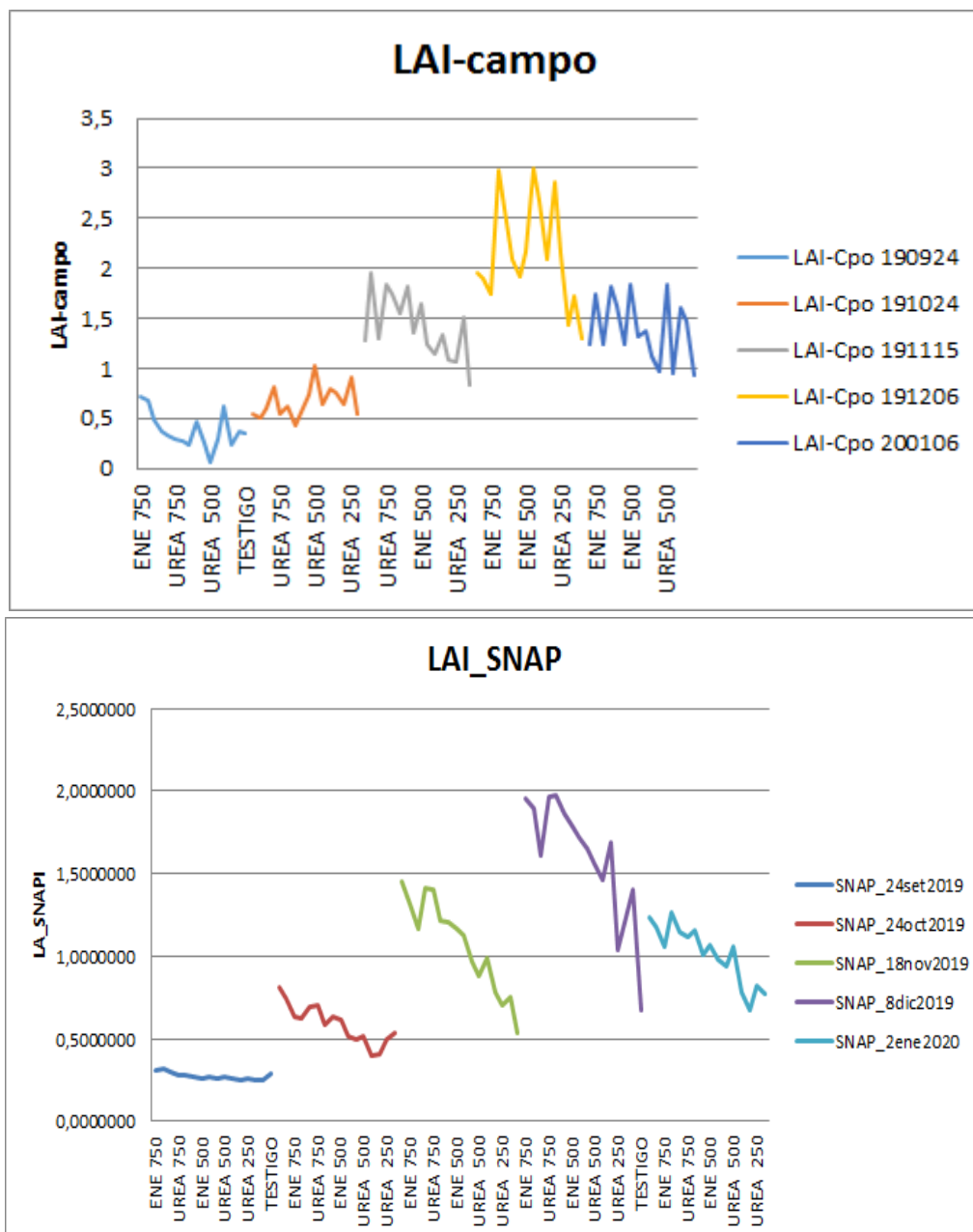


Figura 28. Evolución del índice LAI en tomas de medias de campo y de Sentinel-2 a lo largo del ciclo de cultivo del ensayo de cebolla.

### 3.2 Análisis de las variables de rendimiento

Los componentes de rendimiento (N° de bulbos y peso) de los calibres comerciales de bulbos de cebolla (N° 2, 3, 4 y 5 de la Tabla 6) se analizaron de cada una de las parcelas (N= 18).

No se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos aplicados ( $p>0,05$ ) y el número de bulbos de las muestras cosechadas. Se observa una tendencia positiva de respuesta a mayores dosis de N con un leve aumento a favor de los tratamientos donde se aplicó urea granulada + inhibidor de ureasa:  $T \leq U250 \leq U750 = U500 = E500 = E750$  (Tabla 10). 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 10. Rendimiento promedio de cebolla ( $t\ ha^{-1}$ ) en el ciclo de cultivo.

Tratamiento		Rendimiento	
Dosis	Fuente	$t\ ha^{-1}$	
T		18,00 ± 6,00	a
U250	Urea granulada	46,67 ± 9,29	b
U500		59,33 ± 11,24	bc
U750		62,67 ± 14,74	bc
E500	Urea granulada + Inhibidor de ureasa	61,33 ± 0,58	bc
E750		70,33 ± 22,50	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 4.

