

Maíces tempranos vs tardíos en el centro de la región pampeana:
diferencias en variables funcionales estimadas con sensores remotos

*Trabajo final presentado para optar al título de
Especialista en Teledetección y Sistemas de Información Geográfica aplicados al
estudio de los recursos naturales y la producción agropecuaria*

Federico José Garello

Ingeniero Agrónomo - Universidad Nacional de Villa María - 2013

Lugar de trabajo: AER INTA Chascomús



Escuela para Graduados Ing. Agr. Alberto Soriano
Facultad de Agronomía - Universidad de Buenos Aires

TUTORA

María Eugenia Beget

Ingeniera Agrónoma – Universidad de Buenos Aires
Magister en Recursos Naturales - Universidad de Buenos Aires

JURADO DE TRABAJO FINAL

Marcelo Daniel Nosetto

Ingeniero Agrónomo - Universidad Nacional de Entre Ríos
Doctor en Ciencias Agropecuarias - Universidad de Buenos Aires

Francisco Murray

Ingeniero Agrónomo - Universidad Nacional del Comahue
Magister en Producción Animal - Universidad Nacional de Mar del Plata
Doctor en Ciencias Agropecuarias - Universidad de Buenos Aires

Fecha de defensa del Trabajo Final: 02 de junio de 2023

Agradecimientos

A mi Directora en este trabajo final María Eugenia, quien con su tiempo, paciencia y excelente predisposición me ayudó a poder darle cierre a esta etapa de formación.

A Julieta por su excelentísimo buen humor y predisposición a sacarme las dudas de los horarios de clases, ya que nunca leía sus mails.

Al grupo de docentes que integran esta especialización, ya que, gracias a su elevadísima calidad académica, pude comprender los fundamentos físicos y técnicos de la teledetección, y lograron que me apasione.

A Martín López de la Bolsa de Cereales de Buenos Aires, quien brindó la base de datos de lotes de maíz a partir del cual pude elaborar éste trabajo final.

Finalmente, a todos mis compañeros de cursada, que estuvieron del otro lado de la pantalla a lo largo de toda la cursada, aguantando mis innumerables comentarios (muchas veces fuera de lugar).

"Declaro que el material incluido en esta tesis es, a mi mejor saber y entender, original, producto de mi propio trabajo (salvo en la medida en que se identifique explícitamente las contribuciones de otros), y que este material no ha sido presentado, en forma parcial o total, como una tesis en ésta u otra institución."

Resumen

El maíz es uno de los cultivos con mayor proporción de superficie implantada en la Argentina. Estrategias de manejo, como el cambio en la fecha de siembra, posibilitaron la expansión del cultivo a regiones con características edáficas y climáticas más restrictivas. El objetivo de este trabajo fue analizar mediante información satelital, las diferencias en los atributos funcionales del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), la radiación fotosintéticamente activa absorbida (APAR) y la evapotranspiración real (ET_C) del cultivo de maíz implantado en fechas de siembra temprana y tardía, en un área del centro de la región Pampeana Argentina, en ambientes que difieren en las temperaturas y precipitaciones medias, y en la capacidad de retención hídrica de sus suelos (“Amb-1”: Cálido-Húmedo-Franco Arcilloso, “Amb-2”: Fresco-Seco-Areno Franco) en las campañas 2017-18 (“Seca”) y 2018-19 (“Húmeda”). A partir de datos provenientes de la misión MODIS, se calcularon los atributos de la curva del NDVI y la APAR, mientras que los datos de ET_C se obtuvieron de un balance hídrico calculado a partir de VIIRS (Suomi-NPP). Atrasos en la fecha de siembra redujeron el ciclo de crecimiento del cultivo $\approx 40-50$ días en el “Amb-1”. La tasa de crecimiento y senescencia fue siempre más alta en maíces tardíos y en el “Amb-2”. El NDVI Max, no fue afectado por la fecha de siembra en el “Amb-2”, pero se redujo en fechas de siembras tardía en el “Amb-1”. En la campaña “Seca”, la APAR alcanzó los mayores valores en fechas tempranas en el “Amb-2”, mientras que en la campaña “Húmeda” la APAR fue más elevada en fechas tempranas, independientemente del “Ambiente”. La APAR se relacionó de manera lineal y positiva con las precipitaciones, pero no se modificó por el contenido de agua en la capa superficial del suelo. La ET_C en la campaña “Seca” de los maíces tardíos fue 80 mm y 102 mm menor que los tempranos en los “Amb 1” y “Amb 2”, respectivamente; mientras que en la campaña “Húmeda” esta diferencia se redujo a 47 mm, y los maíces implantados en el “Amb-2” evapotranspiraron 13 mm más que los del “Amb-1”. La ET_C no se relacionó ni con las precipitaciones ni con el agua en el suelo. Este trabajo contribuye a cuantificar el impacto de los atrasos en la fecha de siembra bajo diferentes condiciones ambientales, en los atributos funcionales y biofísicos de maíces implantados en el centro de la Región Pampeana, lo cual permite prever el impacto en la productividad de este cultivo bajo posibles escenarios futuros.

Abstract

Maize is one of Argentina's crops with the highest proportion of sowing area. Management strategies, such as a change in the sowing date, allowed the expansion of the crop to regions with more restrictive soil and climatic characteristics. The objective of this work was to analyze the differences in the functional attributes of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), the absorbed photosynthetically active radiation (APAR), and the actual evapotranspiration (ET_C) of the maize crop in early and late sowing dates, in an area in the center of Pampas Region of Argentina, in environments that differ in average temperatures, precipitation, and the water retention capacity of their soils (“Env-1”: Warm-Wet-Clayey loam, “Env-2”: Cool-Dry-Sandy loam) in the 2017-18 (“Dry”) and 2018-19 (“Wet”) seasons. From data from the MODIS mission, the attributes of the NDVI and APAR curve were calculated, while ET_C data was obtained from a water balance calculated from VIIRS (Suomi-NPP). Delays in the sowing date reduced the growth cycle by $\approx 40-50$ days only in “Env-1”. The growth and senescence rate was always higher in late maize and in “Env-2”. The NDVI Max was not affected by the sowing date in “Env-2” but was reduced by late sowing dates in “Env-1”. In the "Dry" season, the APAR reached the highest values at early dates on “Env-2”, while in the "Wet" season, the APAR was higher at early dates, regardless of the "Environment". APAR was linearly and positively related to rainfall, but was not modified by water content in the topsoil. The ET_C in the "Dry" season of sowing late maize was 80 mm and 102 mm lower than the early ones in “Env-1” and “Env-2”, respectively; while in the "Wet" season this difference was reduced to 47 mm, and the corn implanted in “Env-2” evapotranspired 13 mm more than those of “Env-1”. ET_C was not related to either precipitation or water in the soil. This work contributes to quantifying the effect of delays in sowing date under different climatic and edaphic conditions, on functional and biophysical attributes of maize sowing in the center of the Pampas Region, which allows us to predict the impact on the productivity of this crop under possible future scenarios.

Índice general

1. Introducción.....	10
2. Materiales y métodos	13
2.1 Área de estudio	13
2.2. Información de cultivos por campaña	15
2.3. Extracción de información satelital	15
2.3.1. Precipitaciones.....	15
2.3.2. Agua en el suelo	16
2.3.3. Índice de vegetación normalizada y curva fenológica	16
2.3.4. Radiación absorbida	18
2.3.5. Evapotranspiración del cultivo	19
2.4. Análisis estadístico.....	19
3. Resultados y Discusión.....	20
4. Conclusiones	34
5. Bibliografía	35

Índice de tablas

Tabla 1. Número de lotes correspondientes a cada fecha de siembra en las campañas 2017-18 y 2018-19.	15
Tabla 2. Precipitaciones y agua en los primeros 5 cm del perfil (Ambas expresadas en mm de agua) en el período vegetativo (PP_{VEG} y ADC_{VEG}), en el período crítico (PP_{PC} y ADC_{PC}), en el período de llenado de granos (PP_{LLG} y ADC_{LLG}) y en el ciclo (PP_{CICLO} y ADS_{CICLO}).....	22
Tabla 3. Métricas de la curva de NDVI (Max: NDVI máximo alcanzado, LC: Largo del ciclo, TC: tasa de crecimiento, TS: tasa de senescencia) de maíces de fecha temprana y tardía en cada grupo de suelos, para las dos campañas.	25
Tabla 4. Radiación fotosintéticamente activa interceptada en el ciclo (APAR) y evapotranspiración en el ciclo (ET _c) de maíces tempranos y tardíos en cada los Ambientes 1 y 2, para las campañas 2017-18 y 2018-19.	28
Tabla 5. Evapotranspiración mensual (mm) para maíces de siembra temprana y tardía, en los Ambientes 1 y 2, en las campañas 2017-18 y 2018-19.	33

Índice de figuras

Figura 1. Mapa del área de estudio. A: Argentina, se destaca en un cuadro violeta las provincias donde se llevó a cabo el trabajo: Córdoba, Santa Fe y Entre Ríos. B: Precipitaciones medias anuales y C: Temperaturas medias anuales (Período 1934-1990 Adaptado de Cravero et al. (2017)), el área de estudio se delimita en rojo en las figuras B y C	14
Figura 2. Grupos texturales en el horizonte superficial (A) y sub-superficial (B) de los suelos del área de estudio (Delimitada en rojo). Adaptado de (INTA, 2013).	14
Figura 3. Curva fenológica del NDVI y métricas derivadas. Ini V: Momento de aparición del verdor, Fin V: Momento de fin del verdor, LC: Longitud del ciclo de crecimiento del cultivo, NDVI Min Ini: Valor de NDVI al inicio en el ciclo del cultivo, NDVI Min Fin: Valor de NDVI al final en el ciclo del cultivo, NDVI Max: Valor de NDVI máximo alcanzado, TC: Tasa de crecimiento vegetativo, TS: Tasa de senescencia. (Adaptado de Reed et al. (1994)).....	18
Figura 4. Distribución espacial de las precipitaciones durante el ciclo de maíces tempranos y tardíos en las campañas 2017-18 (A y B) y 2018-19 (C y D) Adaptado de Funk et al. (2015). .	21
Figura 5. Distribución espacial del contenido de agua (en mm) en los primeros 5 cm del perfil del suelo, promedio durante el ciclo de maíces tempranos y tardíos en las campañas 2017-18 (A y B) y 2018-19 (C y D).	21
Figura 6. Precipitaciones (Barras celestes), Evapotranspiración del cultivo (ET _c : Líneas grises), y curvas de NDVI de maíces tempranos (Líneas verdes) y tardíos (Líneas anaranjadas), en el Amb-1 (Izquierda) y el Amb-2 (Derecha). En las campañas 2017-18 y 2018-19. Las barras negras indican ± 1 EE.	26
Figura 7. Relaciones entre la radiación fotosintéticamente activa interceptada (APAR) y las precipitaciones (A, B, C y D) o el agua en el suelo (E, F, G y H), en los períodos vegetativos (A y E), período crítico (B y F), llenado de granos (C y G) y en el ciclo completo (D y H) para maíces en las campañas 2017-18 (Símbolos vacíos) y 2018-19 (Símbolos llenos), en suelos del Amb-1 (Cuadrados) y el Amb-2 (Triángulos) en fechas de siembra Temprana (Símbolos Verdes) y Tardías (Símbolos Anaranjados). Las barras indican el IC del 95%.....	30
Figura 8. Relación entre la evapotranspiración del cultivo en el ciclo (ET _c) y las precipitaciones (A, B, C y D) o el agua del suelo (E, F, G y H), en los períodos vegetativos (A y E), período crítico (B y F), llenado de granos (C y G) y el ciclo completo (D y H) para maíces en las campañas 2017-18 (Símbolos vacíos) y 2018-19 (Símbolos llenos), en suelos del Amb-1 (Cuadrados) y el Amb-2 (Triángulos) en fechas de siembra Temprana (Símbolos Verdes) y Tardías (Símbolos Anaranjados). Las barras indican el IC del 95%.....	31

Figura 9. Relación entre la APAR y la ETc en cada uno de las diferentes combinaciones Ambiente x Fecha de Siembra, para maíces en las campañas 2017-18 (Símbolos vacíos) y 2018-19 (Símbolos llenos), en suelos del Amb-1 (Cuadrados) y el Amb-2 (Triángulos) en fechas de siembra Temprana (Símbolos Verdes) y Tardías (Símbolos Anaranjados), los valores por fuera de los contornos punteados indican el valor promedio de la relación en cada campaña. Las barras indican el IC del 95%. 32

1. Introducción

La frontera agrícola en Argentina sufrió una marcada expansión desde mediados de la década del 90 hasta la actualidad, la cual se dio como consecuencia del desarrollo de la siembra directa, sumado a las modificaciones genéticas en los principales cultivos que los protegían contra el ataque de insectos (ej: Maíz Bt) como a herbicidas de amplio espectro (Ej: Maíz y soja RR) (Paruelo et al., 2005). Este avance agrícola se dio en mayor medida en regiones donde la actividad principal era la ganadería a base de pasturas de alfalfa y se comenzó a realizar cultivos anuales como soja, maíz y trigo (Viglizzo et al., 2012).

