



---

# Monitoreo, análisis y clasificación de lotes de cosecha fina mediante imágenes satelitales

---

**Martín, Walter Oscar**

**Docente tutor**

Ing. Agr. Mg Nelly Salomón

**Docentes consejeros**

Ing. Agr. Dra. Marta Miravalles

Ing. Agr. Dr. Juan Pablo Renzi

**Supervisores Externos**

Dra. G. Noelia Revollo Sarmiento (DIEC)

Ing. Agr. Mg María Elena Antonelli (BCP)

Departamento de agronomía. Universidad Nacional del Sur.

Bahía Blanca 2021

## INDICE

INDICE .....	1
Agradecimientos .....	1
Resumen .....	2
Índice de figuras .....	3
Índice de tablas.....	3
Índice de gráficos.....	4
INTRODUCCION .....	5
Trigo y Cebada en el mundo .....	5
Trigo y Cebada en Argentina.....	5
Exportaciones .....	9
Sensado Remoto.....	10
Espectro electromagnético .....	11
Firma espectral.....	12
Imágenes satelitales.....	15
Satélites.....	15
Programa LANDSAT.....	16
Programas SPOT y Sentinel .....	18
Índices de vegetación.....	19
Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI).....	20
Clasificación de Imágenes satelitales .....	21
Clasificación Supervisada .....	21
Métodos paramétricos de clasificación.....	21
Coeficiente de cultivo .....	22
Objetivos.....	23
MATERIALES Y MÉTODOS.....	24

Fase Preliminar .....	25
Toma de muestras .....	25
Reconocimiento de los cultivos de invierno.....	26
Descarga de Imágenes satelitales .....	27
Procesamiento de datos.....	29
Método cualitativo de selección de lotes .....	30
Construcción de firma espectral.....	30
Evaluación de estado hídrico de lotes.....	31
Clasificación supervisada .....	31
Métodos paramétricos de clasificación.....	31
Análisis del desempeño de la clasificación .....	31
RESULTADOS .....	34
Análisis de lotes de trigo y cebada.....	34
Evaluación de estado hídrico de lotes.....	38
Clasificación .....	39
Conclusiones .....	40
Bibliografía.....	42

## Agradecimientos

En primer lugar, a mis padres Adelina y Rosalino por educarme y brindarme siempre su confianza y apoyo en las decisiones que tomé a lo largo de estos años. Sin ellos hubiera sido imposible lograr esta meta.

En segundo lugar, a la Universidad Nacional del Sur y el departamento de agronomía por darme la posibilidad de terminar de formarme como profesional en estos últimos años. También a la Universidad Nacional de Río Negro por permitirme realizar los primeros años de la carrera, aunque no pudiera finalizarla allí.

En tercer lugar, a mi directora Ing. Agr. Mg. Nelly Salomón por transmitirme sus conocimientos, brindarme su tiempo y asistencia. Siempre dispuesta en todo momento a responder dudas y consultas sobre el trabajo.

En cuarto lugar, a la Dra. G. Noelia Revollo Sarmiento por su asesoramiento y tiempo dedicados en la realización de este trabajo. También al Dr. Juan Pablo Renzi y a la Ing. Agr. Mg María Elena Antonelli por sus devoluciones y tomarse el tiempo en revisar mi trabajo

Por último, a mi familia, primos, amigos y compañeros de cursada que de alguna u otra manera me acompañaron y apoyaron en estos años.

## Resumen

El partido de Coronel Dorrego (Buenos Aires, Argentina) está ubicado dentro de la zona pampeana austral, posee clima templado subhúmedo seco con precipitaciones medias anuales de 700 mm. La superficie sembrada de trigo y cebada, adquiere significativa importancia para la posterior planificación agrícola y económica. Con la creciente demanda del sector agropecuario por elevar la eficiencia productiva, es necesario incorporar nuevas tecnologías que mejoren la gestión. Es por ello que el monitoreo con imágenes satelitales surge como alternativa para obtener información precisa y actualizada para la caracterización de lotes agrícolas utilizando el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada, NDVI. El objetivo del presente trabajo fue monitorear, analizar y clasificar lotes de trigo y cebada en el partido de Coronel Dorrego con imágenes satelitales LANDSAT 8 en la campaña 2018. La metodología de trabajo consistió en procesar y analizar las imágenes durante todo el ciclo de ambos cultivos (junio a diciembre). Las muestras a campo fueron tomadas marcando una transecta de 100 km a lo largo de la ruta nacional N°3, con la cual se registraron 16 lotes de trigo, 20 de cebada y 15 de "otros" (p.e., campo natural, pastura, barbecho). El procesamiento digital de las imágenes se realizó utilizando el software libre de código abierto Q-GIS. En todos los lotes se calculó el índice de NDVI. Se seleccionaron aquellos más homogéneos, cuyos valores de coeficiente de variación no supera el 15%, para graficar la firma espectral de trigo y cebada y calcular la media aritmética. Las curvas NDVI vs. Kc vs precipitaciones en el periodo de estudio nos permitió evaluar el estado hídrico de los lotes. La misma mostró que las lluvias no cubrieron los requerimientos hídricos de trigo y cebada durante el ciclo. Si bien las precipitaciones ocurridas en noviembre favorecieron el llenado del grano de trigo, en cebada causó problemas de grano lavado por su cercanía a la cosecha. El análisis de los valores de NDVI nos mostró la evolución del cultivo durante todo su ciclo en momentos claves de su desarrollo: a) emergencia: 0.3-0.4; b) floración: 0.7-0.8 y c) cosecha: 0.4-0.5. Finalmente, con los datos de muestreo y métodos paramétricos de clasificación (distancia mínima, máxima probabilidad y ángulo espectral) se pudo realizar una discriminación entre lotes de trigo y cebada. En base a parámetros de precisión se concluyó que el mejor clasificador fue el de distancia mínima con una eficacia global del 82% y un nivel de concordancia del 73%. La alta eficiencia de este clasificador nos ofrece información de producción anticipada de grandes áreas sembradas; sin embargo, solo se aplica a la transecta de estudio y siendo posible extrapolarlo a todo el partido de Dorrego.

Palabras clave: trigo - cebada - NDVI - firma espectral - clasificación  
Keywords: wheat - barley - NDVI - spectral signature - classification

## Índice de figuras

Figura 1. Aporte porcentual por provincia a la producción nacional de trigo.....	7
Figura 2. Aporte porcentual por provincia a la producción nacional de cebada..	7
Figura 3. Espectro electromagnético. Fuente: Luz y pigmentos fotosintéticos.....	11
Figura 4. Mapa Path Row Argentina y Provincia de Buenos Aires en LANDSAT 5. ....	18
Figura 5. Provincia de Buenos Aires y área de estudio. ....	24
Figura 6. Área de estudio. Partido de Coronel Dorrego.....	25
Figura 7. Ubicación de la transecta y lotes muestreados .....	26
Figura 8. Detalle de vaina, lígula y aurícula de cebada y trigo.....	27
Figura 9. Mapa Path Row Provincia de Buenos Aires. ....	29
Figura 10. Lotes digitalizados de trigo y cebada sobre imagen NDVI en QGIS. ....	30
Figura 11 Lote de trigo seleccionado en las distintas fechas.....	37
Figura 12. Lote de cebada seleccionado en las distintas fechas.....	37
Figura 13. Clasificación por distancia mínima en la transecta. ....	39

## Índice de tablas

Tabla 1. Descripción de las regiones del espectro electromagnético .....	12
Tabla 2. Características diferenciales de satélites.....	15
Tabla 3. Características serie 8 LANDSAT. ....	17
Tabla 4. Características de los satélites Sentinel y SPOT.....	19
Tabla 5. Tabla comparativa entre los satélites LANDSAT 8, SPOT-5 y Sentinel-2.....	19
Tabla 6. Clasificación trigo y cebada en estado vegetativo .....	26
Tabla 7. Calendario de visitas del satélite en la zona de estudio e imágenes tomadas. ...	28
Tabla 8. Matriz de confusión. ....	32
Tabla 9. Parámetros de precisión. ....	33
Tabla 10. Escala (Landis-Koch, 1977) índice Kappa.....	34
Tabla 11. Datos estadísticos de dispersión de NDVI en trigo y cebada .....	35
Tabla 12. Resultados de clasificación. ....	39
Tabla 13. Matriz de confusión del método distancia mínima. ....	40
Tabla 14. Parámetros de precisión distancia mínima. ....	40

## Índice de gráficos

Gráfico 1: Producción de última campaña de trigo y cebada.....	6
Gráfico 2. Evolución de la superficie sembrada, cosechada y rendimiento de trigo.....	8
Gráfico 3. Evolución de la superficie sembrada, cosechada y rendimiento de cebada.....	9
Gráfico 4. Exportaciones último quinquenio de Trigo y Cebada. ....	10
Gráfico 5. Firmas espectrales típicas de distintos elementos presentes en la superficie..	13
Gráfico 6. Firma espectral de trigo para el mes de agosto de 2012 Córdoba.....	14
Gráfico 7. Firma espectral de cebada para el mes de agosto de 2012 Córdoba. ....	14
Gráfico 8. Firma espectral de cultivo de trigo para los 5 lotes seleccionados. ....	36
Gráfico 9. Firma espectral de cultivo de cebada para los 5 lotes seleccionados. ....	36
Gráfico 10 Evolución de la firma espectral (NDVI, Kc) y precipitaciones trigo. . ....	38
Gráfico 11. Evolución de la firma espectral (NDVI, Kc) y precipitaciones cebada.....	38

## INTRODUCCION

### Trigo y Cebada en el mundo

El trigo pan (*Triticum aestivum* L.) y la cebada (*Hordeum vulgare* L.) son cultivos de gran importancia en el mundo, ya que sus características nutritivas tienen una marcada participación en la alimentación animal y humana. A nivel global se producen aproximadamente 760 y 150 millones de toneladas de trigo y cebada respectivamente (USDA 2020). Productivamente el trigo se ubica en segundo lugar, sólo detrás del maíz; mientras que la cebada se ubica en el quinto y detrás de la soja.

El trigo se emplea principalmente en la molienda para la producción de harinas y los destinos a fines a la panificación. Por su parte la mayoría de la producción de cebada se destina a forraje y solo una pequeña parte a malteo para producción de cerveza (De Bernardi, 2015).

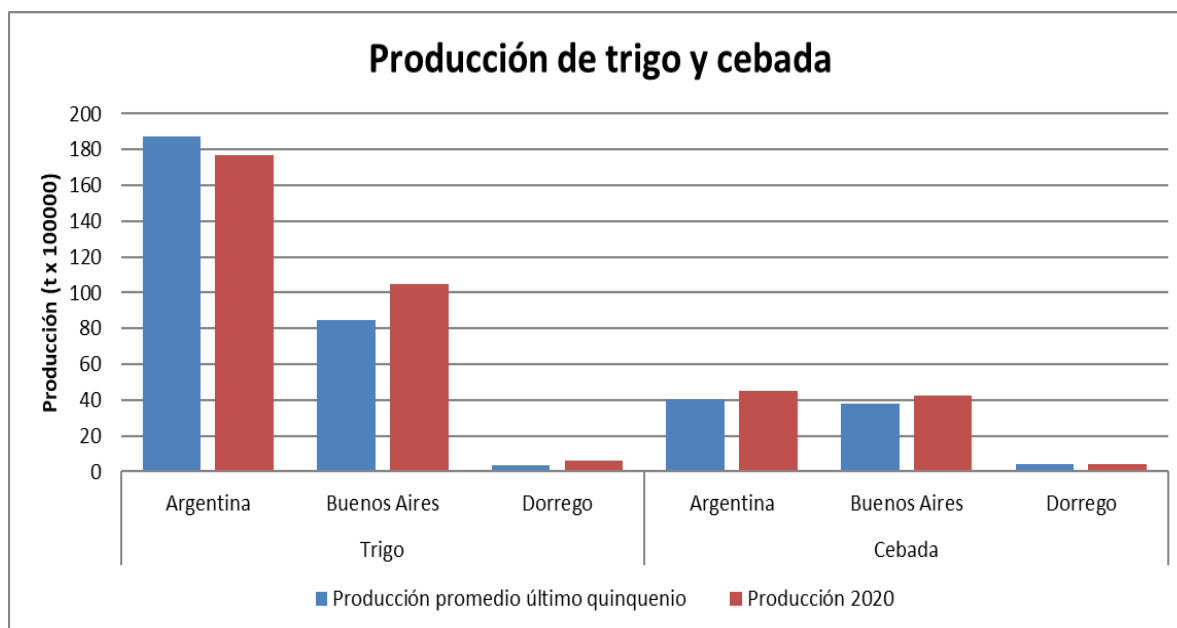
### Trigo y Cebada en Argentina

En Argentina el trigo se orienta principalmente a la producción de pan y en una cantidad menor para fideos; mientras que la cebada tiene como principal destino el malteo para la producción cervecera, contrario a lo que pasa a nivel mundial (Miralles et al., 2014).

La producción de trigo y cebada en nuestro país y en el mundo se comercializa con la estructura genética de **Líneas Puras** denominadas comercialmente cultivares. Estos materiales son genotípicamente homocigotos y fenotípicamente uniformes y homogéneos al momento de su comercialización.

En el gráfico 1 se muestra la comparación entre la producción de trigo y cebada de la última campaña (2020) y la producción anual promedio (toneladas x 100.000) correspondientes al último quinquenio (2015/2020) para nuestro país, provincia de Buenos Aires y el partido de Coronel Dorrego.





**Gráfico 1:** Producción de última campaña de trigo y cebada y promedio anual del último quinquenio en el país, provincia y partido. Fuente: elaboración propia a partir de datos del Ministerio de Agricultura ganadería y pesca (2020).

Ambos cultivos históricamente han sido destacados en la provincia de Buenos Aires representando en trigo un 40% (figura 1) y en cebada 90% (figura 2) de la producción nacional aproximadamente, aunque la producción de trigo en los últimos años se expandió al NOA. A su vez, el partido de Coronel Dorrego aporta el 4,3% y 14,2% en trigo y cebada, respectivamente a la producción total de la provincia de Buenos Aires. La producción de trigo en la campaña 2020 superó la del promedio del último quinquenio en Dorrego y también en Buenos Aires, pero no a nivel nacional. Mientras que, la cebada, superó el promedio del último quinquenio a nivel país y provincia de Buenos Aires y estuvo casi al mismo nivel en el partido de Dorrego.

