

Revista Argentina de Agrometeorología

ISSN 2545-8418

Editada por la
Asociación Argentina
de Agrometeorología

Revista Digital | Volumen IX | Año 2018



Revista Argentina de

AGROMETEOROLOGIA

Volumen IX. AÑO 2018



Asociación Argentina de Agrometeorología

Comisión Directiva

Presidente: Marta Vinocur

Vicepresidente: Andrea Irigoyen

Secretaria: Andrea Rivarola

Prosecretaria: Liliana Spescha

Secretaria de Actas: Graciela Vergara

Tesorero: Roberto Zanvettor

Protesorero: Angel Blason

Vocales Titulares: Armando Brizuela

Carolina Munka

Vocales Suplentes: Silvina Maio

Daniel Sorlino

Revista Argentina de

AGROMETEOROLOGÍA

Director: Pedro Enrique Boletta

Comité Científico

Coordinador: Andrés C. Ravelo

Integrantes del Comité Científico

Homero Bergamaschi

Antonio de la Casa

Patricia Figuerola

Denice Fontana

Andrea Irigoyen

Mario Murphy

Olga Penalba

Ana María Planchuelo

Andrés C. Ravelo

Rafael Rodríguez

Roberto Seiler

Paulo Senthelas

Leonardo Serio

Marta Vinocur

RADA

REVISTA ARGENTINA DE AGROMETEOROLOGÍA

Centro de Relevamiento y Evaluación de Recursos
Agrícolas y Naturales Av. Valparaiso s/n - C.C. 509 -
C.P. 5000

Ciudad de Córdoba - ARGENTINA

www.crean.unc.edu.ar

Email: pecbol@gmail.com

Nota Editorial

Tal como se anticipara en la Reunión Argentina de Agrometeorología 2018 llevada a cabo en el mes de septiembre próximo pasado en la localidad de Merlo, San Luis, el Volumen IX de RADA se publica de acuerdo a lo programado. El presente volumen contiene seis trabajos de los cuales tres tratan distintos aspectos de los sistemas productivos, dos están referidos a las adversidades de heladas y sequías y otro considera el impacto en el régimen térmico producido por el embalse de Salto Grande.

De esta manera son tres volúmenes que se publican en el nuevo formato digital y así se cumplen con los requisitos para su indexación en el Núcleo Básico de CONICET. Este proceso de incorporación al Núcleo Básico se iniciará en el año próximo y una vez aprobado veremos de incorporar a RADA a Scielo, ya con una proyección internacional.

Creo que es oportuno reiterar la solicitud a nuestra comunidad de agrometeorólogos de publicar sus investigaciones en RADA ya sean como trabajos completos, comunicaciones o notas breves. De esta forma mantendremos vigente la publicación de la revista como un medio de difusión científica de los aportes de la Agrometeorología al desarrollo sustentable de nuestro país.

Ing. Ftal (M Sc.) Pedro Enrique Boletta
Director RADA

CONTENIDO

Brecha de rendimiento del cultivo de soja estimada con el modelo AquaCrop en la región central de Córdoba, Argentina

de la Casa, A.; G. Ovando; G. Díaz; L. Bressanini y C. Miranda 1

Índice de Peligrosidad Anual de Heladas (IPAH): Concepto y utilidad

Blasón, A. D.; A. Mollá Kralj y R. O. Rodríguez 21

Hacia el pronóstico anticipado del rendimiento potencial de maíz en el centro- sudeste bonaerense: relaciones con la duración de los subperíodos vegetativo y reproductivo

Irigoyen, A.I.; M.P. Panunzio Moscoso; M.A. Cambareri y L. Echarte 31

Impactos en el régimen térmico producidos por el embalse de Salto Grande

Cruz, G.; M. Bidegain; A. Bocco; S. Alvaríño y R.Terra 47

Determinación de escenarios por sequía en la región del organismo de cuenca del Pacífico Norte, Mexico

Douriet Cárdenas, J.C.; A.C. Ravelo; A.I. Ramirez Orozco; C.E. Torrecillas Nuñez y C.M. García 57

Efectos de la cobertura de la superficie, agua y nitrógeno sobre atributos del canopeo de maíz en panojamiento

Irigoyen, A.I.; M.A. Cambareri; L. Echarte; M. I. Bayala y R.E. Rivas 75

Brecha de rendimiento del cultivo de soja estimada con el modelo AquaCrop en la región central de Córdoba, Argentina

de la Casa, A.; Ovando, G.; Díaz, G.; Bressanini, L. y Miranda, C.

RESUMEN

La diferencia del rendimiento potencial con respecto al efectivo establece la brecha de rendimiento (Br) de un cultivo, indicador utilizado para evaluar las restricciones que el ambiente impone sobre su productividad. Bajo condiciones genéticas, edáficas y de manejo constantes a lo largo del tiempo, el principal responsable de Br es la acción climática que, en un dominio subhúmedo, se vincula principalmente con la variación de la oferta y demanda de agua. A partir de la información monitoreada en 2014-2015 en un lote de soja ubicado al sur de la localidad de Córdoba, Argentina, el modelo AquaCrop se calibró para estimar Br y evaluar el riesgo climático en esta región. A fin de ponderar la influencia climática de manera retrospectiva, se desarrolló y verificó un procedimiento que estima la evapotranspiración de referencia (ET_0) a partir de los valores diarios de temperatura máxima y mínima. Estos valores de ET_0 , junto a los registros de lluvia, permitieron extender la evaluación entre 1960 y 2012. De acuerdo a los resultados experimentales el valor de productividad del agua utilizado para estimar la producción de biomasa de soja a tasa potencial fue $13,1 \text{ g m}^{-2}$. Los valores observados de cobertura, biomasa aérea y agua del suelo en distintos sectores del lote resultaron similares a los estimados por AquaCrop, en especial cuando se consideran condiciones de escurrimiento superficial de agua particulares para cada sitio. Haciendo corridas sucesivas con AquaCrop para la fecha de siembra de la calibración (22 de noviembre), alrededor de 42% de los ciclos presentan Br menores a 750 kg ha^{-1} , las que se incrementan a medida que desmejora la relación entre oferta y demanda de agua. Al analizar el efecto de distintas oportunidades de siembra, los resultados muestran que en 51% (27/53) de los años la decisión influye relativamente poco sobre el resultado productivo. El cambio de la oportunidad de siembra en el 49% restante incrementa la dispersión de Br, lo que permite descartar las decisiones más tempranas (15 de octubre y esperando una acumulación de 50 mm de lluvia desde el 20 de setiembre) por presentar valores significativamente ($P < 0,10$) más elevados.

Palabras clave: evapotranspiración; cobertura del cultivo; biomasa; agua del suelo; riesgo climático

de la Casa, A.; Ovando, G.; Díaz, G.; Bressanini, L. and Miranda, C., 2018. Yield gap of soybean crop estimated with AquaCrop model in central region of Córdoba, Argentina. RADA IX: 1-19

SUMMARY

The difference between potential and actual yield establishes the yield gap (Br) of a crop, an indicator used to evaluate the constraints that the environment imposes on its productivity. Under genetic, edaphical and management conditions constant over time, the main responsible for Br results from the climatic action that, in a sub-humid domain, is mainly linked to the variation of water supply and demand. From the information monitored in 2014-2015 in a soybean plot located south of Córdoba city, Argentina, AquaCrop model was calibrated to estimate Br and assess the climatic risk in this region. To assess the climatic influence retrospectively, a procedure was developed and verified that estimates the reference evapotranspiration (ET_0) from the daily values of maximum and minimum temperature. These ET_0 values together with the rainfall records, allowed to extend the evaluation between 1960 and 2012. According to the experimental results, the water productivity used to estimate the production of soybean biomass at a potential rate was 13.1 g m^{-2} . The observed values of crop coverage, aerial biomass and soil water in different sectors of the plot were similar to those estimated by AquaCrop, especially when considering particular surface water runoff conditions for each site. Making successive runs with AquaCrop for the sowing date of the calibration on November 22, around 42% of the crop seasons have Br less than 750 kg ha^{-1} , which increases as the relationship between supply and demand of water deteriorates. When analyzing the effect of different sowing opportunities, the results show that in 51% (27/53) of the years, the decision has relatively little influence on the productive outcome. The change of the planting opportunity in the remaining 49% increases the dispersion of Br, which allows discarding the earliest decisions (October 15 and expecting a 50 mm rainfall accumulation from September 20) because they present significantly ($P < 0.10$) higher values.

Keywords: evapotranspiration; crop coverage; biomass; soil water; climate risk

de la Casa, A.; Ovando, G. y Díaz, G.: Agrometeorología. Bressanini, L.: Agrotecnia. Facultad de Ciencias Agropecuarias (UNC), Córdoba CP: 5000, Argentina. Miranda, C.: Establecimiento Las Delicias. Contacto: delacasa@agro.unc.edu.ar

INTRODUCCIÓN

El rendimiento potencial (R_p) de un cultivo expresa la máxima productividad de un genotipo que crece y se desarrolla bajo la ausencia de limitaciones de agua, luz y nutrientes en una región (Loomis and Connor, 1992; Evans, 1993). Por su parte, la diferencia que se suscita entre R_p y la productividad que efectivamente alcanza el cultivo (R) representa la brecha de rendimiento (Br) (Cassman et al., 2003; Lobell et al., 2009). La evaluación de este indicador en una región es relevante tanto a los efectos de realizar un manejo agronómico y financiero eficiente del cultivo, como para establecer pautas que orienten a su mejoramiento genético. Reducir la brecha de rendimiento de un cultivo de soja (*Glycine max* (L.) Merrill) en secano es una meta difícil de alcanzar en el centro de la provincia de Córdoba, Argentina, donde la importante variabilidad interanual de la lluvia en un dominio climático sub-húmedo determina que la falta de agua sea una contingencia presente

todos los años con mayor o menor intensidad. En esta región agrícola de relativa vulnerabilidad principalmente por la falta de agua, conocer la fluctuación y frecuencia de Br resulta necesario para diseñar las estrategias de manejo más apropiadas tendientes a reducir el riesgo climático.

En secano es frecuente que los cultivos de soja experimenten limitaciones productivas ocasionadas por la disponibilidad de agua, tanto por la insuficiencia y retraso de la oferta como por tasas de evapotranspiración muy elevadas durante el verano. Por otra parte, tampoco se puede descartar por completo algunos años en que el aporte de lluvia resulta excesivo, particularmente en las zonas bajas de los predios (van Itterssum et al., 2013). Entre ambos extremos, las condiciones atmosféricas de oferta y demanda de agua durante algunos ciclos de producción se equilibran de modo que es posible reducir Br hasta alcanzar su expresión mínima. Para un cultivo de secano bien manejado, tales circunstancias se pueden aprovechar a fin

de evaluar R_p o, al menos, determinar un valor de productividad que se considera no limitado por la disponibilidad de agua (R_{pw}) (Passioura and Angus, 2010; van Ittersum et al., 2013).

La determinación de R_p para un cultivo o variedad es difícil de implementar de manera experimental debido a la necesidad de controlar los múltiples factores que lo determinan en forma integrada y efectiva, lo que en parte explica la relativa escasez de esta información (Duvick and Cassman, 1999; Grassini et al., 2011). La falta de datos de productividad potencial medidos a campo para distintas regiones y épocas de cultivo es bastante extendida en la Argentina en general y la provincia de Córdoba en particular. Una forma alternativa para evaluar R_p es utilizando modelos de simulación de cultivos, que constituyen herramientas informáticas relativamente confiables, en particular cuando se dispone de información meteorológica y edáfica apropiada en extensión y detalle (Abeledo et al., 2008; Lobell et al., 2009). En este sentido, la información meteorológica no siempre resulta disponible, en particular cuando se requiere procesar el valor de la evapotranspiración de referencia (ET_c) a partir de la metodología de Penman-Monteith (Allen et al., 1998). En primer término, como el procedimiento utiliza un conjunto de cuatro variables atmosféricas (radiación solar (o heliofanía), temperatura y humedad del aire y velocidad del viento), su uso queda restringido a lugares que por lo general disponen de una estación meteorológica con dotación instrumental completa. Además, esta restricción se acentúa en la medida que la evaluación debe prolongarse a lo largo del tiempo. Para salvar estos inconvenientes generalizados, se han desarrollado procedimientos que permiten estimar ET_c haciendo uso de la información meteorológica disponible, como el programa ET0Calc (FAO, 2012).

Con respecto al uso de modelos de cultivo para estimar R_p , Grassini et al. (2009) presentaron una evaluación en maíz (*Zea mays*) a los efectos de evaluar los límites productivos de la región oeste del cinturón de maíz en USA a partir del modelo Hybrid-Maize (Yang et al., 2004). Por su parte, Caldiz et al. (2001) elaboraron una zonificación agroecológica del cultivo de papa (*Solanum tuberosum*) para la Argentina en base a valores de R_p estimados con el modelo LINTUL-POTATO (Kooman, 1995). En trigo (*Triticum aestivum*), Andarzian et al. (2011) desarrollaron un modelo simple para estimar el potencial de rendimiento basado en datos meteorológicos mensuales que utilizan para hacer recomendaciones en sistemas de agricultura sitio-específica. Karimaya (2014) empleó el modelo AquaCrop para estimar el rendimiento potencial de

la variedad de soja Jenguma en Ghana, teniendo en cuenta sólo limitaciones climáticas. En Argentina, Aramburu Merlos et al. (2015) emplearon el modelo de cultivo DSSAT junto con información meteorológica, edáfica y de manejo para simular R_p , R y Br de soja, maíz y trigo para cuantificar el potencial de estos cultivos de incrementar la producción, a través de la disminución de la Br , en lugar de expandir el área sembrada.

La información que se obtiene del relevamiento de un cultivo en un lote de producción ha sido útil para evaluar la productividad real e identificar los principales factores que restringen la producción en los distintos sectores (Mercau et al., 2001; Sadras et al., 2002; Lobell et al., 2005). La falta de diseño experimental y de hipótesis específicas, si bien dificulta establecer relaciones causales de una manera estricta, puede ser apropiada a los efectos de determinar los principales factores responsables de la brecha de rendimiento (Wiese, 1982; Sadras et al., 2002).

Los modelos de cultivo han evolucionado de manera notable en los últimos años, existiendo distintos procedimientos disponibles a fin de hacer proyecciones del rendimiento de los cultivos a distintas escalas, desde local hasta regional y mundial (van Wart et al., 2013). En general, a partir de un valor de R_p determinado por el genotipo, la densidad de siembra y las condiciones particulares de radiación y régimen térmico de una región, la productividad real se calcula de acuerdo al nivel tecnológico aplicado, teniendo en cuenta la cantidad y oportunidad de agua utilizada, la fertilidad del lote, las prácticas de manejo, etc. Esta diversidad de modelos de cultivo permite clasificar los procedimientos siguiendo diferentes criterios. Los modelos pueden ser genéricos, cuando la estructura de cálculo es común para distintos cultivos, o específicos, desarrollados para simular el crecimiento y desarrollo de cada especie en particular. Así, mientras los modelos CERES-Wheat (Singh et al., 2008) y CERES-Maize (Jones et al., 2003) aplican de manera específica para trigo y maíz, respectivamente, el modelo SOYGROW, si bien responde a una concepción similar a los anteriores, está diseñado para simular el comportamiento productivo de la soja, o el modelo SUBSTOR-Potato destinado para el cultivo de papa (Griffinet et al., 1995), etc. Por su parte, el modelo CROPSYST (Stockle et al., 2003) a partir de algunas simplificaciones, utiliza el mismo procedimiento para el crecimiento y desarrollo de todos los cultivos herbáceos.

Los modelos también se tipifican como simples o complejos, de acuerdo a la cantidad y detalle de los procesos ecofisiológicos e interacciones genotipo-ambiente que representan. El requeri-

miento de datos, que se incrementa a medida que aumenta la complejidad del modelo, constituye un aspecto que limita su implementación, en tanto los resultados obtenidos no son necesariamente más precisos que los producidos por modelos más simples (Constantin et al., 2015).

El procedimiento que sustenta el cálculo de la biomasa potencial (B_p) también se puede utilizar para caracterizar el tipo de modelo de cultivo. En su gran mayoría, los modelos de cultivo más difundidos estiman B_p empleando el concepto de eficiencia en el uso de la radiación (EUR) (Monteith 1977), a partir de la siguiente ecuación (Sinclair and Muchow, 1999):

$$B_p = EUR \times \sum_s^c RSFAI \quad (1)$$

Donde \sum_s^c representa un valor acumulado entre siembra (s) y cosecha (c), y $RSFAI$ es la radiación solar fotosintéticamente activa interceptada por el cultivo diariamente.

Otros modelos, en cambio, utilizan el concepto de eficiencia en el uso del agua (EfT o WUE) (Stanhill, 1986) a fin de obtener la productividad potencial, de acuerdo a la siguiente expresión análoga a (1) (Passioura and Angus, 2010):

$$B_p = EfT \times \sum_s^c T \quad (2)$$

Donde T es la cantidad de agua transpirada y EfT es la eficiencia de la transpiración o productividad del agua.

Luego, la determinación de R_p se resuelve adjudicando una fracción de B_p que se asimila en los órganos de cosecha. En general, esta tasa se define como el índice de cosecha (IC) de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$R_p = B_p \times IC \quad (3)$$

El modelo AquaCrop (Raes et al., 2009; Steduto et al., 2009) fue diseñado para simular el crecimiento, desarrollo y rendimiento de un cultivo que, de acuerdo a los criterios expuestos, corresponde a un procedimiento de tipo genérico, simple y aplica el concepto de eficiencia o productividad del agua (WP) para obtener R_p . Un aspecto distintivo de AquaCrop es la utilización de la cobertura del cultivo (CC), no sólo para caracterizar su crecimiento y desarrollo durante el ciclo, sino también para separar el valor improductivo del agua evaporada (E) respecto a la que el cultivo transpira (T) en el proceso de evapotranspiración (ET) y que, en consecuencia, promueve una acción fisiológica efectiva. A partir de (2), AquaCrop representa la producción de B_p de un cultivo utilizando la siguiente ecuación (Steduto et al., 2009):

$$B_p = WP^* \sum \left(\frac{T}{ET_0} \right)_{(CO_2)} \quad (4)$$

Donde WP^* corresponde a la productividad del agua (EfT en (2)) que, normalizada de acuerdo a la demanda evaporativa de la atmósfera (ET_0 , evapotranspiración de referencia calculada de acuerdo el método FAO de Penman-Monteith (Allen et al., 1998)), propia de cada condición climática y estación del año, y al incremento temporal de la concentración del dióxido de carbono (CO_2), se presenta como un atributo ecofisiológico de carácter conservativo (Steduto et al., 2007). De esta forma, el modelo adquiere la versatilidad necesaria para representar la productividad de distintos ambientes y épocas de cultivo a lo largo del tiempo. Sin embargo, los valores de WP^* deben ser conocidos para aplicar el modelo de manera confiable y no existe aun mucha información al respecto, en particular para el cultivo de soja.

El cómputo de la productividad a partir de (1) ha sido explorado más intensamente y los valores de EUR son relativamente más difundidos (Steduto and Albrizio, 2005). Valores de EUR obtenidos de manera experimental para la soja y otros cultivos son presentados por Sinclair and Muchow (1999). Purcell et al. (2002) analizan la influencia de la densidad de plantación sobre la EUR y la producción de biomasa en soja, y Edwards y Purcell (2005) hacen lo propio considerando las diferencias entre los distintos grupos de maduración de la soja, evaluando tanto las características agronómicas como la capacidad de intercepción y uso de la radiación solar.

Los objetivos de este trabajo fueron: i) desarrollar un procedimiento destinado a obtener valores diarios de ET_0 utilizando únicamente datos meteorológicos de temperatura máxima y temperatura mínima, con el propósito de elaborar una serie prolongada de ET_0 que, junto a la información de lluvia, exprese la variación de las condiciones atmosféricas a través del tiempo en relación a la disponibilidad de agua; ii) ajustar el modelo AquaCrop para las condiciones de producción de soja en secano para la región central de Córdoba, Argentina, a partir de la información relevada en un lote de producción durante el ciclo 2014-2015; iii) evaluar el valor de productividad del agua (WP) y corroborar su aptitud para estimar la producción de biomasa potencial (B_p) haciendo uso del modelo de eficiencia en el uso de la radiación en términos comparativos; iv) estimar la variabilidad que ha experimentado en esta región la brecha de rendimiento de la soja a lo largo del tiempo para la producción de secano, a los efectos de establecer el nivel de riesgo de orden climático de este sistema de producción y evaluar distintas oportunidades de siembra que tiendan a reducirlo.

MATERIALES Y MÉTODOS

1. Datos del cultivo de soja

El estudio se realizó a partir de los registros de crecimiento, desarrollo y productividad de un cultivo de soja en seco y sin fertilización de la variedad FERIA del Norte (GM 4,5), entre la siembra efectuada el 22/11/2014 y la cosecha el 11/04/2015. Los datos se relevaron en un lote de 45 ha, ubicado al sur de la ciudad de Córdoba (31°33' lat. Sur, 64°05' long. Oeste, 400 m s.n.m.). El suelo del predio corresponde a un Haplustol éntico, de la serie Manfredi, con un perfil de tres horizontes de textura franco-limosa. Las constantes hídricas empleadas para representar el balance de entradas y salidas de agua durante el ciclo

fueron establecidas de acuerdo a la descripción de un suelo ubicado próximo al lote por Dardanelli et al. (1997). La Tabla 1 presenta las principales características edáficas del lote que se integraron al archivo de suelo utilizado para ajustar AquaCrop a las condiciones locales.

Sobre el lote de forma rectangular se estableció una grilla de muestreo de 16 estaciones, 4 en sentido Norte-Sur y 4 en dirección Este-Oeste, en posiciones aproximadamente equidistantes. La Figura 1 presenta la ubicación de los sectores de muestreo en el lote con su identificación y las curvas de nivel sobrepuestas que indican la pendiente natural del terreno de Oeste a Este.

En cada fecha de muestreo se contó la cantidad de plantas en 5 metros lineales de dos filas

Tabla 1. Propiedades edáficas utilizadas para representar el suelo del lote al sur de la ciudad de Córdoba, Argentina (Dardanelli et al., 1997).

Horizonte	Textura	Profundidad (m)	Saturación	CC (m ³ m ⁻³)	PMP	ADT (mm m ⁻¹)	Ksat (mm día ⁻¹)	Tau
A	Franco	0-0,23	0,46	0,327	0,145	182	250	0,60
AC	Franco-limoso	0,24-0,46	0,46	0,290	0,117	173	225	0,58
C	Limoso	>0,47	0,44	0,270	0,115	155	200	0,554

Referencias: CC: Capacidad de campo; PMP: Punto de marchitez permanente; ADT: Agua disponible total; Ksat: Coeficiente de saturación; tau: Coeficiente de drenaje.



Figura 1. Imagen de Google Earth del 22/11/2015 correspondiente al lote de soja, con la ubicación de los 16 sectores de muestreo y las curvas de nivel sobrepuestas. Los cuadrados señalan los sectores de muestreo intensivo.

contiguas, separadas a 0,36 m, a fin de evaluar la población de plantas, y se efectuó el corte de la parte aérea de 3 de ellas para determinar la materia seca total de acuerdo a la población de cada sector. La valoración de la densidad de siembra en las primeras 4 fechas de muestreo arrojó un promedio general de 30 pl m⁻² para todos los sectores, de modo tal que esta población fue utilizada para ajustar AquaCrop a los efectos de estimar la evolución de la cobertura. Por su parte, el contenido de agua del suelo se determinó utilizando el método gravimétrico, a partir de un muestreo del perfil a 5 profundidades, con barrenadas cada 0,20 m. Estas mediciones se integraron a los efectos de obtener el contenido de agua del perfil hasta 1 m, considerando un valor uniforme de densidad aparente de 1,25 Mg m⁻³ (Rollán y Bachmeir, 2014). Si bien las muestras de suelo se tomaron en 6 oportunidades durante el ciclo, la última fecha arrojó valores erráticos en razón de la continuidad de las lluvias de modo que fue descartada.

La CC se obtuvo a partir de fotografías adquiridas con una cámara Canon PowerShot SD780 IS, modificada para producir imágenes de NDVI (de la Casa et al., 2016a; b). Las fotografías se tomaron 3 m por encima del cultivo, altura que se mantuvo constante a lo largo del ciclo por medio de un dispositivo extensible. La obtención de CC para cada imagen se realizó diferenciando el suelo de la vegetación verde de acuerdo a un umbral γ , a partir de la imagen binaria producida, se estableció el cociente entre la cantidad de píxeles con vegetación y el total, valor que se expresó como fracción (0-1) o porcentaje (0-100%).