Las condiciones de crecimiento para los cultivos en la Región Pampeana van a estar determinadas por: el tipo de suelos, la profundidad a la que se encuentre la napa freática, las precipitaciones (volumen y distribución en el ciclo) y las temperaturas. En este sentido, en el centro de la región los suelos difieren principalmente en las propiedades físicas al movimiento y almacenamiento del agua (Damiano & Taboada, 2000; Rubio & Taboada, 2013), mientras que en promedio las precipitaciones al igual que las temperaturas disminuyen de manera gradual en sentido este-oeste (Rubí Bianchi & Cravero, 2010). A su vez, las variaciones espaciales e inter-anales de las precipitaciones (Magliano et al., 2015), provocan fluctuaciones de la napa freática a escala local y regional. En este sentido, a nivel local (i.e: dentro de un mismo establecimiento) los años con elevadas precipitaciones provocan una recarga de la napa, acercándola a la superficie siendo más importante en los sectores bajos del relieve (Mercau et al., 2016), mientras que un estudio reciente muestra que a escala regional, la profundidad de la napa se hace más superficial en sentido este-oeste (Whitworth-Hulse et al., 2023).

Con 6.3 M has, el maíz fue el segundo cultivo más sembrado de Argentina durante la campaña 2019/20. Si bien se distribuye desde el sur de Buenos Aires hasta Jujuy, la mayor proporción es realizada en el centro de la región, principalmente en las provincias de Córdoba, norte de Buenos Aires y sur de Santa Fe (BCBA, 2020). A su vez, la implantación se divide en igual proporción en dos momentos contrastantes entre sí: (i) siembras tempranas (septiembre-octubre) y (ii) tardías (noviembre-diciembre) (Gayo & López, 2020), donde la elección entre una u otra, obedece a una decisión humana compleja, en la que entran en juego componentes fisiológicos del cultivo (Ej: productividad y tolerancia a estreses), pronósticos climáticos para la campaña que se vaya a atravesar, condiciones empresariales, etc.

La productividad de una cobertura vegetal se asocia tanto a la radiación fotosintéticamente activa interceptada (APAR) como al agua evapotranspirada en el ciclo (ET_c) dado que ambas cuantifican el intercambio neto de carbono mediante el balance de energía o de agua (Choudhury, 2000). En este sentido, la APAR surge de la relación entre la radiación fotosintéticamente activa incidente (PAR) y la fracción de esa radiación que es interceptada y absorbida por las hojas verdes (fPAR) (Pellegrini et al., 2020). En el cultivo de maíz, las decisiones de manejo modifican tanto la APAR como la ET_c , donde la primera se verá modificada por diferentes niveles de PAR, mientras que la segunda mostrará cambios asociados a las temperaturas como a las precipitaciones (Allen et al., 2006). A su vez, el IAF modificará tanto la fPAR (Balance de energía) como la transpiración (Balance de agua) (Maddonni & Otegui, 1996). De esta manera, si el objetivo de un sistema de producción es maximizar la productividad, la búsqueda debe orientarse en elevar los valores de APAR y/o ET_c (Andrade et al., 2005; Monteith, 1972).

En este sentido, los maíces de siembras tempranas tienden a ser los más productivos debido a un período siembra-floración más prolongado que provoca una mayor APAR y consecuentemente, producción de biomasa más elevada (Maddonni, 2012; Otegui et al., 1995), pero también son los más inestables debido a la elevada variabilidad interanual de las condiciones climáticas asociadas al fenómeno El Niño Oscilación Sur (ENSO) (Podestá et al., 1999). Por el contrario, los maíces de siembras tardías alcanzan menores niveles de producción debido a un ciclo de crecimiento más reducido que en última instancia provoca una menor APAR (Cirilo & Andrade, 1994), pero también muestran una mayor estabilidad de producción, ya que son menos propensos a los déficit hídricos durante el período crítico debido a la menor demanda atmosférica (Maddonni, 2012).

De esta manera, poder comprender en qué medida cambian la APAR y la ET_c en maíz, frente a combinaciones de fecha de siembra y condiciones hídricas en el ciclo (i.e: por precipitaciones o influencia de napa) en diferentes tipos de suelo, permitiría comprender la magnitud que las decisiones de manejo tienen sobre la productividad del cultivo a escala regional. En relación a lo anterior, las herramientas satelitales proveen mediciones de grandes áreas de manera simultánea que permiten captar la heterogeneidad estructural de las coberturas vegetales, posibilitando describir y cuantificar la magnitud de diferentes condiciones agroclimáticas en las variables funcionales de la vegetación (Paruelo, 2008).

En este sentido, el índice de vegetación de diferencia normalizado (NDVI, por sus siglas en inglés) que fue formulado por Rouse et al. (1974) (Ec 1), ha sido utilizado para describir la fenología de las coberturas vegetales (Reed et al., 1994), cuantificar la ET_C (Di Bella et al., 2019) y como estimador lineal de la fPAR en el proceso de fotosíntesis (Asner et al., 2004; Paruelo et al., 2004; Sellers et al., 1992). Donde IR_C y R corresponden a la reflectancia en la porción del infrarrojo cercano rojo del espectro electromagnético, respectivamente.

$$NDVI = \frac{IR_C - R}{(IR_C + R)} \quad [Ec 1]$$

Sumado a los índices de la vegetación, en la actualidad se dispone de modelos matemáticos que generan estimaciones de eventos meteorológicos, los cuales son calibrados mediante sensores satelitales y estaciones meteorológicas que cuantifican las precipitaciones en regiones donde no se dispone información confiable (Ej: CHIRPS; Funk et al., 2015). Además, es cada vez mayor el número de satélites con sensores en el rango de las microondas, que permiten cuantificar el agua acumulada en el perfil del suelo (Verón & De Abelleira, 2014). Estas herramientas permiten integrar información de la vegetación (Ej: NDVI) y climática asociada al ciclo del agua a lo largo de grandes áreas. Así, entender la dinámica de crecimiento de los cultivos en general y del maíz en particular ante un amplio rango de condiciones agroclimáticas de crecimiento (i.e: suelo, lluvias, agua en el suelo, etc), nos permitiría proyectar un mejor uso de los recursos disponibles. Esto se vuelve de vital importancia en un contexto de cambio climático, donde se esperan eventos de déficits y excesos hídricos más intensos y frecuentes (Collins et al., 2013).

Los objetivos de este trabajo son: i) cuantificar mediante información satelital cómo se ven afectados los atributos funcionales del NDVI, la Radiación Fotosintéticamente Activa Absorbida (APAR) y la Evapotranspiración en el ciclo (ET_C) de maíz ante cambios en la fecha de siembra, en dos ambientes con diferencias climáticas y edáficas, y ii) evaluar la relación entre la APAR y la ET_C con las precipitaciones y el agua en el suelo en el ciclo de maíz.

2. Materiales y métodos

2.1 Área de estudio

La región analizada abarca el centro-sur de la provincia de Córdoba, el sur de la provincia de Santa Fe y el sur-oeste de la provincia de Entre Ríos, Argentina (**Figura 1 A**) y corresponde a las zonas IV y V definidas por la Bolsa de Cereales de Buenos Aires. El clima de la región presenta un régimen de precipitaciones monzónico, donde más del 60% del total de lluvias se da entre octubre-marzo. Tanto las precipitaciones como las temperaturas presentan un gradiente incremental en dirección oeste-este, en el que la precipitación media anual va de 700 a 1100 mm (**Figura 1 B**), mientras que la temperatura media anual de 16 a 19 °C (**Figura 1 C**) (Cravero et al., 2017).

Por otro lado, los suelos muestran un gradiente de texturas en el que los suelos se “afinan” en dirección oeste-este, donde los perfiles areno-francos se encuentran principalmente en el sudeste de Córdoba, pasando gradualmente a perfiles de textura franca y franca limosa en el sudeste de Córdoba, hasta llegar a suelos franco-arcillo-limosos y arcillo-limosos en el sur de Santa Fe y oeste de Entre Ríos (**Figura 2**) (INTA, 2013), estas características texturales condicionan tanto la capacidad de retención como el movimiento descendente del agua de los suelos (Taboada, 2008). De esta manera, para cuantificar el impacto de este componente del agro-ecosistema, se utilizaron las Cartas de suelo digitales de la Argentina (<http://visor.geointa.inta.gob.ar/?p=922>), las cuales presentan información sobre la clasificación de los suelos y sus características a una escala 1:100000 (**Figura 2**). De la totalidad de información disponible en las cartas de suelo digitales, en este análisis, se utilizaron los datos de: (i) Grandes grupos, (ii) grupos y (iii) textura.

En función de lo mencionado, se definieron dos ambientes dentro de la zona evaluada que integraron tanto las características edáficas como climáticas (**Figura 1**):

“**Ambiente 1**”: constituyó la porción Este de la zona, donde están los suelos clasificados dentro de los sub-grupos Argiudoles ácuicos, típicos o vérticos. Los cuales presentan un horizonte argílico de textura franco arcillo limosa a arcillo limosa, ubicado debajo de un horizonte mólico con textura franca a franco limosa, ambos de espesor variable (Soil Survey Staff, 2014). La capacidad de retención hídrica de estos suelos está en el rango de 140-170 mm en el primer metro de perfil (Damiano & Taboada, 2000). A su vez, la temperatura anual media es de 18.2 °C (Rango de 16.7 a 19.2 °C), mientras que las precipitaciones promedio son de 932 mm año⁻¹ (Rango de 835 a 1110 mm). Estas propiedades lo caracterizaron como Arcilloso-Cálido-Húmedo.

“Ambiente 2”: ubicado en la porción Oeste de la zona evaluada, este ambiente se compone de los suelos clasificados como Hapludoles y Haplustoles, dentro de los cuales, se desprenden como sub-grupos: típico, éntico, ácuico, fluvéntico y údico. La textura en las capas superficial y sub-superficial se engloba dentro de las categorías de: Areno franca, franca o franco arcillo limosa. En este sentido, la capacidad de retención hídrica está en el rango de 80-140 mm (Damiano & Taboada, 2000). Sumado a las temperaturas medias de 16.4 °C (Rango de 9.6 a 17.8 °C) y precipitaciones de 816 mm año (Rango de 611 a 917 mm), se lo denominó como Arenoso-Frío-Árido.

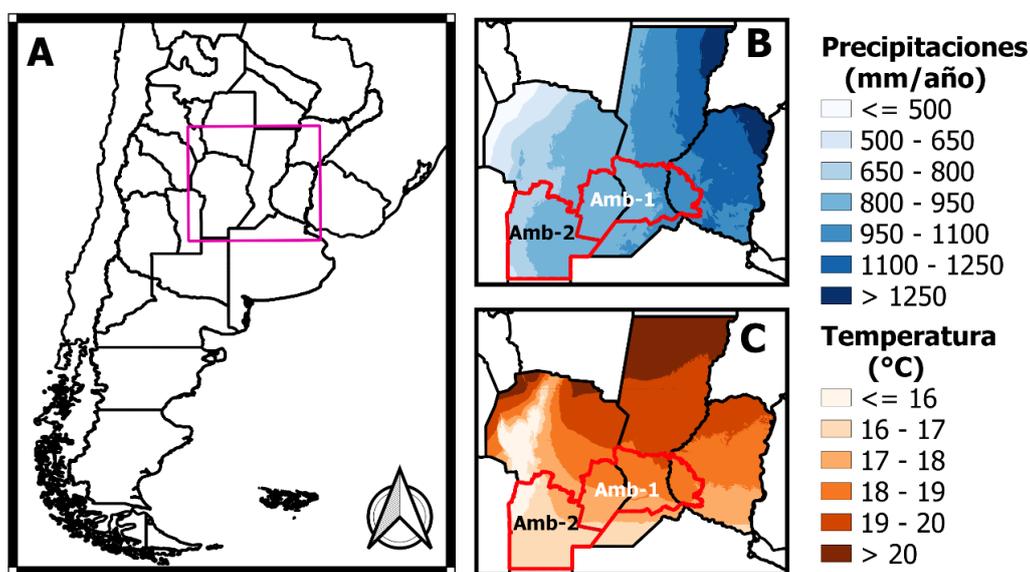


Figura 1. Mapa del área de estudio. **A:** Argentina, se destaca en un cuadro violeta las provincias donde se llevó a cabo el trabajo: Córdoba, Santa Fe y Entre Ríos. **B:** Precipitaciones medias anuales y **C:** Temperaturas medias anuales (Período 1934-1990 Adaptado de Cravero et al. (2017)), el área de estudio se delimita en rojo en las figuras **B** y **C**.