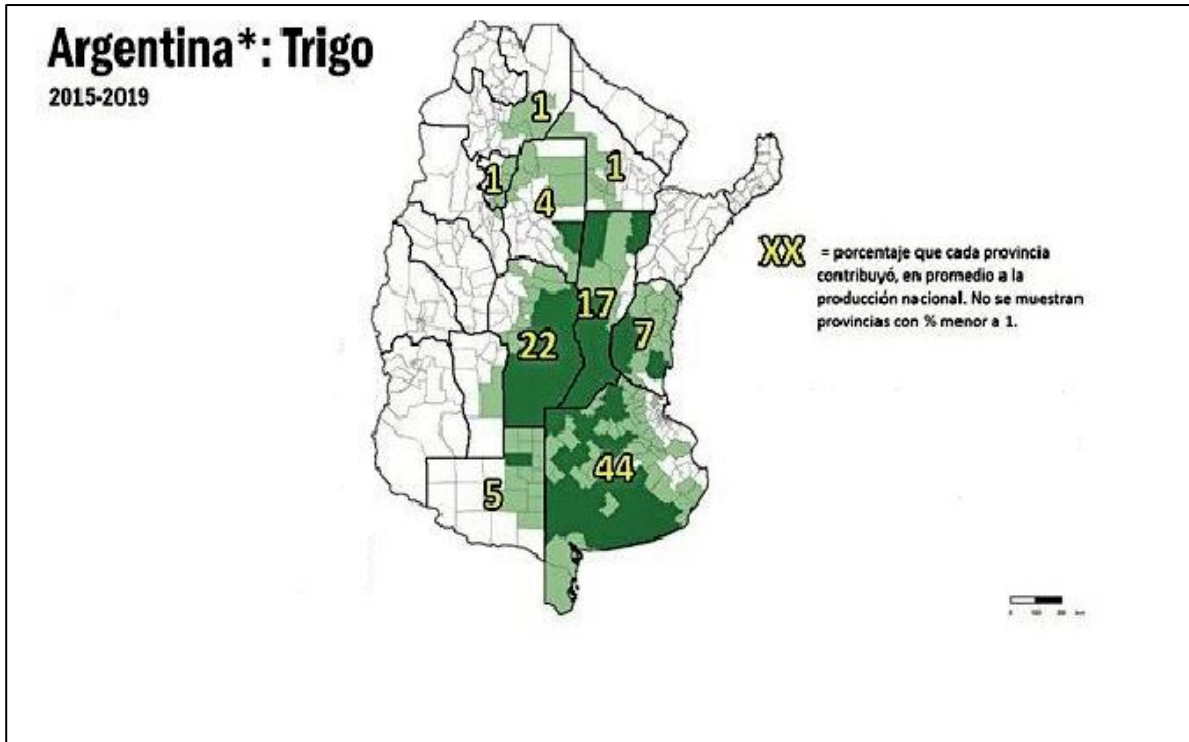


Figura 1. Aporte porcentual por provincia a la producción nacional de trigo. Fuente: Bolsa de Comercio de Rosario (BCR, 2020).

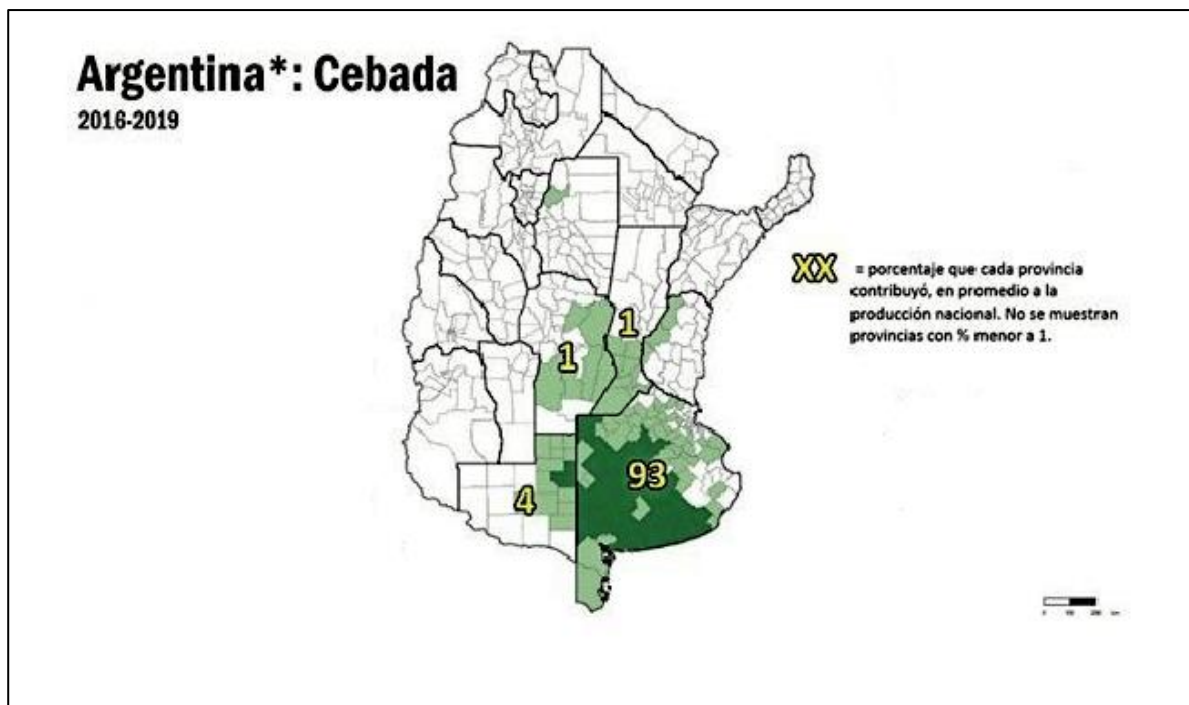
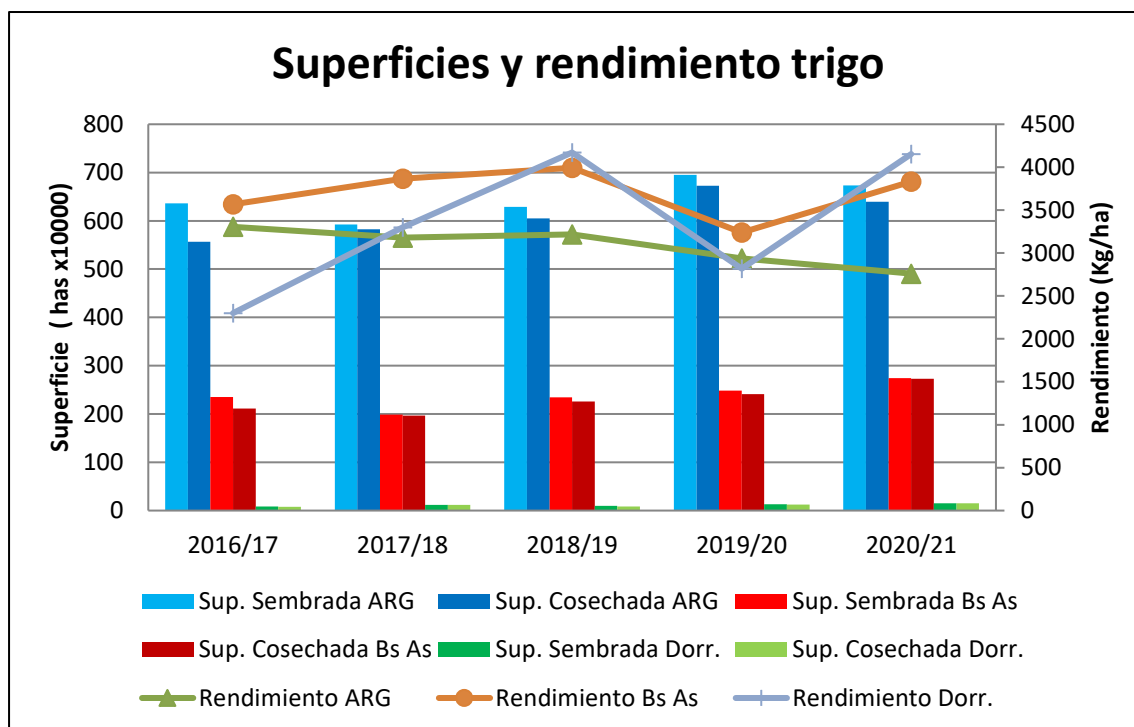
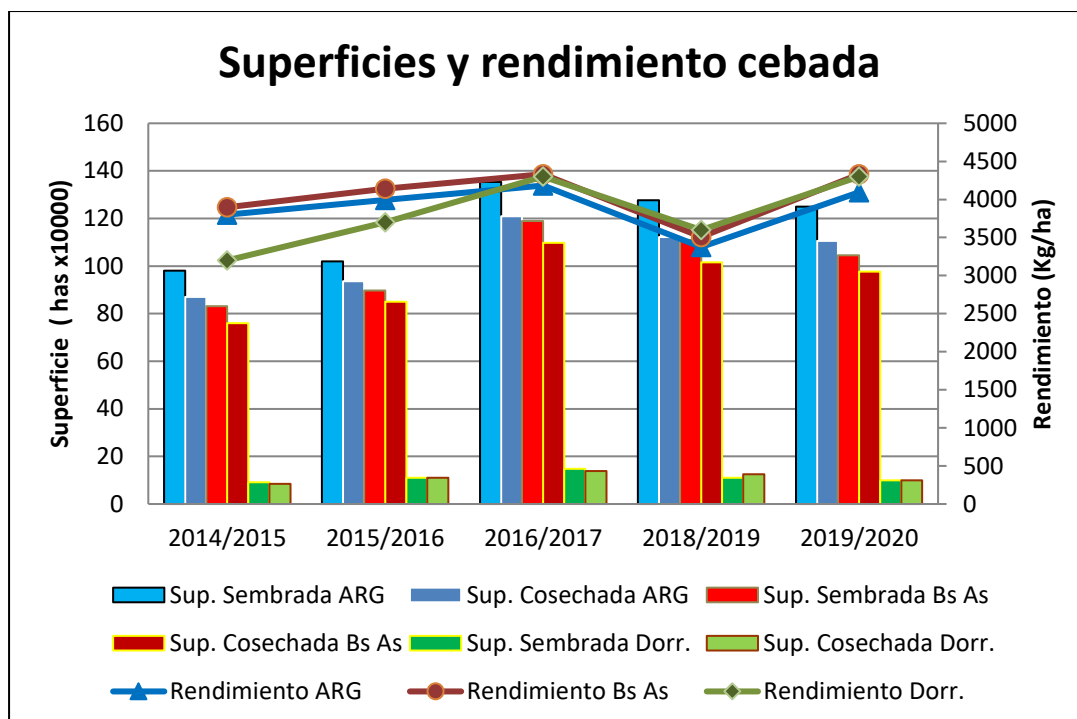


Figura 2. Aporte porcentual por provincia a la producción nacional de cebada. Fuente: BCR (2020).

En el gráfico 2 se muestra la evolución de la superficie sembrada, cosechada (hectáreas x 10.000) y el rendimiento del cultivo de trigo (kg/ha) en el último quinquenio (2015-2020) para Argentina, Buenos Aires y Dorrego. En el gráfico 3 se muestra lo mencionado anteriormente, pero para el cultivo de cebada.



**Gráfico 2.** Evolución de la superficie sembrada, cosechada y rendimiento de trigo en el último quinquenio a nivel nacional, provincial y partido de Dorrego. Fuente: elaboración propia a partir de datos del Ministerio de agricultura, ganadería y pesca (MAGyP) (2020).



**Gráfico 3.** Evolución de la superficie sembrada, cosechada y rendimiento de cebada en el último quinquenio a nivel nacional, provincial y partido de Dorrego. Fuente: elaboración propia a partir de datos del MAGyP (2020).

La superficie sembrada de trigo en provincia de Buenos Aires representa aproximadamente solo 35 % de lo que se siembra a nivel nacional. Mientras que Dorrego aporta un 5 % a la superficie sembrada en la provincia.

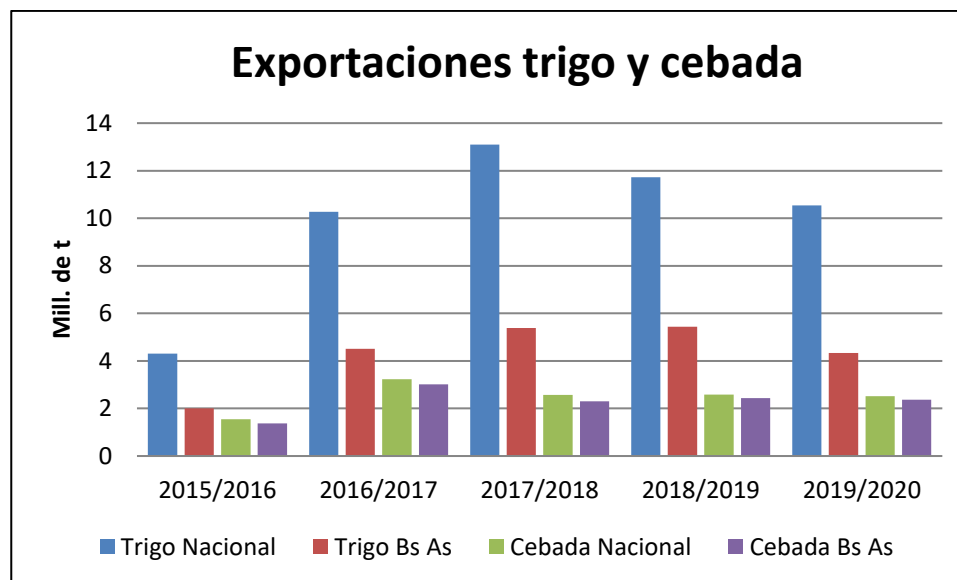
En cebada, en cambio, la superficie sembrada en Buenos Aires participa en un 85% de lo que se siembra en Argentina y; aportando Dorrego un 11% a la superficie provincial.

### Exportaciones

El gráfico 4 muestra las exportaciones en trigo a nivel nacional y provincial. Se observa un incremento hasta alcanzar el pico en 2017/2018; luego del cual fue disminuyendo en los últimos años. Buenos Aires aportó un 43% en promedio el último quinquenio.

En cebada, tanto a nivel nacional como provincial la producción tuvo un leve incremento en la campaña 2016/2017 y a partir de allí no sufrió muchas variaciones ya que siempre el volumen osciló en 2 millones de toneladas. Buenos Aires, a diferencia del trigo, tiene una mayor participación en lo que respecta a la producción nacional debido a que en los últimos 5 años contribuyó con un 90% a las exportaciones nacionales.

Según datos del puerto de Bahía Blanca, las exportaciones de trigo y cebada para la campaña 2019/2020, fueron de 1,54 millones y 309.073 de toneladas respectivamente (BCP Bahía Blanca, 2020).



**Gráfico 4.** Exportaciones último quinquenio de Trigo y Cebada (Argentina y Buenos Aires). Fuente: elaboración propia a partir de datos del INDEC (2020).

## Sensado Remoto

El sensado remoto es la técnica que permite obtener información a distancia de los objetos situados sobre la superficie terrestre por medio de sensores espaciales. Para que esta observación remota sea posible es necesario que exista algún tipo de interacción energética entre los objetos y el sensor, ya sea por reflexión de la energía solar o algún haz energético artificial (Chuvienco, 1990).

El principio físico de la percepción remota se basa en la ley de la conservación de la energía, donde una parte de la energía es absorbida, otra transmitida y otra reflejada. Durante la transmisión a través de un objeto la energía es absorbida selectivamente por los componentes químicos del objeto y luego es reflejada. En el caso de las plantas, la energía transmitida a una hoja sufre una absorción selectiva por los pigmentos de la hoja como la clorofila y luego es reflejada desde las paredes celulares. Estas características son la base para identificar los objetos mediante sensores remotos que pueden captar la energía reflejada por los cuerpos y convertirla en valores digitales. En particular, las imágenes de satélite almacenan las señales espectrales en diferentes longitudes de onda, y después de diversos análisis se efectúa la

interpretación; de allí se obtiene la información sobre las características y los tipos de objeto presentes en el área de estudio (Chuvienco 1990; García & Martínez, 2010).

## Espectro electromagnético

El flujo energético entre la superficie terrestre y el sensor espacial constituye una forma de radiación electromagnética; por lo que se puede describir este tipo de energía en función de su frecuencia y longitud de onda.

Si bien la sucesión de valores de longitud de onda es continua, suelen establecerse una serie de bandas en donde la radiación electromagnética tiene un comportamiento similar. La organización de estas bandas de longitudes de onda o frecuencia se denomina espectro electromagnético (Chuvienco, 1990); comprende, en un continuo, desde las longitudes de onda más cortas (rayos gamma) hasta las kilométricas (telecomunicaciones).