2. Datos meteorológicos y procedimiento para estimar ET_o

Los datos meteorológicos registrados en 2014-2015 por una estación automática ubicada en la proximidad del lote, además de proveer los registros de precipitación (PP), permitieron obtener la información meteorológica completa durante el ciclo de cultivo, incluida la evapotranspiración de referencia calculada con el método de Penman-Monteith (ET_o) (Allen et al., 1998). Asimismo, a partir de los datos de temperatura máxima (Tx) y temperatura mínima (Tn) se desarrolló un procedimiento para estimar diariamente ET_o, que se verificó posteriormente con registros de la misma estación obtenidos en 2013-2014. El modelo propuesto tiene la ventaja de estimar ET_o utilizando exclusivamente esta información térmica que, por lo general, resulta más accesible y presenta mayor difusión temporal y espacial. En este sentido, con la expectativa

de disponer de una serie extendida en el tiempo que fuera apropiada para el estudio, se utilizaron los datos de Tx y Tn de la estación Córdoba Observatorio (31° 24' lat. Sur, 64° 11' long. Oeste, 425 m snm) para estimar los valores diarios de ET_o entre 1960 y 2013.

El procedimiento para obtener ET_o se formuló a partir de un análisis de regresión múltiple que utilizó, además de Tx y Tn, un conjunto de variables elaboradas a partir de ellas. Las variables utilizadas fueron: temperatura media [$Tm = (Tx + Tn) * 0,5$], amplitud térmica [$AT = Tx - Tn$], y la radiación solar recibida (RSr). El valor de RSr se obtuvo del producto entre la radiación astronómica (RSa) y la transmisividad atmosférica (t) que se calculó de acuerdo a la expresión de Bristow y Campbell (1984). A partir de AT para representar la condición de nubosidad, el modelo exponencial utilizó un conjunto de parámetros de ajuste local obtenidos por de la Casa et al. (2003):

$$t = a[1 - e^{(-bxAT)^c}] \quad (5)$$

Siendo 0,68; 0,03 y 1,7 los valores que asumen a, b y c para la ciudad de Córdoba, respectivamente.

La RSa diaria se calculó a partir de las expresiones de Duffie y Beckman (1980), para la latitud del lugar y utilizando una constante solar de 1367 W m⁻². De esta forma, se dispuso de un conjunto de variables predictoras potenciales para estimar ET_o que, de acuerdo al comportamiento no lineal observado, también se expresaron en forma cuadrática. Este conjunto de variables predictoras se depuró de manera progresiva procediendo a eliminar aquellas candidatas que carecían de significación estadística.

A los efectos de determinar la eficiencia en el uso de la radiación (EUR) a partir de la ecuación (1), los valores de RSFAI fueron acumulados entre siembra y cosecha, asumiendo el valor de cobertura del cultivo (CC) como sucedáneo de la fracción de intercepción, de acuerdo a la siguiente expresión:

$$RSFAI = \sum_s^c (Rsr \times 0,5 \times CC) \quad (6)$$

Por su parte, para determinar la productividad del agua (WP) mediante la ecuación (2), la cantidad de agua transpirada diariamente durante el ciclo en condiciones potenciales se obtuvo a partir de la siguiente expresión:

$$T = ET_o \times Kc \times CC \quad (7)$$

El valor del coeficiente de cultivo (Kc) que se uti-

lizó para determinar la evapotranspiración máxima en soja ($ET_{max} = ET_0 \times Kc$), se obtuvo siguiendo el procedimiento de Gardiol et al. (2002). Este método emplea una fracción de tiempo térmico estacional como variable independiente que se obtiene a partir del método residual con una temperatura base de 11°C, similar al método de suma de temperatura utilizado por AquaCrop. De acuerdo a Raes et al. (2009), el valor observado de CC permite, en este caso, disociar la evapotranspiración entre el agua que evapora la superficie del suelo de la que transpira el cultivo.

3. Empleo del modelo de cultivo AquaCrop

El modelo AquaCrop dispone de distintas prestaciones y alternativas de uso que se exploraron de manera particular en este trabajo. En primer término, los valores de cobertura del cultivo, biomasa y agua del suelo monitoreados a campo durante el ciclo de cultivo de la soja 2014-2015 se incorporaron como registros observados a los efectos de contraste estadístico con respecto a las estimaciones del modelo.

Al permitir efectuar corridas sucesivas de múltiples años y una vez calibrado para las condiciones edáficas, tecnológicas y de manejo del cultivo de soja, AquaCrop se ejecutó para simular cada año los valores de rendimiento (R) y, bajo el mismo contexto productivo pero sin restricciones hídricas, el rendimiento potencial (Rp) a fin de determinar la brecha (Br). En este sentido, el modelo se corrió bajo la modalidad secuencial, de modo que la humedad del suelo inicial de cada ciclo productivo queda definida por la dinámica particular de entradas y salidas de agua que la rutina de balance computa de manera ininterrumpida. A los efectos de compatibilizar la influencia de la temperatura en la duración de los procesos de desarrollo, el modelo se utilizó bajo la modalidad temporal de grados días, considerando una temperatura base de 11 °C y un límite térmico superior de 30°C.

Por su parte, a los efectos de representar el escurrimiento de agua en el lote el modelo utilizó un valor fijo de Curva Número (CN=70) y, para simular la redistribución del agua en cada sector se consideró, por un lado, un manejo uniforme y, por el otro, un manejo variable supeditado a particulares condiciones superficiales en los diferentes sitios. Este recurso se utilizó en especial para ajustar con mayor detalle la información de la humedad de suelo.

En el cálculo de la producción de biomasa, la ecuación 4 del modelo AquaCrop considera la influencia del incremento de la concentración del CO₂ atmosférico a lo largo del tiempo sobre el valor

de productividad del agua (Steduto et al., 2007). A tal efecto, WP se multiplica por un coeficiente de corrección cuyo valor depende de la concentración de CO₂ de cada año en particular respecto a la concentración del año 2000. De acuerdo al incremento sostenido que registra el contenido atmosférico de CO₂ este procedimiento produce un efecto de tendencia sobre las estimaciones de productividad que, si bien refleja el aumento de los niveles de CO₂, no contribuye a esclarecer la influencia en particular de las condiciones climáticas. De esta forma, los valores de rendimiento que estima AquaCrop fueron expresados tomando como referencia la concentración de CO₂ del año 2000.

De acuerdo a la disponibilidad de información meteorológica entre 1960 y 2012, la condición del riesgo climático para el cultivo de soja en secano se evaluó asumiendo diferentes alternativas en relación a la decisión de siembra. A los efectos de establecer algunos escenarios posibles, en primer término se consideró un esquema fijo de tres fechas los días 15 de octubre, noviembre y diciembre, respectivamente. Además, con el propósito de evaluar una recomendación de siembra basada en información meteorológica previa, se consideraron otros tres escenarios que, con posterioridad al 20 de setiembre, retrasan la siembra hasta totalizar 50 mm, 100 mm y 150 mm de lluvia, respectivamente.

4. Evaluación estadística

Los datos de ET₀ que registró la estación automática próxima al lote asumieron el carácter de observados en tanto los obtenidos con el modelo de regresión constituyen los valores estimados. El modelo de regresión se desarrolló a partir de la información registrada durante el periodo de calibración en 2014-2015, en tanto su desempeño predictivo se evaluó con los datos meteorológicos de 2013-2014.

Por su parte, la evaluación estadística para valorar la magnitud del error entre los datos observados y estimados por AquaCrop se realizó a partir de los distintos indicadores que utiliza la plataforma, esto es: Coeficiente de determinación (R²), Raíz cuadrada del error cuadrático medio (RMSE), Raíz cuadrada del error cuadrático medio normalizada (NRMSE), Coeficiente de eficiencia del modelo de Nash-Sutcliffe (EF) e Índice de concordancia refinado de Willmott (dr) (Willmott, 2012). El criterio de ajuste aplicado para representar el cultivo de soja consistió en realizar la evaluación de valores observados y estimados de una manera integrada, tanto en relación a los distintos sectores del lote como de las variables biométricas utilizadas.

Finalmente, el conjunto de 6 escenarios/tratamientos se clasificó con respecto al valor medio (Br_M) y el desvío estándar (Br_{DE}) de Br , estableciendo 4 categorías: con valores por debajo tanto de Br_M como de Br_{DE} (Baja y Estable); con valores por encima tanto de Br_M como de Br_{DE} (Alta e Inestable), y sus correspondientes combinaciones (Baja e Inestable y Alta y Estable) (Blackmore et al., 2003). Posteriormente, se realizó un análisis de variancia a los efectos de establecer diferencias entre medias para analizar la fecha de siembra más conveniente en la región.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

1. Obtención de ET_o entre 1960 y 2013

Los registros de ET_o obtenidos durante el monitoreo de la soja en 2014-2015 se utilizaron como variable dependiente de un modelo de regresión lineal múltiple (RLM) que empleó, además de datos diarios de T_x y T_n , un conjunto de términos independientes obtenidos a partir de ellos, que se expresaron tanto en forma lineal como cuadrática. Luego de un proceso de depuración en función de la significación estadística de cada término, y de la prueba de verificación realizada a partir de la información meteorológica de 2013-2014, se obtuvo el modelo de RLM cuyos términos y demás estadísticos muestra la Tabla 2. Por su parte, el análisis de la relación entre los valores de ET_o y los estimados a partir del modelo de RLM, tanto en 2014-2015 como la verificación en 2013-2014, se muestran en la Figura 2.

El modelo propuesto para estimar ET_o muestra resultados consistentes, con un coeficiente de determinación (R^2) de 0,81 y un valor de la raíz cuadrada del error cuadrático medio de 0,86 mm d⁻¹ en la etapa de desarrollo que, si bien se reduce en la prueba de verificación a 0,72 y aumenta a 1 mm d⁻¹, respectivamente, muestra rectas de ajuste muy semejantes a la función de identidad, en particular cuando el modelo fue verificado. Asimismo, la prueba de comparación de medias apareadas en ambos casos indica que tampoco existen diferencias entre los valores calculados y estima-

dos. Aunque las curvas muestran una ligera tendencia del modelo a subestimar, la dispersión se presenta distribuida de manera uniforme respecto a la función identidad para todo el rango entre 0 y 10 mm por día. A partir de este procedimiento de cálculo, y disponiendo de los registros de T_x y T_n de la estación Córdoba Observatorio desde 1960 hasta 2013, se realizó la estimación de los valores diarios de ET_o , teniendo en cuenta que el eventual error cometido al extrapolar se minimiza en virtud de la escasa distancia que separa a ambos sitios.

2. Calibración de AquaCrop para el cultivo de soja en seco

2.1 Evaluación de la productividad del agua (WP)

Desde su aparición en 2009, el modelo AquaCrop se ha utilizado para representar el crecimiento, desarrollo y productividad de distintos cultivos bajo diversos ambientes y condiciones de manejo. En maíz (Henget et al., 2009; Hsiao et al., 2009; Abedinpour et al., 2012), algodón (Farahani et al., 2009), trigo (Andarzian et al., 2011; Mkhabela and Bullock, 2012; Iqbal et al., 2014), existe información abundante que se puede considerar inicialmente para calibrar AquaCrop de manera específica. No ocurre lo mismo con el cultivo de soja, que ha sido aparentemente menos explorado a tal efecto.

Un aspecto central de la calibración de AquaCrop consiste en adoptar el valor adecuado de WP a fin de calcular la ecuación (3). Ante la ausencia de valores de WP de carácter experimental para la soja en la región central de Córdoba, se optó por utilizar de manera preliminar la determinación obtenida a partir del monitoreo en 2014-2015 que presentó valores de rendimiento elevados como se indica más adelante en este mismo punto. Esta definición es relevante en vistas a utilizar un valor potencial de productividad a partir del cual la Br de la soja represente una estimación razonable.

La Figura 3a presenta la relación lineal entre las mediciones de biomasa aérea relevada en los distintos sectores del lote a lo largo del ciclo y al valor de la transpiración acumulada normalizada respecto a la evapotranspiración de referencia (ET_o), a los efectos de obtener una aproximación experi-

Tabla 2. Coeficientes de regresión y estadísticos asociados del modelo para estimar la evapotranspiración de referencia de Penman-Monteith (ET_o) obtenidos durante el período de desarrollo.

Variable	Coefficiente	Error típico	Estadístico t	Probabilidad
Tm^2	0,00901213	0,00090162	9,99551828	6,8339E-20
Tn^2	-0,00906535	0,00111002	-8,16682435	1,8057E-14
RSr^2	0,00467608	0,00040519	11,540349	8,4555E-25

Referencias: Valores diarios de temperatura media (Tm), temperatura mínima (Tn) y radiación solar recibida (RSr).

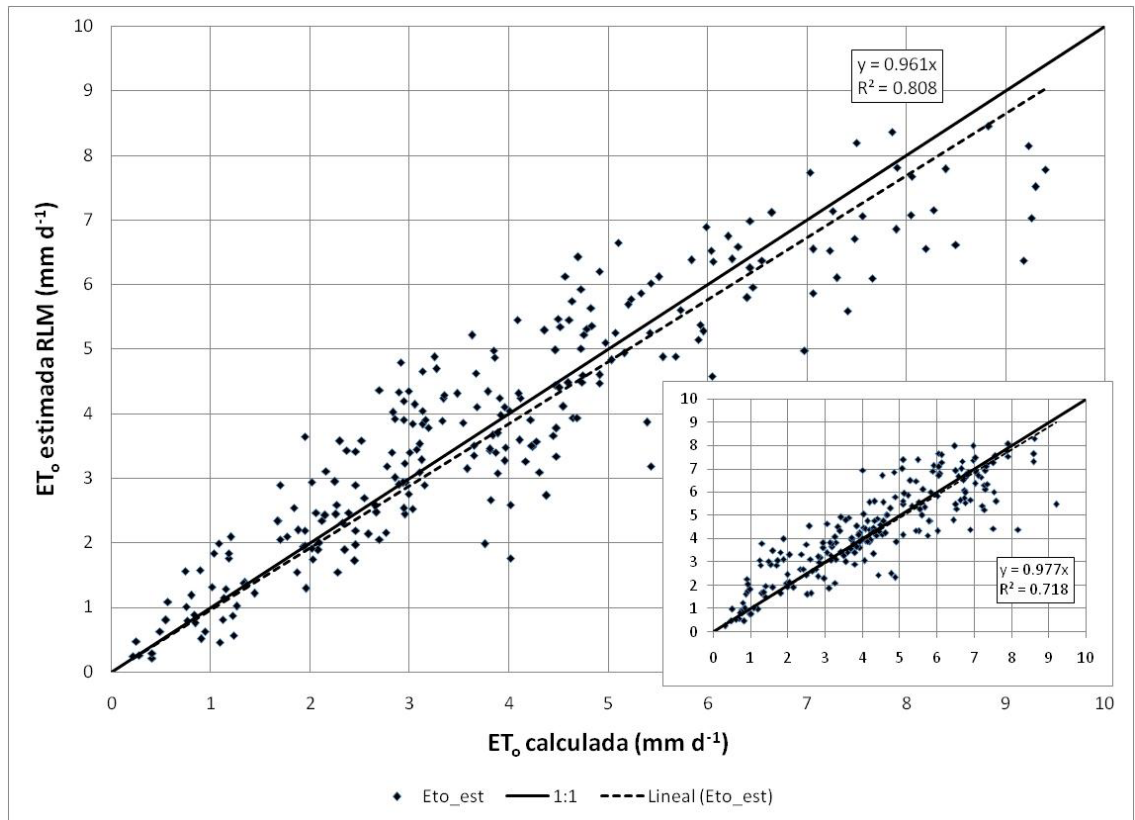


Figura 2. Valores de evapotranspiración de referencia de Penman-Monteith (ET_0) calculados y estimados a partir del modelo de regresión lineal múltiple (RLM) durante 2014-2015. Inserta la dispersión correspondiente a la etapa de verificación con datos de 2013-2014. La figura muestra también la recta de regresión y el coeficiente de determinación obtenidos en cada caso.

mental de WP. Esta determinación, que alcanza un valor de $13,1 \text{ g m}^{-2}$ para el conjunto completo de la información registrada, se considera moderada ya que, en algunos sectores del lote la productividad presenta valores aún superiores. Dicho valor resulta ligeramente inferior al utilizado por Rodrigues da Silva et al. (2018) que calibraron y validaron el modelo AquaCrop para soja con distintos niveles de riego en Brasil, empleando valores de WP de $15,5 \text{ g m}^{-2}$.

Para dar respaldo a esta información, el crecimiento potencial de la soja también se analizó a partir del concepto de eficiencia en el uso de la radiación (EUR), procedimiento de cálculo alternativo que se presenta relativamente más generalizado (de la Casa et al., 2014). La Figura 3b muestra el modelo de regresión lineal obtenido por correlación y regresión entre los mismos datos de materia seca relevados en distintos sectores del lote como variable dependiente respecto a la radiación fotosintéticamente activa interceptada por la soja

durante el ciclo estimada a partir de CC. La pendiente lineal de esta recta de ajuste corresponde a la EUR que, para el conjunto completo de la información del lote, resultó de $1,2 \text{ g MJ}^{-1}$. Este valor resulta ligeramente inferior a los citados para soja en ausencia de restricciones hídricas y nutricionales, con un rango entre $1,3 \text{ g MJ}^{-1}$ y $2,4 \text{ g MJ}^{-1}$ de radiación fotosintéticamente activa interceptada (Sinclair and Muchow, 1999; Purcell et al., 2002). Van Roekel and Purcell (2014), por su parte, observaron valores de EUR entre $1,46 \text{ g MJ}^{-1}$ y $1,89 \text{ g MJ}^{-1}$ para variedades de soja más recientes. La EUR obtenida para el lote en su conjunto resulta algo inferior a los valores que reporta la bibliografía, acrecentando la evidencia de que el cultivo de soja en 2014-2015, a pesar de la muy adecuada disponibilidad de agua (de la Casa et al., 2017 en prensa), experimentó alguna restricción en la producción de biomasa. El exceso de lluvia puede ser en parte responsable de la merma producida, así como la distribución desuniforme del escurrimiento superficial de agua originada por el microrelieve.

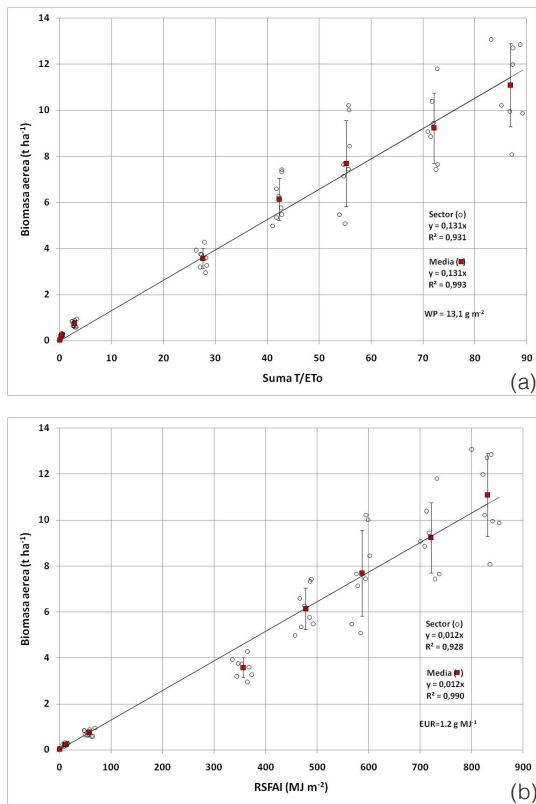


Figura 3. (a) Relación entre la biomasa aérea de soja relevada en distintos sectores del lote monitoreado en 2014-2015 y el valor acumulado de la transpiración (T) normalizado por la evapotranspiración de referencia (ET_0), para determinar el valor de la productividad del agua (WP). (b) Idem anterior pero con relación a la radiación solar fotosintéticamente activa interceptada (RSFAI) para obtener el valor de la eficiencia en el uso de la radiación (EUR). La figura presenta los valores de cada sector individual (círculo hueco), como así también del promedio para el lote (cuadrado lleno) y la barra que indica +/- el desvío estándar.

El cultivo de soja monitoreado en 2014-2015 presentó rendimientos elevados y muy uniformes en el lote de acuerdo, tanto a la información del mapa de rendimiento, con un valor medio de 5068 kg ha^{-1} y un desvío estándar de $\pm 819 \text{ kg ha}^{-1}$, considerando sólo el 96% central de la distribución empírica de los datos de rendimiento, como así también las observaciones realizadas en los 16 sectores de muestreo para una densidad uniforme establecida por conteo ($5467 \text{ kg ha}^{-1} \pm 702$, respectivamente). Por su parte, el rendimiento en el sector de mayor productividad alcanzó 6566 kg ha^{-1} , valor comprendido entre aquellos registrados en ambientes donde la soja presenta un rendimiento máximo (van Roekel and Purcell, 2014). Por su parte, la prueba de la diferencia de medias apareadas entre los valores de rendimiento observados y los estimados por AquaCrop, tanto con un valor de CN constante en el lote

como para condiciones de manejo variables en los 8 sectores de muestreo intensivo, no arrojó diferencias significativas. En vistas a catalogar el potencial productivo de la soja en la región, el modelo AquaCrop se calibró aprovechando la variabilidad observada en los 8 sectores que se monitorearon en el lote de manera más exhaustiva. Este análisis propone establecer la capacidad predictiva de la herramienta de estimación que se utiliza luego para determinar la variabilidad temporal tanto de la productividad real como potencial en la región.

2.2 Calibración bajo condiciones edáficas uniformes

A partir de la rutina de calibración y ajuste que provee la misma plataforma de AquaCrop, el procedimiento de calibración se implementó analizando las diferencias a lo largo del ciclo entre valores observados y estimados de la cobertura del cultivo (CC), la biomasa total (B) y el contenido de agua del suelo (AS). Para representar el comportamiento del cultivo en los distintos sectores del lote el modelo utilizó, en una primera etapa de aproximación, las mismas condiciones meteorológicas, igual tipo de suelo (con una curva número $CN=70$) e idénticas prácticas de manejo, considerando condiciones de secano y sin restricciones por fertilidad. De esta forma, la única diferencia establecida para determinar un comportamiento diferente entre los sectores se circunscribe a la información del contenido inicial de agua del suelo, de acuerdo a las mediciones que se realizaron al momento de la siembra. La evaluación estadística produjo los resultados de error que muestra la Tabla 3.

Excepto para la materia seca estimada en S6, que produjo un índice de Nash-Sutcliffe de 0,32 y en S3 donde EF fue 0,76, los coeficientes de la Tabla 3 corroboran que el modelo estima con mucha precisión tanto los valores de CC como de la materia seca producida en los distintos sectores del lote, con valores siempre próximos o por encima de 0,8. Distintos son los resultados con respecto al agua del suelo, ya que los indicadores reflejan un desempeño de estimación muy deficiente en este caso. Sólo el valor de Willmott presenta en algunos sectores cierta aproximación a corroborar la identidad entre valores observados y estimados del contenido de agua al metro de profundidad.

La evaluación en particular del balance de agua pone de manifiesto que las diferencias entre el agua del suelo observada y calculada por AquaCrop redundan en una dispersión considerable, como revelan los bajos valores de R^2 , EF y dr. Esto se explica, en parte, por el fuerte carácter local que tiene la medición del agua del suelo y un muestreo

Tabla 3. Valoración estadística de la relación entre valores observados de cobertura del cultivo, materia seca y contenido de agua del suelo del perfil hasta 1,0 m y estimados por AquaCrop en los sectores monitoreados del lote de soja en Córdoba, durante el ciclo 2014-2015.

Sector	Parámetros estadísticos	Cobertura del cultivo (%) (n=10)	Materia seca (Kg ha ⁻¹) (n=7)	Agua del suelo (mm) (n=5)
S1	R ²	0,993	0,950	0,302
	EF	0,993	0,893	-0,924
	dr	0,975	0,895	0,219
	RMSE	3,379	1,530	19,755
	NRMSE	5,357	31,294	7,127
S3	R ²	0,982	0,968	0,414
	EF	0,955	0,761	-4,331
	dr	0,904	0,820	-0,143
	RMSE	8,366	1,830	31,209
	NRMSE	12,968	45,648	12,261
S6	R ²	0,974	0,933	0,085
	EF	0,974	0,323	-0,293
	dr	0,942	0,708	0,437
	RMSE	6,468	2,836	28,075
	NRMSE	10,107	74,147	11,235
S8	R ²	0,941	0,941	0,194
	EF	0,920	0,861	-0,897
	dr	0,916	0,858	0,185
	RMSE	11,413	1,526	14,877
	NRMSE	17,269	39,519	5,928
S9	R ²	0,996	0,935	0,078
	EF	0,992	0,841	-3,381
	dr	0,960	0,846	0,110
	RMSE	3,794	1,757	20,763
	NRMSE	6,201	41,048	9,018
S11	R ²	0,910	0,968	0,638
	EF	0,895	0,894	0,264
	dr	0,900	0,873	0,644
	RMSE	13,432	1,442	15,463
	NRMSE	20,595	32,269	6,580
S14	R ²	0,941	0,963	0,142
	EF	0,873	0,917	-1,322
	dr	0,857	0,892	0,232
	RMSE	14,689	1,175	29,671
	NRMSE	22,930	28,984	13,462
S16	R ²	0,947	0,973	0,020
	EF	0,946	0,873	-2,737
	dr	0,929	0,842	0,166
	RMSE	9,521	1,609	24,259
	NRMSE	14,816	36,089	9,548

Referencias. R²: Coeficiente de determinación; RMSE: Raíz cuadrada del error cuadrático medio; NRMSE: Raíz cuadrada del error cuadrático medio normalizado; EF: Coeficiente de eficiencia del modelo de Nash-Sutcliffe; dr: Índice de concordancia refinado de Willmott.

relativamente escaso, como así también porque los aportes de agua de lluvia fueron abundantes y frecuentes a lo largo del ciclo, especialmente durante febrero y marzo de 2015, de modo que la continua reposición no sólo mantuvo el contenido de agua siempre en niveles relativamente eleva-

dos, sino que también se tornó favorable para producir escurrimiento superficial. De esta forma, se desprende que la simulación del balance de agua a partir de condiciones edáficas y de escurrimiento uniformes, impide representar el eventual proceso de redistribución de agua en el lote (Garrison et

al., 1999) y repercute de manera negativa sobre la estimación del contenido de agua.