Se encontraron diferencias significativas de rendimiento del peso ( $p<0,003$ ) entre el tratamiento testigo y los tratamientos con aplicación de fertilización N (Fig. 29). El testigo ( $18\ t\ ha^{-1}$ ) 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).

En general, se observa una diferencia importante entre U250 (47 t ha<sup>-1</sup>) y los demás tratamientos con aporte de N (59 a 70 t ha<sup>-1</sup>). A igual dosis de N se observa mayores valores de rendimientos a partir de la fuente nitrogenada urea granulada + inhibidor de ureasa sin llegar a ser significativos, esto podría ocurrir dado que posee un inhibidor de la ureasa protegiéndolo contra la pérdida de N en superficie (volatilización). El mayor valor de rendimiento se obtuvo con el tratamiento E750 (70 t ha<sup>-1</sup>) que coincide con los valores obtenidos en lotes de cebolla de productores alta adopción de tecnología (Galmarini et al, 2011; Orden, 2013).

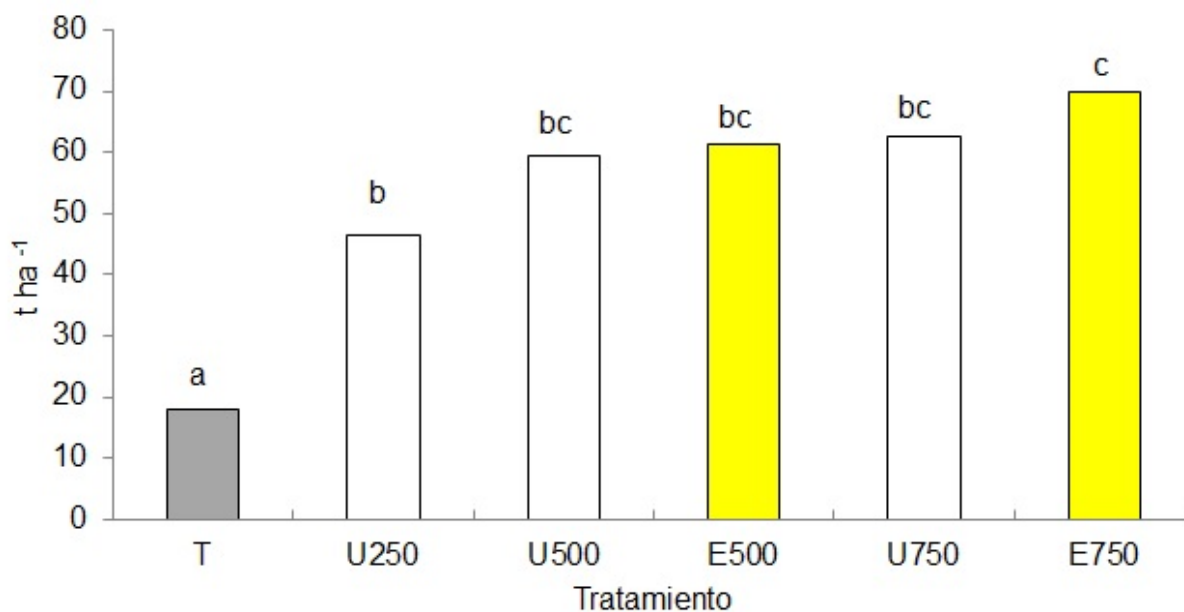


Figura. 29. Rendimiento promedio de cebolla (t ha<sup>-1</sup>) en el ciclo de cultivo. Las barras corresponden al error estándar. Letras diferentes entre barras indican diferencias significativas entre tratamientos ( $p < 0,05$ ).

#### 4. Consideraciones finales

Este primer año de ensayo demostró que la metodología es adecuada y la resolución de 10 m del satélite Sentinel-2 es adecuada para estudios precisos en cultivos intensivos bajo riego. Completar el estudio con análisis de N en laboratorio e incorporar también el análisis de Chl en hoja 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 IV en diferentes condiciones de suelo y meteorológicas.

Los índices están relacionados con la reflectancia de la luz solar del canopeo del cultivo (Delegido et al., 2013). 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., 2006). Esto genera variaciones en los IV que deben ser ajustados y recalibrados para una aplicación generalizada en el cultivo de cebolla de un valle irrigado. Un análisis del contenido de Chl y de N en la hoja de cebolla permitirá encontrar los modelos que mejor se ajusten a este cultivo.

Como reflexión final, el ensayo con aerofotografía demostró que debería incorporarse este tipo de tecnología proveniente de cámaras hiperespectrales montadas en drones para el estudio de variables biofísicas como el LAI o el CCC, de gran importancia para predecir deficiencias de N. Entre las ventajas se citan:

- a) Mejoramiento de la resolución espacial (tamaño del pixel de la imagen).
- b) Posibilidad de coordinación con las pasadas del satélite.
- c) Manejo de las observaciones, en función de las condiciones meteorológicas, con libertad de decisión para elegir el momento de captura.
- d) Posibilidades de generar índices espectrales con mayor precisión por el tamaño del pixel, que permite ajustar el dato espacialmente.