En la figura 3 se muestran las regiones del espectro electromagnético y sus longitudes de onda. Desde el punto de vista del sensado remoto interesan particularmente espectro visible, infrarrojo próximo, medio y térmico y por último microondas. En la tabla 1 se describen las principales características de cada región.

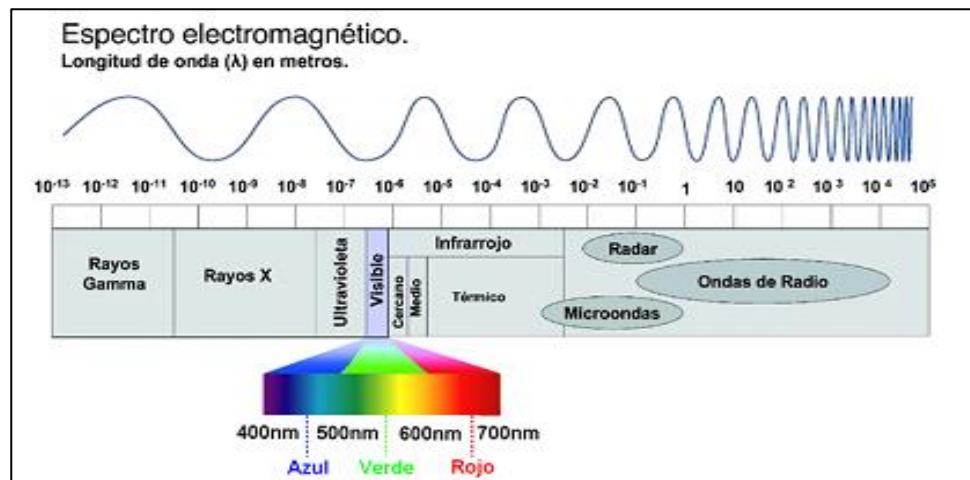


Figura 3. Espectro electromagnético. Fuente: Luz y pigmentos fotosintéticos. KhanAcademy 2021.

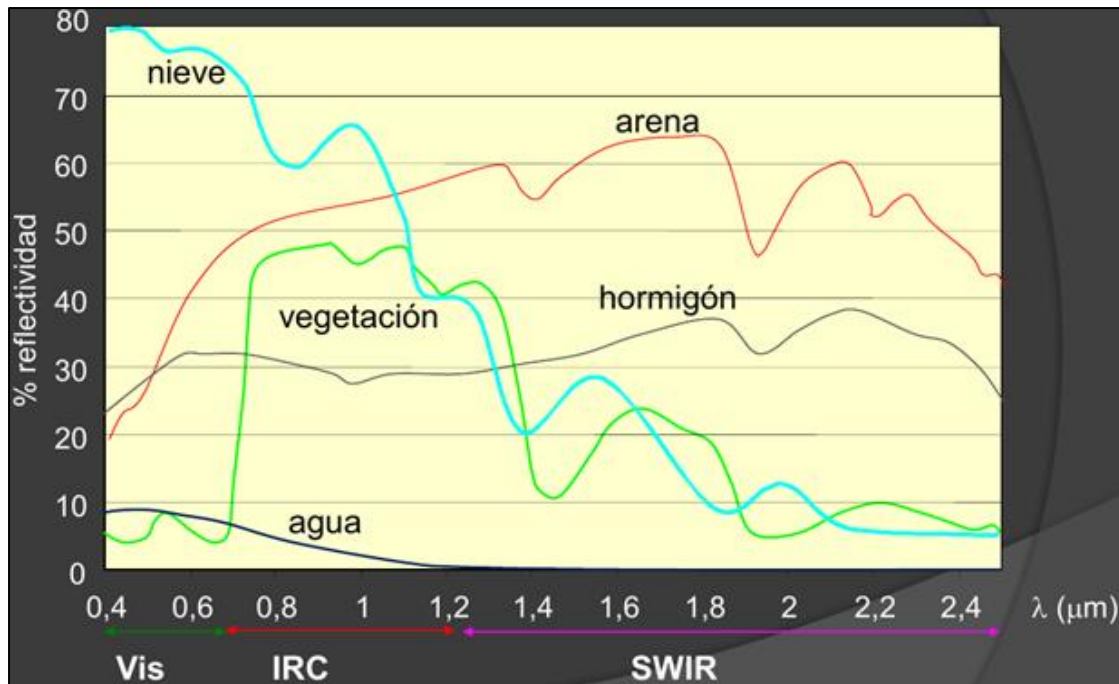
**Tabla 1.** Descripción de las regiones del espectro electromagnético.

Región o Banda espectral		Longitud de Onda	Características
<b>Rayos Gamma</b>		< 0,03 nm	Radiación completamente absorbida por las capas superiores de la atmósfera. No se utilizan en teledetección.
<b>Rayos X</b>		0,03 – 30 nm	
<b>Ultravioleta</b>		0,03 – 0,4 $\mu\text{m}$	La radiación con $\lambda < 0,3 \mu\text{m}$ es completamente absorbida por la capa de ozono de la atmósfera.
<b>Visible(azul, verde, rojo)</b>		0,4 – 0,5 $\mu\text{m}$ (azul) 0,5 – 0,6 $\mu\text{m}$ (verde) 0,6 - 0,7 $\mu\text{m}$ (rojo)	Se puede detectar a través de fotodetectores y películas fotosensibles normales (color y B/N).
<b>Infrarrojo (IR)</b>	Infrarrojo reflejado	0,7 - 1,3 $\mu\text{m}$ (IR cercano) 1,3 - 3,0 $\mu\text{m}$ (IR medio)	Radiación solar reflejada que no contiene información acerca de las propiedades térmicas de los materiales. El rango 0,7 a 0,9 $\mu\text{m}$ se puede detectar usando películas fotosensibles (infrarrojo fotográfico).
	Infrarrojo térmico	3,0 – 5,0 $\mu\text{m}$ 8,0 – 14,0 $\mu\text{m}$	Corresponden a dos ventanas atmosféricas en la región térmica.
<b>Radar(región de la microonda)</b>		0,1- 100 cm.	Radiación de grandes longitudes de onda, capaces de penetrar nubes, nieblas y lluvia.
<b>Ondas de radio y TV</b>		> 100 cm.	Radiación con las mayores longitudes de onda del espectro. Se utilizan en telecomunicaciones.

**Nota:**(1  $\mu\text{m} = 10^{-6} \text{ m}$  y 1 nm = 10). Fuente: Guamán Chiluisa (2018)

## Firma espectral

Cuando la energía electromagnética llega a la superficie terrestre, interactúa con cada tipo de material ya sea por reflexión, absorción o transmisión, de acuerdo a un patrón de respuesta espectral. La superficie de nuestro planeta, de modo global, se considera dividida en tres grandes tipos de cubiertas: superficies con agua, superficies con vegetación y suelos, cada tipo de material reflejará la radiación incidente de forma diferente lo que permitirá distinguirlo de los demás si medimos la radiación reflejada. Esto puede observarse en el gráfico 5, donde elementos presentes en la superficie de la tierra poseen un % de reflectancia diferente en las regiones del espectro electromagnético. Este comportamiento distintivo de cada tipo de material es aprovechado en procesos de clasificación de imágenes, siendo común referirse a él como “firma espectral” (Hernández, 2011).

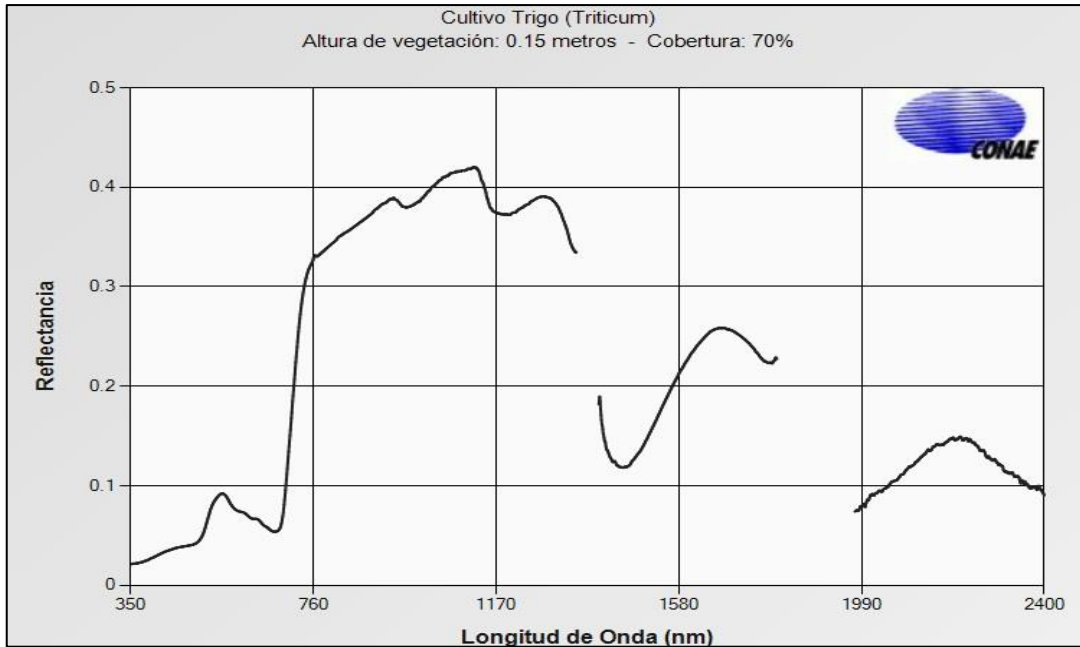


**Gráfico 5.** Firmas espectrales típicas de distintos elementos presentes en la superficie terrestre. Vis: región visible; IRC: infrarrojo cercano; SWIR: ShortWavelength InfraRed (Infrarrojo de onda corta). Fuente: Volante (2012).

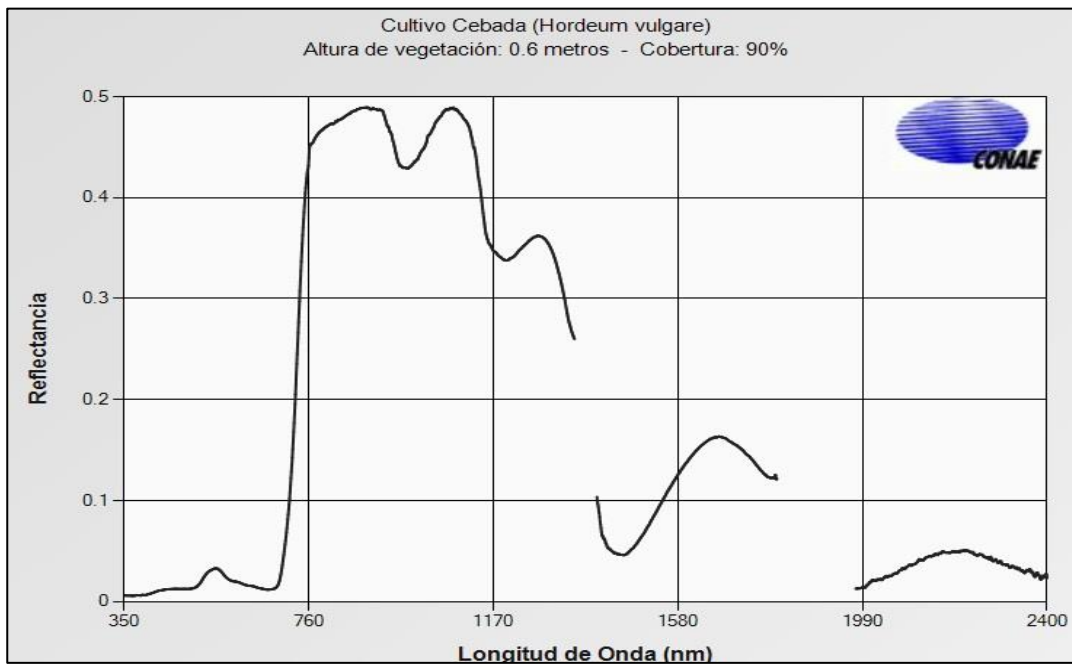
En el estudio de una vegetación, dicha firma espectral está altamente influenciada por la reflectividad de la hoja en función de su estado fenológico, forma y contenido de humedad. Considerando el estudio de una vegetación sana y vigorosa, en la región visible del espectro (0,4 - 0,7  $\mu\text{m}$ ) los pigmentos fotosintéticos son los que condicionan la respuesta espectral de la vegetación; mientras que en la región de infrarrojo cercano (0,7 - 1,3  $\mu\text{m}$ ), es la estructura interna de la hoja el factor condicionante. Los pigmentos fotosintéticos (clorofila, xantofila y carotenos) actúan como elementos absorbentes en la región visible del espectro produciendo una baja reflectividad. Mientras que en la región del infrarrojo cercano se produce una alta reflectividad debido a la estructura interna de la hoja, en particular la capa esponjosa de mesófilo con sus cavidades de aire interna difundiendo y dispersando la radiación incidente (Chuvienco, 1990).

En los gráficos 6 Y 7 se muestran la reflectividad de cultivos de trigo y cebada respectivamente; para el mes de agosto en la localidad de Bell Ville Córdoba.





**Gráfico 6.** Firma espectral de trigo para el mes de agosto de 2012 en Bell Ville Córdoba. Fuente: Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE) (2012).



**Gráfico 7.** Firma espectral de cebada para el mes de agosto de 2012 en Bell Ville Córdoba. Fuente: CONAE (2012).

## Imágenes satelitales

Una imagen satelital es el producto obtenido por un sensor instalado a bordo de un satélite artificial a través de la captación de la radiación electromagnética emitida o reflejada por un cuerpo celeste; producto que posteriormente se transmite a estaciones terrestres para su visualización, procesamiento y análisis (Guamán Chiluisa, 2018).

### Satélites

Existen varios tipos de imágenes que se pueden utilizar para monitorear la superficie terrestre. Las mismas están determinadas por diferentes sensores y sus características intrínsecas, que al mismo tiempo, los distingue entre sí. Estas características se definen en la tabla 2.

**Tabla 2.** Características diferenciales de satélites.

Característica	Definición
<b>Resolución espectral</b>	Número y ancho de bandas espectrales que capta el sensor del satélite.
<b>Resolución temporal o periodicidad</b>	Se refiere a la periodicidad con que un sensor capta imágenes de una misma zona. Indica el tiempo del paso del satélite sobre la vertical de un punto y se mide en días.
<b>Resolución radiométrica</b>	Número de niveles de gris (energía) distintos que registra el sensor. Indica la sensibilidad del sensor, es decir la capacidad de discriminar entre pequeñas variaciones en la radiación que capta. Se expresa en número de bits que es capaz de almacenar cada píxel
<b>Altitud</b>	Se refiere a la altura orbital del satélite

*Fuente: Adaptado de Chuvieco 1990.*

En áreas agrícolas donde los **lotes son pequeños**, debido a su resolución espacial, los datos de LANDSAT y SPOT (Satellite Pour l'Observation de la Terre) son muy adecuados; no obstante la frecuencia temporal de estos satélites y la posibilidad de nubosidad durante sus pasadas son, a veces, una limitante (Bocco et al., 2015).

Los satélites LANDSAT y SPOT son sistemas ópticos multiespectrales y referidos como pasivos, es decir, que utilizan la luz solar reflejada por la Tierra para la formación de imágenes de la superficie del planeta. Por el contrario, los satélites SAR (acrónimo SAR, del inglés *Synthetic Aperture Radar*) son sistemas activos ya que emiten sus propias señales de microondas a la Tierra y procesa las señales que recibe de regreso. Al ser un sensor activo, la longitud de onda más larga es más adecuada para penetración atmosférica y puede coleccionar datos sin tener en cuenta las condiciones atmosféricas de la Tierra (nubes). Esta habilidad ofrece al usuario

significativas ventajas cuando se trata de ver bajo condiciones que impiden observaciones hechas por aviones o satélites ópticos (Reuter, 2009).