2.3 Calibración bajo diferentes condiciones de escurrimiento

En procura de lograr que la evidencia converja simultáneamente para los tres aspectos evaluados del cultivo (CC, MS y AS), la calibración y ajuste de AquaCrop, en esta segunda instancia, considera condiciones de escurrimiento particulares para cada sector del lote. A los efectos de expresar diferencias vinculadas a la infiltración, percolación y redistribución del agua del suelo (Basso, 2000; Batchelor et al., 2002), como fuera planteado en una evaluación anterior en el mismo lote (de la Casa et al., 2016b), la capacidad de escurrimiento de agua en cada sector se ajustó de manera particular. Para ello, aprovechando que en el módulo de prácticas de manejo superficial AquaCrop permite alterar la velocidad de escurrimiento, el aumento o disminución puntual del valor de CN permitió hacer la corrección en cada caso. La Figura 4 muestra los resultados observados de cobertura, biomasa y agua del suelo y los correspondientes valores estimados utilizando en todos los sectores del lote un valor de CN fijo (70), pero bajo diferentes condiciones de manejo superficial de la cobertura en cada uno de ellos.

La modificación de las prácticas de manejo diferencial del escurrimiento en cada sector de muestreo mejora substancialmente el ajuste entre valores observados y estimados del agua edáfica, que se pone en evidencia por un coeficiente angular más cercano a la unidad, en tanto el R^2 de 0,14 se incrementa a 0,54. Por otra parte, estas modificaciones no alteran mayormente los resultados para CC y biomasa, incluso mejorando ligeramente su estimación.

3. Evaluación de la brecha de rendimiento de soja en seco y bajo distintas opciones de siembra

3.1 Fecha de siembra fija (22 de noviembre)

Visto el comportamiento diferencial de cada sector, principalmente como resultado del proceso de redistribución del agua, a los efectos de evaluar la brecha de rendimiento a escala regional se procedió a utilizar la información de calibración de AquaCrop correspondiente a un valor promedio del lote y considerando cada año una fecha de siembra fija igual a la utilizada en la calibración (22 de noviembre). A partir de la serie de ET_0 y los registros de lluvia observados para el periodo

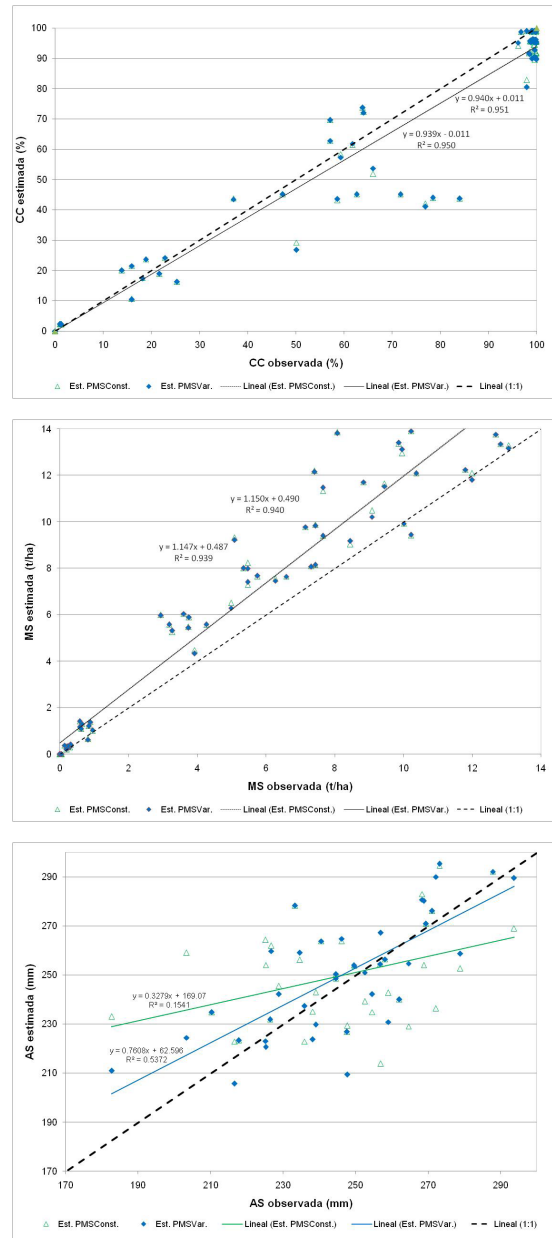


Figura 4. Relación entre los valores observados de cobertura del cultivo (CC), materia seca (MS) y agua del suelo a 1 m de profundidad (AS) y estimados con AquaCrop para una CN fija de 70 con un manejo uniforme (triángulos vacíos) y variable (círculos llenos) en cada sector del lote.

1960-2012, se estimaron los rendimientos de soja de carácter real (R) y potencial (Rp) que muestra la Figura 5a, ordenados en términos de frecuencia relativa acumulada de R. La Figura 5b, en tanto, presenta el histograma de frecuencias para la Br del cultivo de soja.

Dependiendo de la longitud del ciclo y las con-

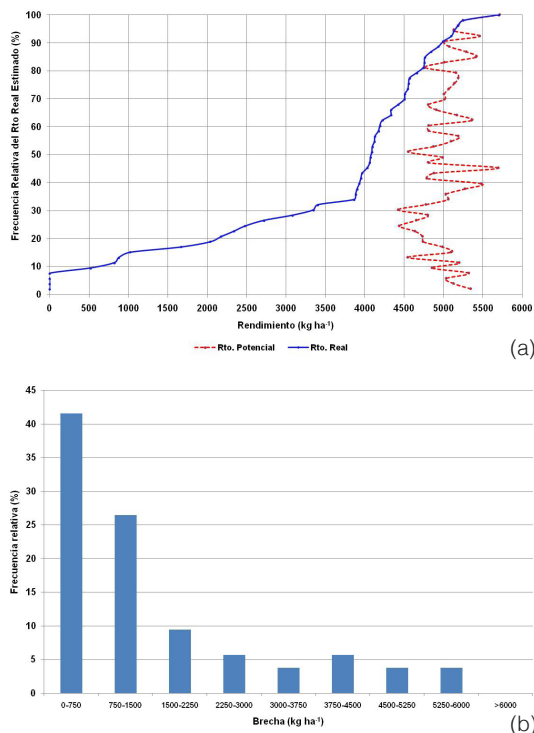


Figura 5. (a) Rendimientos de soja estimados con AquaCrop para condiciones reales (ordenados en términos de la frecuencia relativa acumulada), con el respectivo valor potencial de cada año en Córdoba, Argentina, empleando el 22 de noviembre como fecha de siembra. (b) Histograma de frecuencia relativa de la brecha de rendimiento del cultivo de soja estimada entre 1960 y 2012.

diciones de demanda atmosférica de cada año, la serie de rendimiento potencial fluctúa aproximadamente entre algo menos de 4500 y algo más de 5500 kg ha⁻¹. Van Roekel and Purcell (2014) reportaron para soja un rango de rendimientos potenciales de carácter experimental comprendido entre 5290 y 7953 kg ha⁻¹, siendo un poco más amplio y superior que las estimaciones de este trabajo. Por su parte, los valores estimados de carácter real oscilan entre un poco menos de 10% de casos nulos y, en el extremo superior, alcanzando rindes que superan 5500 kg ha⁻¹.

De acuerdo a la Figura 5b, para esta fecha de siembra fija el cultivo de soja presentaría reducciones relativamente bajas de la productividad (menores a 1500 kg ha⁻¹) en alrededor de 69% de los años, que se asocian a condiciones meteorológicas más favorables durante el ciclo. Luego, la brecha incrementa su valor bajo condiciones climáticas cada vez más limitantes, en tanto que su frecuencia se reduce. Sólo en aproximadamente un tercio de los ciclos las brechas productivas ponen de manifiesto restricciones climáticas más

severas.

Considerando que AquaCrop evalúa la productividad poniendo el énfasis en la cantidad de agua transpirada por el cultivo, la Br presenta una relación estrictamente lineal de carácter inversa respecto a la transpiración acumulada durante el ciclo, como muestra la Figura 6a. La disponibilidad de agua en los ambientes semiáridos y subhúmedos tendiente a reducir Br es un factor decisivo para la producción agrícola en general (Anderson, 2010; van Ierssun et al., 2013) y la soja en particular (Bhatia et al., 2008). En secano esta disponibilidad de agua depende de dos fuentes de aprovisionamiento: la almacenada en el perfil al momento de la siembra y la que aporta la lluvia durante el ciclo. Mientras la Figura 6b presenta la relación de la precipitación acumulada durante el ciclo con respecto a la brecha de la soja estimada con AquaCrop, la Figura 6c hace lo propio pero en función al contenido de agua del suelo previo a la siembra.

Si bien la relación entre Br y la precipitación durante el ciclo permite reconocer una tendencia negativa previsible, la gran dispersión de los datos reduce la proporción de variabilidad explicada a sólo 28% y 30%, dependiendo del modelo de ajuste. El agua que aporta la lluvia durante el ciclo resulta un indicador relativamente menos preciso de la productividad. La dispersión que muestra la Figura 6(b) pone de manifiesto la influencia de distintos factores intrínsecos de la lluvia, como la intensidad pluviométrica, y extrínsecos, como la capacidad de infiltración del suelo y la topografía del lote, sobre la efectividad del fenómeno en términos de su aprovechamiento para el cultivo.

Por su parte, el contenido de agua almacenado a la siembra, además de expresar un comportamiento inverso lógico, ya que un mayor contenido de agua inicial reduce el valor de Br, mantiene una buena capacidad para explicar la variabilidad de la productividad estimada. Cuando el suelo almacena una cantidad elevada de agua la brecha tiende a presentar valores reducidos. En cambio, si el almacenaje previo es más escaso, la línea de tendencia (función de ajuste) permite separar dos situaciones, diferenciando los casos que conservan una brecha reducida porque la precipitación durante el ciclo no es limitante, de aquellos ciclos en que, además del comienzo con una reserva inicial reducida, la lluvia durante su transcurso también resulta escasa, lo que acrecienta la brecha de manera considerable. De esta forma, se destaca la importancia fundamental del agua almacenada previa a la siembra a los efectos de contribuir a reducir cada año las pérdidas de productividad.

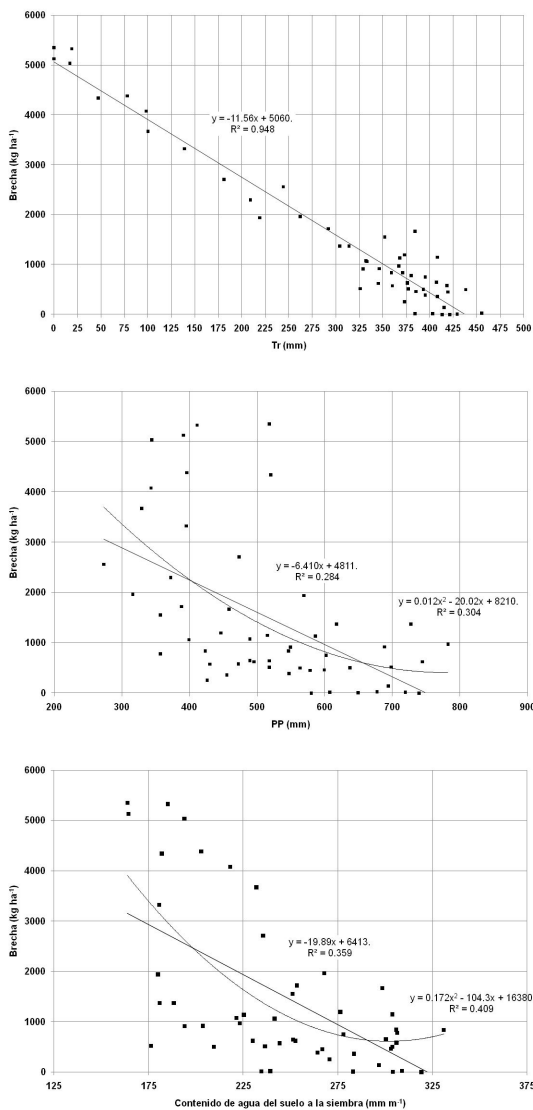


Figura 6. Relación de la brecha de rendimiento estimada con AquaCrop con (a) el agua total transpirada durante el ciclo; (b) la lluvia acumulada y (c) el contenido de agua a la siembra (1 m de profundidad).

3.2 Evaluación del efecto de distintas fechas de siembra sobre la brecha

Teniendo en cuenta la importancia decisiva de la disponibilidad de agua sobre la productividad de la soja (Sadras y Calviño, 2001), y de acuerdo a la capacidad de AquaCrop para expresar esta influencia, se analizan distintas alternativas de siembra a fin de dilucidar la influencia de un eventual adelanto/atraso de la fecha sobre la brecha de rendimiento. En primer término se analiza el impacto

de un cambio en la fecha de siembra, evaluando 3 fechas fijas cada año: una más adelantada el 15 de octubre, otra próxima a la fecha de la calibración el 15 de noviembre y la más atrasada el 15 de diciembre.

Por otra parte, considerando los resultados de la Figura 6c respecto a la importancia del agua almacenada a la siembra y teniendo en cuenta que, en regiones con un régimen de lluvias monzónico como el área central de Córdoba, Argentina (González and Barros, 1998), el comienzo de la estación de lluvias es errático y muy variable cada año (de la Casa, 2009), se procedió a evaluar distintas fechas de siembra ligadas a la ocurrencia de lluvias previas que permitan iniciar el cultivo con diferentes contenidos de agua. En este sentido, la alternativa de atrasar la siembra basado en la cantidad y continuidad de las lluvias que dan inicio al periodo húmedo tiene una connotación prescriptiva más racional, ya que la recomendación se formula de acuerdo a las condiciones meteorológicas de cada ciclo productivo en particular y empleando información que puede reducir la pérdida de productividad.

Los valores medios, desvío estándar y casos extremos de Br que se produce cada año entre 1960 y 2012 se presentan en la Figura 7 para las 6 alternativas de siembra evaluadas. Como se indicó antes, esta información se clasificó cada año de acuerdo a dos criterios: los casos por debajo y por encima del valor medio general, como así también aquellos inferiores y superiores al valor medio de la desviación estándar. Por su parte, el primer criterio evalúa el potencial productivo de cada ciclo, con brechas pequeñas (grandes) que son indicativas de condiciones de demanda de agua mejor (peor) satisfechas, el segundo establece en qué medida la decisión de siembra puede impactar de manera significativa. Mientras el desvío estándar reducido expresa un resultado productivo más uniforme cada año y, de esta forma, independiente de la decisión de siembra, los desvíos más elevados caracterizan aquellos años cuando esta decisión ejerce una influencia marcada sobre las diferencias de rendimiento obtenidas.

Como se aprecia en la Figura 7, existe una gran variabilidad a lo largo del tiempo respecto a las distintas consecuencias productivas que cada año promueven tanto la condición meteorológica previa y durante el ciclo del cultivo, como así también la oportunidad de siembra. En este sentido, el anava que muestra la Tabla 4, indica la ausencia de diferencias significativas entre la decisión de siembra (tratamientos) para el conjunto completo de los datos analizados.

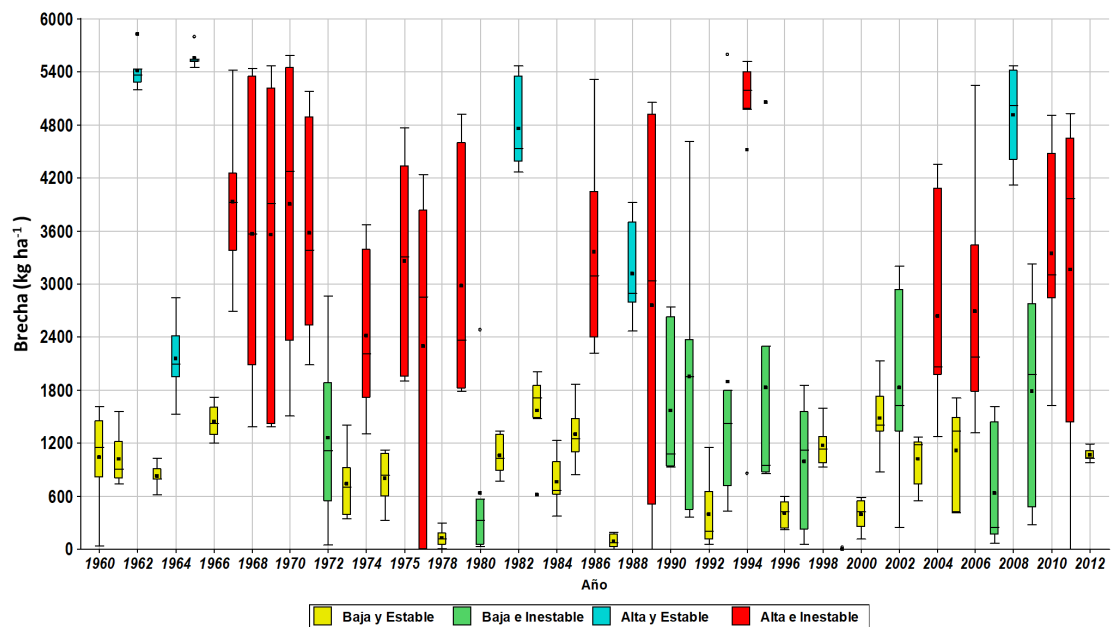


Figura 7. Variación de la brecha de rendimiento del cultivo de soja entre 1960 y 2012 de acuerdo a las 6 alternativas de siembra evaluadas en la región central de Córdoba, Argentina, y clasificadas de acuerdo al valor medio y desvío estándar de todo el conjunto. Referencias: Baja/Alta (inferior/superior a la brecha media); Estable/Inestable (inferior/superior al desvío estándar medio).

En procura de una interpretación de los resultados más utilitaria, los casos con un desvío reducido (estables) representan condiciones climáticas (favorables (en amarillo) o desfavorables (en celeste)) bajo las cuales la decisión de siembra no altera en gran medida el resultado productivo, de modo que este conjunto de 27 casos no resulta intrínsecamente interesante de evaluar. En cambio, aquellos años de mayor desviación (inestables) corresponden a

escenarios productivos más diversos a propósito de la oportunidad de siembra (tanto favorables (en verde) como desfavorables (en rojo)), con algunas opciones de siembra menos oportunas que incrementan la brecha y otras, en cambio, que tienden a reducirla. En total los casos de interés son 26, cuyo estudio permite una selección más racional de la oportunidad de siembra, como muestra el análisis de la varianza de la Tabla 5.

Tabla 4. Resultados del Análisis de la Varianza (SC tipo III) para el conjunto completo de casos

Fuente de variación	Suma de cuadrados	gl	Cuadrado medio	F	p-valor
Modelo	8899480.01	5	1779896.00	0.59	0.7077
Tratamientos	8899480.01	5	1779896.00	0.59	0.7077
Error	941332640.84	312	3017091.80		
Total	950232120.85	317			

Test: DGC Alfa=0.10 PCALT=622.7258

Error: 4398833.4707 gl: 312

Tratamiento	Brecha media	n (años)	E.E.
15/12	1859.21	53	238.59a
150mmacu	1938.38	53	238.59a
100mmacu	2026.50	53	238.59a
15/11	2056.17	53	238.59a
50mmacu	2228.20	53	238.59a
15/10	2351.63	53	238.59a

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.10$). DGC: Prueba de Di Rienzo, Guzmán y Casanoves (Di Rienzo et al., 2011).

Tabla 5. Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

Fuente de variación	Suma de cuadrados	gl	Cuadrado medio	F	p-valor
Modelo	29567822.43	5	5913564.49	2.13	0.0645
Tratamientos	29567822.43	5	5913564.49	2.13	0.0645
Error	415792884.18	150	2771952.56		
Total	445360706.61	155			

Test:DGC Alfa=0.10 PCALT=802.1953

Error: 2771952.5612 gl: 150

Tratamiento	Brecha media	n (años)	E.E.
15/12	1984.17	26	326.52a
150 mm acu	2110.24	26	326.52a
100 mm acu	2498.41	26	326.52a
15/11	2542.84	26	326.52a
50 mm acu	2934.22	26	326.52b
15/10	3238.00	26	326.52b

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.10$). DGC: Prueba de Di Rienzo, Guzmán y Casanoves (Di Rienzo et al., 2011).

El análisis estadístico para este subgrupo revela que la opción de siembra del 15 de octubre así como la de esperar una acumulación de 50 mm de lluvia desde el 20 de setiembre, son las alternativas que producen una brecha significativamente mayor ($P < 0.10$) y, en consecuencia, deberían ser evitadas. Si bien las otras alternativas no arrojan diferencias significativas entre ellas, se destaca que la brecha resulta menor a medida que la siembra se retrasa, y esto es así tanto para el conjunto completo de los datos como para el subgrupo de mayor dispersión. La reducción de la brecha por efecto del atraso de la siembra se explica ya que esta dilación desplaza el ciclo de cultivo a la parte central de la estación de lluvias, cuando el fenómeno en la región es menos errático. La correspondencia de los valores medios de las brechas para las dos alternativas de siembra consideradas (a fecha fija o esperando acumular una cierta cantidad de lluvia), pone de manifiesto que la demora en sembrar tiende a producir una mayor acumulación de lluvia que, al incrementar el contenido de agua inicial, promueve la reducción de Br.

CONCLUSIONES

El uso de AquaCrop a fin de estimar la brecha de rendimiento demanda la disponibilidad de una serie de registros de ET_0 que, prolongada en el tiempo, de lugar a la manifestación de diferentes complejos climáticos. El procedimiento que estima ET_0 por el método de Penman-Montieth-FAO, desarrollado sólo a partir de datos diarios de temperatura máxima y mínima, demostró ser una herramienta precisa para ese propósito. Junto a los datos pluviométricos, la disponibilidad preliminar de información ligada a la

demanda atmosférica permite estimar la brecha de rendimiento de la soja a lo largo del tiempo y evaluar el nivel de riesgo asociado principalmente a la falta de agua en la región central de Córdoba, Argentina.

En el modelo AquaCrop, la rutina que calcula la productividad vegetal basada en la eficiencia o productividad del agua (WP) se calibró para las condiciones climáticas, edáficas y tecnológicas de esta región cotejando los valores de cobertura del cultivo, biomasa y agua del suelo observados en un lote de soja en 2014-2015 y los respectivos valores estimados por el modelo. De acuerdo a los resultados experimentales el modelo utilizó un valor de WP de $13,1 \text{ g m}^{-2}$ para estimar la producción de biomasa que, a pesar de la abundante disponibilidad hídrica ese año, puede resultar relativamente reducido. Esta apreciación se apoya en el valor también ligeramente bajo que resulta del análisis realizado a partir del concepto de eficiencia en el uso de la radiación.

El contraste entre valores observados y estimados por el modelo AquaCrop arrojó índices de precisión y error aceptables al evaluar la cobertura del cultivo, la biomasa total y el contenido de agua del suelo a lo largo del ciclo. Este control resultó particularmente más convincente cuando se consideraron condiciones de escurrimiento diferentes en los distintos sectores del lote.

Con el modelo calibrado para representar condiciones de cultivo propias de la región central de Córdoba, Argentina, y utilizando como fecha de siembra el 22 de noviembre, la brecha de rendimiento de la soja presenta valores inferiores a 1500 kg ha^{-1} en 69% de los ciclos, lo que acredita su potencial productivo en secano. La brecha productiva se incrementa a medida que las condiciones meteorológicas son más limitantes hasta que, para

algo menos de 10% de los casos, los rendimientos resultan nulos.