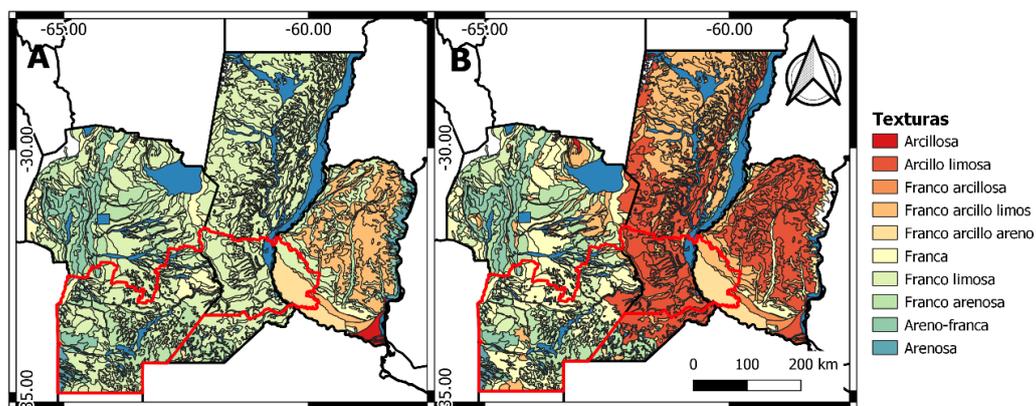


Figura 2. Grupos texturales en el horizonte superficial (**A**) y sub-superficial (**B**) de los suelos del área de estudio (Delimitada en rojo). Adaptado de (INTA, 2013).

2.2. Información de cultivos por campaña

Los puntos de verdad de campo, fueron provistos por la Bolsa de Cereales de Buenos Aires, y surgen de un muestreo supervisado que realizan anualmente y corresponden a lotes sembrados con maíz en fechas tempranas (octubre-noviembre) y tardías (diciembre-enero) para las campañas 2017-18 y 2018-19 (**Tabla 1**).

Tabla 1. Número de lotes correspondientes a cada fecha de siembra en las campañas 2017-18 y 2018-19.

	2017-18			2018-19		
	Temprano	Tardío	Total	Temprano	Tardío	Total
Amb-1	243	71	314	215	20	235
Amb-2	177	115	292	99	181	280

2.3. Extracción de información satelital

La información proveniente de sensores remotos correspondiente a índice de vegetación, precipitaciones y agua en el suelo, fue extraída utilizando la plataforma Google Earth Engine (Gorelick et al., 2017). La ventana temporal analizada fue desde inicios de septiembre a fines de junio de las campañas 2017-18 y 2018-19, que corresponde a el período de crecimiento del cultivo de maíz de siembras tempranas y tardías en la región analizada.

2.3.1. Precipitaciones

La información de precipitaciones se extrajo de la colección de imágenes "UCSB-CHG/CHIRPS/DAILY", provenientes del "Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data" (CHIRPS) que brinda datos diarios de precipitaciones desde 1981 hasta el presente, con una resolución de 0,05° ó 0.25° (5.56 y 28 km, respectivamente) entre las latitudes 50°S y 50°N.

Esta base de datos se compone de precipitaciones estimadas mediante imágenes satelitales de la NASA y NOAA, calibradas a través de un algoritmo que combina datos de estaciones meteorológicas. Esto permite evitar el error que sufren las estimaciones generadas solo por estaciones meteorológicas que pueden ser muy escasas, obteniéndose un producto mixto mejorado (Funk et al., 2015).

Para el análisis en éste trabajo, la información originalmente descargada en base diaria, se resumió en base mensual como precipitaciones/mes. A su vez, acumulamos las precipitaciones mensuales durante el ciclo de cada cultivo para comparar las precipitaciones/ciclo recibidas en cada fecha de siembra en la región analizada.

2.3.2. Agua en el suelo

Los datos de agua en el suelo se extrajeron de la colección de imágenes "NASA-USDA Enhanced SMAP Global Soil Moisture Data". Esta colección se genera a partir de información proveniente del satélite SMAP, tiene datos en intervalos de 3 días y posee 4 bandas de información que son: (i) humedad superficial (0 a 25 mm), (ii) humedad sub-superficial (0 a 274 mm), (iii) Humedad en el primer metro del perfil del suelo (0 a 1, como fracción) y (iv) Anomalía superficial y sub-superficial (Entekhabi et al., 2014).

El satélite SMAP es una misión radar de banda L, que lleva a bordo un radiómetro (centrado en 1,5 GHz). Este instrumento proporciona una detección directa de la humedad del suelo en los 5 cm superficiales de suelo con una precisión de $0.04 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ y correlaciones de hasta 0.65 con los valores in-situ (Zhang et al., 2017), que observa la superficie de la Tierra con una resolución de 9 km.

Los datos de “humedad superficial” corresponden a la capa 0-5 cm, y son los efectivamente medidos por el sensor. Mientras que los datos de “humedad sub-superficial” corresponden a datos estimados a partir de algoritmos, y se corresponden al contenido hídrico volumétrico desde 5-100 cm. Por este motivo, para los objetivos de este trabajo, se utilizó la primera banda (i.e: Humedad superficial (mm)), ya que los valores de humedad sub-superficial surgen de modelos calibrados para suelos con características diferentes a los encontrados en la región bajo análisis.

2.3.3. Índice de vegetación normalizada y curva fenológica

Se extrajeron los datos del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizado (NDVI, por sus siglas en inglés) de la colección "MODIS/006/MOD13Q1", la cual provee datos con una resolución espacial de 250 m, cada 16 días, generados a partir de los sensores a bordo de las plataformas MODIS Terra y Aqua.

Se descargaron los valores de NDVI del pixel coincidente con el centro de cada lote que integraba la base de datos, para el período desde el 01 de septiembre al 30 de junio del siguiente año. De esta forma se obtuvo el NDVI cada 16 días, de todo el ciclo

en cada cultivo. Posteriormente, se calcularon los atributos de la curva de NDVI propuestos por Reed et al. (1994) y los momentos en que se dieron dentro del ciclo del cultivo (**Figura 3**):

i) NDVI mínimo inicial (NDVI Min Ini): Valor mínimo de NDVI al inicio del ciclo del cultivo. La determinación de éste valor se realizó en un rango de fechas para cada siembra de maíz. A partir de una evaluación de las curvas de NDVI en 20 lotes de maíz temprano y tardío, se pudo determinar que los maíces tempranos inician su ciclo en un rango de fechas de entre el 10 y el 30 de octubre, mientras que los maíces tardíos lo hacen entre el 20 de noviembre y el 15 de diciembre. Teniendo en cuenta esto, se seleccionó la fecha de menor valor de NDVI en ése período, asumiendo que previo a ese momento, el NDVI correspondía a cultivos invernales/malezas y posterior a esa fecha los valores de NDVI correspondían a las fases de crecimiento inicial del cultivo.

ii) NDVI mínimo final (NDVI Min Fin): Valor mínimo de NDVI al final del ciclo del cultivo. Similar al atributo anterior, la determinación de éste valor se realizó en un rango de fechas para cada siembra de maíz. A partir de una evaluación de las curvas de NDVI en 20 lotes de maíz temprano y tardío, se pudo determinar que los maíces tempranos finalizan su ciclo en un rango de fechas de entre 20 de marzo y 10 de abril, mientras que los maíces tardíos lo hacen entre el 20 de abril y el 10 de mayo. Teniendo en cuenta esto, se seleccionó la fecha de menor valor de NDVI en ése período, asumiendo que previo a ese momento, el NDVI correspondía al maíz secándose y posterior a esa fecha los valores de NDVI correspondían a malezas creciendo dentro del cultivo seco o cultivos de servicio sembrados al voleo. En el caso de que el valor mínimo fuese igual en varias fechas (i.e: no había crecimiento de malezas o cultivo de cobertura dentro del maíz seco), se tomó como fecha final del ciclo el primer momento de NDVI mínimo final.

iii) NDVI Máximo (NDVI Max): Máximo valor de NDVI en el ciclo del cultivo.

iv) Tasa de crecimiento (TC): $(\text{NDVI Máximo} - \text{NDVI mínimo inicial}) / \text{días}$

v) Tasa de senescencia (TS): $(\text{NDVI Máximo} - \text{NDVI mínimos final}) / \text{días}$

vi) Longitud del ciclo (LC) = Días transcurridos entre el momento de aparición del verdor (Ini V) y el momento del fin del verdor (Fin V), correspondientes a los momentos del NDVI mínimo inicial y final, respectivamente.

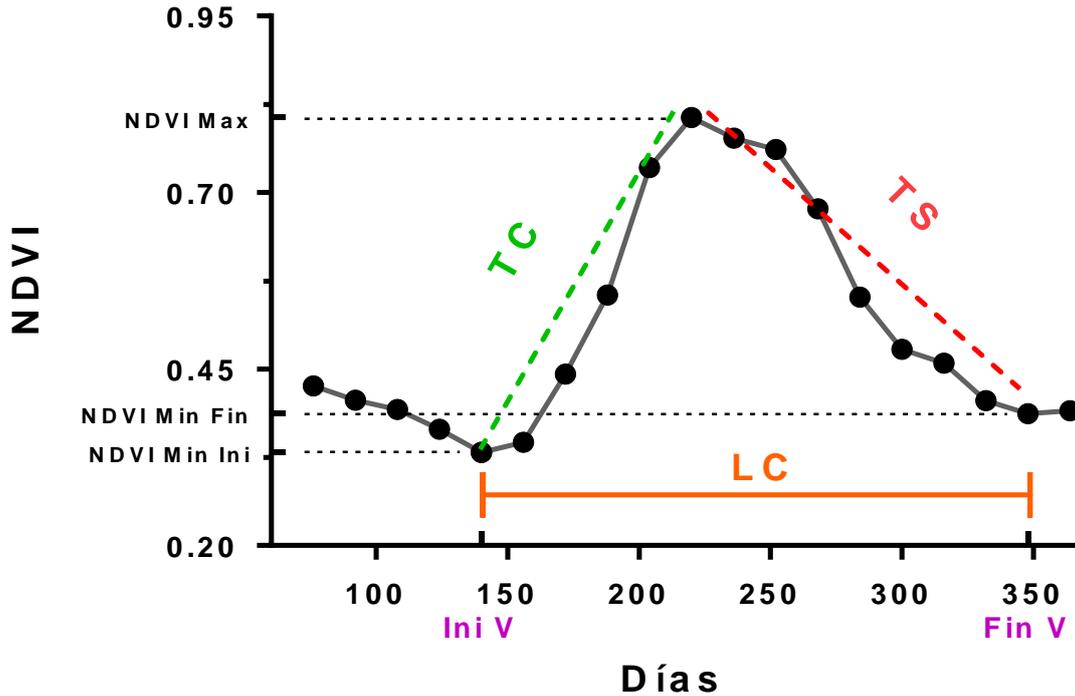


Figura 3. Curva fenológica del NDVI y métricas derivadas. **Ini V:** Momento de aparición del verdor, **Fin V:** Momento de fin del verdor, **LC:** Longitud del ciclo de crecimiento del cultivo, **NDVI Min Ini:** Valor de NDVI al inicio en el ciclo del cultivo, **NDVI Min Fin:** Valor de NDVI al final en el ciclo del cultivo, **NDVI Max:** Valor de NDVI máximo alcanzado, **TC:** Tasa de crecimiento vegetativo, **TS:** Tasa de senescencia. (Adaptado de Reed et al. (1994))