## 5. Agradecimientos

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

A Mirta Toribio y Silvia Saulino de la empresa Profertil, por el aporte financiero, de insumos y la confianza en el grupo de trabajo para llevar a buen término la primera etapa de la experiencia.

A los doctores José Moreno, Jesús Delegido y Nieves Pasqualotto del Laboratorio de Procesamiento de Imágenes, de la Universidad de Valencia, España por apoyarnos económicamente y motivarnos a realizar esta noble actividad de investigación. Principalmente a Jesús y Nieve por estar presentes cada vez que se los consultó en un interesante intercambio de opiniones.

A Verónica Caracotche, Soledad García y Agustín Montenegro del INTA Hilario Ascasubi por colaborar en los muestreos a campo.

## 6. Bibliografía

- 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. 2011. Siembra de cebollas en platabandas. Ed. INTA.
- 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 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. SELPER 2016: XVII 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” -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 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*. 115: 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., & 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.
- 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 EEA Hilario Ascasubi INTA provincia de Buenos Aires. Escala 1:10000. Instituto de Suelos CIRN – INTA Castelar.
- GONZÁLEZ-ESQUIVAA. J.M.; J. Oatesb 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.
- HYAMS, D.G. 2016. CurveExpert software, <http://www.curveexpert.net>.
- IBÁÑEZ J. 2010. Fertilizantes Nitrogenados, Óxido Nitroso, Contaminación y Cambio climático. <https://www.madrimasd.org/blogs/universo/2010/02/23/135447> (22/7/2020).
- IURMAN, D. 2012. Aspectos del mercado de cebolla. Producción, exportación e importación. Ed. INTA. Hilario Ascasubi. Pp.: 22.
- 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.
- LA CASA A., Ovando G., Bressanini L. y Martínez J. 2016. Empleo del ndvi de una cámara digital modificada para estimar la cobertura del cultivo de papa bajo distintas condiciones de fertilización nitrogenada. *AGRISCIENTIA*, VOL. 33.
- 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.

-LOZANO, J., Budde C., 2017. Boletín de Frutas y Hortalizas del Convenio INTA- CMCBA N° 64.

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 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.

XXXVI Congreso Argentino de Horticultura. Pérdidas de nitrógeno por volatilización y lixiviado: consecuencias en el rendimiento del cultivo de cebolla en el Valle Bonaerense del río Colorado. 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*.

PALEARI, L., Movedi, E., Vesely, F.M., Thielke, W., Tartarini, S., Foi, M., Boschetti, M., Nutini, F., Confalonieri, R. 2019. Estimating crop nutritional status using smart apps to support nitrogen fertilization. A case study on paddy rice. *Sensors*, 19, 981.

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

PASQUALOTTO, N.; Delegido, J.; Van Wittenberghe, S.; Rinaldi, M.; Moreno, J. 2019b Multi-Crop Green LAI Estimation with a New Simple Sentinel-2 LAI Index (SeLI). *Sensors* 19, 904.

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 n° 40.



- SÁNCHEZ, R.; Pezzola, N. y J. Cepeda. 1998. Caracterización edafoclimática del área de influencia del INTA EEA Hilario Ascasubi. Partidos de Villarino y Patagones. Provincia de Buenos Aires.
- SILQUINI, 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.
- VERRELST, J., Camps-Valls, G., Muñoz-Marí, J., Rivera, J.P., Veroustraete, F., Clevers J.G. Moreno, J. 2015. Optical remote sensing and the retrieval of terrestrial vegetation biogeophysical properties—A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 108, pp. 273-290.
- VON BUEREN S. K., Burkart A., Hueni A., Rascher U., Tuohy M. P. and Yule I. J. 2015. CC Attribution 3.0 License. Deploying four optical UAV-based sensors over grassland: challenges and limitations *Biogeosciences*, 12, 163–175.
- WEISS, M., Baret, F. 2016. S2toolbox Level 2 products: LAI, FAPAR, FCOVER Version 1 9ATBD) INRA. S2ToolBox Level 2 products: LAI, FAPAR, FCOVER.

En el valle bonaerense del río Colorado, la producción de cebolla cumple un rol importante en el Producto Bruto Interno (PBI) de los partidos de Villarino y Patagones de la provincia de Buenos Aires.

El desafío actual es optimizar el uso de fertilizantes y disminuir la contaminación de los recursos ambientales en un cultivo que requiere elevada cantidad de insumos. Dentro de los principios científicos de las buenas prácticas agrícolas (BPA) se encuentra el manejo de fertilizantes. 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 de la investigación fue desarrollar un método a partir de las variables biofísicas: Índice de Área foliar, factor de cobertura y contenido de clorofila en el canopeo en lotes de producción, que proporcione una herramienta para el diagnóstico y recomendación de fertilización nitrogenada en el cultivo de ciclo intermedio.

ISSN 0328-3399 Informe técnico N° 66 de la EEA Hilario Ascasubi



Ministerio de Agricultura,  
Ganadería y Pesca  
Argentina