El análisis de distintas alternativas de siembra cada año muestra que en 51% (27/53) de los casos la decisión influye relativamente poco sobre el resultado productivo alcanzado, siendo la brecha en 38% (20/53) de ellos inferior al valor medio general. En el 49% restante el cambio de la oportunidad de siembra se expresa incrementado la dispersión de la brecha, lo que permite descartar las opciones relacionadas con las fechas de siembra más tempranas (15 de octubre y esperar una acumulación de 50 mm de lluvia desde el 20 de setiembre) y muestra la conveniencia de adoptar fechas más tardías (15 de diciembre y esperar acumular 150 mm de lluvia) para obtener Br más bajas.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Secretaría de Ciencia y Técnica de la Universidad Nacional de Córdoba por el apoyo económico recibido para realizar esta investigación.

REFERENCIAS

- Abedinpour, M., Sarangi, A., Rajput, T.B.S., Singh, M., Pathak, H., Ahmad, T. 2012. Performance evaluation of AquaCrop model for maize crop in a semi-arid environment. *Agric. Water Manage.* 110(0):55–66.
- Abeledo, L.G., Savin, R., Slafer, G.A., 2008. Wheat productivity in the Mediterranean Ebro Valley: Analyzing the gap between attainable and potential yield with a simulation model. *Eur. J. Agron.* 28, 541–550.
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M. 1998. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. In: *FAO Irrigation and Drainage Paper 56*. FAO, Rome, Italy.
- Andarzian, B., Bannayan, M., Steduto, P., Mazraeh, H., Barati, M.E., Barati, M.A., Rahnama, A. 2011. Validation and testing of the AquaCrop model under full and deficit irrigated wheat production in Iran. *Agric. Water Manage.* 100, 1–8.
- Anderson, W.K. 2010. Closing the gap between actual and potential yield of rainfed wheat. The impacts of environment, management and cultivar. *Field Crops Res.* 116, 14–22.
- Aramburu Merlos, F.A., Monzon, J.P., Mercuro, J.L., Taiboada, M., Andrade, F.H., Hall, A.J., ... & Grassini, P. 2015. Potential for crop production increase in Argentina through closure of existing yield gaps. *Field Crops Research* 184, 145–154.
- Basso, B. 2000. Digital terrain analysis and simulation modeling to assess spatial variability of soil water balance and crop production. Ph.D. Dissertation, Michigan State University, East Lansing, MI.
- Batchelor, W.D., Basso, B., Paz, J.O. 2002. Examples of strategies to analyze spatial and temporal yield variability using crop models. *Europ. J. Agron.* 18, 141–158.
- Bhatia, V.S., Singh, P., Wani, S.P., Chauhan, G.S., Kesava Rao, A.V.R., Mishra, A.K., Srinivas, K. 2008. Analysis of potential yields and yield gaps of rainfed soybean in India using CROPGRO-Soybean model. *Agric. For. Meteorol.* 148, 1252–1265.
- Blackmore, S.; Godwin, R.J.; Fountas, S. 2003. The Analysis of Spatial and Temporal Trends in Yield Map Data over Six Years. *Biosystems Engineering* 84(4), 455–466.
- Bristow, K.L., Campbell, G.S. 1984. On the relationship between incoming solar radiation and daily maximum and minimum temperature. *Agric. For. Meteorol.* 31, 159–166.
- Caldiz, D.O., Gaspari, F.J., Haverkort, A.J., Struik, P.C. 2001. Agro-ecological zoning and potential yield of single or double cropping of potato in Argentina. *Agric. For. Meteorol.* 109, 311–320.
- Cassman, K.G., Dobermann, A., Walters, D.T., Yang, H.S., 2003. Meeting cereal demand while protecting natural resources and improving environmental quality. *Annu. Rev. Environ. Resour.* 28, 315–358.
- Constantin, J., Willaume, M., Murgue, C., Lacroix, B., Therond, O., 2015. The soil-crop models STICS and AqYield predict yield and soil water content for irrigated crops equally well with limited data. *Agric. For. Meteorol.* 206, 55–68.
- Dardanelli, J.D., Bachmeier, O.A., Sereno, R., Gil, R., 1997. Rooting depth and soil water extraction patterns of different crops in a silty loam Haplustoll. *Field Crop Res.* 54, 29–38.
- de la Casa, A., Ovando, G., Rodríguez, A., 2003. Estimación de la radiación solar global en la provincia de Córdoba, Argentina, y su empleo en un modelo de rendimiento potencial de papa. *Revista de Investigaciones Agropecuarias* 32(2), 1–17.
- de la Casa, A., 2009. Onset of the rainy season in the province of Córdoba (Argentina) determined by rainfall records and evaluation of its agricultural risk condition. *Chilean Journal of Agricultural Research* 69(4), 567–576.
- de la Casa, A., Ovando, G., Bressanini, L., Martínez, J., 2014. Estimación del rendimiento potencial de papa en Córdoba, Argentina, a partir de la eficiencia en el uso de la radiación y de la productividad del agua. *AGRISCIENCIA* 31(2), 75–91.
- de la Casa, A., Ovando, G., Bressanini, L., Martínez, J. 2016a. Empleo del NDVI de una cámara digital modi-

- ficada para estimar la cobertura del cultivo de papa bajo distintas condiciones de fertilización nitrogenada. *AGRISCIENTIA* 33(2), 75–88.
- de la Casa, A., Ovando, G., Bressanini, L., Martínez, J., Miranda, C., Díaz, G. 2016b. Evaluación de un lote de maíz bajo riego y siembra variable con el modelo AquaCrop en Córdoba, Argentina. *Revista Argentina de Agrometeorología* 7, 1–13.
- de la Casa, A., Ovando, G., Bressanini, L., Martínez, J., Díaz, G., Miranda, C. 2017. Soybean crop coverage estimation from NDVI images with different spatial resolution to evaluate yield variability in a plot. *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. En prensa.
- Di Rienzo J.A.; Casanoves, F.; Balzarini, M.G.; Gonzalez, L.; Tablada, M.; Robledo, C.W. 2011. InfoStat versión 2011. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
- Duffie, J.A., Beckman, W.A., 1980. *Solar engineering of thermal processes*. John Wiley & Sons, New York. 1-109 pp.
- Duvick, D.N., Cassman, K.G., 1999. Post-green revolution trends in yield potential of temperate maize in the North-Central United States. *Crop Sci.* 39, 1622–1630.
- Edwards, J.T., Purcell, L.C., 2005. Soybean yield and biomass responses to increasing plant population among diverse maturity groups: I. Agronomic Characteristics. *Crop Sci.* 45, 1770–1777.
- Evans, L.T., 1993. *Crop Evolution, Adaptation, and Yield*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- FAO, 2012. ETo Calculator version 3.2. Land and Water Digital Media Series N° 36. Reference Manual. FAO, Rome, Italy.
- Farahani, H.J., Izzi, G., Oweis, T.Y., 2009. Parameterization and evaluation of the AquaCrop model for full and deficit irrigated cotton. *Agron. J.* 101:469-476.
- Gardiol, J.M., Della Maggiora, A., Irigoyen, A., 2002. Curvas de coeficientes de cultivo de maíz, girasol y soja. IX Reunión Argentina de Agrometeorología. Córdoba, Argentina, 2002.
- Garrison, M.V., Batchelor, W.D., Kanwar, R.S., Ritchie, J.T., 1999. Validation of the CERES-Maize water and nitrogen balances under tile drained conditions. *Agric. Syst.* 62, 189-200.
- González, M., Barros, V., 1998. The relation between tropical convection in South America and the end of a dry period in Subtropical Argentina. *Int. J. Climatol.* 18, 1669-1685.
- Grassini, P., Thorburn, J., Burr, C., Cassman, K.G. 2011. High-yield irrigated maize in the Western U.S. Corn Belt: I. On-farm yield, yield potential, and impact of agronomic practices. *Field Crops Res.* 120, 142–150.
- Grassini, P., Yang, H., Cassman, K.G., 2009. Limits to maize productivity in Western Corn-Belt: A simulation analysis for fully irrigated and rainfed conditions. *Agric. For. Meteorol.* 149, 1254-1265.
- Griffin, T.S., Johnson, B.S., Ritchie, J.T. 1995. A simulation model for potato growth and development: Substortato Version 2.0. IBSNAT Research Report Series 02. Dept. of Agronomy and Soil Science.
- Heng, L.K., Hsiao, T.C., Evett, S.R., Howell, T.A., Steduto, P. 2009. Testing of FAO AquaCrop model for rainfed and irrigated maize. *Agron. J.* 101:488-498.
- Hsiao, T.C., Heng, L.K., Steduto, P., Rojas-Lara, B., Raes, D., Fereres, E. 2009. AquaCrop-The FAO crop model to simulate yield response to water: III. Parameterization and testing for maize. *Agron. J.* 101:448-459.
- Iqbal, M.A., Shen, Y., Stricevic, R., Pei, H., Sun, H., Amiri, E., Penas, A., del Rio, S. 2014. Evaluation of the FAO AquaCrop model for winter wheat on the North China Plain under deficit irrigation from field experiment to regional yield simulation. *Agric. Water Manage.* 135, 61–72.
- Jones, J.W., Hoogenboom, G., Porter, C.H., Boote, K.J., Batchelor, W.D., Hunt, L.A., Wilkens, P.W., Singh, U., Gijssman, A.J., Ritchie, J.T. 2003. The DSSAT cropping system model. *Eur. J. Agron.* 18, 235–265.
- Kariyama, I.D. 2014. Simulations of the potential yields of Jenguma soybean variety in the upper west region using Aqua Crop model. *International Journal of Scientific & Technology Research* 3(5), 101-106.
- Kooman, P.L., Haverkort, A.J., 1995. Modelling development and growth of the potato crop influenced by temperature and daylength: LINTUL-POTATO. In: Haverkort, A.J., Mac Kerron, D.K.L. (Eds.), *Potato Ecology and Modelling of Crops Under Conditions Limiting Growth*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, pp. 41–60.
- Lobell, D.B., Cassman, K.G., Field, C.B., 2009. Crop yield gaps: their importance, magnitude, and causes. *Annu. Rev. Environ. Resour.* 34, 1–26.
- Lobell, D.B., Ortiz-Monasterio, J.I., Asner, G.P., Naylor, R.L., Falcon, W.P. 2005. Combining field surveys, remote sensing, and regression trees to understand yield variations in an irrigated wheat landscape. *Agron. J.* 97, 241–249.
- Loomis, R.S., Connor, D.J., 1992. *Crop Ecology. Productivity and Management in Agricultural Systems*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Mercau, J.L., Sadras, V.O., Satorre, E.H., Messina, C., Balbi, C., Uribelarrea, M., Hall, A.J. 2001. On-farm assessment of regional and seasonal variation in sunflower yield in Argentina. *Agric. Syst.* 67, 83–103.
- Mkhabela, M.S., Bullock, P.R. 2012. Performance of the FAO AquaCrop model for wheat grain yield and soil moisture simulation in Western Canada. *Agric. Water Manage.* 110, 16–24.

- Monteith, J.L. 1977. Climate and the efficiency of crop production in Britain. *Philos T R Soc Lond B* 281:277-294.
- Passioura, J.B., Angus, J.F. 2010. Improving productivity of crops in water-limited environments. *Adv. Agron.* 106, 38–74.
- Purcell, L.C., Ball, R.A., Reaper, III, J.D., Vories, E.D. 2002. Radiation use efficiency and biomass production in soybean at different plant population densities. *Crop Sci.* 42:172–177.
- Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T.C., Fereres, E. 2009. AquaCrop-The FAO crop model to predict yield response to water: II Main algorithms and software description. *Agron. J.* 101, 438-44.
- Rodrigues da Silva, V.D.P., Maciel, G.F., Braga, C.C., Júnior, S., Souza, E.P.D., Almeida, R.S.R., ... & Holanda, R.M.D. 2018. Calibration and validation of the AquaCrop model for the soybean crop grown under different levels of irrigation in the Motopiba region, Brazil. *Ciência Rural*, 48(1):1–8.
- Rollán, A.A., Bachmeier, O.A., 2014. Compactación y retención hídrica en Haplustoles de la provincia de Córdoba (Argentina) bajo siembra directa. *AGRISCIENTIA* 31(1):1–10.
- Sadras, V., Roget, D., O'Leary, G.O. 2002. On-farm assessment of environmental land management constraints to wheat yield and efficiency in the use of rainfall in the Malle. *Aust. J. Agric. Res.* 53, 587–598.
- Sadrás, V.O., Calviño, P.A. 2001. Quantification of grain yield response to soil depth in soybean, maize, sunflower, and wheat. *Agron. J.* 93:577–583.
- Sinclair, T.R., Muchow, R.C., 1999. Radiation use efficiency. *Adv. Agron.* 65:215-265.
- Singh, A.K., Tripathy, R., Chopra, U.K., 2008. Evaluation of CERES-Wheat and CropSyst models for water-nitrogen interactions in wheat crop. *Agric. Water Manage.* 95, 776–786
- Steduto, P., Albrizio R. 2005. Resource-use efficiency of field grown sunflower, sorghum, wheat and chickpea. II Water use efficiency and comparison with radiation use efficiency. *Agric. For. Meteorol.* 130:269-281.
- Steduto, P., Hsiao, T.C., Raes, D., Fereres, E. 2009. AquaCrop- the FAO crop model to simulate yield response to water: I. Concepts and underlying principles. *Agron. J.* 101, 426–437.
- Steduto, P., Hsiao T.C., Fereres, E. 2007. On the conservative behavior of biomass water productivity. *Irrig. Sci.* 25: 189–207.
- Stöckle, C.O., Donatelli, M., Nelson, R., 2003. CropSyst: a cropping systems simulation model. *Eur. J. Agron.* 18, 289-307.
- van Ittersum, M.K., Cassman, K.G., Grassini, P., Wolf, J., Tittonell, P., Hochman, Z. 2013. Yield gap analysis with local to global relevance - A review. *Field Crops Res.* 143, 4–17.
- van Roekel, R.J., Purcell, L.C. 2014. Soybean biomass and nitrogen accumulation rates and radiation use efficiency in a maximum yield environment. *Crop Sci.* 54, 1189–1196.
- Van Wart, J., Kersebaum, Ch., Peng, Sh., Milner, M., Cassman, K.G. 2013. Estimating crop yield potential at regional to national scales. *Field Crops Res.* 143,34–43.
- Wiese, M.V. 1982. Crop management by comprehensive appraisal of yield determining variables. *Annu. Rev. Phytopathol.* 20, 419–432.
- Willmott, C.J., Robeson, S.M., Matsuura, K. 2012. A refined index of model performance. *International Journal of Climatology* 32, 2088-2094.
- Yang, H.S., Dobermann, A., Cassman, K.G., Lindquist, J.L., Walters, D.T., Arkebauer, T.J., Cassman, K.G. 2004. Hybrid-Maize: a maize simulation model that combines two crop modelling approaches. *Field Crops Res.* 87, 131–154.

Índice de Peligrosidad Anual de Heladas (IPAH): Concepto y utilidad

Blasón, A.D.; Mollá Kralj, A. y Rodríguez, R.O.

RESUMEN

El impacto de las adversidades meteorológicas condiciona la producción agropecuaria. Las heladas en Argentina causan severas pérdidas en inicios y finalización de los ciclos de cultivo principalmente debido a su considerable variabilidad interanual, a la vez que la sensibilidad al daño varía según el estadio fenológico. A causa de esto, localidades con similar probabilidad de ocurrencia de heladas pueden presentar distinta peligrosidad. Para su valoración, este trabajo presenta un índice de peligrosidad anual de heladas (IPAH), que asocia la probabilidad de ocurrencia de heladas con la suma de temperaturas medias diarias meteorológicas durante el período de cultivo. El efecto de integración térmica planteado en este índice permite distinguir la evolución en el desarrollo de un cultivo y su peligrosidad más allá de la igualdad de temperaturas entre fechas y/o localidades. Los resultados alcanzados muestran al IPAH como una metodología potencialmente dúctil para la valoración interanual, utilizando solo dos variables de fácil interpretación, cálculo sencillo y resultado preciso.

Palabras clave: Riesgo de helada, ICK, Suma térmica, Estado fenológico.

Blasón, A.D.; Mollá Kralj, A. y Rodríguez, R.O., 2018. Annual Frost Hazardous Index (AFHI): Concept and usefulness. RADA IX: 21-30

SUMMARY

Agricultural production is conditioned by the impact of the meteorological adversities. Frosts in Argentina cause severe losses at the beginning and the end of crops cycles. It's mainly due to their considerable interannual variability, while the sensitivity to damage varies according to the phenological stage. Because of this, localities with a similar probability of frost occurrence can present different hazards. For its assessment, this work presents an annual frost hazardous index (AFHI), which associates the probability of frost occurrence with the sum of average daily meteorological temperatures during the cultivation period. The effect of thermal integration raised in this index allows distinguishing the evolution in the development of a crop and its danger beyond the equality of temperatures between dates and / or locations. The results obtained show the AFHI as a potentially ductile methodology for the interannual assessment, using only two variables of easy interpretation, simple calculation and precise result.

Key words: Frost risk, ICK, Thermal time, Phenological stage.

A.D. Blasón y R.O. Rodríguez: Cátedra de Agrometeorología. A. Mollá Kralj: Cátedra de Ecología y Fitogeografía. Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Lomas de Zamora. Ruta 4, km. 2, Llavallol (1836), Lomas de Zamora, Buenos Aires, Argentina. Tel. 0114 2826263/7905. Correspondencia a: adblason@yahoo.com

INTRODUCCIÓN

Las actividades agropecuarias se encuentran condicionadas por diversos riesgos, entre ellos las adversidades climáticas. Las mismas cobran gran importancia a causa de las pérdidas de producción que provocan a nivel de los productores, con su consiguiente impacto sobre las economías a nivel regional y nacional. Este panorama resulta recurrente debido a la gran variabilidad temporal y espacial de las condiciones meteorológicas dificultando la valoración de la capacidad productiva de las diferentes regiones de la Argentina, la planificación de las actividades agropecuarias y los diferentes intentos de lucha y mitigación de sus efectos negativos.

En cuanto al fenómeno de heladas, conocer su origen, intensidad, duración y período de ocurrencia (entre otros aspectos relevantes) y los daños que por consiguiente produce, resulta de suma importancia dado que no hay región del país que a nivel macro climático esté a salvo de este tipo de eventos (Burgos, 1963).

En la Argentina, aunque el período libre de heladas es suficientemente extenso en la mayor parte de su territorio con capacidad de producción desde el punto de vista agrícola (Burgos, 1963; Murphy y Hurtado, 2011), las heladas generan a menudo pérdidas considerables en inicios y finalización de ciclos de cultivos que resultan en general sumamente sensibles a este fenómeno.

Esas etapas o momentos del ciclo de vida en cultivos de granos, frutales, hortícolas y muchos otros, pueden hallarse más o menos adelantadas en el año (según las características ambientales del mismo). Esa situación, unida a la gran dispersión interanual, que desafortunadamente presentan las fechas de heladas primaverales y otoñales en esa vasta región (Murphy y Hurtado, 2011), genera la dificultad de prever sus fechas de ocurrencia con precisión haciendo más difícil anticipar sus efectos y los intentos de controlar o al menos disminuir los daños.

El clima oceánico que posee el territorio argentino y la facilidad de traslado de masas de aire en sentido N-S son la principal causa de esa incertidumbre, ya que provoca desviaciones en las fechas medias de heladas otoñales y primaverales de aproximadamente 20 a 30 días, mientras que en el hemisferio norte de clima continental dichas desviaciones resultan de 7 a 10 días (Burgos, 1963; Murphy y Hurtado, 2011), simplificando la planificación de cultivos, fecha de siembra y métodos de lucha.

Otro aspecto sumamente importante para el análisis numérico, es definir si se está considerando a la helada meteorológica, entendida como descenso de la temperatura del aire de 0°C o menor, o se refiere a una helada agrometeorológica, con temperaturas por debajo de umbrales que dañan al cultivo parcial o totalmente, generalmente sin que la temperatura alcance el punto de congelación del agua.

Pueden producirse daños por heladas aun con temperaturas del aire, medidas en abrigo, mayores a 0°C; debido a que la temperatura en órganos vegetales puede ser 3 ó 4°C más baja por efecto de la irradiación que en ese momento ellos emiten (Lhomme & Guilioni, 2004; Murphy y Hurtado, 2011). También las distintas etapas fenológicas en que se encuentre el vegetal son causa de diferente sensibilidad a las bajas temperaturas y por lo tanto se modifica el umbral de daño (Murphy y Hurtado, 2011).

Así se dan situaciones en la que un cultivar sembrado en una misma fecha y localidad puede encontrarse más avanzado o retrasado en su desarrollo a causa de la integración térmica producida durante un año particular, siempre y cuando el agua y la nutrición mineral no ejerzan un rol restrictivo, aunque la probabilidad de ocurrencia de heladas pueda resultar la misma.

Estos considerandos han llevado a diferentes investigadores del tema a generar distintos índices de valoración de riesgo de daño que no se basen exclusivamente en el análisis probabilístico de he-

ladas meteorológicas. Así Burgos (1947) presentó su Índice Crio Kindinoscópico (ICK) de peligrosidad para heladas invernales, primaverales y otoñales, permitiendo valorar climáticamente a nivel regional el peligro de daño producido por las heladas asociado a las temperaturas normales del aire al ocurrir las mismas. Mientras que el índice de Peligrosidad de Heladas (IPH) desarrollado por Pascale y Damarío (1958), avanzó en la determinación del riesgo de heladas más específicamente para un lugar y cultivo determinado; dicha metodología requiere una considerable mayor cantidad de información fenológica y meteorológica del cultivo y de la región de producción.

Posteriormente se determinaron otros indicadores como el Frost Index (FI) (Lindkvist y Chen, 1999) y el IRISH (Fernández Long *et al.*, 2008) los cuales consideran gran cantidad de variables que influyen sobre el fenómeno. Estos, además de realizar contrastes climáticos para un cultivo dado posibilitan comparaciones interanuales de peligrosidad, pero al combinar información difícil de homologar terminan generando valores de índices adimensionales integrados de compleja abstracción, resultando así su mayor utilidad en comparaciones relativas. En resumen, se han incorporado mediante diferentes modalidades, los aspectos concernientes a los distintos umbrales térmicos y nivel de resistencia a las bajas temperaturas según el estado de avance del desarrollo del cultivo.

Retomando conceptualmente el ICK para heladas primaverales - otoñales y la probabilidad de ocurrencia de dichos eventos, Burgos planteó la peligrosidad asumiéndola directamente vinculada al desarrollo y sensibilidad del cultivo (a mayor desarrollo, mayor sensibilidad) y por ende a un estado de mayor susceptibilidad al daño por bajas temperaturas.

A su vez, Burgos asoció la temperatura normal del aire con el estado de crecimiento/desarrollo de la canopia para una determinada fecha del año. El día del año elegido, para determinar el valor de ICK, es aquel en donde aún existe un 20 % de probabilidad de ocurrencia de la última helada meteorológica (caso de las primaverales) o en la fecha en que ya se alcanzó un 20 % de probabilidad para la primera helada (caso de las otoñales). Por lo tanto, eventos con igual probabilidad estadística de ocurrencia de heladas, resultan en un aumento de peligrosidad tanto mayor sea la temperatura del aire climáticamente correspondiente a la fecha en referencia.

Si bien este avanzado concepto permitió valorar eficazmente diferentes climas de zonas productoras en el territorio argentino, no distingue dife-

rencias entre localidades expuestas a diferentes marchas térmicas que podrían acelerar o atrasar el ciclo de vida del vegetal, aunque el valor del índice resultase el mismo. Es decir que igual valor del ICK no necesariamente conduce a un mismo estado fenológico y por ende de sensibilidad. Con el mismo criterio, se plantea adaptar un método de cómputo capaz de captar diferencias entre heladas otoñales y primaverales que posean un mismo ICK, ya que el carácter climático de este último, le impide detectar diferencias de peligrosidad debidas a la variabilidad interanual de las temperaturas.

El presente trabajo presenta el concepto, metodología, posibilidad de adecuación y utilidad de un índice de peligrosidad anual de heladas (IPAH), como herramienta ampliada respecto a la previsión del potencial daño vegetal provocado por la ocurrencia de heladas, en vista a la toma de decisiones concordantes a las actuales necesidades productivas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para el desarrollo de la presente metodología se utilizaron las bases de datos históricas en paso diario de varias localidades de la República Argentina descargadas desde la plataforma pública <http://siga2.inta.gov.ar>. Las localidades fueron seleccionadas en la medida que contaran con series ininterrumpidas de mayor antigüedad posible y que al mismo tiempo se ubicaran en una estrecha franja latitudinal que abarca desde el clima templado húmedo de Buenos Aires al seco oasis mendocino, lo que la hace representativa de una zona de importancia agropecuaria relevante.