2.3.4. Radiación absorbida

El NDVI es un estimador directo de la fPAR (Sellers et al., 1992). Teniendo en cuenta esto, se calculó la fPAR mediante la ecuación calibrada por Pellegrini et al. (2020) (Ec 2) para cada una de las fechas durante el ciclo de cada cultivo. Posteriormente, a partir de los datos históricos de radiación fotosintéticamente activa (PAR) de la estación meteorológica de la EEA INTA Marcos Juárez (<http://siga.inta.gob.ar/#/data>), se calculó la radiación fotosintéticamente activa diaria (APARd) por el cultivo mediante la Ec 3. Para finalizar, se acumularon los valores de APARd durante el ciclo (Ecuación 4), obteniendo, de esta manera, la radiación fotosintéticamente activa absorbida acumulada en el ciclo del cultivo (APAR).

$$fPAR = 0.008e^{(5.41 \times NDVI)} \quad [Ec 2]$$

$$APARd = PAR \times fPAR \quad [Ec 3]$$

$$APAR = \sum APARd \quad [Ec 4]$$

2.3.5. Evapotranspiración del cultivo

Se utilizó el producto de evapotranspiración real mensual (E_{tr} : mm/mes) generado por el Instituto de Clima y Agua del INTA (<http://sepa.inta.gob.ar/>), que surge de un algoritmo ajustado mediante los datos de evapotranspiración potencial (ET_0) y precipitaciones registrados en estaciones meteorológicas del INTA y del Servicio Meteorológico Nacional, datos de capacidad de retención de agua de los suelos (Damiano & Taboada, 2000) e información satelital (NDVI y Temperatura de superficie) obtenida por el sensor VIIRS a bordo del satélite Suomi-NPP. El producto generado mediante el algoritmo es un archivo raster con una resolución espacial de 14 hectáreas, donde la correlación alcanzada entre los datos estimados vs los observados es del 0.8 (Di Bella et al., 2019).

Para los objetivos de este trabajo se evaluó la evapotranspiración real mensual (ET_M). Posteriormente, se agruparon los valores de ET_M de todo el ciclo de cada fecha de siembra obteniéndose la evapotranspiración acumulada en el ciclo del cultivo (ET_C).

2.4. Análisis estadístico

Los datos de las variables NDVI máximo (NDVI Max), tasa de crecimiento (TC) y senescencia (TS), evapotranspiración real mensual (ET_M), evapotranspiración acumulada en el ciclo del cultivo (ET_C) y la radiación fotosintéticamente activa absorbida acumulada en el ciclo del cultivo (APAR) fueron analizados mediante ANOVA para determinar la existencia de diferencias entre los factores (i) Fecha de siembra, (ii) Ambientes y sus interacciones. Cuando se detectaron diferencias significativas ($p < 0.05$), se aplicó un test de Fisher para establecer las diferencias entre medias. Las campañas fueron evaluadas separadamente con la finalidad de identificar las respuestas de las variables evaluadas a regímenes hídricos contrastantes. El modelo se detalla en la ecuación 5 (Ec 5).

$$X_{ijkl} = \mu + \alpha_i + \tau_j + \alpha\tau_{ij} + \varepsilon_{ijkl} \quad [\text{Ec } 5]$$

Donde:

X_{ijk} : es el valor de la variable respuesta observada en la “Fecha de siembra” i en el “Grupo de suelo” j .

μ : es la respuesta media general de todos los tratamientos.

α_i : es el efecto principal de la “Fecha de siembra” en el nivel i .

τ_j : es el efecto principal del “Suelos” en el nivel j .

$\alpha\tau_{ij}$: es el efecto de la interacción entre los niveles de los factores principales “Fecha de siembra” y “Suelos”.

ε_{ijkl} : es el error experimental no explicado

Mediante regresión lineal se evaluaron las relaciones entre la APAR y la ET_C con (i) las precipitaciones y (ii) el contenido de agua en el suelo en el estrato superficial en diferentes etapas durante el ciclo de crecimiento.

3. Resultados y Discusión

Las precipitaciones difirieron en el espacio, entre años y cultivos. Las lluvias fueron significativamente más bajas en la campaña 2017-18 respecto a la 2018-19. En la zona de estudio, estos valores fluctuaron entre 500-650 mm y 650-1250 mm para las campañas 2017-18 y 2018-19, respectivamente (**Figura 4 C y D**). Las mayores precipitaciones se dieron en el Amb-1, donde se encuentran los suelos con texturas más finas y con mayor capacidad de retención hídrica (Damiano & Taboada, 2000) (**Figura 2**). Al comparar entre cultivos (i.e: Tempranos vs Tardíos), tanto en el Amb-1 como en el Amb-2 los maíces tempranos recibieron precipitaciones más elevadas durante su ciclo respecto a los tardíos, esta diferencia fluctuó entre 8 a 15 % y entre 22 a 35%, en el Amb-1 y el Amb-2, respectivamente. Sin embargo, éste patrón de distribución de las precipitaciones totales, difirió entre fechas de siembra y ambientes cuando se evaluaron las diferentes fases del ciclo de crecimiento (i.e: vegetativo, período crítico y llenado de granos). En otras palabras, los maíces tempranos no siempre recibieron las más elevadas precipitaciones en todas las fases de desarrollo, indicando una fuerte variabilidad temporal de las lluvias (**Figura 4 y Tabla 2**).

Por su parte, el agua en el suelo del estrato superficial (i.e: 5 cm) en la campaña 2017-18 presentó un valor promedio de ≈ 9 mm a lo largo del ciclo del cultivo en ambas fechas de siembra, éstos contenidos fueron más elevados en el período vegetativo y período crítico (**Tabla 2, Figura 5 A y B**). Por el contrario, durante la campaña 2018-19 el contenido promedio de agua en el estrato superficial fue de ≈ 14 mm en el ciclo (**Figura 5 C y D**), y fue más elevada en el Amb-1 respecto al Amb-2, y durante los períodos críticos y de llenado de granos (**Tabla 2**). Si bien estos resultados están en línea con lo observado respecto a las precipitaciones recibidas, se puede observar claramente la

influencia de la textura del suelo y la consecuente menor capacidad de retención hídrica en los ambientes más arenosos.

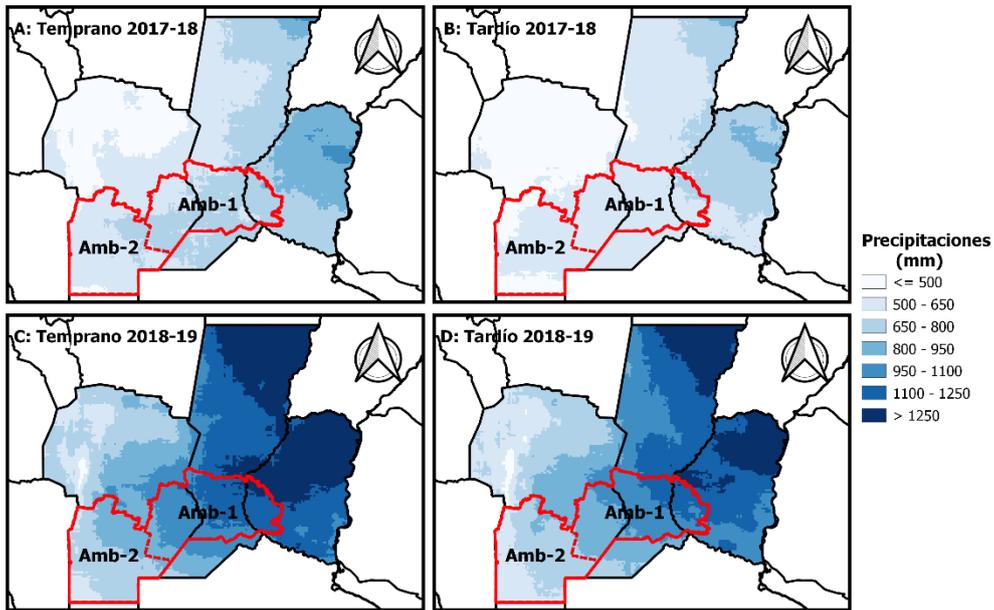


Figura 4. Distribución espacial de las precipitaciones durante el ciclo de maíces tempranos y tardíos en las campañas 2017-18 (A y B) y 2018-19 (C y D) Adaptado de Funk et al. (2015).

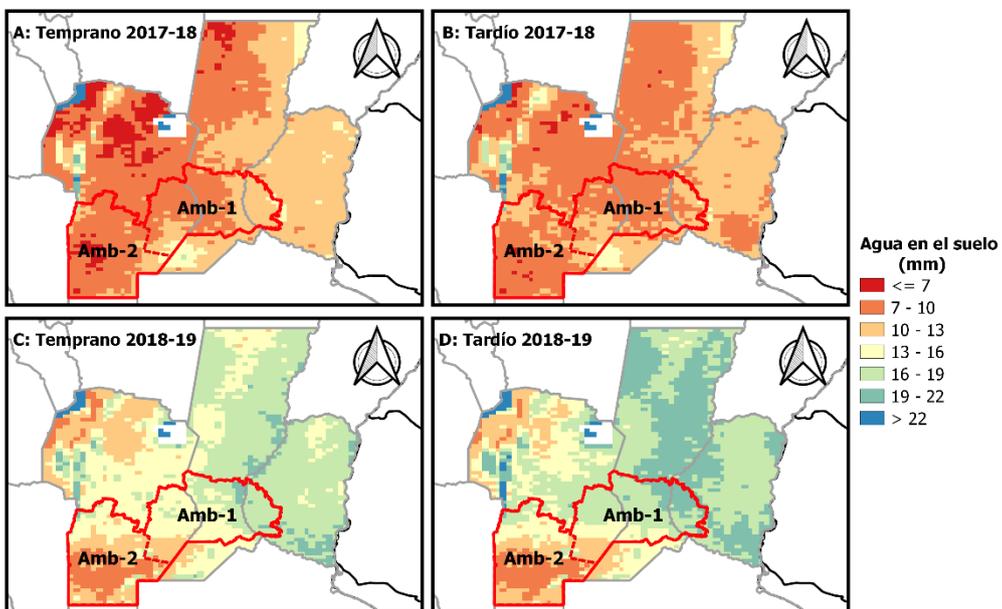


Figura 5. Distribución espacial del contenido de agua (en mm) en los primeros 5 cm del perfil del suelo, promedio durante el ciclo de maíces tempranos y tardíos en las campañas 2017-18 (A y B) y 2018-19 (C y D).

Tabla 2. Precipitaciones y agua en los primeros 5 cm del perfil (Ambas expresadas en mm de agua) en el período vegetativo (PP_{VEG} y ADC_{VEG}), en el período crítico (PP_{PC} y ADC_{PC}), en el período de llenado de granos (PP_{LLG} y ADC_{LLG}) y en el ciclo (PP_{CICLO} y ADS_{CICLO}).

Campaña	Ambiente	Fecha de siembra	PP_{VEG}	PP_{PC}	PP_{LLG}	PP_{CICLO}	ADS_{VEG}	ADS_{PC}	ADS_{LLG}	ADS_{CICLO}
2017-18	Amb-1	Temprano	166 <i>a</i>	166 <i>b</i>	220 <i>b</i>	552 <i>a</i>	14.5 <i>a</i>	8.0 <i>b</i>	4.4 <i>b</i>	9.8 <i>Ab</i>
		Tardío	104 <i>d</i>	92 <i>d</i>	316 <i>a</i>	512 <i>b</i>	7.7 <i>c</i>	7.7 <i>b</i>	4.6 <i>b</i>	10.4 <i>Aa</i>
	Amb-2	Temprano	153 <i>b</i>	209 <i>a</i>	198 <i>c</i>	560 <i>a</i>	10.6 <i>b</i>	11.2 <i>a</i>	4.4 <i>b</i>	9.4 <i>Bb</i>
		Tardío	114 <i>c</i>	145 <i>c</i>	182 <i>d</i>	442 <i>c</i>	11.3 <i>b</i>	11.3 <i>a</i>	5.5 <i>a</i>	10.0 <i>Ba</i>
ANOVA										
Fecha de siembra (F)			<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	0.6955	<0.0001	0.0003
Ambiente (A)			0.252	<0.0001	<0.0001	<0.0001	0.412	<0.0001	<0.0001	<0.0001
A x F			<0.0001	0.0016	<0.0001	<0.0001	<0.0001	0.1272	<0.0001	0.9958
2018-19	Amb-1	Temprano	319 <i>a</i>	378 <i>b</i>	317 <i>a</i>	1011 <i>a</i>	11.9 <i>a</i>	18.9 <i>b</i>	16.58 <i>b</i>	15.48 <i>b</i>
		Tardío	210 <i>c</i>	401 <i>a</i>	261 <i>c</i>	881 <i>b</i>	10.9 <i>b</i>	20.94 <i>a</i>	18.58 <i>a</i>	19.51 <i>a</i>
	Amb-2	Temprano	260 <i>b</i>	272 <i>c</i>	323 <i>a</i>	855 <i>b</i>	10.6 <i>c</i>	13.47 <i>c</i>	13.22 <i>c</i>	12.34 <i>c</i>
		Tardío	82 <i>d</i>	194 <i>d</i>	286 <i>b</i>	562 <i>c</i>	10.9 <i>b</i>	10.88 <i>d</i>	11.08 <i>c</i>	11.28 <i>d</i>
ANOVA										
Fecha de siembra (F)			<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	0.790	<0.0001
Suelo (S)			<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	0.2724	<0.0001	<0.0001
S x F			<0.0001	<0.0001	0.014	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001

Medias con letras mayúsculas diferentes indican diferencias entre Fechas de siembra, medias con letras minúsculas diferentes indican diferencias entre Ambientes. Medias con letras minúsculas cursiva en negrita indican interacción “Fecha de siembra x Ambiente”.