### Programa LANDSAT

El programa estadounidense LANDSAT es un programa conjunto entre la Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio (NASA, por sus siglas en inglés, National Aeronautics and Space Administration) y el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) que ofrece un catálogo amplio de observaciones de la Tierra a nivel global. Desde su origen en 1975 hasta el día de hoy, continúa aportando imágenes de gran valor científico sobre nuestro planeta. Las imágenes LANDSAT siguen en la actualidad una política de datos **libres y abiertos**, estando disponibles las imágenes desde diferentes repositorios, siendo el más utilizado el de earthexplorer del USGS (<https://earthexplorer.usgs.gov/>). A nivel nacional se puede destacar el repositorio de CONAE (<https://catalogos.conae.gov.ar/landsat8/>), que también nos permite descargar imágenes LANDSAT.

### Series

El programa LANDSAT contó a lo largo del tiempo con varias “series” de satélites, cada uno con un sensor con características distintas. En el periodo reciente las más utilizadas fueron las series 5, 7 y 8. Las primeras dos ya están en desuso, mientras que la serie 8 es la que se utiliza actualmente y cuyas características se especifican en la tabla 3.

El sensor del satélite fue uno de los principales elementos que fue modificado y perfeccionado hasta llegar al actual sensor de la serie 8.

### Sensores

**Sensor MSS (Serie 1-4):** El equipo de barrido multiespectral de cuatro bandas M.S.S. (Multiespectral Scanner) cubre franjas del terreno de 185 km. de lado en cuatro bandas de longitud de onda, dos en el espectro visible y dos en el infrarrojo reflejado con una resolución de 80m.

**Sensor Thematic Mapper o TM (Serie 5):** Es un sensor de segunda generación derivado de los M.S.S. que equiparon a sus predecesores. Posee 7 bandas en lugar de 4, con una resolución espacial de 30 m en la región reflejada del espectro electromagnético, mientras en la banda del infrarrojo termal la resolución es de 120 m.

**Sensor Enhanced Thematic Mapper o ETM+(Serie 7):** Similar al TM, con un perfeccionamiento del sistema de calibración radiométrica y la adición de una banda pancromática (banda 8) con resolución espacial de 15 m.

**Sensores Operational Land Imager (OLI) y Thermal Infrared Sensor (TIR):** ambos sensores se encuentran presentes en la serie **LANDSAT 8**. El instrumento OLI incorpora 2 nuevas bandas (banda 1 azul visible y banda 9 infrarrojo) para operar con un total de nueve bandas con resoluciones de entre 15 (pancromática) a 30 m. Por otro lado, el sensor TIRS está compuesto por dos bandas espectrales (bandas 10 y 11), las cuales detectan infrarrojos térmicos, una herramienta imprescindible para medir la temperatura de la superficie de la Tierra. Fuente: <https://landsat.gsfc.nasa.gov/>

**Tabla 3.** Características serie 8 LANDSAT.

Satélite	Altitud y periodicidad	Resolución radiométrica (bits)	Sensor	Banda	Intervalo espectral ( $\mu\text{m}$ )	Resolución espacial (m)
LANDSAT 8	705 km - 16 días	12	OLI	1	0.433 - 0.453	30
				2	0.450 - 0.515	30
				3	0.525 - 0.600	30
				4	0.630 - 0.680	30
				5	0.845 - 0.885	30
				6	1.560 - 1.660	30
				7	2.100 - 2.300	30
				8 (PAN)	0.500 - 0.680	15
				9	1.360 - 1.390	30
			TIRS	10	10.30 - 11.30	100
				11	11.50 - 12.50	100

Fuente: LANDSAT 8 handbook user (2019).

### Características orbitales

La órbita seleccionada para los satélites de la serie LANDSAT corresponde a una órbita circular, casi polar, repetitiva que pasa por el mismo sitio cada 16 días. Es sincrónica con el sol para tener iluminación constante (Stern, 2001). La altura de órbita es de 705 km, pasando por el Ecuador a las 9,30 hs de tiempo local (Argentina).

El proceso de barrido continuo del MSS produce imágenes cada 28 segundos aproximadamente que corresponden a una distancia en el terreno de 185 km. Durante el procesamiento se separan los puntos centrales de cada imagen a una distancia que corresponde a intervalos de 25 segundos, lográndose así un recubrimiento de un 10 % en las imágenes sucesivas durante una órbita (LANDSAT 8 handbook, 2019).

### Sistema de referencia mundial

La repetitividad de la órbita LANDSAT ha permitido un sistema de referencia mundial (WRS), donde cada órbita dentro del ciclo es designada como "path" y a lo largo de estas órbitas se ubican los centros de cada imagen y se les llaman líneas ("row").

Los “path” no son paralelos a los meridianos si no que tienen una leve inclinación, mientras que los “row” si son líneas con la misma disposición que los paralelos y cortan a los “path”. Estos elementos conforman un reticulado de 233 paths y 248 rows que cubren la totalidad de la tierra; y la intersección de uno con otro da como resultado el centro de una imagen satelital. Conociendo estos datos se puede adquirir la imagen de un lugar determinado (Monferrer, 2012) (figura 4).

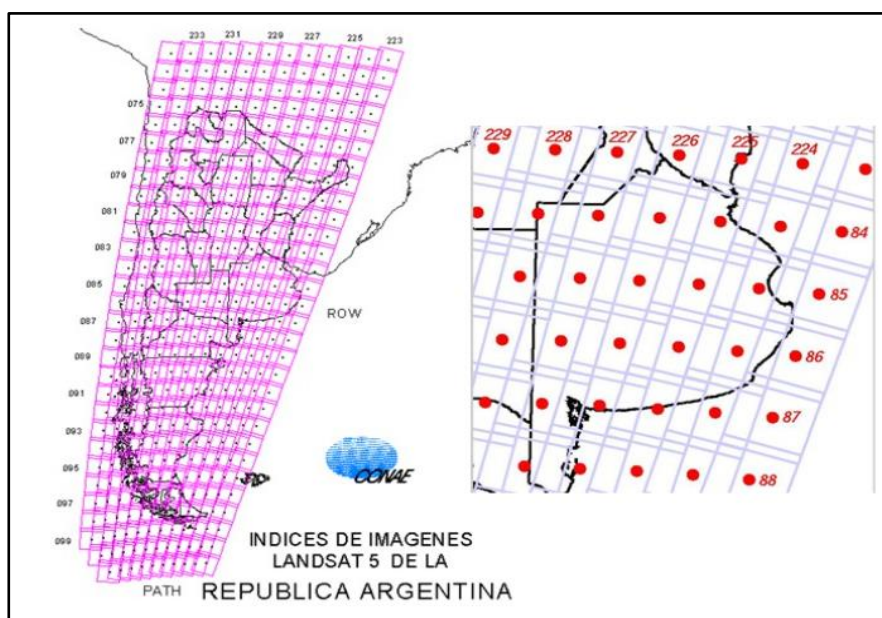


Figura 4. Mapa Path Row Argentina y Provincia de Buenos Aires en LANDSAT 5. Fuente: CONAE

### Programas SPOT y Sentinel

Los satélites SPOT son una serie de satélites de teledetección civiles de observación del suelo terrestre. Desarrollado en 1978 por el CNES (Centro Nacional de Estudios Espaciales Francés) en colaboración con Bélgica y Suecia. Sus características se detallan en la tabla 4 y sus imágenes son **pagas** (Inteligencia Airbus <http://www.astrium-geo.com/es/>).

Los satélites Sentinel son desarrollados bajo la dirección de la Agencia Espacial Europea (ESA) en el marco del programa Copernicus. Este programa, consta de varios satélites Sentinel (siete) destinados a proporcionar información precisa, actualizada y de fácil acceso para mejorar la gestión del medio ambiente (Proyecto Copernicus: <https://www.copernicus.eu/es>) Las características más destacadas del satélite Sentinel 2, se detallan en la tabla 4.

**Tabla 4.** Características de los satélites Sentinel y SPOT.

Satélite	Altitud y periodicidad	Banda	Intervalo espectral ( $\mu\text{m}$ )	Resolución espacial (m)
Sentinel 2	786 km - 10 días individualmente y 5 en conjunto	1	0.43 - 0.45	60
		2	0.45 - 0.52	10
		3	0.54 - 0.57	10
		4	0.65 - 0.68	10
		5	0.69 - 0.71	20
		6	0.73 - 0.74	20
		7	0.77 - 0.79	20
		8	0.78 - 0.90	10
		9	0.85 - 0.87	20
		10	1.36 - 1.39	60
		11	1.56 - 1.65	60
		12	2.10 - 2.28	20
SPOT 5	832 km- 26 días	1	0,50-0,59	10
		2	0,61-0,68	10
		3	0,78-0,89	10
		4	1,58-1,75	20
		5	0,48-0,71	2,5-5

Fuente: Spot image <https://www.intelligence-airbusds.com>; Sentinel 2 handbook user (2019)

La tabla 5 detalla las principales diferencias entre los satélites antes citados. Para el presente trabajo se utilizaron imágenes de LANDSAT 8, debido al acceso **gratuito** a la fecha de realización del mismo.

**Tabla 5.** Tabla comparativa entre los satélites LANDSAT 8, SPOT-5 y Sentinel-2

	LANDSAT 8	SPOT-5	Sentinel-2
Periodicidad (días)	16	26	5
Ancho de cobertura (km)	185	2x60	290
Bandas espectrales	7, 12	4	13
Resoluciones espaciales (m)	30;60	2.5;10;20	10;20;60
Resolución radiométrica (bits)	12	8	12
Acceso a imágenes	Gratuita	Paga	Gratuita (a partir de enero 2019)

## Índices de vegetación

Los índices de vegetación son medidas cuantitativas, basadas en los valores digitales, que miden la biomasa o vigor vegetal. El índice de vegetación es una combinación de las bandas espectrales, siendo el producto de varios valores espectrales que son sumados, divididos, o

multiplicados en una forma diseñada para producir un simple valor que indique la cantidad o vigor de vegetación dentro de un píxel. Permite estimar y evaluar el estado de salud de la vegetación, en base a la medición de la radiación que las plantas emiten o reflejan. Altos valores de índices de vegetación identifican píxeles cubiertos por proporciones substanciales de vegetación saludable, mientras que valores bajos indicarían la presencia de vegetación poco vigorosa o suelo descubierto. Existe una variedad de índices de vegetación que han sido desarrollados para ayudar en el monitoreo de la vegetación. La mayoría de estos índices están basados en las interacciones diferentes entre la vegetación y la energía electromagnética de las bandas del espectro rojo e infrarrojo (Díaz García-Cervigón, 2015).

### Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI)

El índice de vegetación más conocido y usado es el Índice Normalizado Diferencial de Vegetación. Este índice fue introducido por Rouse et al. 1974, con el objetivo de separar la vegetación del brillo que produce el suelo. Los valores del NDVI están en función de la energía absorbida o reflejada por las plantas en diversas partes del espectro electromagnético. Mientras que en el visible los pigmentos de la hoja absorben la mayor parte de la energía que reciben, en el NIR, las paredes de las células de las hojas, que se encuentran llenas de agua, reflejan la mayor cantidad de energía. En contraste, cuando la vegetación sufre algún tipo de estrés, ya sea por presencia de plagas o por sequía, la cantidad de agua disminuye en las paredes celulares por lo que la reflectividad disminuye el NIR y aumenta paralelamente en el rojo al tener menor absorción clorofílica (Díaz García Cervigón, 2015)

El cálculo del NDVI (ecuación 1) implica el uso de una simple fórmula con dos bandas, el Infrarrojo Cercano (NIR) y el rojo (RED). Los valores de este índice fluctúan entre -1 y 1. Diversos estudios y publicaciones señalan que valores por encima de 0.1 indican presencia de vegetación, y cuanto más alto sea el valor de este índice, las condiciones de vigor son mejores

Ecuación 1. Cálculo de NDVI.

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{(NIR + RED)}$$

## Clasificación de Imágenes satelitales

El proceso de clasificación es esencial en el reconocimiento de patrones de imágenes satelitales. Clasificar significa asociar a cada elemento de una colección con una categoría o clase (de entre un conjunto predeterminado o desconocido, según sea el caso). Esta asociación se realiza en base a las características o propiedades de los objetos que están representados por un conjunto de descriptores.

En particular, la clasificación de datos en imágenes de sensado remoto es una tarea fundamental en el proceso de reconocimiento de patrones. Se requiere el uso de diferentes técnicas para lograr una precisión adecuada en la clasificación de objetos en imágenes digitales (Revollo Sarmiento, 2015).

### Clasificación Supervisada

La clasificación supervisada necesita de cierto conocimiento previo del terreno y de los tipos de coberturas, a través de una combinación de trabajo de campo, análisis de informes técnicos y referencias profesionales locales. En base a este conocimiento se definen y se delimitan sobre la imagen las áreas de entrenamiento. Las características espectrales de estas áreas son utilizadas para "entrenar" un algoritmo de clasificación, que calcula los parámetros estadísticos de cada banda para cada sitio, posteriormente evalúa cada nivel de radiancia de la imagen, los compara y asigna a una respectiva clase. En otras palabras, el usuario preliminarmente reconoce las regiones de interés identificadas en el área y el algoritmo extrapola estas características espectrales a otras regiones de la imagen, realizando la clasificación (Guamán Chiluisa, 2018; Willington et al 2013).

### Métodos paramétricos de clasificación

Los diferentes métodos paramétricos que existen para clasificar el uso o cobertura del suelo pueden agruparse en tres categorías principales: basados en **distancia**, en **probabilidad** y en **reglas de decisión angular**. Los primeros utilizan los valores espectrales medios de las distintas clases, ignorando las varianzas entre ellas; los segundos ofrecen, generalmente, mayor exactitud que los anteriores; incorporando la media y la varianza de los datos utilizados, lo que les proporciona información adicional sobre la cual basar la clasificación. Los terceros utilizan una regla de decisión basada en ángulos espectrales formados entre un espectro de referencia y un píxel no clasificado en un espacio de  $n$  dimensiones, donde  $n$  es el número de bandas disponibles (Willington et al. 2013).



## Coeficiente de cultivo

La evapotranspiración de un cultivo puede ser calculada usando el coeficiente de cultivo ( $K_c$ , ecuación 2) definido como el cociente entre la evapotranspiración del cultivo en condiciones óptimas ( $ET_c$ ) y la evapotranspiración de referencia ( $ET_0$ ). Este coeficiente integra el efecto de características que distinguen la evapotranspiración de un cultivo de la de la superficie de referencia. Los factores que determinan los coeficientes de cultivo son el tipo de cultivo, clima, evaporación del suelo, y el estado de crecimiento y desarrollo (Cuesta et al. 2005)

Ecuación 2. Cálculo de  $k_c$ .

$$K_c = \frac{ET_c}{ET_0}$$

## Objetivos

El presente estudio se realizó en el Partido de Coronel Dorrego (Prov. Bs. As.) con el propósito de realizar un monitoreo de lotes de cosecha fina mediante la implementación de técnicas de procesamiento digital de imágenes. El mismo aportará resultados significativos a la producción local al disponer de información en tiempo y forma que permitan conocer la evolución de los lotes destinados a la comercialización.

**Objetivo general:** monitoreo de lotes de trigo y cebada en el partido de Coronel Dorrego mediante la aplicación de técnicas de sensado remoto.