La elección de a pares de las estaciones meteorológicas por zona, contribuyó a resolver el inconveniente de datos faltantes. En dichos casos, se complementó la misma con la correspondiente en fecha de su par (Estación Meteorológica Convencional más cercana de las analizadas) y en caso de su imposibilidad, se rellenó las series con promedios temporales previo-post de la variable. Las localidades estudiadas y sus detalles se presentan en el cuadro N° 1.

Una vez completas y validadas las series, tanto en los valores lógicos de temperaturas como también del ordenamiento consecutivo correcto de registros de fechas, se procedió mediante el uso de planillas de cálculo a nomenciar y ordenar las series según su día del año de 1 a 365 o en bisiesto 366 (DDA). Dicho procedimiento permitió, utilizando herramientas de filtrado, la caracterización estadística de las distribuciones en estudio.

Utilizando la información meteorológica de temperaturas mínimas y medias diarias del aire, provenientes de los abrigos meteorológicos convencionales del S.M.N. y del INTA, se precisó el momento de ocurrencia y la variabilidad interanual de las heladas otoñales y primaverales (primera helada del año y última respectivamente). Para tal fin se estableció su fecha media, desvío estándar y coeficiente de variación, además fueron determinadas las fechas correspondientes al 20% de probabilidad normal acumulada para la helada otoñal (FP20-HO) y del 80% de probabilidad normal acumulada para helada primaveral (FP80-HP) coincidentemente con el criterio utilizado por Burgos (1947), lo que significa en ambos casos una recurrencia del fenómeno de una vez cada 5 años.

Lo descrito hasta aquí corresponde con un análisis tradicional de caracterización de heladas por su momento de ocurrencia. Resulta oportuno mencionar que la metodología de análisis propuesta es factible de ser modificada en cuanto al umbral de tolerancia a baja temperatura (temperatura mínima que produzca daño) para cada cultivo en particular, teniendo en cuenta los órganos afectados, la altura sobre el suelo y también las diferencias de sensibilidad de los tejidos, siempre y cuando se disponga de la información adecuada para ello.

Establecidas las fechas FP20-HO y FP80-HP se procedió a realizar sumatorias térmicas mediante el tradicional método directo, resultando este en la integración consecutiva de las temperaturas medias diarias durante un período determinado como se detalla más adelante.

Previo a ello para poder llevar a cabo la metodología propuesta se debió considerar que el fenómeno de heladas inherente a zonas extra tropicales, comprendidas desde latitudes intermedias

a altas, goza de una marcada influencia de la marcha anual de la radiación solar. La misma presenta un mínimo en el solsticio de invierno (SI) y en contraposición su máximo en el solsticio de verano (SV), a la vez que las temperaturas acompañan en gran medida esa oscilación del goce de radiación si bien con cierto conocido retardo.

Las especies vegetales cultivadas en nuestra zona de estudio ya sean anuales o perennes, inician o reanudan su crecimiento y desarrollo al salir del receso biológico invernal; siendo plausible su división en dos grandes grupos.

Aquellas que lo hacen más tempranamente se encuentran comprendidas entre los cultivos comúnmente conocidos como de ciclo OIP (otoño-invierno-primaverales) y los frutales de carozo y pepita. Las primeras lo componen principalmente especies anuales vernalizantes, consideradas bioclimáticamente como paratermocíclicas; mientras que a los restantes lo componen los frutales perennes criófilos, clasificadas como termocíclicas. Este primer gran grupo presenta sus fases y subperíodos fenológicos de mayor sensibilidad a las bajas temperaturas (períodos críticos como floración, espigazón, cuajado de frutos, etc.) principalmente durante la rama ascendente de la temperatura anual y por ende resultan mayormente susceptibles a la ocurrencia de las heladas primaverales.

El segundo gran grupo hace referencia a cultivos que inician o reanudan su crecimiento y desarrollo más tardíamente ya sean anuales o perennes. Aquí se enmarcan las especies conocidas como PVO (primavera-verano-otoñales) o atermocíclicas. Estos vegetales, excepto en los períodos de emergencia y establecimiento del cultivo en donde pueden ser susceptibles a heladas primaverales, en general presentan mayor riesgo a dicho

Cuadro N°1: Listado de las estaciones meteorológicas ubicación y serie temporal considerados en el análisis.

Nombre	Descripción	Localidad	Provincia	Latitud	Longitud	Serie
Ezeiza	Ezeiza	Ezeiza	Buenos Aires	-34,82	-58,53	1959-2009
Castelar	Castelar CNIA INTA	Hurlingham	Buenos Aires	-34,60	-58,67	1951-2017
Pergamino	Pergamino EEA INTA	Pergamino	Buenos Aires	-33,93	-60,55	1932-2017
Junín	Junín	Junín	Buenos Aires	-34,55	-60,92	1934-2014
Marcos Juárez	Marcos Juárez EEA INTA	Marcos Juárez	Córdoba	-32,68	-62,12	1968-2017
Manfredi	Manfredi EEA INTA	Río Segundo	Córdoba	-31,82	-63,77	1970-2013
General Pico	Gral. Pico	Gral. Pico	La Pampa	-35,70	-63,75	1960-2014
Anguil	Anguil EEA INTA	Anguil	La Pampa	-36,50	-63,98	1961-2017
Villa Mercedes	Va. Mercedes EEA INTA	General Pedernera	San Luis	-33,72	-65,48	1968-2013
San Rafael	Mendoza	Mendoza	Mendoza	-34,58	-68,40	1960-2015
Mendoza-Obs.	Mendoza	Mendoza	Mendoza	-32,88	-68,85	1960-2014

fenómeno meteorológico en sus fases de floración y posterior formación de sus frutos, siendo coincidentes con la rama descendente de la temperatura en la cual se encuentran las heladas otoñales.

Considerando todo lo antedicho y resultando la suma térmica una herramienta de probada eficacia, validada en innumerables casos para el seguimiento del desarrollo de los cultivos, decidimos analizar su comportamiento interanual asociado a las fechas antes mencionadas de FP20-HO y FP80-HP a fin de aventajar al uso de la simple temperatura media como índice de peligrosidad de la ocurrencia de heladas.

Se propone como inicio de la integración térmica el SI acumulando hacia el SV hasta alcanzar la FP80-HP, resultando la cuantificación en grados días (°Cd) particular según cada año y localidad en la que se realice el computo. Análogamente para las heladas otoñales, se comienza en el SV, acumulando a través de la rama descendente de temperatura hacia el SI hasta alcanzar la FP20-HO.

Debido a los procesos de transferencia y redistribución de la energía los mínimos y máximos climáticos de la oscilación anual de la temperatura presentan en general un retardo respecto a la ocurrencia de los momentos de los solsticios; variables además según factores formadores de clima preponderantes en cada región. Es por esto que para facilitar cálculos y poder realizar comparaciones geográficas estándares se decidió homologar las fechas de inicio de las sumas térmicas al día 01 de enero (DDA-V = 1) correspondiente al último mes de la rama ascendente e inicio del proceso descendente de temperatura y asociada a la fecha de ocurrencia de helada otoñal para nuestro hemisferio. Por la contraparte se tomó como fecha de inicio al día 01 de julio (DDA-I = 181 ó 182 en año bisiesto) correspondiente al final de la rama descendente e inicio de la rama ascendente de temperatura, asociada a la fecha de ocurrencia de helada primaveral. Al establecer dichas fechas como nuevos puntos de partidas para realizar las integraciones térmicas en lugar de utilizar las fechas de los solsticios (reduce la posibilidad de incluir ascensos de temperatura en días posteriores al SV o de descensos posteriores al SI, al tratar de sumar desde los valores extremos de la oscilación anual) se tiene la ventaja de aprovechar mejor la serie de datos disponible desde el primer y hasta el último año completo, lo que nos agrega dos años extras de datos que se desperdiciarían, correspondientes al primer y último año incompletos de la serie utilizada. En caso de extender este tipo de análisis a localidades del hemisferio norte solo es necesario considerar la contra estación y readecuar las sumas de verano por la de invierno y viceversa.

Una vez que se cuenta con todos los valores de las series conforme a lo explicado anteriormente, es factible calcular el IPAH. Para ello se realiza la integración térmica (sumatoria de la temperatura media diaria) desde inicio de DDA-I y desde DDA-V hasta sus correspondientes fechas de fin previamente determinadas en FP20-HO y FP80-HP a través de la serie de años para las temperaturas diarias disponibles, obteniendo las sumas año por año y para cada localidad.

El promedio de dichas sumatorias nos da una valoración climática o normal sitio específica posible de ser asociada a la evolución fenológica media de los cultivos. En el caso de la sumatoria promedio o normal obtenida desde el DDA-V hasta la FP20-HO la denominaremos suma térmica normal en heladas otoñales (STN-HO); y para la obtenida desde DDA-I hasta FP80-HP será la suma térmica normal en heladas primaverales (STN-HP).

A partir de esta instancia, se puede calcular el IPAH para cada año en particular, efectuando la relación entre la suma térmica correspondiente a cada año sobre la STN-HO ó STN-HP según corresponda en cada caso. Así la ecuación 1 presenta la forma de cálculo del índice correspondiente a heladas otoñales y la ecuación 2 para heladas primaverales.

$$IPAH_{HO} = \sum_{i=1}^{n_{FP20-HO}} Tmd_i / STN - HO \quad (1)$$

Siendo:

IPAH_{HO}: índice de peligrosidad anual de helada otoñal.

n_{FP20-HO}: día del año para el nivel de probabilidad de ocurrencia de helada otoñal escogido (20 % en este caso).

Tmd_i: Temperatura media diaria del día i.

STN-HO: Suma térmica normal en heladas otoñales.

$$IPAH_{HP} = \sum_{i=181}^{n_{FP80-HP}} Tmd_i / STN - HP \quad (2)$$

Siendo:

IPAH_{HP}: índice de peligrosidad anual de helada primaveral.

n_{FP80-HP}: día del año para el nivel de probabilidad de ocurrencia de helada primaveral escogido (80 % en este caso).

Tmd_i: Temperatura media diaria del día i.

STN-HP: Suma térmica normal en heladas primaverales.

Así construido el IPAH individual para cada año

muestra como resultado un valor circundante al valor uno ó climático medio (normal), los menores a dicho valor en un año en particular representan una integración térmica menor al valor normal y los mayores viceversa. Asociando el desarrollo y la sensibilidad del cultivo a dicho valor los menores a uno resultan expuestos a una menor peligrosidad, por el contrario, valores mayores a uno denotan una peligrosidad más elevada de lo normal.

Acorde a la preferencia particular de cada operador de la metodología, el IPAHP también puede ser expresado como IPAHP% o IPAHP% anómalo.

El IPAHP% se obtiene multiplicando al índice original por 100 y nos arroja valores porcentuales (indicando la base 100 el nivel de peligrosidad normal de esa localidad)

En cuanto al IPAHP% anómalo muestra las variaciones porcentuales en la acumulación térmica para cada año particular en valores negativos y positivos, circundando el valor cero o normal. Para su cómputo se le sustrae el valor uno a la relación entre la sumatoria térmica del año particular y su valor medio climático y se lo multiplica por 100 para llegar a su expresión porcentual, tal como se puede observar en la ecuación 3 para heladas otoñales y en la ecuación 4 para las primaverales.

$$IPAHO\%anómalo = \left[\left(\sum_{i=1}^{nFP20-HO} Tmd_i / STN - HO \right) - 1 \right] * 100 \quad (3)$$

$$IPAHP\%anómalo = \left[\left(\sum_{i=181}^{nFP80-HP} Tmd_i / STN - HP \right) - 1 \right] * 100 \quad (4)$$

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados numéricos más destacados del análisis propuesto en el presente trabajo son presentados a continuación en el cuadro N°2 para la ocurrencia y peligrosidad de heladas otoñales y en el cuadro N°3 para las heladas primaverales.

La sexta columna del cuadro N°2 presenta el índice de peligrosidad anual de primeras heladas mínimo de la serie en forma de anomalía porcentual (IPAHO%anómaloMIN) para cada localidad; la séptima lo hace en forma análoga para su valor máximo (IPAHO%anómaloMAX), mientras que la última columna presenta la diferencia entre ambos representando el rango de fluctuación obtenido para este indicador (RANGOIPAHO%) según serie y localidad representada. Las últimas tres columnas del cuadro N°3 presentan los resultados equivalentes a los antes descritos pero obtenidos para las heladas primaverales, nombrados según IPAHP%anómaloMIN, IPAHP%anómaloMAX y RANGOIPAHP%.

Al observar los IPAHO del cuadro N° 2 muestra valores menores al 12 % tanto en su anomalía negativa (con excepción de Pergamino) como en su anomalía positiva (con excepción de Manfredi), mientras que al observar sus análogos IPAHP del cuadro N° 3 sus valores resultan casi sin excepción superiores al 12 % y en varias localidades dobla el valor de peligrosidad indicado para heladas otoñales en el mismo sitio.

Ciertamente este efecto es proveniente de las diferencias de integración térmica que se producen en un año en particular respecto de su valor normal. Y respecto de este último porque por

Cuadro N°2: Parámetros de distribución de heladas otoñales (FM-HO y DS) valores entre paréntesis en DDA, fecha FP20-HO, suma térmica normal (STN-HO), valores extremos y rango para el índice de peligrosidad anual de heladas otoñales (IPAHO), según localidad analizada.

Nombre	FM-HO	DS	FP20-HO	STN-HO	IPAHO% anómaloMIN	IPAHO% anómaloMAX	RANGO IPAHO%
Ezeiza	28 may (148)	19	12 may (132)	2682	-9	7	16
Castelar	27 may (147)	19	11 may (131)	2681	-9	8	17
Pergamino	20 may (140)	20	3 may (123)	2454	-28	11	39
Junín	22 may (142)	22	4 may (124)	2498	-25	10	35
M. Juárez	23 may (143)	21	6 may (126)	2711	-10	7	17
Manfredi	14 may (134)	19	27 abr (117)	2441	-11	16	27
Gral. Pico	9 may (129)	20	22 abr (112)	2379	-7	10	17
Anguil	23 abr (113)	26	1 abr (91)	1943	-7	9	16
V. Mercedes	20 abr (110)	17	6 abr (96)	2016	-6	6	12
San Rafael	13 may (133)	20	26 abr (116)	2362	-8	9	17
Mendoza	9 jun (160)	19	24 may (144)	2849	-6	7	13

Cuadro N°3: Parámetros de distribución de heladas primaverales (FM-HP y DS) valores entre paréntesis en DDA, fecha FP20-HP, suma térmica normal (STN-HP), valores extremos y rango para el índice de peligrosidad anual de heladas primaverales (IPAHP), según localidad analizada.

Nombre	FM-HP	DS	FP80-HP	STN-HP	IPAHP% anómaloMIN	IPAHP% anómaloMAX	RANGO IPAHP%
Ezeiza	05 set (248)	24	24 set (267)	1004	-12	11	23
Castelar	31 ago (243)	22	18 set (261)	920	-20	18	38
Pergamino	15 set (258)	20	2 oct (275)	1052	-28	24	52
Junín	9 set (252)	17	23 set (266)	922	-29	20	49
M. Juárez	13 set (256)	19	29 set (272)	1133	-14	18	32
Manfredi	20 set (263)	16	4 oct (277)	1105	-19	19	38
Gral. Pico	18 set (261)	20	4 oct (277)	1059	-13	16	29
Anguil	09 oct (282)	20	26 oct (299)	1283	-12	14	26
V. Mercedes	16 oct (289)	21	3 nov (307)	1487	-11	14	25
San Rafael	21 set (264)	18	7 oct (280)	1028	-15	15	30
Mendoza	22 ago (234)	15	4 set (247)	667	-20	17	37

construcción el índice propuesto considera períodos del año y temperaturas muy distintos para su integración tanto para las heladas otoñales como para las primaverales, partiendo desde su arranque por los días escogidos para el inicio de las sumas. La peligrosidad primaveral se obtiene de sumar valores de temperaturas progresivamente en ascenso (asociada a menores velocidades de desarrollo vegetal) lo que hace que las fluctuaciones de las sumas anuales resulten en anomalías de mayor magnitud al ser proporcionadas respecto a su valor climático de suma, mientras que la peligrosidad otoñal lo hace desde pleno verano con altas temperaturas en progresivo descenso (asociada a máximas velocidades de desarrollo vegetal), con un valor climático de suma otoñal francamente mayor a las primaverales.

Este efecto plantea una diferencia conceptual importante con el índice cryokindynoscópico, puesto que en teoría una localidad con un mismo valor de ICK para heladas primaverales que otoñales (sin diferenciar probabilidad por momento de ocurrencia entre anuales y perennes) poseen igual peligrosidad mientras que lo explicado previamente hace improbable que resulten iguales el IPAHP y el IPAHO de la misma. Dicho de otra forma, el efecto de integración térmica planteado en el nuevo índice permite diferenciar la evolución en el desarrollo de un cultivo considerándola independientemente de la similitud de temperaturas entre fechas y/o localidades. En estos términos también resulta posible el concepto inverso, sea esto valores de IPAH similares en correspondencia con valores de ICK muy disímiles.

El IPAH capta el efecto de todos los meteoros

que influyen sobre la marcha anual a paso diario de las temperaturas del aire, resultando relevante al integrar pequeñas variaciones para poder asociar con su efecto biológico.

La construcción acumulativa del índice amplifica diferencias térmicas tal vez no detectables a prima facie, relevantes para el análisis de la evolución de peligrosidad de heladas frente a posibles termo periodismos asincrónicos detectados.

Dado que el carácter meteorológico del índice desarrollado genera una gran cantidad de resultados cuando se procesan series climáticas largas como en este caso, es por ello que resulta preferible presentar tabulados solo aspectos relevantes como los valores extremos y el rango de oscilación del mismo en forma de anomalía a lo largo de la serie para las localidades analizadas; y presentar todos los resultados obtenidos mediante gráficas que amenizan su interpretación.

Sin ahondar en el detalle del análisis de las fluctuaciones de los índices a través de los años y por localidad que será motivo de estudios particulares, surge de inmediato en general que el porcentual de las anomalías para la peligrosidad de heladas primaverales representadas por los trazos grises son en general para todas las localidades analizadas prácticamente del doble en magnitud que las mismas para heladas otoñales representadas por los trazos negros. El rango de los coeficientes de variación porcentuales correspondientes a heladas primaverales observables en la figura 1 resultó prácticamente entre 7 y 10 %, mientras que en consonancia a lo antedicho el correspondiente a las heladas otoñales fluctuó entre 3 y 5 %, exceptuando Pergamino que resultó en 8,4% y Junín

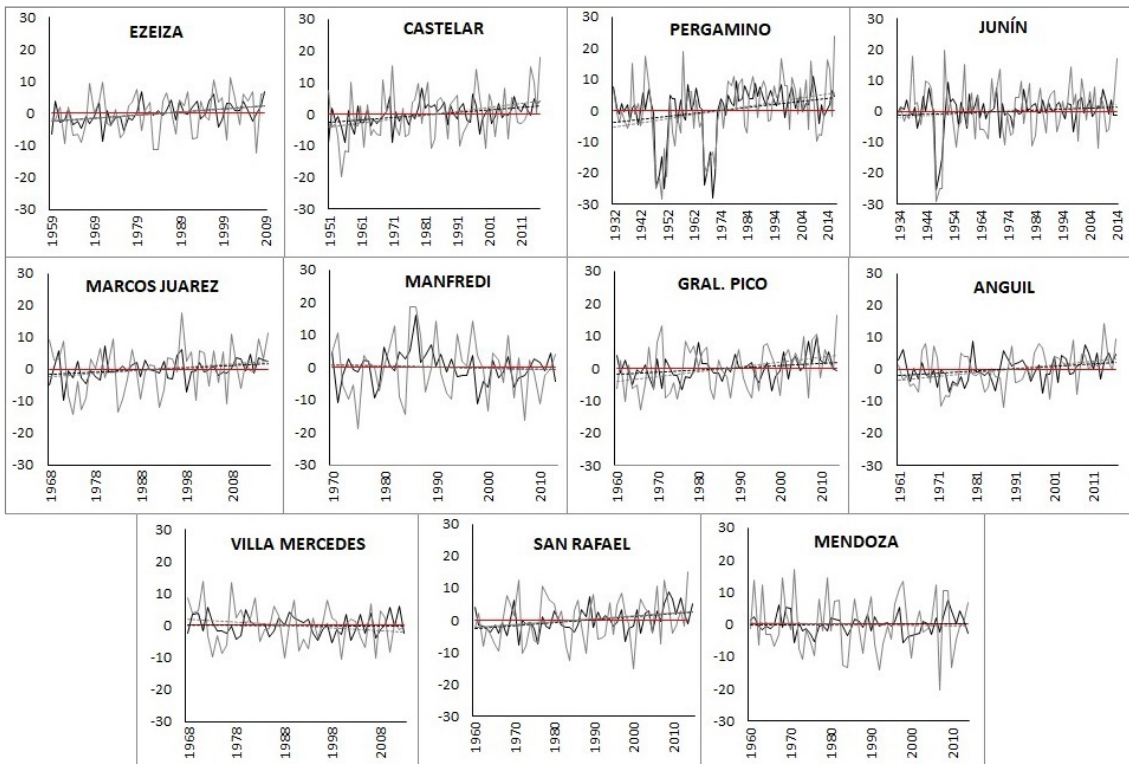


Figura 1: Índice de peligrosidad anual de helada (IPAH) presentado según serie temporal analizada por localidad. El eje horizontal cero resalta la situación normal, el trazo gris continuo corresponde al IPAH y la línea gris punteada su tendencia lineal; mientras el trazo negro continuo corresponde al IPAO y la línea negra punteada su tendencia lineal.

con 5,2% debido a las fuertes anomalías negativas que presentan en los valores más antiguos de sus series. Esto es particularmente importante debido a que puede representar variabilidad interanual en el desarrollo y sensibilidad de los cultivos mucho más marcada y peligrosa de sufrir daño por bajas temperaturas a la salida del receso invernal y con niveles de temperatura más bajos que hacen que sus fluctuaciones sean proporcionalmente más importantes que en los niveles otoñales provenientes de sumas iniciadas en el verano.

Exceptuando Manfredi, Villa Mercedes y Mendoza que parecen tener una inexistente o leve tendencia negativa, el resto mayoritariamente presentan tendencias temporales positivas más o menos marcadas lo cual de confirmarse implicaría un aumento histórico en la peligrosidad del índice.

A simple vista a través de las localidades e incluso tanto para heladas otoñales como primaverales pareciera que existe mayor cantidad de años con anomalía positiva que negativa pero paralelamente también se observa que en general la magnitud de las anomalías negativas es mayor que las positivas.

Para despejar dudas al respecto las figuras 2

y 3 muestran la comparación de las localidades a través de sus índices de peligrosidad propuestos para heladas otoñales IPAOH como primaverales IPAH y ordenados en su valor absoluto lo cual grafica su frecuencia acumulada y su balance como anomalía es comparable en termino de longitud de la serie analizada al cruzar el eje cero representativo de condición normal, acompañando para mayor detalle de asimetrías el valor mediano correspondiente a cada serie.

En cuanto a la utilización del IPAH, tal como es aquí propuesto, se debe presuponer que conforme avanza la acumulación de °Cd, el estado fenológico resulta más avanzado en su ciclo, provocando que el cultivo se encuentre más susceptible frente a la ocurrencia de una helada. Ante el supuesto planteado, debemos considerar que la suma térmica se relaciona con el crecimiento/desarrollo tal como la conocemos, siempre y cuando no se encuentren otros factores como limitantes (agua, luz, nutrientes, etc.), tal como lo afirma la ley de Liebig; ni que los mismos excedan umbrales de tolerancia, conforme a la ley de Shelford, dando lugar a interacciones y respuestas aún poco documentadas. Esto solo es válido para cultivos que aumentan su

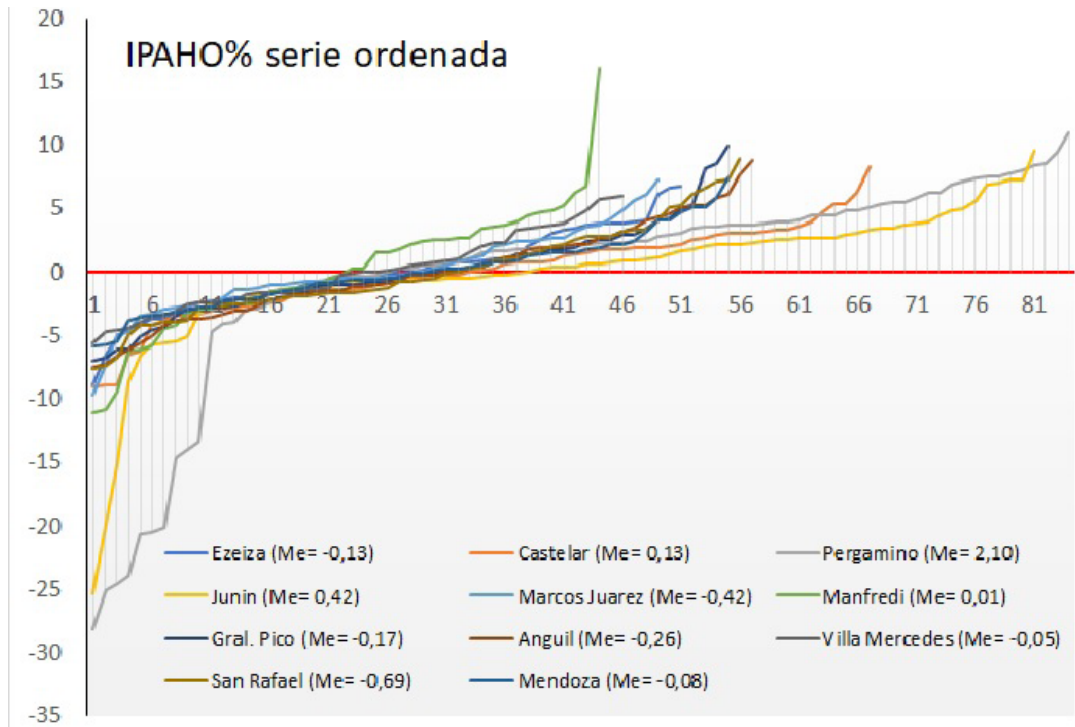


Figura 2: Índice de peligrosidad anual heladas otoñales presentado como anomalía porcentual (IPAHO%anómalo) y ordenados por su valor. Eje de abscisas representa la longitud en años de las series, los orígenes no son coincidentes cronológicamente. (Me) Representa la mediana para cada serie.