La duración del ciclo del cultivo (LC) fue modificada tanto por la fecha de siembra ($p < 0.0001$) como por el Ambiente ($p < 0.0001$) (**Tabla 3**). En este sentido, el ciclo de los maíces tardíos fue ≈ 40 -45 días más cortos que el de los maíces tempranos. A su vez, la duración del ciclo fue de ≈ 15 días menor en el Amb-1 respecto del Amb-2 en ambas campañas. El inicio del ciclo de los maíces sembrados en fechas tempranas fue en la primera semana de octubre y lo finalizaron a principios del mes de mayo, mientras que los maíces de siembras tardías iniciaron su ciclo a fines de noviembre/principio de diciembre y lo finalizaron a fines de mayo (**Figura 6**), provocando que el NDVI Max de los maíces tempranos transcurra en los meses de diciembre y enero, mientras que en maíces tardíos fue en los meses de enero y febrero (**Figura 6**).

Las diferencias en el NDVI Max fueron solo del 3% entre campañas (2017-18 < 2018-19). La más amplia diferencia fue en el Amb-1 entre maíces tempranos vs tardíos, donde los primeros alcanzaron valores 4-8% más elevados, ésta diferencia fue aún menos marcada en el Amb-2, en ambas campañas (**Tabla 3**).

La TC varió entre 0.004 y 0.0085 en el rango de suelos, fechas de siembra y campañas. Independientemente del Ambiente y la Campaña, esta variable fue entre 9 y 15% más elevada en maíces Tardíos vs Tempranos, a excepción del Amb-1 de la campaña 2018-19, donde el maíz tardío presentó una TC 42% menor a la de maíces Tempranos (**Tabla 3**). En cuanto a la TS, se observó que en el Amb-1 los maíces presentaron similar TS independientemente de la Fecha de Siembra y en ambas Campañas; pero en el Amb-2 los maíces Tardíos se secaron un 15-20% más rápido que los Tempranos (**Tabla 3**).

Tasas de crecimiento más elevadas durante el período vegetativo de maíces sembrados en fechas tardías, han sido reportadas en diversos estudios de la Región Pampeana (Cantarero et al., 2000; Cirilo & Andrade, 1994). Si bien en este análisis no se utilizó información de la temperatura de superficie de cada campaña, la temperatura promedio histórica mensual en la zona de estudio durante diciembre (mes en el que los maíces Tardíos atraviesan su período vegetativo), es ≈ 6 °C más elevada que la del mes de octubre (mes en el que los maíces Tempranos atraviesan su período vegetativo) (23.5 °C vs 17.5 °C, Cravero et al., 2017), lo que acelera el crecimiento del cultivo debido a una mayor acumulación de °Cdía por día transcurrido y en última instancia acorta el ciclo de crecimiento (Cirilo & Andrade, 1994). En este análisis se pudo determinar un acortamiento del ciclo de 6 días por cada 10 días de atraso en la fecha de siembra en

ambos ambientes, en línea con lo reportados por Cirilo & Andrade (1994) en una región 500 km más al sur.

Por otra parte, las bajas TC y NDVI Max, de maíces tardíos en suelos del Amb-1 (**Tabla 3, Figura 6 D**), posiblemente fueron consecuencia de la presencia de cultivos invernales previos al cultivo de verano (Lo que se refleja en los mayores valores del NDVI en la línea color negra, **Figura 6 D**), que condicionó la disponibilidad hídrica inicial. Las fechas de inicio del ciclo del maíz tardío (i.e: 20-30 de noviembre), hacen pensar que los cultivos predecesores en esos lotes fueron cultivos de cobertura y no trigo, ya que en ésta región el trigo finaliza su ciclo ontogénico a fines de noviembre lo que retrasa la siembra del maíz posterior al 10 de diciembre (denominado maíz de segunda).

En esta región se ha difundido la práctica del “cultivo de cobertura”, la cual consiste en implantar un cultivo con desarrollo otoño-invernal cuyo ciclo ontogénico es interrumpido previo a que llegue a madurez fisiológica (Álvarez et al., 2012). Si bien el objetivo de su inclusión es la mejora en los parámetros edáficos (Cazorla et al., 2017), se han reportado menores niveles de producción en maíces no fertilizados a los cuales previamente se les habían realizado cultivos de coberturas de gramíneas como consecuencia de la inmovilización de nitrógeno y menores niveles de agua útil (de Sá Pereira et al., 2014). Por lo cual, podría ser uno de los factores que explique el motivo de los resultados encontrados. A su vez, vale recalcar que es el tipo de cobertura con un menor número de muestras en nuestro análisis ($n = 20$).

Tabla 3. Métricas de la curva de NDVI (Max: NDVI máximo alcanzado, LC: Largo del ciclo, TC: tasa de crecimiento, TS: tasa de senescencia) de maíces de fecha temprana y tardía en cada grupo de suelos, para las dos campañas.

Campaña	Ambiente	Fecha de siembra	NDVI			
			Max	LC	TC	TS
2017-18	Amb-1	Temprano	0.823 <i>b</i>	215 Ab	0.0061 Bb	0.0043 <i>b</i>
		Tardío	0.792 <i>c</i>	171 Bb	0.0071 Ab	0.0042 <i>b</i>
	Amb-2	Temprano	0.855 <i>a</i>	229 Aa	0.0078 Ba	0.0043 <i>b</i>
		Tardío	0.847 <i>a</i>	182 Ba	0.0085 Aa	0.0056 <i>a</i>
		ANOVA				
		Fecha de siembra (F)	0.0011	<0.0001	0.0003	0.0014
		Ambiente (A)	<0.0001	0.0002	<0.0001	0.0002
		F x A	0.05	0.501	0.479	<0.0001
2018-19	Amb-1	Temprano	0.859 <i>a</i>	209 Ab	0.0068 <i>a</i>	0.0046 <i>ab</i>
		Tardío	0.793 <i>b</i>	167 Bb	0.0040 <i>b</i>	0.0040 <i>b</i>
	Amb-2	Temprano	0.855 <i>a</i>	221 Aa	0.0066 <i>a</i>	0.0044 <i>ab</i>
		Tardío	0.867 <i>a</i>	186 Ba	0.0074 <i>a</i>	0.0052 <i>a</i>
		ANOVA				
		Fecha de siembra (F)	<0.0001	<0.0001	0.003	0.837
		Ambiente (A)	<0.0001	0.0003	<0.0001	0.0092
		F x A	<0.0001	0.352	<0.0001	0.001

Medias con letras mayúsculas diferentes indican diferencias entre Fechas de siembra, medias con letras minúsculas diferentes indican diferencias entre Ambientes. Medias con letras minúsculas cursiva en negrita indican interacción “Fecha de siembra x Ambiente”.

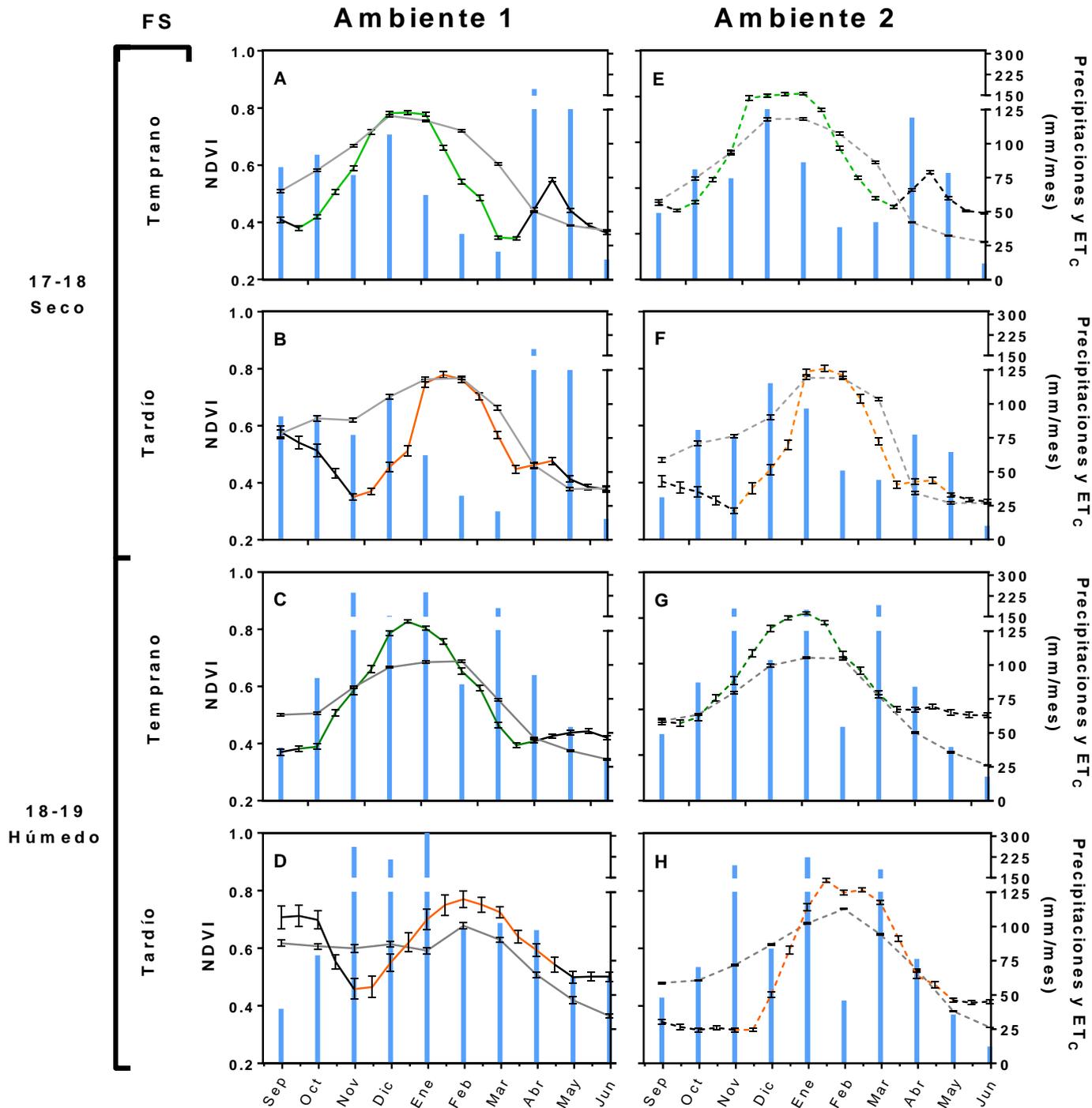


Figura 6. Precipitaciones (Barras celestes), Evapotranspiración del cultivo (ET_c: Líneas grises), y curvas de NDVI de maíces tempranos (Líneas verdes) y tardíos (Líneas anaranjadas), en el Amb-1 (Izquierda) y el Amb-2 (Derecha). En las campañas 2017-18 y 2018-19. Las barras negras indican ± 1 EE.