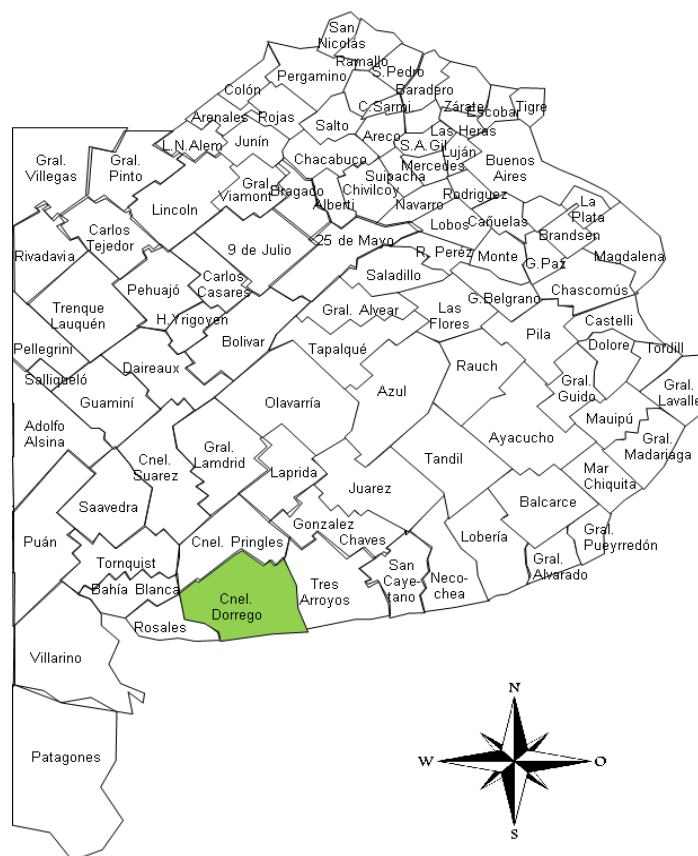
**Objetivos específicos:**

- investigar la relación de la fenología con el Índice de Vegetación Normalizada.
- evaluar el estado hídrico de los cultivos en sus diferentes estadios.
- investigar diferentes métodos de clasificación de trigo y cebada mediante imágenes satelitales.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Área de estudio.

El área de estudio se localiza en el partido de Coronel Dorrego, provincia de Buenos Aires, fisiográficamente se enmarca dentro del Distrito Austral de la Provincia Fitogeográfica Pampeana (Cabrera, 1976) (Figuras 5 y 6). Geomorfológicamente es un área llana, con una suave ondulación hacia el Oeste y una moderada pendiente hacia el mar, los suelos predominantes son hapludoles, asociados a argiudoles. El área posee clima templado subhúmedo seco según la clasificación de Thornthwaite (1948). La precipitación media anual es de 700 mm, mientras que la temperatura media anual es de 14,5 °C (Paoloni et al, 2005). Este partido tiene una superficie productiva de 537.000 has, que representa un 92 % de la superficie total del partido (583.150 has).



**Figura 5.** Provincia de Buenos Aires y área de estudio. Fuente: elaboración propia sobre mapa de zonificación de BCP Bahía Blanca (2020)

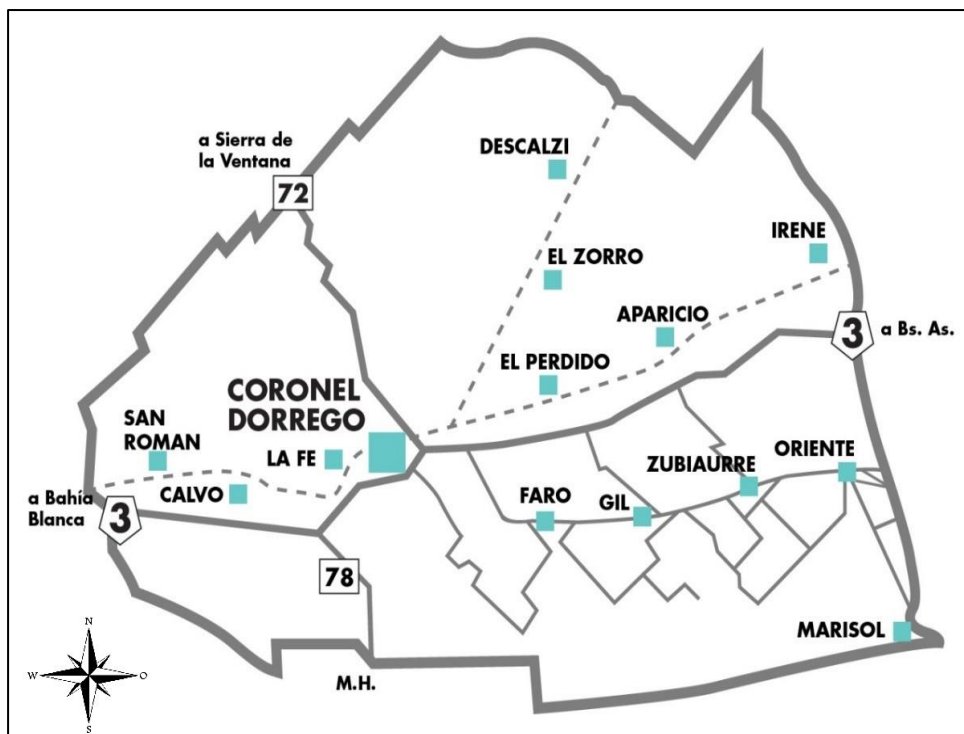


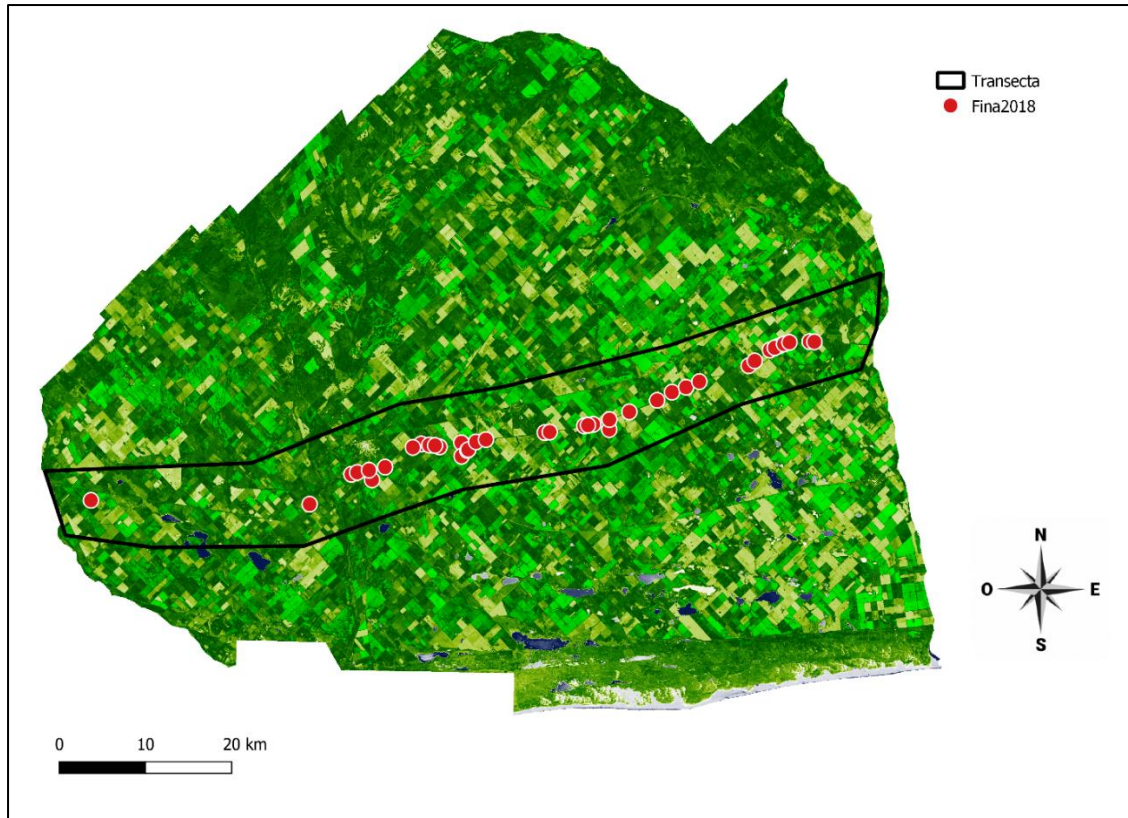
Figura 6. Área de estudio. Partido de Coronel Dorrego. Fuente: [www.dorrego.gov.ar](http://www.dorrego.gov.ar)

## Fase Preliminar

### Toma de muestras

El trabajo de campo consistió en una recorrida del área de estudio en el mes de agosto de 2018, para el relevamiento de lotes de trigo y cebada.

El muestreo se realizó marcando una **transecta** de 100 km a lo largo de la ruta nacional N°3. La toma de datos se realizó con una aplicación de SMART PHONE Android del que disponía el grupo de trabajo de la Universidad Nacional del Sur. Se registraron los siguientes datos: fecha, número de lote, estado fenológico y sanitario del cultivo, **latitud y longitud** (figura 7), orientación, observaciones y lotes denominados “otros”, que representan todo aquello no clasificado como los dos anteriores (ruta, caminos, barbecho, avena, etc). El total de lotes muestreados fue 51 (16 de trigo, 20 de cebada y 15 de otros)



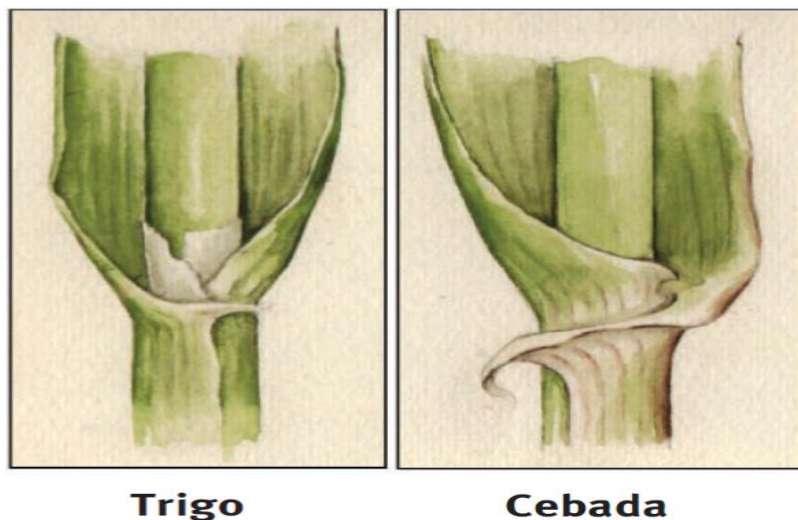
**Figura 7.** Ubicación de la transecta y lotes muestreados en el área de estudio sobre imagen NDVI.

### Reconocimiento de los cultivos de invierno

Las especies trigo y cebada a campo se identificaron observando vaina, lígulas y aurículas (Tabla 6 y Figura 8). Para poder determinar estas características visualmente se realizó la extracción de plantas en los lotes. Para cada lote identificado se realizó su georreferenciación en un punto del lote, con el objetivo de digitalizarlo y calcular las dimensiones del mismo con las imágenes satelitales.

**Tabla 6.** Clasificación trigo y cebada en estado vegetativo.

Cultivo	Vaina	Aurículas	Lígulas
Trigo	Con pelos	Abrazadoras (< 3 mm) con pelos	Sin dientes
Cebada	Glabras	Abrazadoras glabras (> 3mm)	Con dientes



**Figura 8.** Detalle de vaina, lígula y aurícula de cebada y trigo. Fuente: Carrasco et al 2009.

### Descarga de Imágenes satelitales

Las imágenes LANDSAT 8 fueron obtenidas en forma gratuita desde el sitio [earthexplorer.usgs.gov](http://earthexplorer.usgs.gov), previo al registro de un correo electrónico. El criterio de búsqueda es a través del “path” y “row” de la zona de estudio, fecha de interés, tipo de sensor e información contenida en la imagen; la descarga es a demanda y es por ello que puede demorarse un tiempo en que esté disponible.

En el presente trabajo se utilizaron imágenes captadas por el sensor OLI/TIRS del satélite LANDSAT 8 durante el año 2018 (tabla 7). Las mismas se descargaron aplicando los siguientes criterios de búsqueda:

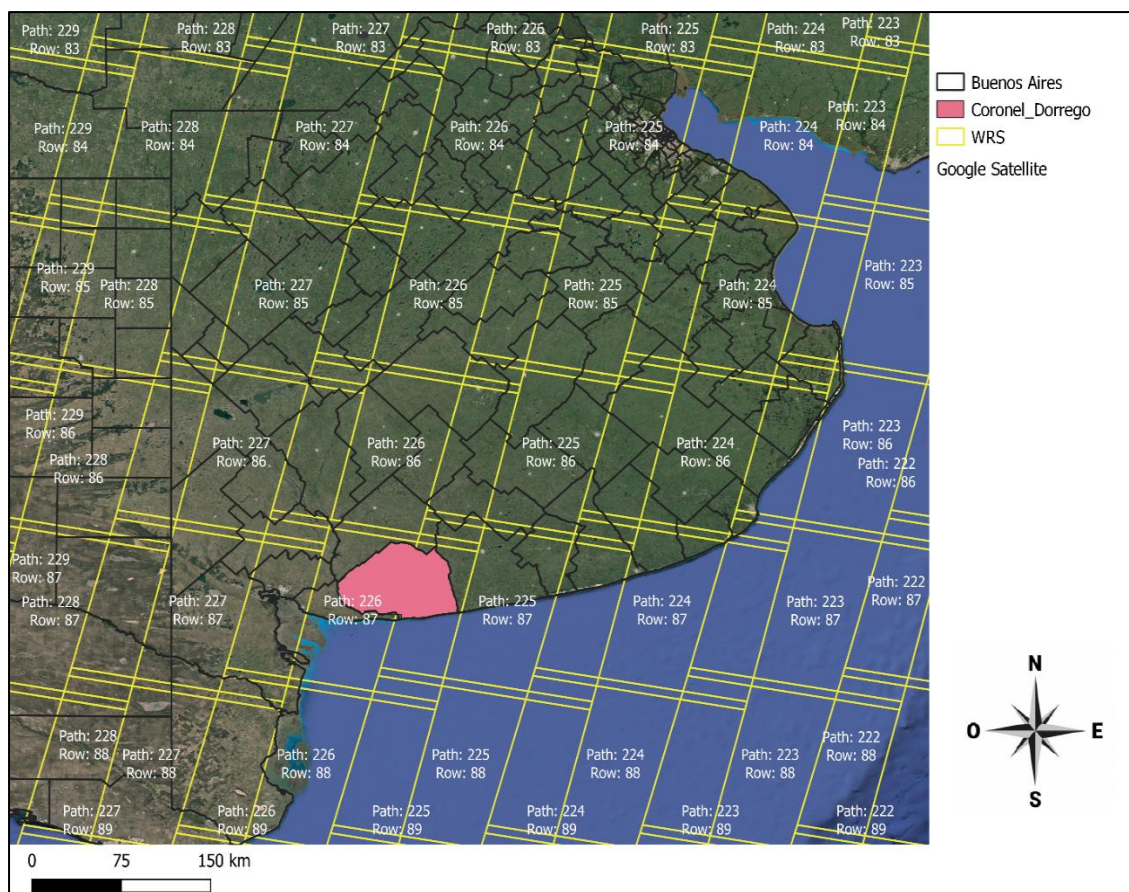
- Ubicación área de estudio: Coronel Dorrego. Path: 226 y Row: 87 en el sistema de referencias WRS2 del Satélite LANDSAT 8 (figura 9).
- Periodo de estudio: 01/06/2018 – 31/12/2018. Correspondiente al ciclo de los cultivos de trigo y cebada.
- Satélite: LANDSAT 8. Sensor OLI/TIRS.