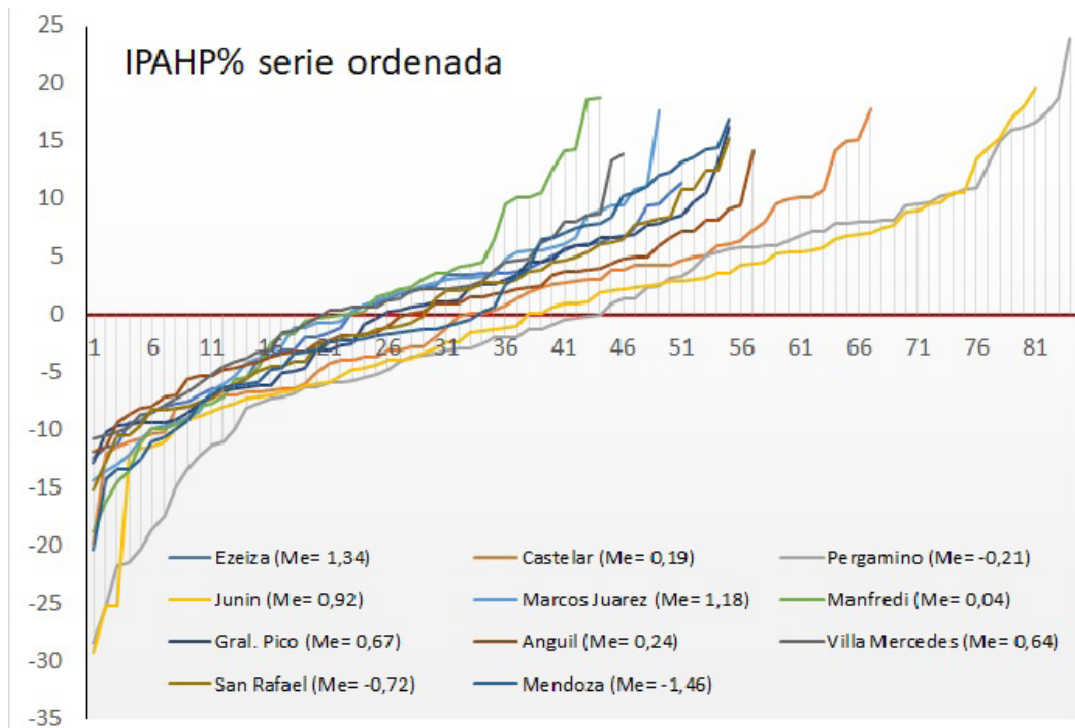


Figura 3: Índice de peligrosidad anual heladas primaverales presentado como anomalía porcentual (IPAHP%anómalo) y ordenados por su valor. Eje de abscisas representa la longitud en años de las series, los orígenes no son coincidentes cronológicamente. (Me) Representa el valor mediado de la serie.

susceptibilidad conforme avanza con el estado de desarrollo, aunque es sabido que muchas especies adquieren una mayor tolerancia a las bajas temperaturas en los estadios fenológicos vegetativos intermedios (ej: roseta, macollaje, etc.) y luego incrementan su sensibilidad conforme avanza su ciclo. El presente trabajo no alcanza a considerar dicha salvedad, quedando abierta la posibilidad de adaptar el índice a las necesidades particulares de cada cultivo.

Por otra parte, el retorno de daño por helada económicamente aceptable podría resultar diferente a uno de cada cinco años como el utilizado arbitrariamente en el presente análisis, por tal motivo, el mismo puede ser variado sin perjuicio de los resultados para ajustarse al riesgo máximo que para cada caso en particular se desee incurrir. Además, es factible realizar seguimientos y tendencias a tiempo real y pronósticos de la evolución de la peligrosidad expresada por este índice respecto de la probabilidad estadística elegida.

CONCLUSIONES

Los resultados hasta aquí alcanzados convierten al IPAH propuesto en una metodología potencialmente dúctil para la valoración interanual de la peligrosidad de heladas, utilizando solo dos varia-

bles de fácil interpretación, cálculo sencillo y resultado preciso.

BIBLIOGRAFÍA

- Burgos, J. J. (1947). A Cryokindynoscopie index useful in agroclimatic researches. Serv. Meteor. Nac. Buenos Aires. CIR/INO/T 305. Cag. M Doc número 30, Toronto, Mimeogr.
- Burgos, J.J. (1963). *Las heladas en la Argentina*. Buenos Aires: Colección Científica del I.N.T.A. 389 pp.
- Fernández Long, M. E., Murphy, G., & Torterolo, M. K. (2008). Índice de riesgo sistémico de heladas (IRISH). *Agronomía Tropical*, 58(1), 65-68.
- Murphy, G. y R. Hurtado. (2011). *Agrometeorología*. Buenos Aires: Editorial FAUBA.
- Lindkvist, L.; Chen, D. (1999). Air and soil frost in relation to plant mortality in elevated clear-felled terrain in Central Sweden. *Climate Research* 12: 65-75.
- Lhomme, J. P., & Guillioni, L. (2004). A simple model for minimum crop temperature forecasting during nocturnal cooling. *Agricultural and forest meteorology*, 123(1-2), 55-68.
- Pascale, A. J. y E. A. Damario. (1958). Fecha de floración de frutales y probabilidades de daño por heladas. Congreso Frutícola Argentino. Actas: 103-118. Cipolletti, Río Negro.

Hacia el pronóstico anticipado del rendimiento potencial de maíz en el centro-sudeste bonaerense: relaciones con la duración de los subperíodos vegetativo y reproductivo

Irigoyen, A.I., Panunzio Moscoso, M.P., Cambareri, M.A. y Echarte, L.

RESUMEN

Cambios en los patrones climáticos modifican la estación de crecimiento de los cultivos y así las condiciones ambientales a las que quedan expuestos y, por ende, el rendimiento resultante. La evaluación de prácticas de manejo agrícola mediante generación de escenarios de simulación permite formular estrategias de adaptación para minimizar los riesgos y aprovechar los beneficios. El objetivo fue evaluar la relación entre el rendimiento potencial (Y_{max}) y la duración de la estación de crecimiento (EC) y de los subperíodos vegetativo (S-R1) y reproductivo (R1-R6) para maíz por efecto de la fecha de siembra y madurez del cultivar en el centro-sudeste de Buenos Aires. Los escenarios agrícolas seleccionados para la presente evaluación combinaron seis fechas de siembra y tres ciclos de madurez. Las estaciones de crecimiento (serie 1971-2010) fueron simuladas mediante un modelo de desarrollo basado en la temperatura del aire. El método de simulación fue aplicado para cuatro localidades (Azul, Tandil, Balcarce y Mar del Plata). Los subperíodos vegetativo y reproductivo de la estación de crecimiento (EC) fueron calculados con base en la fecha de ocurrencia de floración (R1) y madurez fisiológica (R6). El rendimiento potencial (Y_{max}) de cada escenario fue estimado mediante el producto de evapotranspiración máxima (ETM) y la eficiencia de uso de agua (EUA). Índices de productividad ambiental fueron propuestos para evaluar los efectos de la fecha de siembra sobre el rendimiento potencial para cada ciclo de madurez y localidad mediante la variación de la duración de los subperíodos de desarrollo. El atraso de la fecha de siembra expone al cultivo a condiciones del ambiente más productivas durante el subperíodo vegetativo. Los beneficios de la cuantificación de la productividad ambiental pueden ser extendidos a la evaluación de estrategias agronómicas bajo un clima cambiante.

Palabras clave: fechas de siembra, ciclos de madurez, floración, madurez fisiológica, índices de productividad ambiental

Irigoyen, A.I., Panunzio Moscoso, M.P., Cambareri, M.A. and Echarte, L., 2018. Towards early prediction of potential yield for maize in center-southeastern of Buenos Aires: Relationships with the extension of vegetative and reproductive subperiods. RADA IX: 31-45

SUMMARY

Changes in climate patterns modify the crop growing season and the environment of exposure and then, the resultant yield. The assessment of agricultural practices by generation of scenarios is useful to identify options of adaptation to minimize risks and improve the benefits. The objective was to assess the relation of potential yield (Y_{max}) to the extension of growing season (EC) and the vegetative (S-R1) and reproductive (R1-R6) subperiods for maize as affected by planting date and maturity cultivar in center-southeastern of Buenos Aires. Six planting dates and three cultivars with contrasting maturity were selected for the simulation scenarios. The maize growing season agroclimatology (1971-2010) was based on a simple model of crop development using growing degree-days as estimator. The approach was performed for four locations of the region. Dates of key stages of development (flowering, R1 and physiological maturity, R6) were predicted. Vegetative and reproductive subperiods were calculated based on timing of occurrence of R1 and R6. Potential yield (Y_{max}) of each scenario was estimated by the product between maximum evapotranspiration (ETM) and water use efficiency (EUA). Environmental indexes were proposed to assess the effect of planting dates on potential yield for each maturity cultivar and location through the variation on duration of developmental subperiods. Delay in planting date exposes the crop to more productive conditions during vegetative subperiod. Benefits of quantification of environmental productivity could be extended to the assessment the agricultural strategies for a changing climate.

Key words: planting date, contrasting maturity cultivars, flowering, physiological maturity, environmental productivity indices

Irigoyen, A.I., Panunzio Moscoso, M.P., Cambareri, M.A., Echarte, L.: Unidad Integrada Balcarce: Facultad de Ciencias Agrarias UNMdP -INTA Balcarce. Ruta Nac. 226, km 73,5, Balcarce CC 276 (7620), Argentina. Correspondencia a: irigoyen.andrea@inta.gov.ar

INTRODUCCIÓN

Se han detectado cambios en los patrones climáticos y en la producción agrícola (Magrin *et al.*, 2005; Barros, 2007, Magrin *et al.*, 2007; Travasso *et al.*, 2007; Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable, 2015). Fernández Long *et al.* (2013) indicaron un calentamiento regional sobre el área agrícola de Argentina, debido principalmente al aumento de las temperaturas mínimas. No obstante, las tendencias de los índices bioclimáticos basados en la temperatura no se distribuyeron de manera uniforme en toda la región. Los cambios observados en índices bioclimáticos pueden indicar cambios en las estaciones de crecimiento de los cultivos.

En el sudeste de la provincia de Buenos Aires, Irigoyen *et al.* (2011) han descrito una tendencia creciente en los grados-días acumulados durante dos trimestres que son coincidentes con la estación de crecimiento del cultivo de maíz para un conjunto de combinaciones de prácticas de

manejo. En virtud de las tendencias descriptas en los índices bioclimáticos, se esperan cambios en la ocurrencia de los estados fenológicos sensibles del cultivo y así sobre el grado de exposición a las amenazas, que también pueden cambiar en el tiempo.

En ese sentido, la generación de escenarios agrícolas (estaciones de crecimiento asociadas a prácticas de manejo), a partir de modelos de simulación del desarrollo del cultivo con base en series meteorológicas, provee información factible de ser analizada probabilísticamente y como serie de tiempo.

En maíz, el momento de ocurrencia de la floración (R1) y de la madurez fisiológica (R6) dentro de la estación de crecimiento (EC) definen la duración de los subperíodos vegetativo y reproductivo (o también denominados pre y posfloración). La variabilidad de las fechas de R1 y R6 en la zona centro-sudeste bonaerense ya fue descrita al caracterizar probabilísticamente los riesgos de adversidades como temperaturas extremas y

deficiencias de agua (Panunzio Moscoso *et al.*, 2016 a y b). En esos casos se aplicó un modelo de tiempo térmico para simular el desarrollo fenológico para diferentes escenarios que combinaron fechas de siembra y ciclos de madurez del cultivo.

Debe destacarse que, experimentalmente, la duración de los subperíodos vegetativo y reproductivo ha sido relacionada con el rendimiento en grano para las condiciones ambientales de Balcarce (Andrade *et al.*, 1996; Capristo *et al.*, 2007; Bonelli *et al.* 2016). Así, Capristo *et al.*, (2007) describieron una asociación positiva y significativa entre el rendimiento de cultivares de diferente ciclo y la radiación interceptada durante el período reproductivo. En ese caso, los incrementos en radiación interceptada acumulada al aumentar el ciclo del cultivar hasta floración se explicaron, principalmente, por cambios en la duración del período y, en menor medida, por variaciones en la radiación interceptada diaria. Por su parte Bonelli *et al.*, (2016) para dos campañas agrícolas reportaron una consistente respuesta de los rendimientos y de las relaciones fuente- destino que indican que a medida que se atrasa la fecha de siembra, el suministro de asimilados (fuente) se torna más limitante que la demanda por los granos (destino) durante el subperíodo reproductivo. El efecto negativo del atraso será menor cuanto más uniforme sea la oferta radiativa y térmica durante la estación de crecimiento (Cirilo *et al.*, 1996). Según Egli (2011) existe alta potencialidad de mejora de los rendimientos de maíz mediante la modificación de la duración de los subperíodos de desarrollo.

Es de interés, por una parte, corroborar si las variaciones en la duración de los subperíodos vegetativo y reproductivo tienen el mismo efecto en la generación del rendimiento en otras localidades de la región centro-sudeste de Buenos Aires y, por otra parte, proponer índices de productividad ambiental que permitan comparar estrategias de manejo agronómico que afectan tanto el desarrollo como el rendimiento de los cultivos.

Se han descripto las variaciones en el rendimiento potencial (Y_{max}) y en el rendimiento real (Y) asociadas a diferentes escenarios de fecha de siembra y ciclo de madurez, pero aún no se profundizó la evaluación de la relación entre los rendimientos del cultivo y la duración de los subperíodos. El enfoque probabilístico y de comparación específica de escenarios como el abordado en los trabajos de Panunzio *et al.* (2016, a y b) es útil para la toma de decisiones, mientras que este enfoque basado en productividad ambiental puede contribuir por una parte con la modelización del desarrollo y la producción y con metodologías de pronóstico anticipado de rendimiento y por otra,

con la propuesta de estrategias de manejo que maximicen el rendimiento del cultivo.

El objetivo principal de este trabajo fue evaluar las relaciones entre el rendimiento potencial y la duración de los subperíodos fenológicos de maíz en localidades del centro-sudeste bonaerense, obtenida mediante el análisis del desarrollo simulado del cultivo para escenarios agrícolas que combinan diferentes fechas de siembra y ciclos de madurez. Los objetivos específicos fueron: a) evaluar la relación entre la duración del subperíodo vegetativo y la duración de la estación de crecimiento para los diferentes escenarios; b) cuantificar la productividad ambiental asociada a cambios en la duración de los subperíodos vegetativo y reproductivo mediante índices que integran la duración relativa de los subperíodos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Escenarios agrícolas por simulación del desarrollo del cultivo

Los escenarios agrícolas evaluados en cuatro localidades de la zona centro-sudeste de Buenos Aires (Tabla 1) fueron generados combinando seis fechas de siembra, desde fines de septiembre (25-09) hasta mediados de noviembre (15-11) y tres ciclos de madurez del cultivo de maíz (corto (1), intermedio (2) y largo (3)).

Tabla 1. Ubicación geográfica de las localidades en estudio.

Localidad	Latitud	Longitud	Altura sobre nivel del mar (m)
Azul	-36° 50'	59° 51'	132
Tandil	-37° 19'	59° 08'	175
Balcarce	-37° 45'	58° 18'	130
Mar del Plata	-38° 00'	57° 32'	21

La estación de crecimiento (EC) en cada escenario (fecha de siembra x ciclo) fue simulada para cada localidad y cada campaña agrícola (1971-1972 a 2009-2010), mediante un modelo simple de desarrollo del cultivo basado en el concepto de tiempo térmico (Ritchie y NeSmith, 1991). Un subperíodo específico se consideró completo cuando fue alcanzada una determinada suma térmica preestablecida por encima de la temperatura base del cultivo (8 °C). Si bien existe una variedad de modelos de predicción fenológica basados en la relación entre desarrollo y temperatura (Kumudini *et al.*, 2014), la simplicidad de cálculo fue el criterio seguido para seleccionar el modelo residual. En este modelo, el tiempo

térmico se determina como la sumatoria de las diferencias entre la temperatura media diaria del aire y la temperatura base.

La duración de la estación de crecimiento (EC) para cada escenario y cada campaña agrícola (1971-1972 a 2009-2010) quedó definida como el período comprendido entre la siembra (S) y la fecha estimada de madurez fisiológica (R6). Los requerimientos térmicos utilizados para simular las fechas de ocurrencia de la floración (R1) y la madurez fisiológica (R6) fueron seleccionados a partir de la información reportada para un grupo de cultivares de diferente madurez comúnmente empleados en la zona de estudio (Tabla 2) (Capristo *et al.*, 2007).

Tabla 2. Requerimiento térmico de los subperíodos siembra-floración (S-R1) y floración-madurez fisiológica (R1-R6) para cultivares de maíz de corto (Ciclo 1), intermedio (Ciclo 2) y largo (Ciclo 3) ciclo de madurez.

Cultivar	Tiempo térmico (°Cd)	
	S-R1	R1-R6
Ciclo 1	660	840
Ciclo 2	760	870
Ciclo 3	870	860

Además de la duración (en días) de la estación de crecimiento (EC) y de los subperíodos vegetativo (S-R1) y reproductivo (R1-R6) se calcularon otras expresiones adimensionales asociadas: i) relación de duración entre subperíodos vegetativo y reproductivo (DRVR), ii) relación de duración del subperíodo vegetativo al total de la estación de crecimiento (DRVEC) como:

$$DRVR = \frac{\text{duración del subperíodo vegetativo (días)}}{\text{duración del subperíodo reproductivo (días)}} \quad (1)$$

$$DRVEC = \frac{\text{duración del subperíodo vegetativo (días)}}{\text{duración la estación de crecimiento EC (días)}} \quad (2)$$

Relación entre el rendimiento potencial y la duración de la estación de crecimiento y de los subperíodos vegetativo y reproductivo

El rendimiento máximo o potencial (Y_{max}) en cada escenario (fecha de siembra x ciclo de madurez) fue estimado para cada localidad y cada campaña agrícola (1971-1972 a 2009-2010) a partir del producto entre la evapotranspiración máxima (ETM) estacional y la eficiencia de uso del agua (EUA) del cultivo de maíz.

Se asumió un valor de EUA de $22 \text{ kg ha}^{-1}\text{mm}^{-1}$ que fue estimado a partir del cociente entre el rendimiento potencial de cultivares actuales,

recientemente evaluados por Bonelli (2014), y la ETM estacional de las campañas agrícolas en las cuales este autor determinó el rendimiento. Se determinó la ETM de cada escenario evaluado en este trabajo a partir del producto de la evapotranspiración de referencia (ET0) estimada por el método de Penman-Monteith (Allen *et al.*, 1998) y el coeficiente de cultivo (Kc). El coeficiente Kc en cada estación de crecimiento de la serie histórica se calculó en función del tiempo térmico acumulado (Della Maggiora *et al.*, 2003) para el período comprendido entre 0,20 y 1,00 de la fracción de tiempo térmico acumulado en el total de la estación de crecimiento (ocurrencia de R6). En el período previo, desde 90 días antes de la siembra y hasta el 0,20 de la fracción de tiempo térmico acumulado, el valor de Kc se estimó siguiendo las recomendaciones de Allen *et al.* (1998). Cabe aclarar que se inició el balance de agua a los 90 días previos de la primera fecha de siembra, con un valor de almacenaje igual al límite máximo de almacenaje (valor altamente probable en toda la región en la cual se recarga completamente el perfil de suelo durante el invierno) y de esa forma fue posible determinar el almacenaje al momento de siembra de cada escenario en cada campaña agrícola. Las variaciones en la evolución del Kc de acuerdo con los escenarios agrícolas han sido discutidas en Panunzio Moscoso *et al.* (2014).

Se evaluó el grado de asociación entre el rendimiento potencial (Y_{max}) con la duración de la estación de crecimiento (EC) y de los subperíodos vegetativo (S-R1) y reproductivo (R1-R6), así como también con las relaciones adimensionales definidas en las ec. 1 y 2, mediante los coeficientes de correlación lineal de Pearson (nivel de significancia al 0,05).

Se realizaron los ajustes por regresión lineal entre el rendimiento potencial (Y_{max}) y las relaciones adimensionales de duración (DRVR y DRVEC) por localidad y ciclo de madurez. Para evaluar el efecto de la duración de la estación de crecimiento (EC) y de la duración de los subperíodos sobre el rendimiento potencial (Y_m) se calcularon dos índices que representan la tasa de productividad potencial del ambiente por cada ciclo de madurez y localidad ponderados, respectivamente, por la duración (expresada en días) de EC y del subperíodo vegetativo:

$$TP_{MaxEC} = \frac{Y_{max}(\text{kgha}^{-1})}{\text{duración de la EC (días)}} \quad (3)$$

$$TP_{MaxV} = \frac{Y_{max}(\text{kgha}^{-1})}{\text{duración del subperíodo vegetativo (días)}} \quad (4)$$

Para comparar la productividad ambiental entre localidades se expresaron las tasas TPM_{Max}EC y TPM_{Max}V de cada fecha de siembra con relación al valor máximo obtenido en cada localidad por cada ciclo de madurez.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Estación de crecimiento (EC) y duración relativa de los subperíodos vegetativo y reproductivo en los escenarios de manejo simulados

En la Figura 1 se presenta la distribución en el calendario de la estación de crecimiento y de los subperíodos vegetativo (S-R1) y reproductivo (R1-R6) para los diferentes escenarios de fechas de siembra y ciclos de madurez. No se habían detectado (Panunzio *et al.*, 2016 a) diferencias significativas en la duración de la EC entre las localidades de Mar del Plata, Tandil y Balcarce, pero sí entre éstas y Azul. En Azul, la estación fue más corta en todas las fechas de siembra y para los tres ciclos de madurez.

Ahora también puede indicarse que, la duración del subperíodo vegetativo se reduce con relación al subperíodo reproductivo a una tasa constante para cada uno de los ciclos de madurez (Figura 2) al atrasar la fecha de siembra en el intervalo evaluado (día juliano 268 a 319). No se detectan diferencias significativas en la relación entre localidades para cada fecha de siembra y ciclo de madurez. Para cada ciclo de madurez al atrasar la fecha de siembra (entre fines de setiembre y mediados de noviembre, en correspondencia con una porción creciente de la termofase positiva), la relación de duración de los subperíodos vegetativo/reproductivo (en días) se modifica de modo que las fechas más tempranas son más vegetativas y las fechas más tardías más reproductivas.

De modo general, las siembras posteriores al día juliano 300, generan una estación de crecimiento (EC) con una extensión del subperíodo reproductivo que iguala o supera al vegetativo. Este efecto coincide con lo reportado en la literatura (Andrade *et al.*, 1996, Grassini *et al.*, 2009), pero en este trabajo se constata, además, que la relación de duración vegetativo/reproductivo se modifica a una tasa lineal constante en el segmento de fechas de siembra evaluadas para las cuatro localidades de la zona.

Para el ciclo corto de madurez, la proporción vegetativa de la estación de crecimiento (EC) se reduce con el atraso de la fecha de siembra (Figura 3) a una tasa lineal constante en las localidades bajo estudio. Una distribución espacial semejante de los

cambios fenológicos principales de la estación de crecimiento (R1 y R6) puede indicar que existe una variación similar en el patrón térmico dentro de la región durante una porción de la termofase positiva (primavera-verano). Sin embargo, cuando se trata de ciclos de madurez más largos que extienden la estación de crecimiento durante el otoño (Figura 1), los cambios en la proporción vegetativa de la EC son diferentes entre las localidades y no siempre las reducciones ocurren a tasas lineales.