Tanto la APAR como la ET_c, respondieron a una interacción SxF en la campaña seca (i.e: 2017-18). En la campaña más lluviosa (i.e: 2018-19) se observaron diferencias entre Tempranos vs Tardíos en ambas variables, mientras que el Ambiente solo afectó la ET_c (Tabla 4).

La APAR varió entre los 640 y 818 MJ m⁻² en el rango de fechas de siembra, ambientes y campañas evaluados (**Tabla 4**). En términos generales, la absorción de radiación fue un 10% menor en la campaña seca respecto a la húmeda (≈ 70 MJ m⁻²). A su vez, los maíces tempranos absorbieron ≈ 67 MJ m⁻² (Rango: 20-105 MJ m⁻², 3-15%) más que los maíces tardíos, excepto en el Amb-1 durante la campaña seca, donde la radiación absorbida fue similar entre fechas de siembra (**Tabla 4**). Estos valores de APAR se encuentran dentro de los rangos reportados para maíces templados cultivados bajo diferentes condiciones de hídricas, fertilización nitrogenada y/o densidad de plantas (Curin et al., 2020; Hernández et al., 2020).

Una relación estrecha fue encontrada entre la APAR y las precipitaciones en el ciclo ($R^2 = 0.71$) pero no con el agua en el suelo ($R^2 = 0.26$) (**Figura 7 D y H**, respectivamente), este último comportamiento, sería consecuencia del escaso volumen de suelo a partir del cual se obtiene la información de agua del suelo, ya que solo es en los primeros 5 cm del perfil (Entekhabi et al., 2014), mientras que el maíz puede explorar hasta 2 m de profundidad (Dardanelli et al., 1997). Evaluando las diferentes etapas de crecimiento, la APAR en el ciclo estuvo asociada a las lluvias recibidas durante la etapa vegetativa y el período crítico (**Figura 7 A, B** respectivamente), sugiriendo que el mayor caudal de lluvias en esos períodos favorecieron el desarrollo de hojas que permitió una captura más elevada de PAR a lo largo del ciclo (Cirilo & Andrade, 1994). Estos resultados concuerdan con lo reportado en diversos estudios de la región (Maddonni, 2012; Otegui et al., 1995).

Si bien en el Amb-1 se dan condiciones de crecimiento más favorables para los cultivos debido a: *i*) temperaturas y precipitaciones más elevadas durante el ciclo (**Figura 1**) (Rubí Bianchi & Cravero, 2010), y *ii*) suelos con mayor capacidad de almacenaje de agua (**Figura 2**) (Damiano & Taboada, 2000), la mayor captura de radiación en el Amb-2 en la campaña seca (i.e: 2017-18), hacen pensar de una fuente hídrica no evaluada en éste trabajo, que atenuó las caídas en la APAR. En este sentido, un estudio regional realizado por Whitworth-Hulse et al. (2023), muestra que en la campaña analizada como “seca” en éste trabajo, la napa en el Amb-2 se encontraba entre 1 y 2 m de la superficie, dentro del rango óptimo del alcance de las raíces del maíz (Florio et al., 2014), pudiendo ser el factor que provocó los mayores niveles de captura de radiación en maíces tempranos del Amb-2, y en línea con lo observado por Vitantonio-Mazzini et al. (2020), quienes reportaron que en suelos de textura gruesa se dan mayores respuestas en rendimiento a la presencia de napa, respecto a suelos de textura fina (i.e: Amb-2 vs Amb-1).

Tabla 4. Radiación fotosintéticamente activa interceptada en el ciclo (APAR) y evapotranspiración en el ciclo (ET_c) de maíces tempranos y tardíos en cada los Ambientes 1 y 2, para las campañas 2017-18 y 2018-19.

Campaña	Ambiente	Fecha de siembra	APAR (MJ m ⁻²)	Δ APAR* Temprano vs Tardío	ET _c (mm)	Δ ET _c ** Temprano vs Tardío	
2017-18	Amb-1	Temprano	687 <i>b</i>		700 <i>a</i>		
		Tardío	678 <i>bc</i>	-1.31%	620 <i>c</i>	-11.42%	
	Amb-2	Temprano	745 <i>a</i>		671 <i>b</i>		
		Tardío	640 <i>c</i>	-14.09%	569 <i>d</i>	-15.20%	
	ANOVA						
	Fecha de siembra (F)			0.0004		<0.0001	
Ambiente (A)			0.539		<0.0001		
A x F			0.0027		0.0011		
2018-19	Amb-1	Temprano	818 A		608 Ab		
		Tardío	737 B	-9.90%	555 Bb	-8.70%	
	Amb-2	Temprano	754 A		616 Aa		
		Tardío	734 B	-2.62%	574 Ba	-6.81%	
	ANOVA						
	Fecha de siembra (F)			0.024		<0.0001	
Ambiente (A)			0.132		0.0017		
S x F			0.167		0.188		

Medias con letras mayúsculas diferentes indican diferencias entre Fechas de siembra, medias con letras minúsculas diferentes indican diferencias entre Suelos. Medias con letras minúsculas cursiva en negrita indican interacción “Fecha de siembra x Suelo”.

* Esta columna indican en términos relativos, cuanta menos radiación capturaron los maíces tardíos respecto a los tempranos.

** Esta columna indican en términos relativos, cuanta menos agua evapotranspiraron los maíces tardíos respecto a los tempranos.

La ET_c varió entre 555 y 700 mm en el rango de combinaciones de tipos de suelos, fechas de siembra y campañas evaluados, aunque se observaron efectos contrastantes entre campañas (**Tabla 4**). En promedio, durante la campaña “seca” el agua consumida fue ≈ 9% (52 mm) más elevada que durante la campaña húmeda. Por su parte, los maíces tempranos evapotranspiraron siempre más agua que los tardíos, éstas diferencias fueron máximas en el Amb-2 durante la campaña seca (15.20%) y mínimas en el Amb-2 durante la campaña húmeda (6.81%). Esta variable no se relacionó ni con las precipitaciones, ni con el contenido de agua en los primeros centímetros del suelo (**Figura 8**).

En este trabajo no se evaluó la temperatura del canopéo, sin embargo, dado que para el cálculo de la ET_c en las imágenes utilizadas como fuente de información las variables utilizadas son el NDVI y la temperatura de superficie (Di Bella et al., 2019), las diferencias encontradas entre campañas podrían estar asociadas a mayores temperaturas

durante el ciclo 2017-18 respecto al ciclo 2018-19. Además, algo interesante de notar es que la relación APAR/ET_C (i.e: MJ m⁻² absorbido en función de los milímetros de agua consumida) fue un 22% menor en la campaña “seca” respecto a la “húmeda” (APAR/ET_C: 1.06 vs 1.30, respectivamente) (**Figura 9**), sugiriendo una menor eficiencia en la captura de radiación a igual consumo de agua, posiblemente asociado a altas temperaturas que provocaron golpes de calor como fue reportado por Cicchino *et al.* (2010).

Los valores de ET_C estuvieron dentro del rango informado para maíces cultivados en el centro y sur de la región Pampeana (Curin *et al.*, 2020; Hernández *et al.*, 2020). A su vez, las diferencias observadas en la ET_C de maíces tempranos vs tardíos, concuerda con los resultados reportados por Maddonni (2012) al modelar el desarrollo y crecimiento de maíces en diferentes regiones de Argentina.

Por otro lado, los resultados encontrados ponen en evidencia el efecto de la textura de suelos sobre el consumo de agua del cultivo, ya que la diferencia en la ET_C durante la campaña seca entre maíces tempranos vs tardíos fue más pronunciada en el ambiente que tiene suelos de texturas gruesas y con menor retención de agua (**Tabla 4**) (Damiano & Taboada, 2000), lo que sugeriría un agotamiento más rápido de las reservas hídricas del suelo. Hay que mencionar además que, en la campaña húmeda no solo que las diferencias entre Tempranos y Tardíos se invirtió (**Tabla 4**, Ver columna “ Δ ET_C Temprano vs Tardío”), sino que además los maíces implantados en suelos de texturas arenosas (i.e: Amb-2) consumieron más agua que los maíces implantados en suelos de textura limosas y con horizontes sub-superficiales arcillosos (i.e: Amb-1). Esta respuesta posiblemente se asocie a que el elevado caudal de precipitaciones recibidas en el Amb-1 durante la campaña 2018-19 (**Tabla 2**) se encontró con el impedimento físico a su movimiento descendente generado por el horizonte arcilloso, y consecuentemente se provocaron anegamientos temporarios (Damiano & Taboada, 2000; INTA, 2013; Soil Survey Staff, 2014), afectando negativamente el consumo total del cultivo (i.e: ET_C).

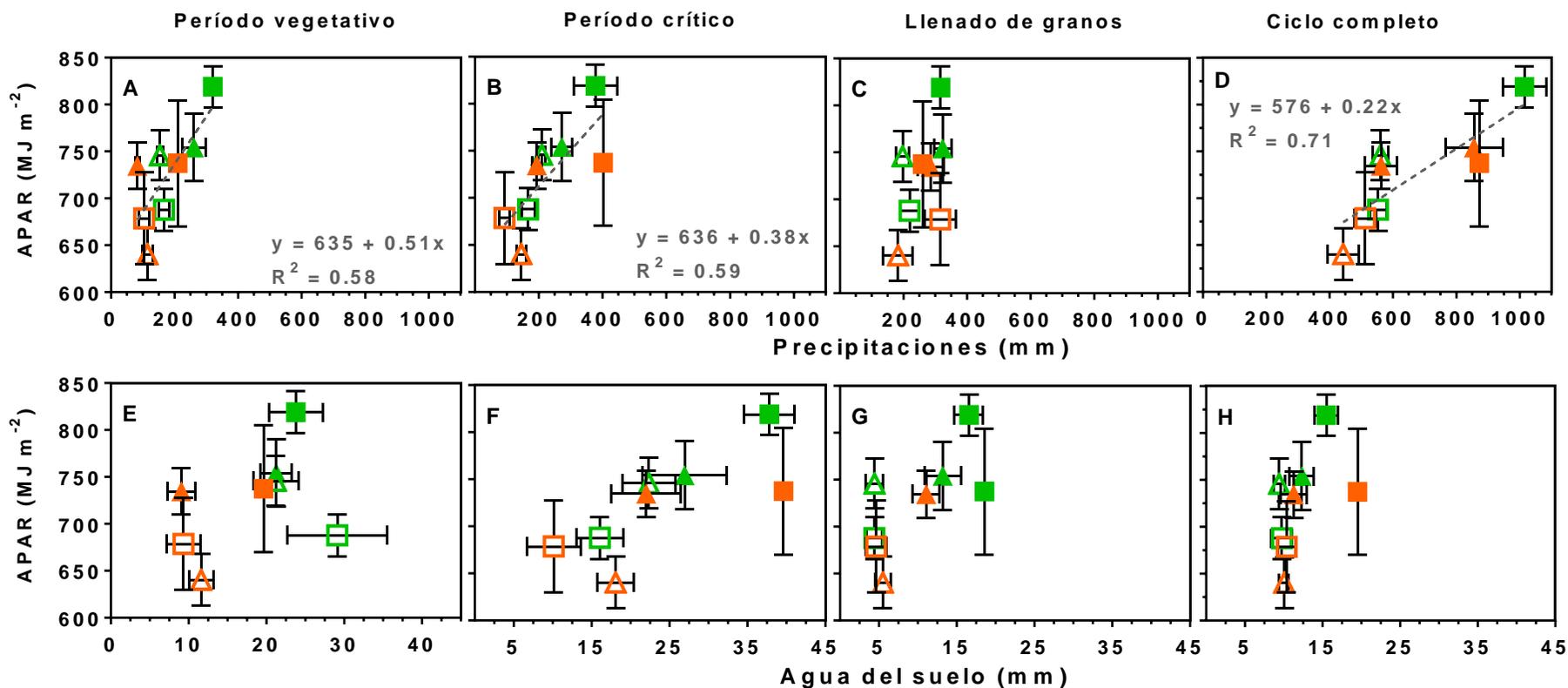


Figura 7. Relaciones entre la radiación fotosintéticamente activa interceptada (APAR) y las precipitaciones (A, B, C y D) o el agua en el suelo (E, F, G y H), en los períodos vegetativos (A y E), período crítico (B y F), llenado de granos (C y G) y en el ciclo completo (D y H) para maíces en las campañas 2017-18 (Símbolos vacíos) y 2018-19 (Símbolos llenos), en suelos del Amb-1 (Cuadrados) y el Amb-2 (Triángulos) en fechas de siembra Temprana (Símbolos Verdes) y Tardías (Símbolos Anaranjados). Las barras indican el IC del 95%.