El resultado fue de 13 imágenes disponibles. Solo se trabajó con cinco, ya que el resto (ocho) presentaban nubes, y su uso generaría un cálculo muy distorsionado del índice de verdor (tabla 7).

**Tabla 7.** Calendario de visitas del satélite en la zona de estudio e imágenes tomadas disponibles en el repositorio de USGS Earthexplorer.



Fuente: elaboración propia a partir de datos del repositorio USGS.



**Figura 9.** Mapa Path Row Provincia de Buenos Aires. Fuente: elaboración propia en QGIS, sobre base de Google satélite y cuadrícula path/row del WRS de LANDSAT 8.

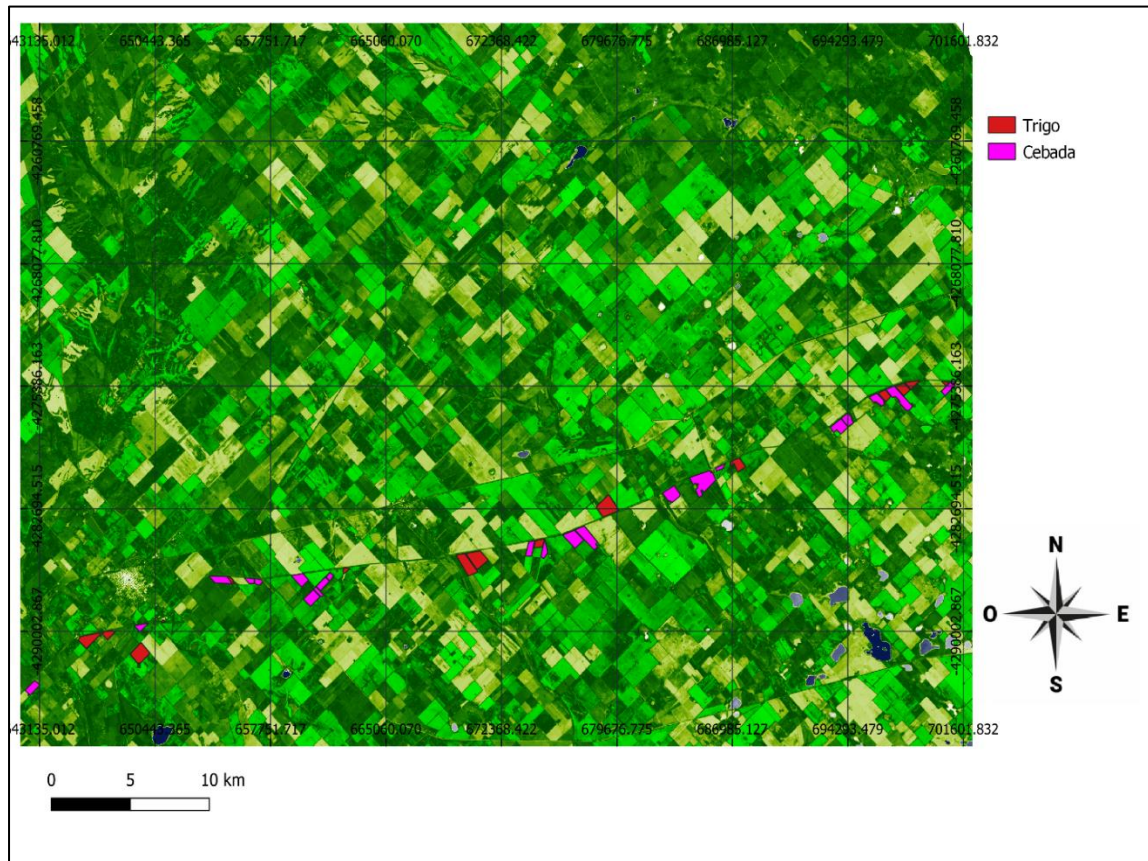
## Procesamiento de datos

Un Sistema de Información Geográfica (SIG o GIS, en su acrónimo inglés) es un conjunto de programas, equipamientos, metodologías, datos y personas (Usuarios), perfectamente integrado, de manera que hace posible la recolección de datos, el almacenamiento, procesamiento y análisis de estos datos georreferenciados, así como la producción de información derivada de la aplicación (Garay, 2013)

El análisis de las imágenes se realizó con la versión 3.8 Zanzibar del software libre y de código abierto Q-GIS. Las coordenadas muestreadas se incorporaron a Q-GIS mediante un archivo CSV, obteniendo así la **capa vectorial de datos**. Luego se procedió a la digitalización de cada lote, creando de esta manera la **capa raster de lotes** (figura 11).

Con las bandas 5 (infrarrojo cercano) y 4 (rojo) de las imágenes LANDSAT 8 de las diferentes fechas, se procedió al cálculo de NDVI utilizando la ecuación 1, creando de esta manera la capa NDVI y logrando la digitalización de los lotes (figura 11).





**Figura 10.** Lotes digitalizados de trigo (rojo) y cebada (rosa) sobre imagen NDVI en QGIS.

### Método cualitativo de selección de lotes

En el estado de macollaje y sobre las imágenes NDVI obtenidas previamente, se realizó un análisis cualitativo de todos los lotes muestreados (36). De este total se seleccionaron cinco para trigo y cinco para cebada, que fueron los más uniformes y homogéneos.

### Construcción de firma espectral

La firma espectral de ambos cultivos fue construida con las medias aritméticas del NDVI extraídas de estos cinco lotes. Esta información fue obtenida de Q-GIS mediante la tabla de atributos de cada lote. La misma tuvo como objetivo comparar los lotes a lo largo del tiempo y poder realizar la **selección de uno** para cada cultivo con la menor variación en el periodo de estudio y, posteriormente utilizarlo para la evaluación del estado hídrico.

### Evaluación de estado hídrico de lotes

La evaluación del estado hídrico del lote de trigo y cebada seleccionado se realizó teniendo en cuenta estas variables:

Precipitaciones: informe climático obtenido de las estaciones meteorológicas de BCP cercanas a los lotes seleccionados en la campaña 2018. Las precipitaciones cercanas al lote de trigo fueron obtenidas de la estación meteorológica ubicada en la localidad del Faro. En cebada se utilizó el promedio de precipitaciones de las tres estaciones meteorológicas ubicadas en el partido de Dorrego (El Zorro, Faro y Monte Hermoso) debido a que el lote no se encontraba en cercanías de ninguna estación meteorológica en particular. Para el partido de Dorrego se registró un total de 710 mm, similar al promedio de los últimos 5 años (712 mm).

Kc: los valores corresponden a cultivos de invierno sembrados en el área semiárida del SO bonaerense (Paoloni et al. 2005). Se calculó un promedio de tres valores registrados para cada mes durante el ciclo. Existe una relación lineal entre los valores de NDVI y los valores de Kc de cultivo (Cuesta et al., 2005).

Fenología: escala fenológica de Zadoks (Zadoks et al,1974) para trigo, la cual se aplicó en ambos cultivos.

### Clasificación supervisada

Para la clasificación se utilizaron como set de datos: 16 lotes de trigo, 20 de cebada y 15 denominados “otros”. En base a esto se utilizó el 70 % de los datos para “entrenar” el algoritmo, dejando el 30 % restante para ser clasificado por la herramienta del software; es decir que se emplearon 11 de trigo, 14 de cebada y 10 de “otros” para el entrenamiento.

### Métodos paramétricos de clasificación

La clasificación de lotes se realizó aplicando los métodos de **distancia mínima, máxima probabilidad y ángulo espectral**, utilizando la función semi-automatic classification plugin de QGIS.

### Análisis del desempeño de la clasificación

La capacidad del modelo para representar confiablemente el sistema real se relaciona esencialmente con la exactitud. Existen diferentes enfoques que pueden ser empleados como

métrica, entre ellas una evaluación cualitativa basada en el conocimiento de un experto y una evaluación cuantitativa basada en estrategias de muestreo.

La bondad o exactitud de un clasificador es una estimación de la probabilidad de la clasificación correcta de una instancia elegida al azar, por ello para evaluar la performance del clasificador es importante que el conjunto de prueba o validación sea diferente del de entrenamiento. Inclusive debe ser lo suficientemente grande para evitar los resultados denominados optimistas (Revollo Sarmiento, 2015).

### Matriz de confusión

La matriz de confusión o matriz de error es el enfoque más utilizado en la evaluación de la precisión de una clasificación (Revollo Sarmiento, 2015). La misma es un arreglo cuadrado de números ordenados en columnas y filas. Las columnas corresponden a las clases predichas en el proceso de clasificación y, las filas al conjunto de referencia. En la diagonal principal se reportan los casos correctamente clasificados y en la opuesta se detallan los errores de la predicción. En la tarea clasificación con dos valores, dado un clasificador y una instancia se producen cuatro valores de salida:

- Verdadero positivo (Tp) si la instancia es clasificada correctamente y su clase pertenece a la positiva.
- Verdadero negativo (Tn) si la instancia es correctamente clasificada con la clase de valor negativo.
- Falso positivo (Fp) cuando la instancia es de la clase negativa y es clasificada como clase positiva.
- Falso negativo (Fn) se presenta cuando el clasificador clasifica erróneamente una instancia de la clase positiva como un caso de la clase negativa.

En base a estas cuatro salidas se construye la matriz de confusión presentada en la tabla 8.

**Tabla 8.** Matriz de confusión.

		Predicción		
		Negativo	Positivo	Total
Actual	Negativo	Tn	Fp	An = Tn + Fp
	Positivo	Fn	Tp	Ap = Fn + Tp
	Total	Pn = Tn + Fn	Pp = Fp + Tp	T

*Fuente: Revollo Sarmiento 2015*

A partir de la matriz de confusión se calculan diversos parámetros representados en la tabla 9, que estiman su precisión respecto del total de característicos en estudio (T). La precisión global (Ag) cuantifica el **número de característicos correctamente clasificados**; varía entre 0 y 1, siendo los valores más cercanos a 1 los mejores. La precisión de clases es la proporción de verdaderos positivos y negativos (RTp y RTn), indica el porcentaje de característicos de la k-ésima clase correctamente clasificados. La precisión de asignación es la proporción de falsos positivos y negativos (RFp y RFn), indica el porcentaje de característicos clasificados como clase k que realmente corresponden a dicha clase. Los coeficientes RFp y RFn están relacionados con los errores de “asignación” y “omisión”, respectivamente. Es decir, los errores que cuantifican el número de característicos clasificados como la k-esima clase que corresponden a una clase diferente y el número de característicos pertenecientes a la k-ésima clase que no fueron clasificados como dicha clase.

**Tabla 9.** Parámetros de precisión.

Definición	Símbolo	Definición Matemática
Precisión global (accuracy)	Ag	$T_n + T_p / (A_n + A_p)$
Índice de Verdaderos Positivos	RTp	$T_p / A_p$
Índice de Verdaderos Negativos	RTn	$T_n / A_n$
Índice de Falsos Positivos	RFn	$T_n / P_n$
Índice de Falsos Negativos	RFp	$T_p / P_p$
Parámetro Auxiliar (a)	Pr (a)	$(T_n + T_p) / T$
Parámetro Auxiliar (e)	Pr (e)	$(A_n * P_n + A_p * P_p) / T^2$

*Fuente: Revollo Sarmiento, 2015*

### Nivel de concordancia entre clasificadores

La medida de consenso entre los resultados del modelo y la evaluación del experto es esencial. Esta evalúa la variabilidad de los resultados entre la imagen clasificada según la apreciación humana (supervisada) y la realidad observada debido a la exactitud de la clasificación del modelo (no supervisada). El índice Kappa ( $\kappa$ ) introducido por Cohen (1960) es una medida de consenso entre dos o más “opiniones”, y no tiene en cuenta las

coincidencias que pueden ocurrir por puro azar. Este índice únicamente tiene en consideración si hay o no acuerdo, es decir, si se clasifica o no la instancia en la misma clase (Borrás et al. 2017).

Además, es insensible al desbalanceo de clases, **lo que sucede en este trabajo** porque las cantidades de lotes de Trigo, Cebada y Otros en las imágenes son desproporcionadas.

El coeficiente Kappa ( $\kappa$ ) se calcula a partir de la ecuación 3, puede tomar valores entre -1 y +1. Mientras más cercano a +1, mayor es el grado de concordancia inter-observador, por el contrario, mientras más cercano a -1, mayor es el grado de discordancia inter-observador (Tabla 10).

Ecuación 3. Índice Kappa ( $\kappa$ )

$$\kappa = \frac{\text{Pr}(a) - \text{Pr}(e)}{1 - \text{Pr}(e)},$$

Donde  $\text{Pr}(a)$  es la proporción de coincidencias frente al total de sujetos y  $\text{Pr}(e)$  es la probabilidad hipotética de la posibilidad de acuerdo entre los observadores, es decir, concordancia esperada.

**Tabla 10.** Escala (Landis-Koch, 1977) para medir el grado de concordancia del índice Kappa.

Kappa	Grado de acuerdo
< 0.00	Sin acuerdo
0.01 - 0.20	Insignificante
0.20 - 0.40	Bajo
0.40 - 0.70	Bueno
0.70 - 1.00	Óptimo

## RESULTADOS

### Análisis de lotes de trigo y cebada

Todos los lotes de trigo y cebada fueron extraídos de la capa ráster NDVI para obtener los datos estadísticos de dispersión de cada uno de ellos en forma individual (media aritmética, desvío estándar, valor máximo y valor mínimo). Esta información fue obtenida de Q-GIS mediante la tabla de atributos de cada lote. Se calculó además el coeficiente de variación (CV) para conocer la uniformidad de cada uno de ellos.

De todos los lotes analizados estadísticamente se seleccionaron para graficar las firmas espectrales y su relación con los estados fenológicos los que tenían valores de NDVI menores a 15% en las imágenes LANDSAT obtenidas.

La tabla 11 muestra los promedio, desvíos y CV de los mejores 5 lotes muestreados.

**Tabla 11.** Datos estadísticos de dispersión de NDVI en trigo y cebada de los cinco lotes más homogéneos muestreado en la transecta durante todo el ciclo de desarrollo.

Cultivo	Lotes Fecha	Promedio					Desvío estándar					CV				
		1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
trigo	30-jul	0,3857	0,2520	0,2749	0,2941	0,3861	0,0632	0,0245	0,0158	0,0160	0,0359	16	10	6	5	9
	15-ago	0,4898	0,3165	0,3570	0,4092	0,5055	0,0820	0,0395	0,0236	0,0200	0,0341	11	12	7	5	7
	2-oct	0,7878	0,6319	0,8928	0,9027	0,8613	0,1119	0,0665	0,0147	0,0066	0,0191	5	11	2	1	2
	3-nov	0,7582	0,6282	0,8953	0,8441	0,7685	0,1013	0,0513	0,0107	0,0173	0,0423	5	8	1	2	5
	19-nov	0,4784	0,5491	0,8503	0,8544	0,6589	0,1715	0,0559	0,0203	0,0180	0,1025	11	10	2	2	16
cebada	30-jul	0,3951	0,3550	0,2703	0,2904	0,5203	0,0334	0,0854	0,0174	0,0182	0,0190	8	24	6	6	4
	15-ago	0,4885	0,4579	0,3772	0,3553	0,6213	0,0594	0,0830	0,0220	0,0251	0,0183	12	18	6	7	3
	2-oct	0,8507	0,8287	0,8560	0,8736	0,8181	0,0546	0,0519	0,0231	0,0224	0,0179	6	6	3	3	2
	3-nov	0,6958	0,6383	0,8361	0,8210	0,7454	0,0408	0,0322	0,0300	0,0169	0,0197	6	5	4	2	3
	19-nov	0,7099	0,8135	0,8592	0,8371	0,4548	0,0419	0,0416	0,0147	0,0311	0,0264	6	5	2	4	6

En los gráficos 8 y 9 se muestran las firmas espectrales de trigo y cebada, respectivamente. A medida que los cultivos se desarrollan los valores de NDVI aumentan hasta llegar a floración, y posteriormente comienzan a disminuir hasta la cosecha. Esto se debe a que el área fotosintéticamente activa va incrementándose con el crecimiento de los cultivos y su mayor producción de hojas, hasta alcanzar su máximo en floración.