Relación entre el rendimiento potencial y la duración de la estación de crecimiento y de los subperíodos vegetativo y reproductivo en los escenarios de manejo simulados

Para caracterizar las estrategias de manejo más apropiadas en la zona se discuten a continuación las relaciones entre el rendimiento potencial y la duración de la estación de crecimiento (EC) y de subperíodos, que son afectadas por las prácticas de fecha de siembra y ciclo de madurez del cultivo.

Debe destacarse que el rendimiento máximo (Y_{max}) en las fechas más tempranas de un determinado ciclo de madurez puede ser diferente entre localidades (Figura 4). No obstante, el patrón de disminución relativa al atrasar la fecha de siembra es semejante entre localidades para cada ciclo de madurez (Figura 5). Aproximadamente por cada día de atraso de la fecha de siembra en el período de tiempo evaluado, el rendimiento potencial se reduce en un 0,2-0,25%, respecto al rendimiento obtenido en la primera fecha de siembra (día juliano 268).

El rendimiento potencial (Y_{max}) se mostró asociado positiva y significativamente con la duración de la estación de crecimiento (EC), con la duración del subperíodo vegetativo (S-R1) y también con la relación DRVR, al tiempo que no se mostró asociado (ns) o estuvo escasamente asociado con la duración del subperíodo reproductivo (R1-R6) (Tabla 3). De modo general, al aumentar la relación DRVR (Figura 6) o la proporción vegetativa al total de EC, DRVEC, aumenta el rendimiento potencial (Figura 7). Cabe destacar que la mayoría de las combinaciones de manejo evaluadas generan estaciones "más vegetativas" (valores mayores a 0,5 en la Figura 6 o valores mayores a 1 en la Figura 7). En Azul y Tandil, todos los escenarios de ciclo y fecha de siembra exhiben valores de rendimiento potencial medio que superan los 12000 kg ha⁻¹, aún con una amplia variación de DRVR. En esas dos localidades, los escenarios más vegetativos (fechas tempranas y ciclos intermedios a largos) pueden superar los 14000kg ha⁻¹. Por su parte,

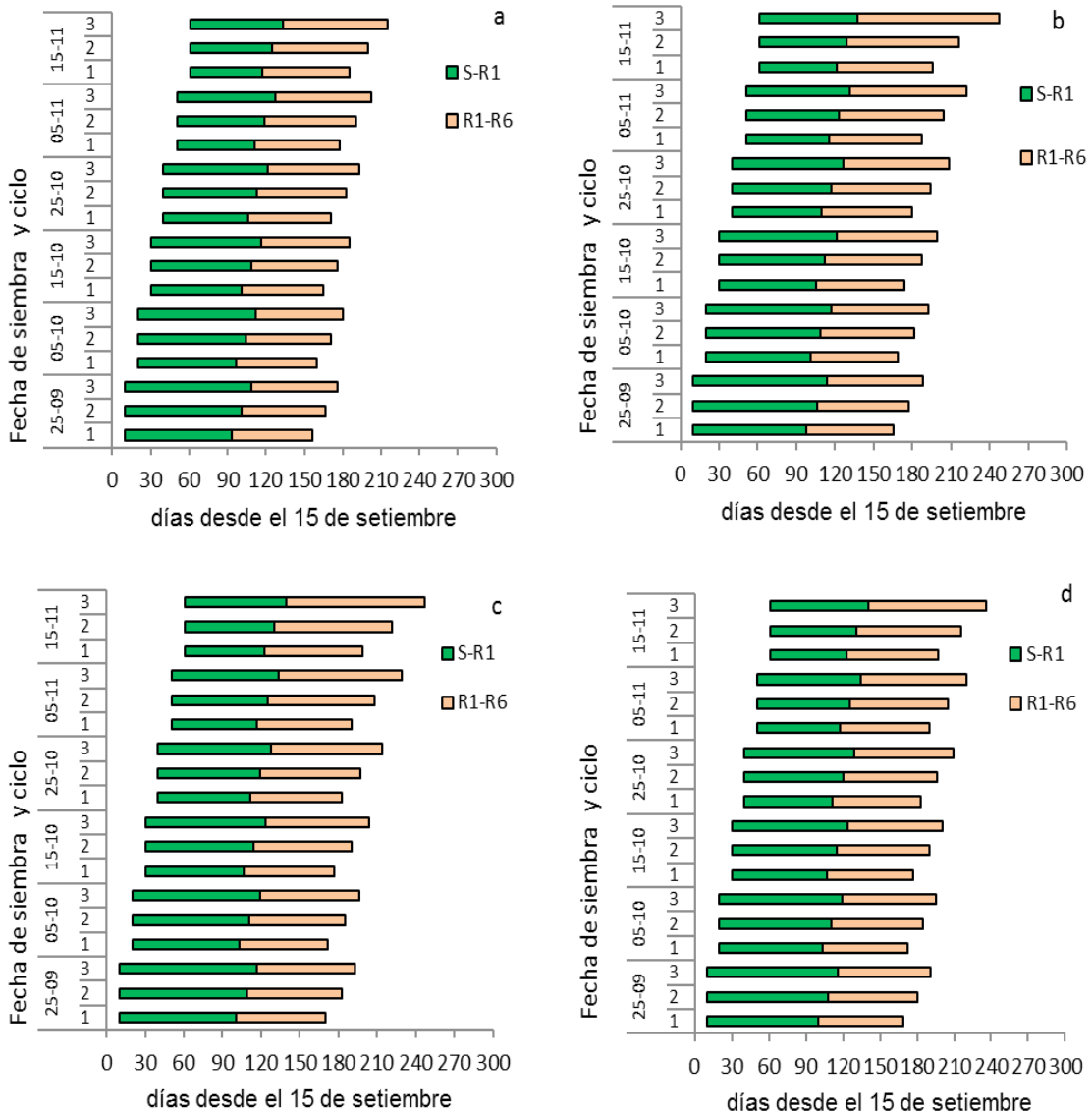


Figura 1. Distribución media (1971-2010) en el calendario de los subperíodos vegetativo (S-R1) y reproductivo (R1-R6) en la estación de crecimiento (EC) del cultivo de maíz en localidades del centro-sudeste bonaerense de acuerdo con escenarios de fecha de siembra y ciclo de madurez. A. Azul. b. Tandil. c. Balcarce. d. Mar del Plata (adaptado de Panunzio Moscoso *et al.*, 2016a).

en Mar del Plata y Balcarce, algunos escenarios de fechas tardías y ciclos cortos, con estaciones de crecimiento “más reproductivas” exhiben rendimientos potenciales medios que no alcanzan los 12000 kg ha⁻¹.

En la Figura 7 se presenta la variación media de Ymax debida a cambios en la relación DRVEC en cada ciclo por localidad. En toda la región, los cambios de Ymax por cambios en DRVEC son menores al considerar ciclos de madurez

más extensos, excepto en Azul. El análisis de la información de las Figuras 6 y 7 puede contribuir al momento de formular estrategias de manejo, mostrando, por un lado, los efectos que se pueden inferir, a partir de las ecuaciones ajustadas, para un mismo ciclo de madurez ante cambios en la fecha de siembra que, a su vez, modifican la duración de los subperíodos. Además, con referencia a la selección de estrategias de manejo basadas en la productividad ambiental de cada

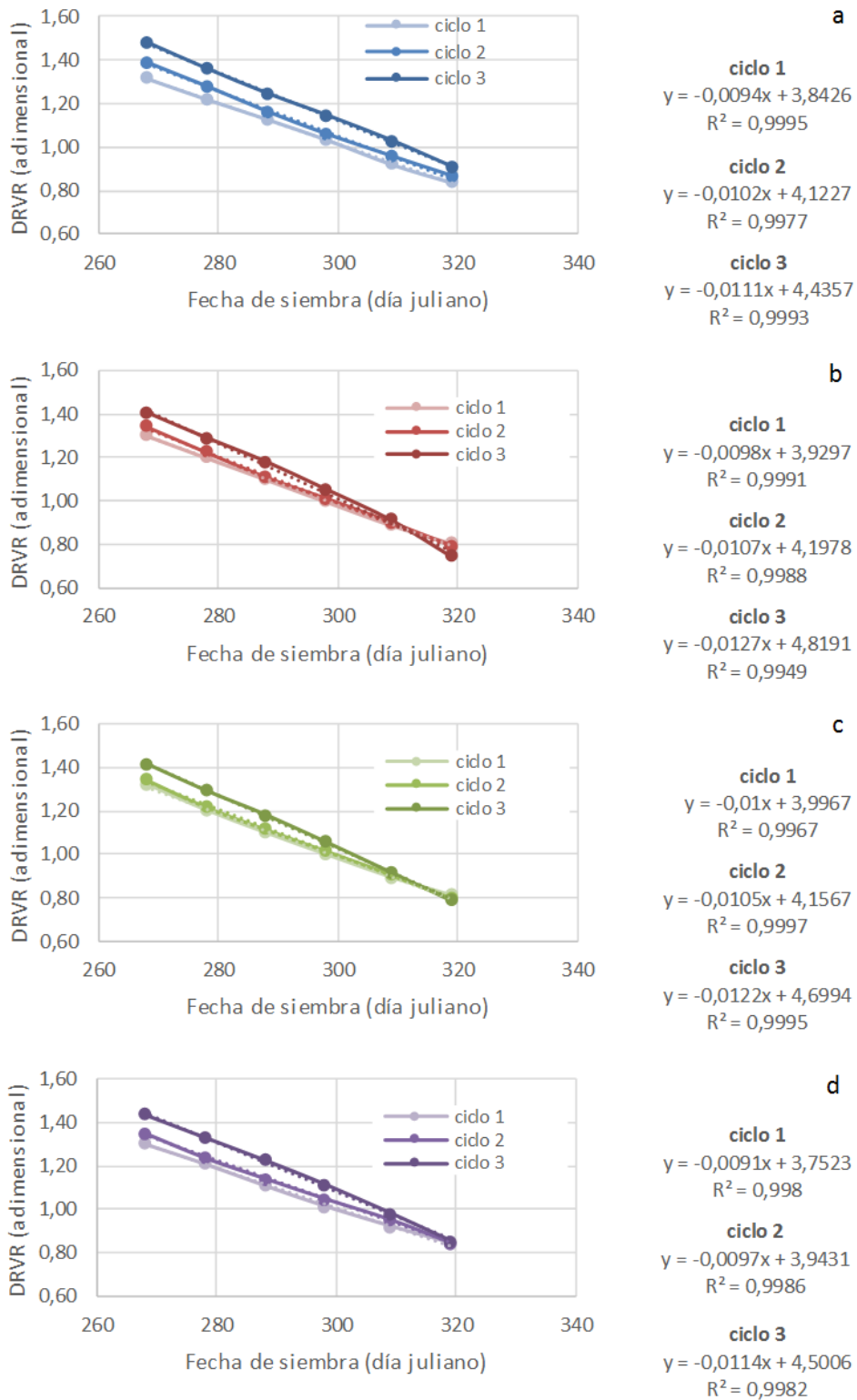
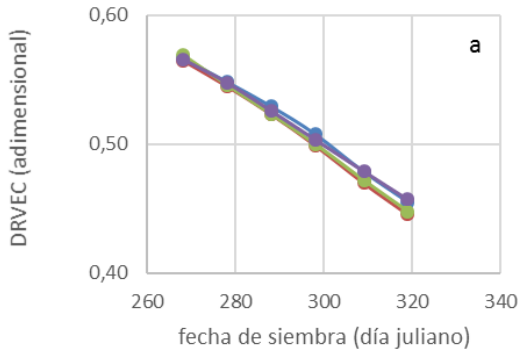
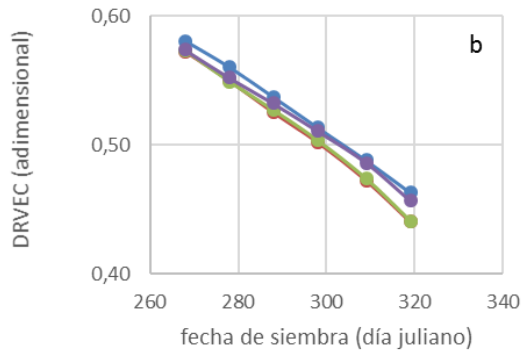


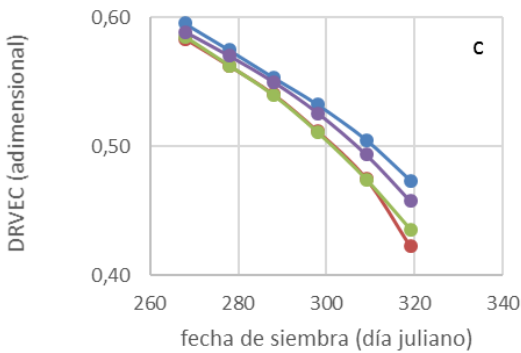
Figura 2. Variación de la duración relativa del subperíodo vegetativo a la duración del subperíodo reproductivo (DRVR) con la fecha de siembra de tres ciclos de madurez del cultivo de maíz en localidades del centro-sudeste bonaerense. a. Azul. b. Tandil. c. Balcarce. d. Mar del Plata. A la derecha se presentan los ajustes por localidad y ciclo de madurez (significativas al 0,05).



● Azul ● Tandil
● Balcarce ● Mar del Plata

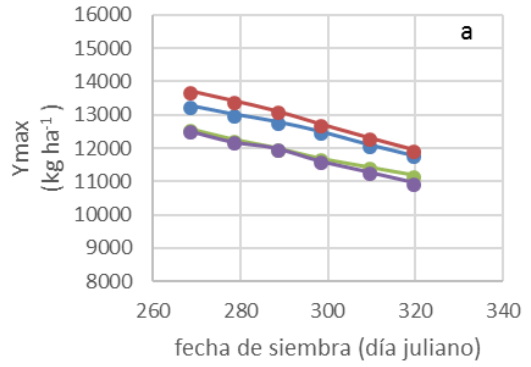


● Azul ● Tandil
● Balcarce ● Mar del Plata

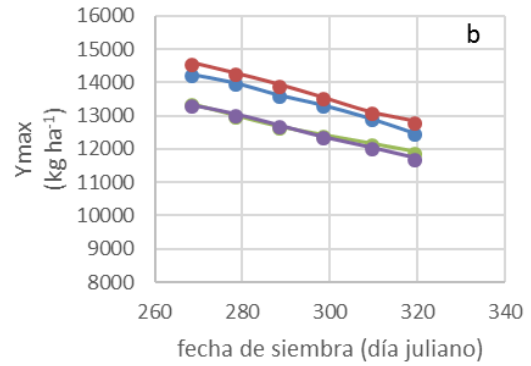


● Azul ● Tandil
● Balcarce ● Mar del Plata

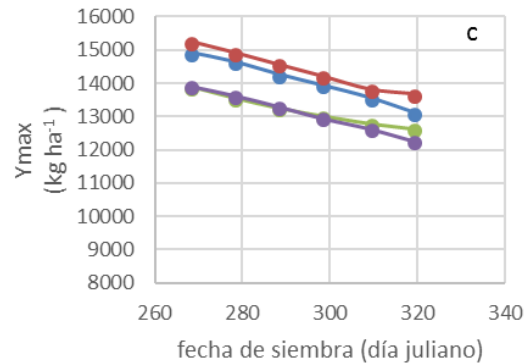
Figura 3. Variación de la duración relativa del subperíodo vegetativo en la estación de crecimiento (DRVEC) del cultivo de maíz con la fecha de siembra en localidades del centro-sudeste bonaerense de acuerdo con el ciclo de madurez. a. Ciclo 1. b. Ciclo 2. c. Ciclo 3.



● Azul ● Tandil
● Balcarce ● Mar del Plata

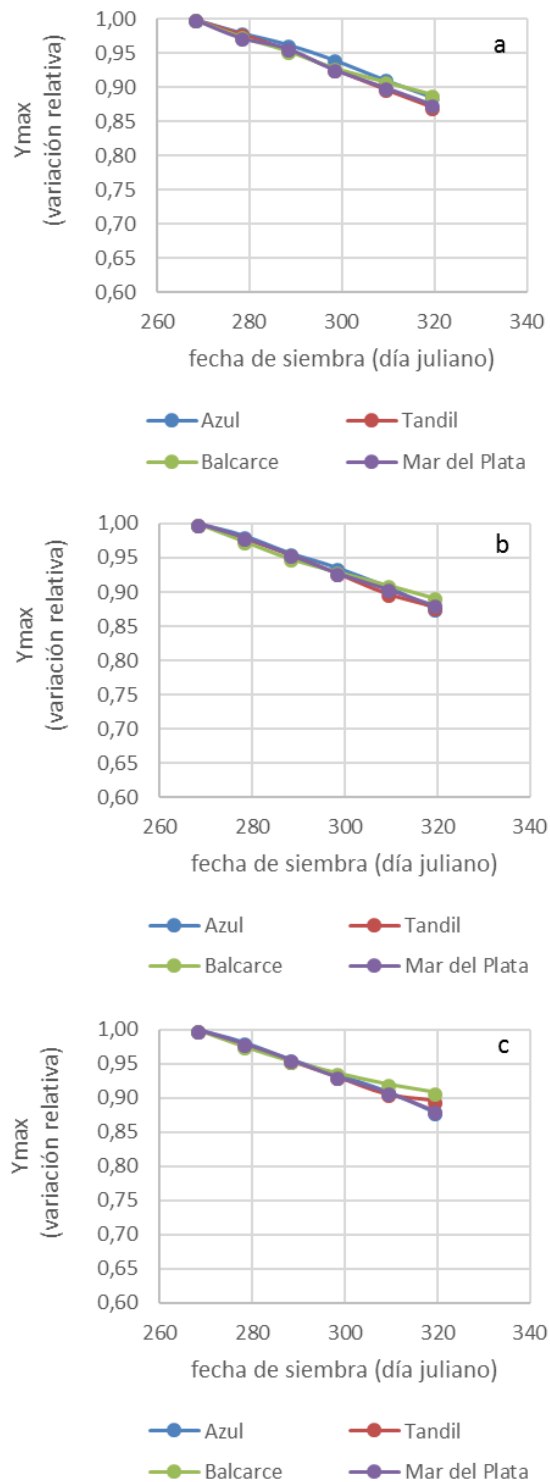


● Azul ● Tandil
● Balcarce ● Mar del Plata



● Azul ● Tandil
● Balcarce ● Mar del Plata

Figura 4. Rendimiento potencial (Y_{max}) de acuerdo con la fecha de siembra de tres ciclos de madurez de maíz en localidades del centro-sudeste bonaerense (serie 1971-2010). a. Ciclo 1. b. Ciclo 2. c. Ciclo 3. (adaptado de Panunzio Moscoso *et al.*, 2016b).



sitio, se sugiere atender la posible diferencia en la productividad ambiental que se genera en las diferentes localidades cuando se decide entre diferentes ciclos de madurez. Así, por ejemplo, en el ambiente medio de Tandil, la decisión del ciclo de madurez a sembrar puede tener mayor impacto en productividad para una determinada fecha de siembra que la decisión en Azul. Se debe mencionar, que dada la naturaleza de la estimación de Ymax (ETM x constante=EUA), los cambios en tasas de Ymax están directamente asociados a cambios en la ETM estacional o en los subperíodos.

En la Figura 8 se presenta la productividad ambiental media (1971-2010) determinada como el cociente entre el rendimiento potencial y la duración de la estación completa (TPMaxEC) para los diferentes escenarios de manejo. Es posible

Tabla 3. Coeficientes de correlación de Pearson significativos (al nivel de significancia de 0,05) entre rendimiento potencial (Ymax) del cultivo de maíz (serie 1971-2010) y expresiones asociadas con la duración de la estación de crecimiento (EC) y de los subperíodos vegetativo y reproductivo en el centro-sudeste bonaerense para tres ciclos de madurez del cultivo (n=234, 39 campañas agrícola x seis fechas de siembra).

Correlación	Localidad	Ciclo 1	Ciclo 2	Ciclo 3
Ymax vs. duración EC	Azul	0,46	0,45	0,33
	Tandil	0,49	0,34	0,22
	Balcarce	0,59	0,45	0,50
	Mar del Plata	0,49	0,39	0,19
Ymax vs. duración vegetativo (S-R1)	Azul	0,50	0,52	0,51
	Tandil	0,61	0,58	0,54
	Balcarce	0,59	0,57	0,53
	Mar del Plata	0,56	0,53	0,48
Ymax vs. duración reproductivo (R1-R6)	Azul	ns	ns	ns
	Tandil	-0,14	-0,15	ns
	Balcarce	0,17	0,15	0,32
	Mar del Plata	ns	ns	-0,14
Ymax vs. relación DRVR	Azul	0,42	0,42	0,39
	Tandil	0,56	0,49	0,34
	Balcarce	0,41	0,27	ns
	Mar del Plata	0,49	0,43	0,39
Ymax vs. relación DRVEC	Azul	0,42	0,42	0,38
	Tandil	0,55	0,47	0,30
	Balcarce	0,40	0,24	ns
	Mar del Plata	0,49	0,42	0,37

S: siembra, R1: floración, R6: madurez fisiológica
 Relación DRVR: duración relativa del subperíodo vegetativo al subperíodo reproductivo
 Relación DRVEC: duración relativa del subperíodo vegetativo en la estación de crecimiento

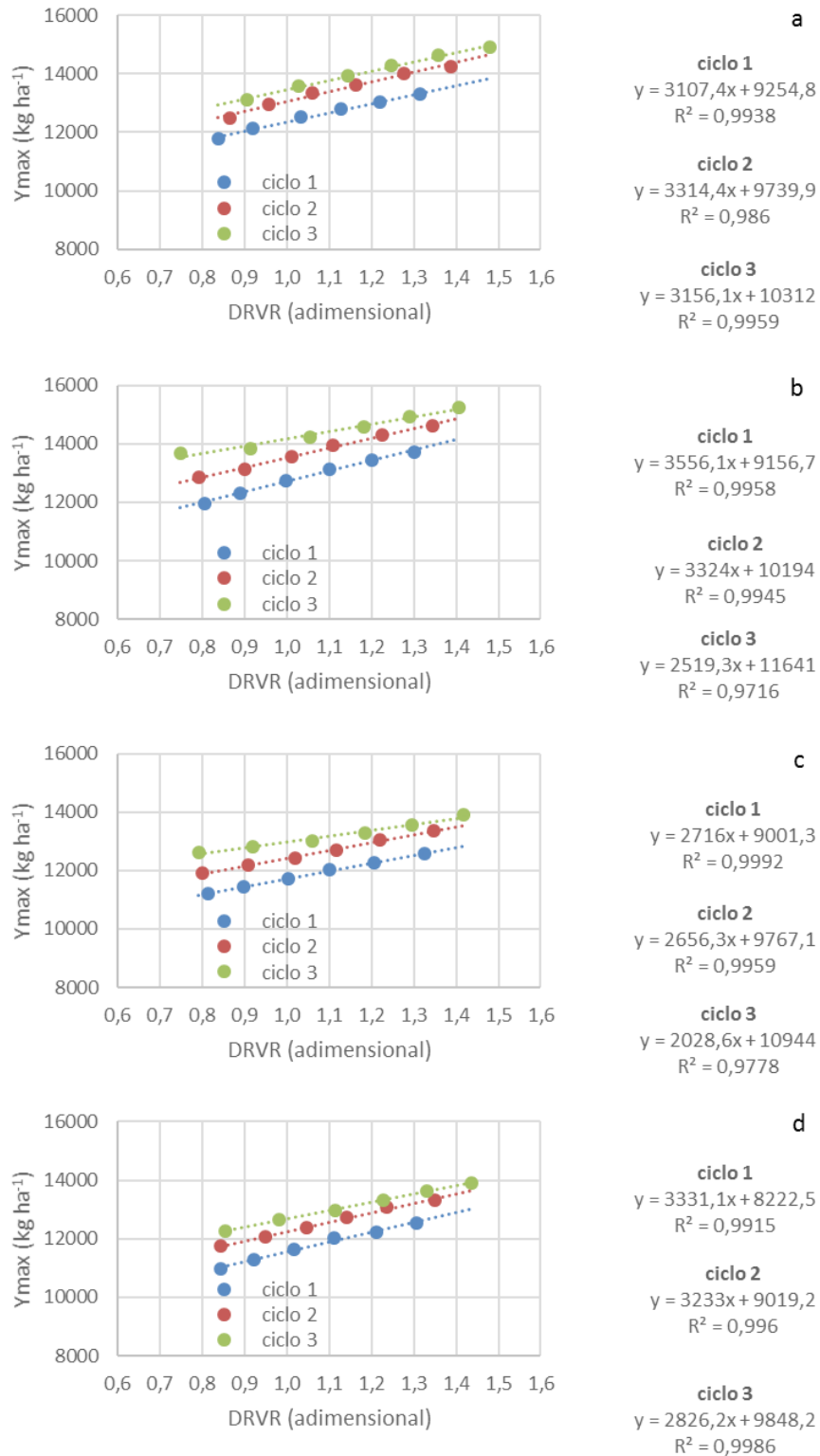


Figura 6. Variación del rendimiento potencial (Y_{max}) con la duración relativa del subperíodo vegetativo al reproductivo (DRVR) de la estación de crecimiento de tres ciclos de madurez del cultivo de maíz en localidades del centro-sudeste bonaerense. a. Azul. b. Tandil. c. Balcarce. d. Mar del Plata. A la derecha se presentan los ajustes por localidad y ciclo de madurez (significativos al 0,05).