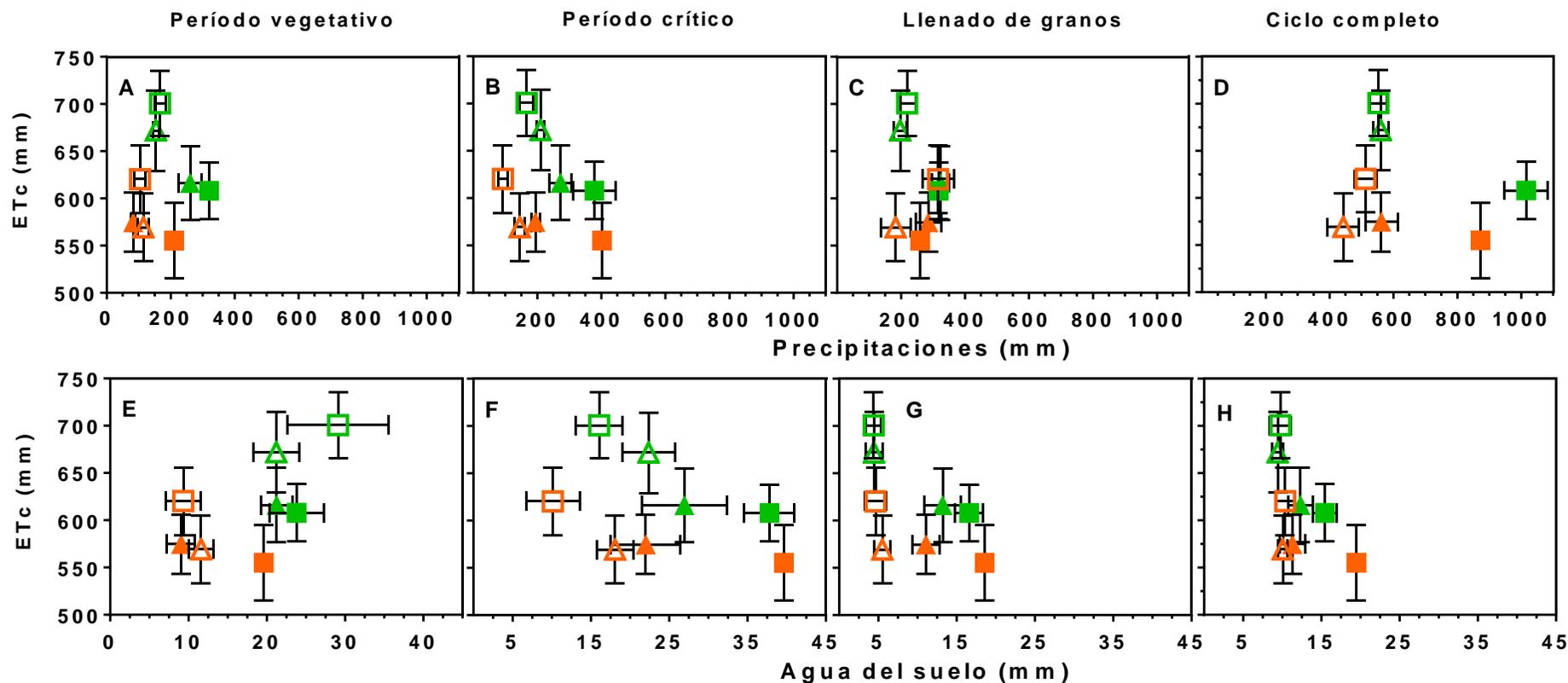


Figura 8. Relación entre la evapotranspiración del cultivo en el ciclo (ETc) y las precipitaciones (A, B, C y D) o el agua del suelo (E, F, G y H), en los períodos vegetativos (A y E), período crítico (B y F), llenado de granos (C y G) y el ciclo completo (D y H) para maíces en las campañas 2017-18 (Símbolos vacíos) y 2018-19 (Símbolos llenos), en suelos del Amb-1 (Cuadrados) y el Amb-2 (Triángulos) en fechas de siembra Temprana (Símbolos Verdes) y Tardías (Símbolos Anaranjados). Las barras indican el IC del 95%.

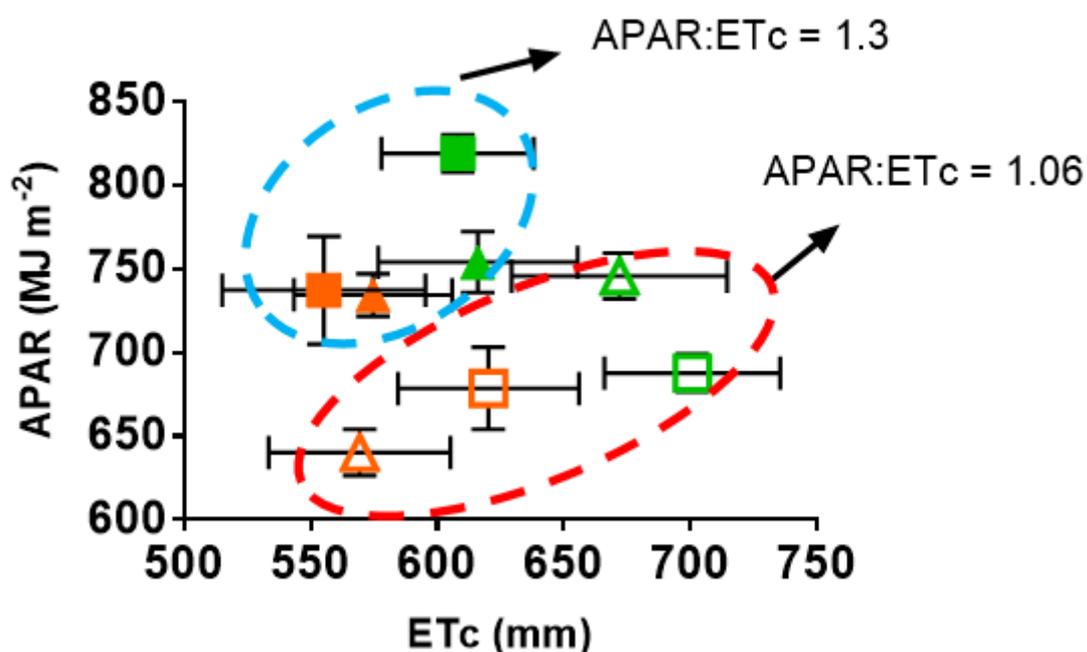


Figura 9. Relación entre la APAR y la ETc en cada uno de las diferentes combinaciones Ambiente x Fecha de Siembra, para maíces en las campañas 2017-18 (Símbolos vacíos) y 2018-19 (Símbolos llenos), en suelos del Amb-1 (Cuadrados) y el Amb-2 (Triángulos) en fechas de siembra Temprana (Símbolos Verdes) y Tardías (Símbolos Anaranjados), los valores por fuera de los contornos punteados indican el valor promedio de la relación en cada campaña. Las barras indican el IC del 95%.

En un análisis de la dinámica mensual de la evapotranspiración de los maíces de siembras tempranas fue $\approx 15\%$ más elevada durante los meses de noviembre y diciembre respecto a maíces tardíos (Rango 11 a 19% y 12 a 23%, para noviembre y diciembre, respectivamente), esta relación se invirtió en los meses entre febrero y mayo, aunque con menor magnitud de diferencias entre fechas de siembra, ya que durante esos meses los maíces tardíos evapotranspiraron entre un 7 y 17% más que los tempranos (**Tabla 5**). Esto coincide con los períodos de la meseta del NDVI máximo observado en cada cultivo (**Figura 6**) y se asocia a que en esos momentos de la curva fenológica, el cultivo está en su máxima tasa de crecimiento (Nguy-Robertson et al., 2012; Reed et al., 1994).

Tabla 5. Evapotranspiración mensual (mm) para maíces de siembra temprana y tardía, en los Ambientes 1 y 2, en las campañas 2017-18 y 2018-19.

Campaña	Ambiente	Fecha de siembra	Evapotranspiración mensual (mm)							
			Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May
2017-18	Amb-1	Temprano	80 <i>b</i>	98 <i>a</i>	120 <i>a</i>	117	109 B	85 Bb	50 <i>b</i>	40 <i>a</i>
		Tardío	89 <i>a</i>	88 <i>c</i>	105 <i>b</i>	118	119 A	97 Ab	55 <i>a</i>	37 <i>a</i>
	Amb-2	Temprano	74 <i>c</i>	93 <i>b</i>	118 <i>a</i>	118	107 B	86 Ba	42 <i>c</i>	32 <i>b</i>
		Tardío	71 <i>c</i>	76 <i>d</i>	90 <i>c</i>	119	119 A	103 Aa	35 <i>d</i>	27 <i>c</i>
ANOVA										
Fecha de siembra (F)			0.093	<0.0001	<0.0001	ns	<0.0001	<0.0001	0.2402	<0.0001
Ambiente (A)			<0.0001	<0.0001	<0.0001	ns	ns	0.0033	<0.0001	<0.0001
A x F			0.0003	0.0011	<0.0001	ns	ns	ns	<0.0001	0.035
2018-19	Amb-1	Temprano	65 <i>b</i>	83 <i>a</i>	98 A	102 <i>a</i>	102 <i>b</i>	74 Bb	46 Bb	37 <i>b</i>
		Tardío	85 <i>a</i>	84 <i>a</i>	87 B	82 <i>b</i>	102 <i>b</i>	90 Ab	64 Ab	46 <i>a</i>
	Amb-2	Temprano	63 <i>b</i>	79 <i>a</i>	99 A	105 <i>a</i>	105 <i>b</i>	77 Ba	50 Ba	35 <i>b</i>
		Tardío	60 <i>b</i>	71 <i>b</i>	86 B	102 <i>a</i>	112 <i>a</i>	94 Aa	68 Aa	38 <i>b</i>
ANOVA										
Fecha de siembra (F)			<0.0001	0.0112	<0.0001	<0.0001	0.0224	<0.0001	<0.0001	0.0002
Ambiente (A)			<0.0001	<0.0001	ns	<0.0001	<0.0001	0.0248	0.015	0.0033
A x F			<0.0001	0.0024	ns	<0.0001	0.0001	ns	ns	0.0264

Medias con letras mayúsculas diferentes indican diferencias entre Fechas de siembra, medias con letras minúsculas diferentes indican diferencias entre Suelos. Medias con letras minúsculas cursiva en negrita indican interacción “Fecha de siembra x Suelo”.

4. Conclusiones

Este trabajo mostró el efecto de dos fechas de siembra en ambientes que contrastaron en el tipo de suelo, temperatura media, profundidad de la napa y precipitaciones en el ciclo del cultivo de maíz, sobre los atributos funcionales de la curva de NDVI y sus variables biofísicas APAR y ET_C. De acuerdo a las preguntas planteadas en la sección de introducción, las respuestas y conclusiones que surgen con los resultados obtenidos son:

En lo que respecta a los atributos funcionales, el uso de la curva del NDVI permitió cuantificar que el atraso de la fecha de siembra acelera la tasa de crecimiento y la de senescencia en un 12 y 17%, respectivamente, provocando que el ciclo de los maíces tardíos se complete 45 días más rápido, la magnitud de éstas respuestas es más elevada en el ambiente Arcilloso-Cálido-Húmedo (Amb-1). El NDVI Max, en cambio es menos sensible a atrasos en la fecha de siembra, ya que las caídas más pronunciadas serían de \approx 8%, sugiriendo que el uso del NDVI debería ser de la curva de completa, y no solo de un período en particular.

El cálculo de la APAR utilizando el NDVI permitió determinar que el atraso en la fecha de siembra de hasta 30 días reducen la absorción de radiación y la evapotranspiración hasta un 14 y 15%, respectivamente.

Las mayores precipitaciones cuantificadas mediante información satelital proveniente de la colección CHIRPS permitió explicar el comportamiento de la APAR, pero no de la ET_C, mientras que la información referida a la medición del contenido de agua del suelo en los primeros centímetros mediante SMAP no fue de utilidad para explicar variaciones ni en la APAR ni en la ET_C.

5. Bibliografía

Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (2006). *Evapotranspiración del cultivo: guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*. Roma, Italia: FAO.