No disponemos de información de NDVI en diciembre (debido a que las imágenes de ese mes presentaban nubes), por lo cual no se puede apreciar el marcado descenso de la curva espectral llegando a madurez fisiológica- cosecha en trigo. Por el contrario, y debido a que se cosecha antes que el trigo; en cebada, si se pudo observar esa disminución drástica en la curva de NDVI (0.7 -> 0.4) llegando a madurez fisiológica.

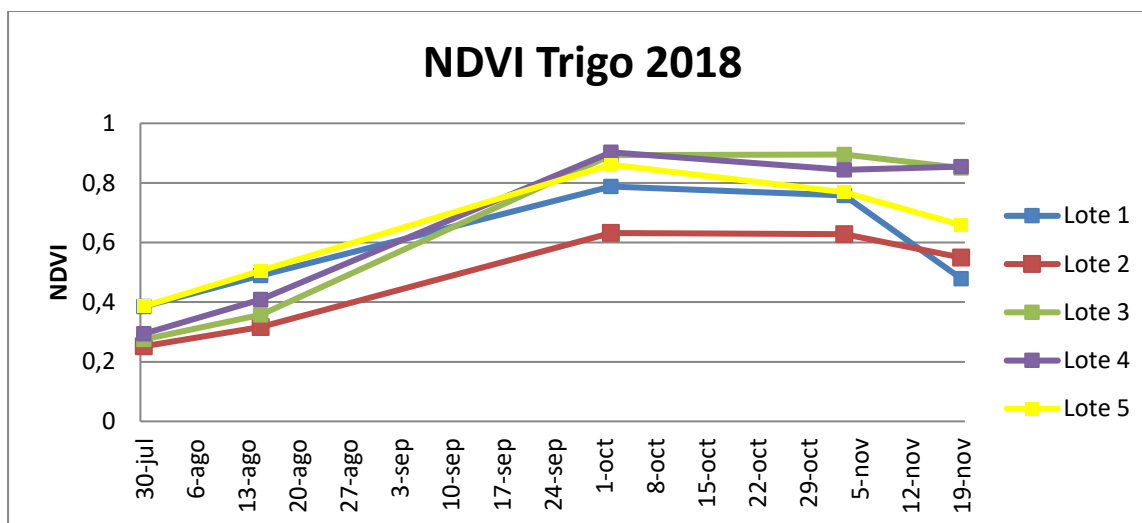


Gráfico 8. Firma espectral de cultivo de trigo para los 5 lotes seleccionados.

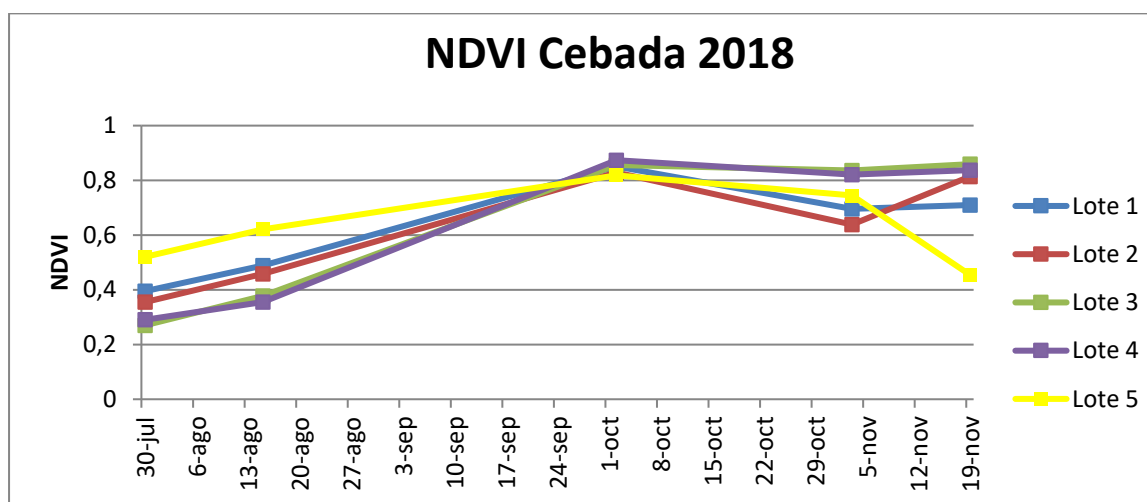
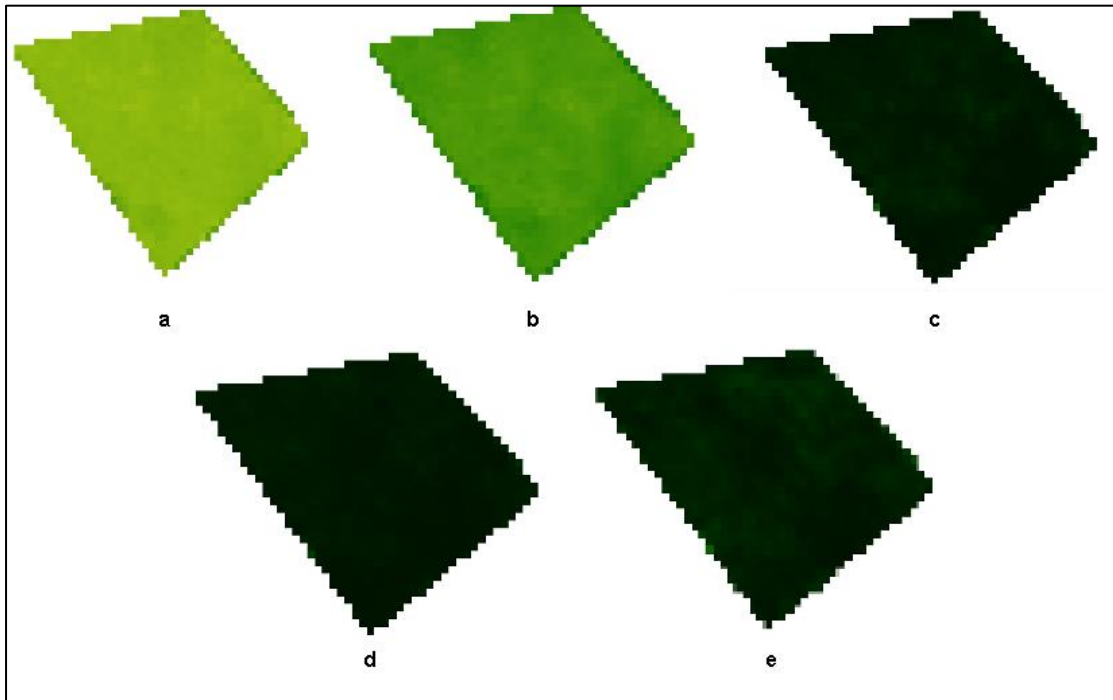


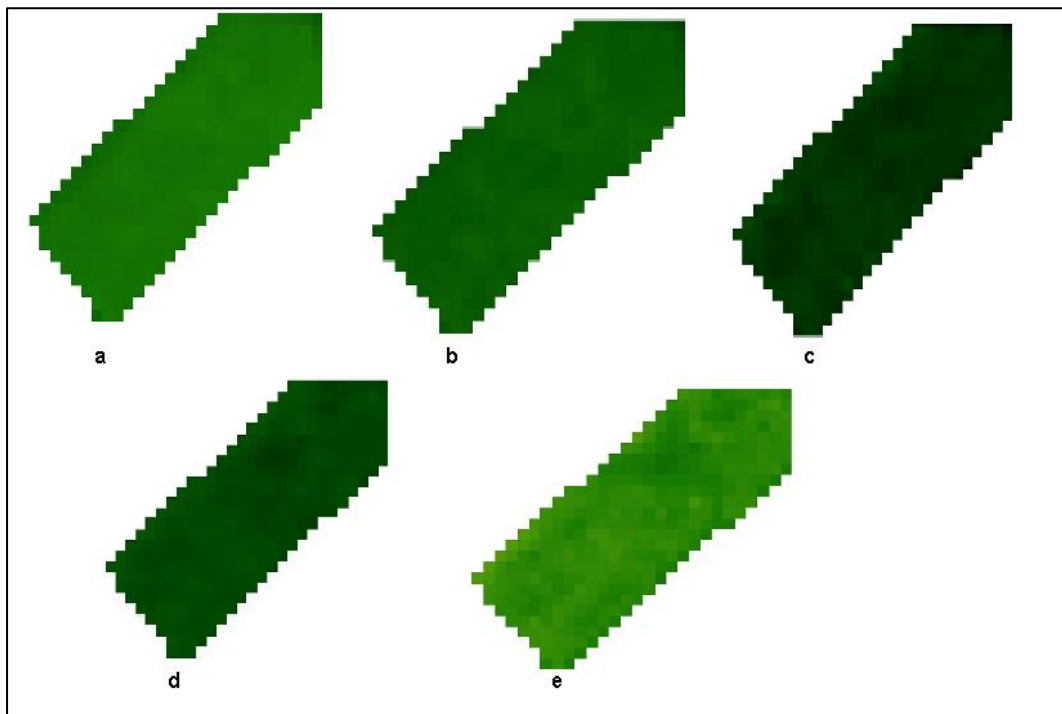
Gráfico 9. Firma espectral de cultivo de cebada para los 5 lotes seleccionados.

El análisis de los CV de trigo (tabla 11) destacó los lotes 3 y 4 por tener menor variación de desarrollo vegetativo durante todo el periodo de estudio. Teniendo en cuenta la firma espectral, evolución visual (figura 11) y su CV, se eligió el lote 3 como el lote más homogéneo. Si bien el lote 4 tenía la menor variación entre ambos, poseía en el mes de noviembre valores de NDVI altos (mayores a 0.7) y con tendencia a aumentar, cuando el cultivo debería tener valores bajos correspondientes a una baja actividad fotosintética, ya que estaría llegando al final de su ciclo.

El análisis de CV en cebada mostró que el lote 5 tuvo menos variación durante el periodo de estudio, mostrando baja variabilidad en sus valores de NDVI, lo cual se observa en la figura 12.



**Figura 11** Lote de trigo seleccionado en las distintas fechas que el satélite tomó imágenes. a: 30/7; b:15/8; c:2/10; d:3/11; e:19/11

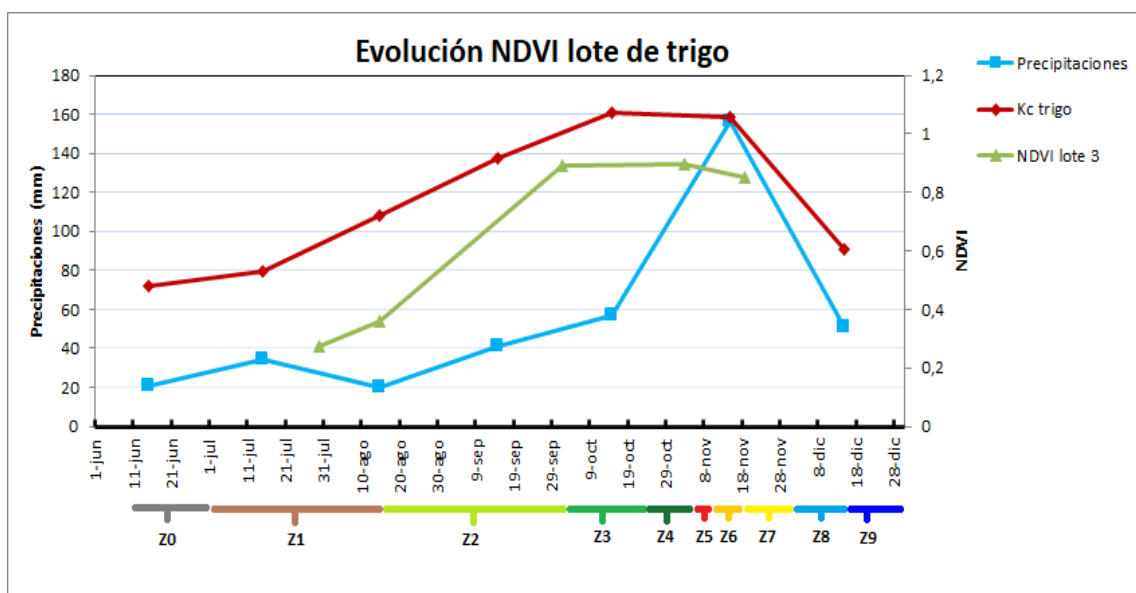


**Figura 12.** Lote de cebada seleccionado en las distintas fechas que el satélite tomó imágenes. a: 30/7; b:15/8; c:2/10; d:3/11; e:19/11

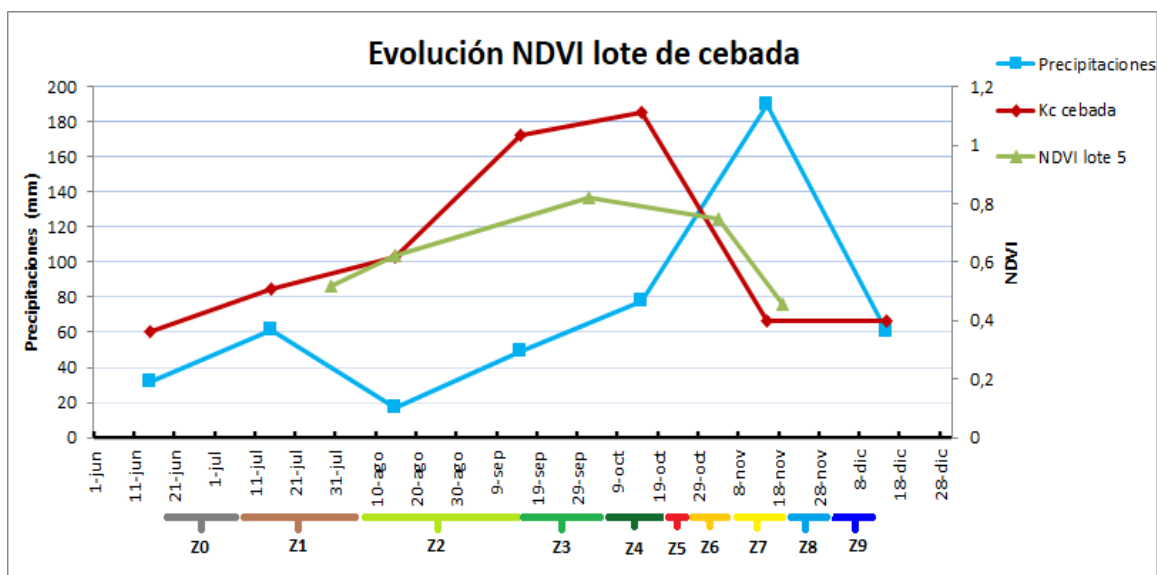


### Evaluación de estado hídrico de lotes

La representación gráfica de la firma espectral, precipitaciones y los Kc (gráficos 10 y 11) tuvo como objetivo poder realizar una estimación del estado hídrico de los cultivos durante el ciclo.