Álvarez, C., Quiroga, A., Santos, D., & Bodrero, M. (2012). *Contribución de los cultivos de cobertura a la sustentabilidad de los sistemas de producción*.

Andrade, F. H., Sadras, V. O., Vega, C. R. C., & Echarte, L. (2005). Physiological Determinants of Crop Growth and Yield in Maize, Sunflower and Soybean. *Journal of Crop Improvement*, 14(1-2), 51-101. https://doi.org/10.1300/j411v14n01_05

Asner, G. P., Nepstad, D., Cardinot, G., & Ray, D. (2004). Drought stress and carbon uptake in an Amazon forest measured with spaceborne imaging spectroscopy. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 101(16), 6039-6044. <https://doi.org/10.1073/pnas.0400168101>

BCBA. (2020). *INFORME DE CIERRE DE CAMPAÑA MAÍZ 2018/19*. Recuperado de <https://www.bolsadecereales.com/estimaciones-informes>

Cantarero, M. G., Luque, S., & Rubiolo, O. (2000). Efecto de la época de siembra y la densidad de plantas sobre el número de granos y el rendimiento de un híbrido de maíz en la región central de Córdoba (Argentina). *Agriscientia*, 17, 3-10. <https://doi.org/10.31047/1668.298x.v17.n0.2619>

Cazorla, C. R., Cisneros, J. M., Moreno, I. S., & Galarza, C. M. (2017). Mejora en el carbono del suelo y estabilidad de agregados por fertilización y cultivos de cobertura. *Ciencia del Suelo*, 35(2), 301-313.

Choudhury, B. J. (2000). CARBON-WATER-ENERGY RELATIONS FOR SELECTED RIVER. *Advances in Space Research*, 26(7), 1091-1099.

Cicchino, M., Rattalino Edreira, J. I., & Otegui, M. E. (2010). Heat stress during late vegetative growth of maize: Effects on phenology and assessment of optimum temperature. *Crop Science*, 50(4), 1432-1436. <https://doi.org/10.2135/cropsci2009.07.0400>

Cirilo, A. G., & Andrade, F. H. (1994). Sowing date and maize productivity: I. Crop growth and dry matter partitioning. *Crop Science*, 34(4), 1039-1043. <https://doi.org/10.2135/cropsci1994.0011183X003400040037x>

Collins, M., Knutti, R., Arblaster, J., Dufresne, J.-L., Fichet, T., Friedlingstein, P., ... Wehner, M. (2013). Long-term climate change: Projections, commitments and irreversibility. En T. F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J.

Boschung, ... P. M. Midgley (Eds.), *Climate Change 2013 the Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 1029-1136). <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.024>

Cravero, S. A. C., Bianchi, C. L., Elena, H. J., & Bianchi, A. R. (2017). *Clima de la Argentina. Mapas digitales mensuales de precipitaciones y precipitación menos evapotranspiración potencial*. (1.^a ed.). Recuperado de https://inta.gob.ar/sites/default/files/clima_de_arg._cravero_bianchi_elena_bianchi_080617.pdf

Curin, F., Severini, A. D., González, F. G., & Otegui, M. E. (2020). Water and radiation use efficiencies in maize: Breeding effects on single-cross Argentine hybrids released between 1980 and 2012. *Field Crops Research*, 246(November 2019), 107683. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2019.107683>

Damiano, F., & Taboada, M. A. (2000). Predicción del agua disponible usando funciones de pedo-transferencia en suelos agrícolas de la región pampeana. *Ciencia del Suelo*, 18(2), 77-88.

Dardanelli, J. L., Bachmeier, O. A., Sereno, R., & Gil, R. (1997). Rooting depth and soil water extraction patterns of different crops in a silty loam haplustoll. *Field Crops Research*, 54(1), 29-38. [https://doi.org/10.1016/S0378-4290\(97\)00017-8](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(97)00017-8)

de Sá Pereira, E., Galantini, J. A., Quiroga, A. R., & Landriscini, M. R. (2014). Efecto de los cultivos de cobertura otoño invernales, sobre el rendimiento y acumulación de N en maíz en el sudoeste Bonaerense. *Ciencia del Suelo*, 32(2), 219-231.

Di Bella, C. M., Oricchio, P. A., Gusmerotti, L. A., & Texeira, M. (2019). Actualización del algoritmo de estimación de la evapotranspiración real para el sensor VIIRS-Suomi NPP. *Ecología Austral*, 29(3), 428-432. <https://doi.org/10.25260/ea.19.29.3.0.887>

Entekhabi, D., Yueh, S., & De Lannoy, G. (2014). *SMAP Handbook*. Recuperado de <https://lirias.kuleuven.be/1741023?limo=0>

Florio, E. L., Mercu, J. L., Jobbágy, E. G., & Nasetto, M. D. (2014). Interactive effects of water-table depth, rainfall variation, and sowing date on maize production in the Western Pampas. *Agricultural Water Management*, 146, 75-83. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.07.022>

Funk, C., Peterson, P., Landsfeld, M., Pedreros, D., Verdin, J., Shukla, S., ... Michaelsen, J. (2015). The climate hazards infrared precipitation with stations - A new

environmental record for monitoring extremes. *Scientific Data*, 2, 1-21. <https://doi.org/10.1038/sdata.2015.66>

Gayo, S., & López, M. (2020). Maíz, el cultivo con mayor volumen de la campaña 2019/20: repasamos el Hoy para prepararnos para el Mañana. *Maizar 4.0*, 13. Recuperado de <https://www.bolsadecereales.com/imagenes/informes/2020-07/150-presentacionmaizar2020sg-ml.pdf>

Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., & Moore, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, 202, 18-27. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>

Hernández, M. D., Alfonso, C., Cerrudo, A., Cambareri, M., Della Maggiora, A. I., Barbieri, P., ... Echarte, L. (2020). Eco-physiological processes underlying maize water use efficiency response to plant density under contrasting water regimes. *Field Crops Research*, 254(April), 107844. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2020.107844>

INTA. (2013). Suelos de la República Argentina. Recuperado de <http://www.geointa.inta.gob.ar/2013/05/26/suelos-de-la-republica-argentina/>

Maddoni, G. A. (2012). Analysis of the climatic constraints to maize production in the current agricultural region of Argentina—a probabilistic approach. *Theoretical and Applied Climatology*, 107(3-4), 325-345. <https://doi.org/10.1007/s00704-011-0478-9>

Maddoni, G. A., & Otegui, M. E. (1996). Leaf area, light interception, and crop development in maize. *Field Crops Research*, 48(1), 81-87. [https://doi.org/10.1016/0378-4290\(96\)00035-4](https://doi.org/10.1016/0378-4290(96)00035-4)

Magliano, P. N., Fernández, R. J., Mercau, J. L., & Jobbágy, E. G. (2015). Precipitation event distribution in central Argentina: Spatial and temporal patterns. *Ecohydrology*, 8(1), 94-104. <https://doi.org/10.1002/eco.1491>

Mercau, J. L., Noretto, M. D., Bert, F., Giménez, R., & Jobbágy, E. G. (2016). Shallow groundwater dynamics in the Pampas: Climate, landscape and crop choice effects. *Agricultural Water Management*, 163, 159-168. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.09.013>

Monteith, J. L. (1972). Solar Radiation and Productivity in Tropical Ecosystems. *The Journal of Applied Ecology*, 9(3), 747-766. <https://doi.org/10.2307/2401901>

Nguy-Robertson, A., Gitelson, A., Peng, Y., Viña, A., Arkebauer, T., & Rundquist, D. C. (2012). Green leaf area index estimation in maize and soybean: Combining vegetation indices to achieve maximal sensitivity. *Agronomy Journal*, 104(5), 1336-1347. <https://doi.org/10.2134/agronj2012.0065>

Otegui, M. E., Nicolini, M. G., Ruiz, R. A., & Dodds, P. A. (1995). Sowing date effects on grain yield components for different maize genotypes. *Agronomy Journal*, 87(1), 29-33. <https://doi.org/10.2134/agronj1995.00021962008700010006x>

Paruelo, J. M. (2008). La caracterización funcional de ecosistemas mediante sensores remotos. *Ecosistemas*, 17(3), 4-22. Recuperado de <http://www.revistaecosistemas.net/articulo.asp?Id=575>

Paruelo, J. M., Garbulsky, M. F., Guerschman, J. P., & Jobbágy, E. G. (2004). Two decades of Normalized Difference Vegetation Index changes in South America: Identifying the imprint of global change. *International Journal of Remote Sensing*, 25(14), 2793-2806. <https://doi.org/10.1080/01431160310001619526>

Paruelo, J. M., Guerschman, J. P., & Verón, S. R. (2005). Expansión agrícola y cambios en el uso del suelo. *Ciencia Hoy*, 15(87), 14-23.

Pellegrini, P., Cossani, C. M., Di Bella, C. M., Piñeiro, G., Sadras, V. O., & Oesterheld, M. (2020). Simple regression models to estimate light interception in wheat crops with Sentinel-2 and a handheld sensor. *Crop Science*, 60(3), 1607-1616. <https://doi.org/10.1002/csc2.20129>

Podestá, G. P., Messina, C. D., Grondona, M. O., & Magrin, G. O. (1999). Associations between grain crop yields in Central-Eastern Argentina and El Niño-Southern oscillation. *Journal of Applied Meteorology*, 38(10), 1488-1498. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1999\)038<1488:ABGCYI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1999)038<1488:ABGCYI>2.0.CO;2)

Reed, B. C., Brown, J. F., VanderZee, D., Loveland, T. R., Merchant, J. W., & Ohlen, D. O. (1994). Measuring phenological variability from satellite imagery. *Journal of Vegetation Science*, 5(5), 703-714. <https://doi.org/10.2307/3235884>

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

Rubí Bianchi, A., & Cravero, S. A. C. (2010). *Atlas climático digital de la República Argentina* (I. Ediciones, Ed.).

Rubio, G., & Taboada, M. A. (2013). Árbol De Decisión Para Diagnosticar La Capacidad Productiva De Suelos De La Región Pampeana. *Ciencia del Suelo*, 31(2), 235-243.

Sellers, P. J., Berry, J. A., Collatz, G. J., Field, C. B., & Hall, F. G. (1992). Canopy reflectance, photosynthesis, and transpiration. III. A reanalysis using improved leaf models and a new canopy integration scheme. *Remote Sensing of Environment*, 42(3), 187-216. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(92\)90102-P](https://doi.org/10.1016/0034-4257(92)90102-P)

Soil Survey Staff. (2014). *Claves para la Taxonomía de Suelos*. 12, 339. Recuperado de https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/nrcs142p2_051546.pdf

Taboada, M. A. (2008). Influencia de la textura y la estructura de los suelos sobre la fertilidad física. En M. A. Taboada & C. R. Alvarez (Eds.), *Fertilidad física de los suelos* (2.ª ed., p. 272). Buenos Aires: Universidad de Buenos Aires.

Verón, S. R., & De Abelleira, D. (2014). Sensores activos de microondas : Radar. En J. M. Paruelo, C. M. Di Bella, & M. Milkovic (Eds.), *Percepción remota y sistemas de información geográfica. Sus aplicaciones en Agronomía y Ciencias Ambientales*.

Viglizzo, E. F., Jobbágy, E. G., Carreño, L. V., Pereyra, H., Ricard, F., Clantt, J., ... Salvador, V. (2012). *Expansión de la frontera agropecuaria en Argentina y su impacto ecológico-ambiental* (E. F. Viglizzo & E. G. Jobbágy, Eds.).

Vitantonio-Mazzini, L. N., Gómez, D., Gambin, B. L., Di Mauro, G., Iglesias, R., Costanzi, J., ... Borrás, L. (2020). Sowing date , genotype choice , and water environment control soybean yields in central Argentina. *Crop Science*, (June), 1-14. <https://doi.org/10.1002/csc2.20315>

Whitworth-Hulse, J. I., Jobbágy, E. G., Borrás, L., Alsina, S. E., Houspanossian, J., & Nosetto, M. D. (2023). The expansion of rainfed grain production can generate spontaneous hydrological changes that reduce climate sensitivity. *Agriculture, Ecosystems and Environmen*, 349(September 2022). <https://doi.org/10.1016/j.agee.2023.108440>

Zhang, X., Zhang, T., Zhou, P., Shao, Y., & Gao, S. (2017). Validation analysis of SMAP and AMSR2 soil moisture products over the United States using ground-based measurements. *Remote Sensing*, 9(2), 1-26. <https://doi.org/10.3390/rs9020104>