**Gráfico 10** Evolución de la firma espectral (NDVI, Kc) y precipitaciones durante el ciclo del cultivo de trigo. Z0: Siembra; Z1: Producción de hojas; Z2: Macollaje; Z3: Encañado Z4.0: Vaina engrosada; Z5: espigado; Z6: Antesis; Z7: grano lechoso; Z8:Grano pastoso; Z9: Madurez.



**Gráfico 11.** Evolución de la firma espectral (NDVI, Kc) y precipitaciones durante el ciclo del cultivo de cebada. Z0: Siembra; Z1: Producción de hojas; Z2: Macollaje; Z3: Encañado Z4.0: Vaina engrosada; Z5: espigado; Z6: Antesis; Z7: grano lechoso; Z8: Grano pastoso; Z9: Madurez.

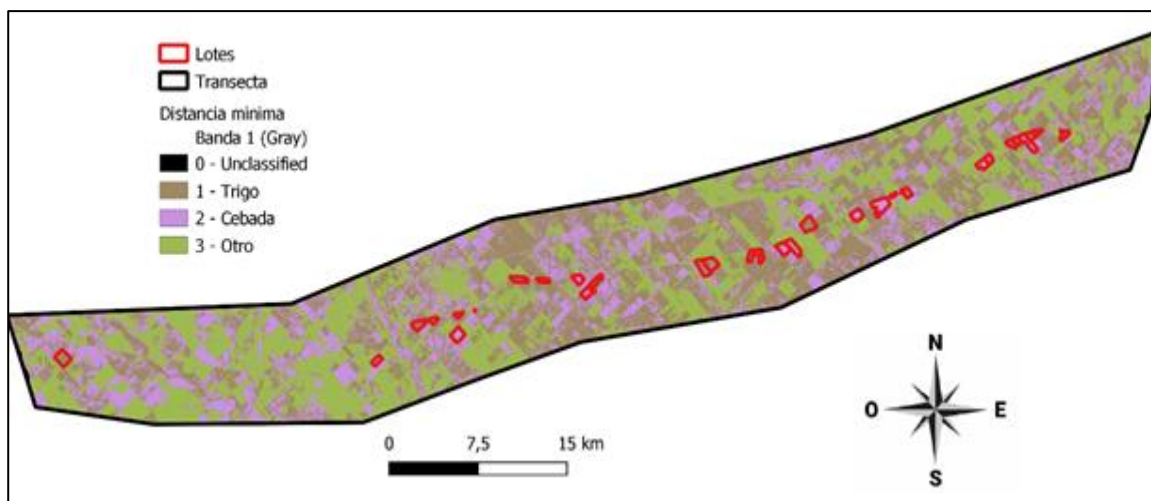
La gráfica obtenida de las tres variables nos indica si las necesidades del cultivo fueron satisfechas durante todo el ciclo. Los gráficos 10 y 11 mostraron que las precipitaciones no cubrieron las necesidades hídricas en ambos cultivos. En el periodo de Z2 A Z4 (macollaje y vaina engrosada) se observa un elevado déficit de agua, marcado por la diferencia entre las curvas de precipitación y NDVI. Sin embargo, la lluvia que se produjo entre el 15 y 21 de noviembre (27.4 mm), favoreció el llenado de grano en trigo (BCP 2018). En el caso de cebada la lluvia ocurrida en este mismo mes causó lavado de grano, ya que para esta fecha el grano ya se llenó y está cercano a madurez.

### Clasificación

Los resultados de las 3 clasificaciones realizadas se expresan en la tabla 12. Contrario a lo que se esperaba, debido a que es el más general de los utilizados, el método que mejor resultado dio fue el de **distancia mínima**, ya que tiene el mayor número de lotes bien clasificados. En la figura 15 puede visualizarse esta clasificación en la transecta de estudio.

**Tabla 12.** Resultados de clasificación.

	Ángulo Espectral		Distancia Mínima		Máxima Probabilidad	
	Bien Clas.	Mal Clas.	Bien Clas.	Mal Clas.	Bien Clas.	Mal Clas.
Trigo	12	4	14	2	12	4
Cebada	15	5	15	5	15	5
Otros	11	4	13	2	12	3
Total	38	13	42	9	39	12



**Figura 13.** Clasificación por distancia mínima en la transecta.

A partir de los resultados se eligió el método de distancia mínima para la evaluación de su desempeño como clasificador. Para ello se realizó la matriz de confusión en la tabla 13 y el cálculo de los parámetros de precisión presentados en la tabla 14.

**Tabla 13.** Matriz de confusión del método distancia mínima.

		Predicción			Total
		T	C	O	
Actual	T	14	2	0	16
	C	5	15	0	20
	O	2	0	13	15
		21	17	13	51

**Nota:** (T: trigo; C: cebada; O: otros)

**Tabla 14.** Parámetros de precisión distancia mínima.

Precisión Global (Accuracy)	0,8235
Índice Verdaderos T	0,8750
Índice Verdaderos C	0,7500
Índice Verdaderos O	0,8667
Índice Falsos T	0,6667
Índice Falsos C	0,8824
Índice Falsos O	1,0000
Parámetro Auxiliar (a)	0,8235
Parámetro Auxiliar (e)	0,3349
Índice Kappa (k)	0,7347

**Nota:** (T: trigo; C: cebada; O: otros)

Como reflejan los números de precisión el clasificador de distancia mínima fue un método bastante eficiente, ya que tiene un 0.82 de precisión global y un índice kappa óptimo (según la escala Landis-Koch) de 0.73. Por lo que este método de clasificación se valida dentro de la transecta marcada previamente en la zona de estudio.

## Conclusiones

El índice de vegetación normalizada nos permitió hacer un monitoreo de la evolución de los lotes de trigo y cebada. El seguimiento de las variaciones de NDVI a través de todo el ciclo presentó la firma espectral típica de un cereal de invierno. Esta evolución mostró valores mínimos en el inicio del desarrollo de ambos cultivos, con máximos valores en la floración y un descenso

marcado desde aquí hasta madurez fisiológico y cosecha (esta ultimo no visualizada por no tener acceso a imágenes sin nubes del satélite LANDSAT-8).

Las precipitaciones de la campaña 2018 no cubrieron las necesidades hídricas de los cultivos en el ciclo. Sin embargo, las lluvias del mes de noviembre favorecieron el llenado de grano en el trigo. En cebada, por el contrario, causó un lavado de grano cercano a madurez lo que será un problema en la cosecha.

La descarga gratuita de imágenes satelitales, la aplicación en un smarthphone para georreferenciar lotes de ambos cultivos y el software de uso libre Q-GIS, ayudaron a realizar una clasificación con una eficacia global del 82% y un nivel de concordancia del 73% en la transecta de estudio. La clasificación supervisada de lotes de trigo y cebada es un método de alta eficiencia porque nos ofrece información de producción anticipada de grandes áreas sembradas. Para poder extrapolar la clasificación a todo el partido de Dorrego se necesitaría un mayor número de datos muestreados y ubicados en forma aleatoria en toda el área de análisis.

## Bibliografía

Bocco, M., Sayago, S., Violini, S., & Willington, E. A. (2015). Modelos simples para estimar rendimiento de cultivos agrícolas a partir de imágenes satelitales: una herramienta para la planificación. In II Simposio Argentino sobre Tecnología y Sociedad (STS)-JAIIO 44.

Bolsa de cereales y productos de Bahía Blanca (2018). Informe climático. Las lluvias favorecieron los rindes de cebada y trigo. Web: <https://viapais.com.ar/bahia-blanca/751331-las-lluvias-de-noviembre-favorecieron-a-los-rindes-de-cebada-y-trigo/>. Consulta 20/6/2021

Bolsa de cereales y productos de Bahía Blanca (2021). Estimaciones agrícolas. Web: <https://www.bcp.org.ar>. Consulta 25/02/2021

Bolsa de comercio de Rosario (2019). La cebada con más problemas que el trigo. Rosario. 2-3 pp. Consulta: 24/3/21. Web: <https://www.bcr.com.ar/es/mercados/investigacion-y-desarrollo/informativo-semanal/noticias-informativo-semanal/la-cebada-en>. Consulta 21/02/2021

Borràs, J., Delegido, J., Pezzola, A., Pereira, M., Morassi, G., & Camps-Valls, G. (2017). Clasificación de usos del suelo a partir de imágenes Sentinel-2. Revista de Teledetección, (48), 55-66 pp. Recuperado de: <https://riunet.upv.es/handle/10251/83604>

Cabrera, A. (1976). Regiones fitogeográficas argentinas: En: Kugler, W.F. (Ed.) Enciclopedia Argentina de Agricultura y Jardinería, Tomo 2, Fasc. 1, 1-85 pp, Buenos Aires.

Chuvieco, E. (1990). Fundamentos de teledetección espacial (No. 526.982 C564 1990). Ediciones Rialp. Madrid. 45-85 pp. Recuperado de: <http://cursosihlla.bdh.org.ar/Sist.%20Cart.%20y%20Teledet./Bibliografia/FUNDAMENTOS-DE-TELEDETECCION-EMILIO-CHUVIECO.pdf>.

Cuesta, A., Montoro, A., Jochum, A. M., López, P., & Calera Belmonte, A. (2005). Metodología operativa para la obtención del coeficiente de cultivo desde imágenes de satélite. Recuperado de: [https://www.aida-itea.org/aida-itea/files/itea/revistas/2005/101-3/ITEA\\_101-3\\_212-224.pdf](https://www.aida-itea.org/aida-itea/files/itea/revistas/2005/101-3/ITEA_101-3_212-224.pdf)

De Bernardi, L (2015). Producción de cebada. Revista alimentos argentinos, (65), 26 pp. Web: <http://www.alimentosargentinos.gob.ar/HomeAlimentos/Publicaciones/revistas/nota.php?id=119>. Consulta: 21/02/2021

Díaz García-Cervigón, & José, J. (2015). Estudio de índices de vegetación a partir de imágenes aéreas tomadas desde UAS/RPAS y aplicaciones de éstos a la agricultura de precisión.

FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations (2021). Web: <http://www.fao.org/3/t0446s/t0446s04.htm>. Consulta: 25/3/2021

Garay, D., & Agüero, J. (2016). Introducción a los SIG Software QGIS. La Rioja. 4pp. Recuperado de: [https://inta.gob.ar/sites/default/files/inta\\_intro\\_qgis2.10\\_eea\\_la\\_rioja.pdf](https://inta.gob.ar/sites/default/files/inta_intro_qgis2.10_eea_la_rioja.pdf)

García-León, D., Contreras, S., & Hunink, J. (2019). Comparison of meteorological and satellite-based drought indices as yield predictors of Spanish cereals. *Agricultural Water Management*, 213, 388-396 pp.

Gómez-Casero, M. T., López-Granados, F., Peña-Barragán, J. M., Jurado-Expósito, M., & García-Torres, L (2010). Caracterización espectral multitemporal de cultivos de regadío aplicando análisis discriminante y redes neuronales. Córdoba. 5 pp. Recuperado de: <https://es.scribd.com/document/489703066/caracterizacion-multiespectral-herbaceas-pdf>

Guamán Chiluisa, A. F. (2018). Monitoreo de maíz duro mediante índices de vegetación obtenidos por imágenes satelitales en Loja y Manabí (Bachelor's thesis, Quito: UCE).

Hernández, J. (2011). Procesamiento digital de imágenes. Recuperado de: <http://www.gep.uchile.cl/Publicaciones/Tratamiento%20Digital%20de%20Imágenes%20-%20Jaime%20Hernández%202011.pdf>

Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INDEC). (2018). Origen provincial de las exportaciones según complejos exportadores y principales zonas económicas. WEB: <https://www.indec.gob.ar/indec/web/Nivel4-Tema-3-2-79>. Consulta 25/02/2021.

Ministerio de agricultura ganadería y pesca (MAGyP) (2021). Metodología para la estimación de la superficie sembrada con cultivos extensivos. Buenos Aires. 7-8 pp. Recuperado de: [https://www.magyp.gob.ar/sitio/areas/estimaciones/acerca\\_de/metodologia/index.php](https://www.magyp.gob.ar/sitio/areas/estimaciones/acerca_de/metodologia/index.php).

Ministerio de agricultura ganadería y pesca (MAGyP). (2019). Perfil de la cebada. Buenos Aires. 2-5 pp. Recuperado de [https://www.magyp.gob.ar/sitio/areas/ss\\_mercados\\_agropecuarios/informes/perfil-de-cebada-2019.pdf](https://www.magyp.gob.ar/sitio/areas/ss_mercados_agropecuarios/informes/perfil-de-cebada-2019.pdf). Consulta 20/02/2021

Ministerio de Agricultura Ganadería y Pesca (MAGyP). (2021). Estimaciones agrícolas. WEB: <https://datosestimaciones.magyp.gob.ar>. Consulta: 31/01/2021

Miralles D.J., González F.G., Abeledo L.G., Serrago R.A., Alzueta I., García G.A., de San Caledonio R.P. & Lo Valvo P. (Eds). (2014). Manual de trigo y cebada para el cono sur procesos fisiológicos y bases de manejo. Buenos Aires. Orientación Gráfica Editora S.R.L.

Monferrer, C (2012). Satélites de observación de la tierra. Fotointerpretación y teledetección. Web: <http://www.bibliotecacpa.org.ar/greenstone/collect/facagr/index/assoc/HASHd200.dir/doc.pdf>. Consulta: 30/3/2021

Paoloni, J. D., Uriarte, M. G., & Sequeira, M. E. (2005). *Geoambiente y evaluación de las aguas freáticas del Partido de Coronel Dorrego (Provincia de Buenos Aires)*. Editorial: UNS

Reuter, F. (2009). *Plataformas orbitales y sensores*. Santiago del Estero. 43-48 pp. Recuperado de: <https://fcf.unse.edu.ar/archivos/series-didacticas/SD-33-Principios-teledeteccion-REUTER.pdf>.

Rouse, J. W., Haas, R. H., Schell, J. A., & Deering, D. W. (1974). *Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS*. NASA special publication, 351(1974), 309.

Revollo Sarmiento, G. N. (2015). *Procesamiento inteligente de imágenes para el modelado geomorfológico*. Recuperado de: <https://repositoriodigital.uns.edu.ar/handle/123456789/4370>

Stern, R. J., Beyth, M., Bodechtel, J., & Wetzel, H. U. (2002). *Potential of the International Space Station for imaging Earth: Lessons from MOMS-2P aboard Mir*. *Geology*, 30(9), 851-854 pp.

Thornthwaite, C. W. (1948). *An approach toward a rational classification of climate*. *Geographical review*, 38(1), 55-94.

USDA. United States Department of Agriculture (2021). *Market and Trade Data. Production, Supply and Distribution Online Reports*. WEB: <https://usda.library.cornell.edu/concern/publications/5q47rn72z?locale=en>. Consulta 22/02/2021

Volante, J. (2012). *Avance de la frontera agropecuaria*. Salta. 5 pp. Recuperado de: [https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-avance\\_frontera\\_agropecuaria\\_argentina.pdf](https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-avance_frontera_agropecuaria_argentina.pdf)

Willington, E. A., Nolasco, M., & Bocco, M. (2013). *Clasificación supervisada de suelos de uso agrícola en la zona central de Córdoba (Argentina): comparación de distintos algoritmos sobre imágenes Landsat*. In V Congreso Argentino de AgroInformática (CAI)-JAIIO 42 (2013).

Zadoks, J.C., Chang, T.T. & Konzak, C.F. 1974. *A decimal code for the growth stages of cereals*. *Weeds Res.*, 14: 415.