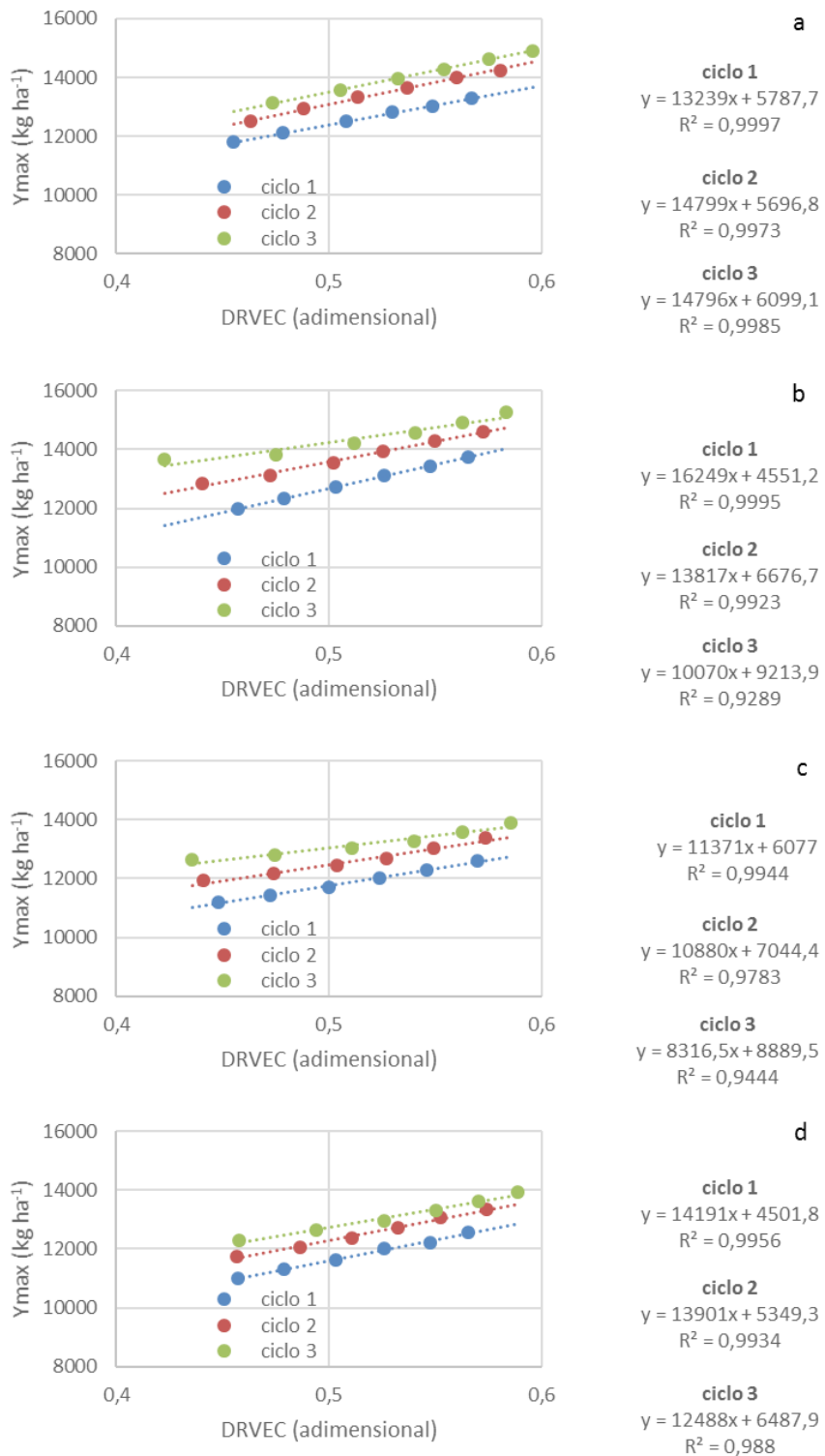
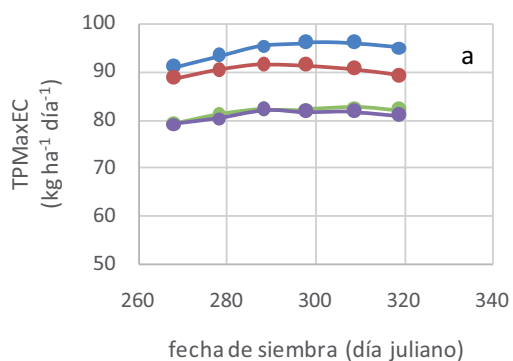
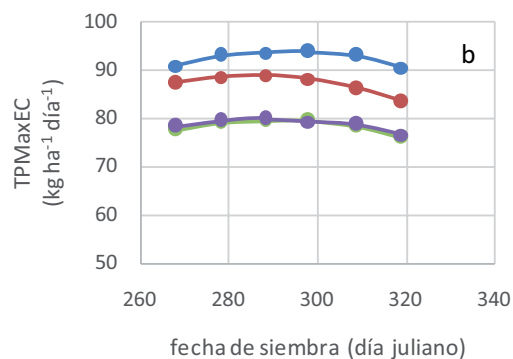


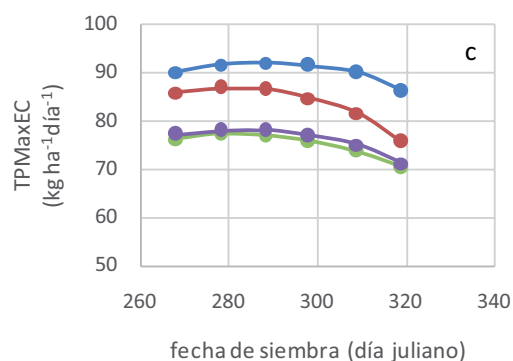
Figura 7. Variación del rendimiento potencial (Ymax) con la duración relativa del subperíodo vegetativo a la estación de crecimiento (DRVEC) de tres ciclos de madurez del cultivo de maíz en localidades del centro-sudeste bonaerense. a. Azul. b. Tandil. c. Balcarce. d. Mar del Plata. A la derecha se presentan los ajustes por localidad y ciclo de madurez (significativos al 0,05).



● Azul ● Tandil
● Balcarce ● Mar del Plata

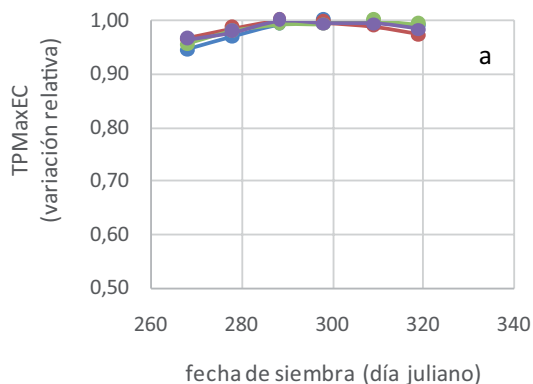


● Azul ● Tandil
● Balcarce ● Mar del Plata

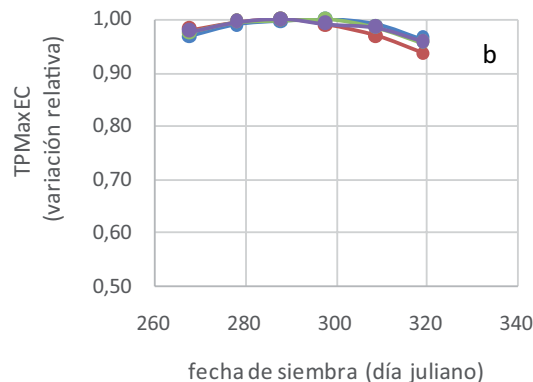


● Azul ● Tandil
● Balcarce ● Mar del Plata

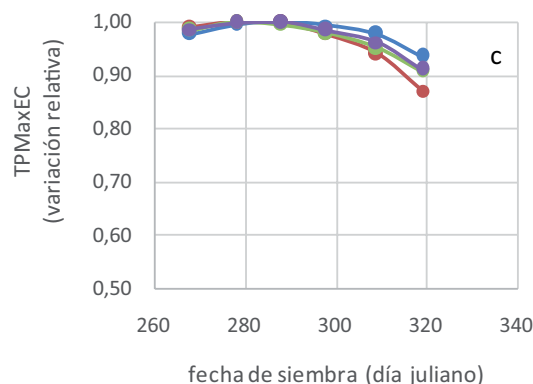
Figura 8. Tasa media de productividad ambiental de la estación de crecimiento (TPMaxEC) de acuerdo con la fecha de siembra en localidades del centro-sudeste bonaerense para tres ciclos de madurez del cultivo de maíz (serie 1971-2010). a. Ciclo 1. b. Ciclo 2. c. Ciclo 3.



● Azul ● Tandil
● Balcarce ● Mar del Plata



● Azul ● Tandil
● Balcarce ● Mar del Plata



● Azul ● Tandil
● Balcarce ● Mar del Plata

Figura 9. Variación relativa de la tasa media de productividad ambiental de la estación de crecimiento (TPMaxEC) con la fecha de siembra en localidades del centro-sudeste bonaerense para tres ciclos de madurez del cultivo de maíz (serie 1971-2010). a. Ciclo 1. b. Ciclo 2. c. Ciclo 3.

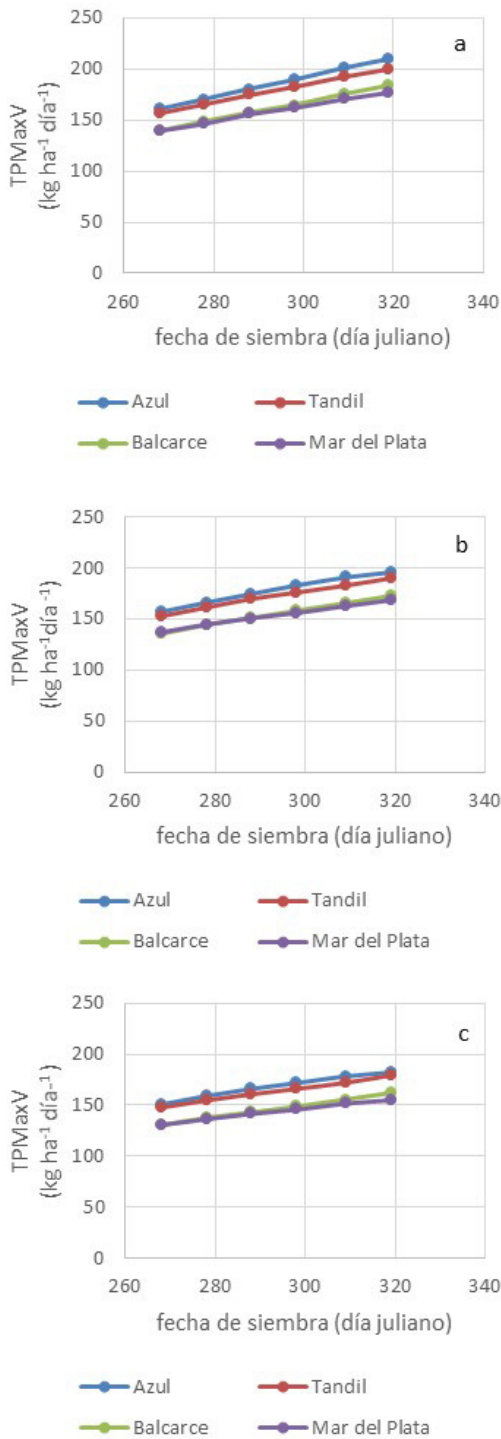


Figura 10. Tasa media de productividad ambiental del subperíodo vegetativo (TPMaxV) de acuerdo con la fecha de siembra en localidades del centro-sudeste bonaerense para tres ciclos de madurez del cultivo de maíz (serie 1971-2010). a. Ciclo 1. b. Ciclo 2. c. Ciclo 3.

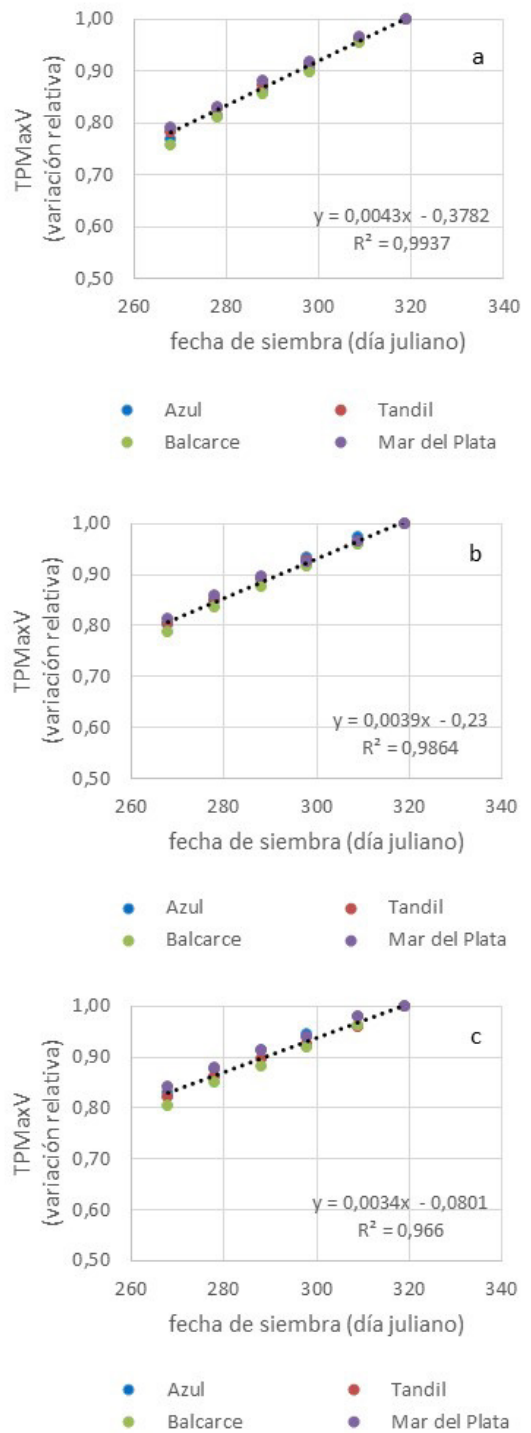


Figura 11. Variación relativa de la tasa media de productividad ambiental del subperíodo vegetativo (TPMaxV) con la fecha de siembra en localidades del centro-sudeste bonaerense para tres ciclos de madurez del cultivo de maíz (serie 1971-2010). a. Ciclo 1. b. Ciclo 2. c. Ciclo 3.

identificar diferentes funciones polinómicas de segundo grado para explicar la variación del índice TPM_{MaxEC} en cada localidad de la zona. Tandil y Azul muestran mayor productividad ambiental en la mayoría de las fechas de siembra. A su vez, las relaciones mostradas en la Figura 9 indican que los valores máximos de TPM_{MaxEC} para cada ciclo de madurez se mantienen dentro de un grupo de fechas de siembra, que se corresponden con las más tardías para el ciclo corto y con las más tempranas para el ciclo largo.

En base al análisis de la productividad ambiental dentro de la estación de crecimiento, se puede indicar que a medida que se atrasa la fecha de siembra, se expone al cultivo a condiciones del ambiente más productivas durante el período vegetativo (Figura 10). Este patrón de respuesta es semejante entre localidades para un mismo ciclo de madurez (Figura 11). Por cada día de atraso en la fecha de siembra, aumenta la productividad del período vegetativo (TPM_{MaxV}) entre 0,3 y 0,4 % del Y_{max} asociado a cada ciclo.

A partir de la relación entre rendimiento potencial y duración del período vegetativo, una vez determinada la fecha de floración y si se conoce la fecha de siembra y ciclo del cultivo, es posible inferir las reducciones de rendimiento debidas a la presencia de algún factor que interrumpa el ciclo (i.e. la ocurrencia de heladas tempranas). No obstante, para las determinaciones de rendimiento real del cultivo, se podrán usar relaciones semejantes a las obtenidas en este trabajo, pero generadas en ese caso a partir del rendimiento real probable como función de algún recurso del ambiente como agua o radiación (Panunzio Moscoso *et al.*, 2016b, Bonelli *et al.*, 2016).

Las futuras propuestas de estrategias de manejo agronómico para el cultivo de maíz en la zona deberán focalizarse en buscar el aumento de productividad del subperíodo reproductivo, que está limitada por los destinos en siembras tempranas y por la capacidad fotosintética en las tardías de acuerdo con Bonelli *et al.* (2016).

CONCLUSIONES

Los escenarios evaluados para la serie histórica 1971-2010 permiten distinguir algunas estrategias de manejo agrícola como más apropiadas de acuerdo con la productividad ambiental. A su vez, se propone el uso de índices de productividad ambiental que pueden aplicarse para evaluar los efectos relativos de otras estrategias de manejo agronómico.

Atrasos en la fecha de siembra desde el 25 de setiembre al 15 de noviembre en la zona centro-sudeste de Buenos Aires reducen la relación entre la duración del período vegetativo y la duración del subperíodo reproductivo. La productividad ambiental de la estación de crecimiento se mantiene durante un intervalo de fechas de siembra por compensación de los efectos sobre la duración y la productividad relativa de los subperíodos vegetativo y reproductivo.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad Nacional de Mar del Plata (UNMDP) que ha provisto la financiación del presente trabajo. Parte de la información presentada fue generada en el marco de una Beca de Entrenamiento otorgada por la Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires (CIC) a MP Panunzio Moscoso. A. Irigoyen es investigadora de la Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires (CIC). L. Echarte es investigadora del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (Conicet).

BIBLIOGRAFÍA

- Allen, R.; L.S. Pereira, D. Raes and M. Smith, 1998. Crop evapotranspiration. Guides for computing crop water requirements. Irrigation and Drainage Paper N°56, 300p.
- Andrade, F.H.; A. Cirilo, S. Uhart y M.E. Otegui, 1996. Ecofisiología del cultivo de maíz. DekalbPress. 292 p.
- Balbuena, H.H., 2006. Caracterización del ambiente térmico y de la respuesta fenológica simulada de un cultivo de maíz ciclo intermedio en el centro sudeste de Buenos Aires. Trabajo de Graduación. Ing. Agr. Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Mar del Plata, Balcarce, Argentina. 41 p.
- Barros, V., 2007. Adaptation to climate trends: lessons from the Argentine experience. In: N. Leary, J. Adejuwon, V. Barros, I. Burton, J. Kulkarni and R. Lasco (eds.) Climate Change and Adaptation. pp. 296-314.
- Bonelli, L.E., 2014. Rendimiento potencial de maíz en Balcarce en función de la fecha de siembra y la duración del ciclo del híbrido. Tesis Magister Scientiae. Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Mar del Plata. Balcarce, Buenos Aires, Argentina. 86 p.
- Bonelli, L. E., Monzón, J.P., Cerrudo, A. and R.H. Rizzalli, 2016. Maize grain yield components and source-sink relationship as affected by the delay in sowing date.

- Field Crops Res. 198: 215-225.
- Capristo, P.; R.H. Rizzalli and F.H. Andrade, 2007. Ecophysiological yield components of maize hybrids with contrasting maturity. *Agronomy Journal* 99: 1111-1118.
- Della Maggiora, A.I.; J.M. Gardiol y A.I. Irigoyen, 2003. Coeficiente de cultivo de maíz basado en la evapotranspiración de referencia Penman-Monteith. *Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, Brasil*. pp. 315-316.
- Egli, D.B., 2011. Time and the productivity of agronomic crops and cropping systems. *Agronomy J.* 103: 743-750.
- Fernández Long, M.E.; G.V. Muller, A. Beltran-Przekurat and O.E. Scarpati, 2013. Long-term and recent changes in temperature-based agroclimatic indices in Argentina. *International Journal of Climatology* 33: 1673-1686.
- Grassini, P., Yang, H. and K.G. Cassman, 2009. Limits to maize productivity in Western Corn-Belt: A simulation analysis for fully irrigated and rainfed conditions. *Agricultural Forest Meteorology*. 149: 1254-1265.
- Irigoyen, A.I.; R.H. Rizzalli, A.I. Della Maggiora, L.R. Angelocci and L.C. Malena, 2011. Seasonal growing degree-days and predicted phenology of maize at Southern Buenos Aires Province (Argentina). *Anais de V Congresso Brasileiro de Biometeorologia Piracicaba, Brasil*. En CD.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2013. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.
- Kumudini, S.; F. H. Andrade, K.J. Boote, G.A. Brown, K.A. Dzotsi, G.O. Edmeades, T. Gocken, M. Goodwin, A.L. Halter, G. Hammer, J.L. Hatfield, J. W. Jones, A. Kemanian, S.H. Kim, J. Kiniry, J.I. Lizaso, C. Nendel, C.R.L. Nielsen, B. Parent, C.O. Stockle, F. Tardieu, P.R. Thomison, D.J. Timlin, T.J. VYN, D. Wallach, H.S. Yang and M. Tollenaar, 2014. Predicting maize phenology: intercomparison of functions for developmental response to temperature. *Agronomy Journal* 106: 2087-2097.
- Magrin, G.O.; M.I. Travasso and G. Rodriguez, 2005. Changes in climate and crop production during the 20th century in Argentina. *Climatic Changes*. 72: 229-249.
- Magrin, G.O.; M.I. Travasso, W.E. Baethgen and R.T. Boca, 2007. Improving Applications in Agriculture of ENSO-based Seasonal Rainfall Forecasts considering Atlantic Ocean Surfaces Temperatures. Sivakumar and Hansen (ed.) *Climate Predictions and Agriculture: Advances and Challenges*, Springer. pp 249-527.
- Otegui, M. E., Ruiz, R. and D. Petrucci, D. 1996. Modeling hybrid and sowing date effects on potential grain yield of maize in a humid temperate region. *Field Crops Research* 47: 167-174.
- Panunzio Moscoso, M.P.; A. I. Irigoyen, A.M. Cabrera y A.I. Della Maggiora, 2014. Coeficiente de cultivo en maíz: escenarios de fechas de siembra y ciclos de madurez para Balcarce (Argentina). *Actas de Reunión Binacional Uruguay-Argentina de Agrometeorología y XV Reunión Argentina de Agrometeorología*. Piriápolis, Uruguay, pp. 77- 78.
- Panunzio Moscoso, M.P.; A. I. Irigoyen, A.I. Della Maggiora y R. H. Rizzalli, 2016. Riesgos climáticos para el cultivo de maíz en el centro-sudeste bonaerense: a. Temperaturas extremas. *Revista Argentina de Agrometeorología VII*: 41-56.
- Panunzio Moscoso, M.P.; A. I. Irigoyen, A.I. Della Maggiora y R. H. Rizzalli, 2016. Riesgos climáticos para el cultivo de maíz en el centro-sudeste bonaerense: b. deficiencias de agua y rendimiento. *Revista Argentina de Agrometeorología VII*: 57-71.
- Ritchie, S.W.; J.H. Hanway and G.O. Benson, 1997. *How a corn plant develops*. Ames: Coop. Extension Service. 21p.
- Ritchie, J. T. and D.S. NeSmith, 1991. Temperature and crop development. *Modeling plant and soil systems*. *Agronomy Monograph*, 31, 5-29.
- Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación, 2015. Tercera Comunicación Nacional sobre Cambio Climático. Modelos Climáticos. [en línea] <http://www.ambiente.gov.ar/> [consulta 10 setiembre 2015]
- Travasso, M.I.; G. O. Magrin, W.E. Baethgen, J.P. Castaño, G.R. Rodríguez, J.L. Pires, A. Giménez, G. Cunha and M. Fernández, 2007. Maize and Soybean Cultivation in Southeastern South America: Adapting to Climate Change. In: N. Leary, J. Adejuwon, V. Barros, I. Burton, J. Kulkarni and R. Lasco (eds) *Climate Change and Adaptation*. pp. 332-352.

Impactos en el régimen térmico producidos por el embalse de Salto Grande

G. Cruz, M. Bidegain, A. Bocco, S. Alvaríño y R. Terra

RESUMEN

El embalse de Salto Grande (ESG) es una de las mayores presas hidroeléctricas en Sudamérica. Si bien ha traído beneficios, también ha llevado a debates sobre sus impactos sociales y ambientales, incluyendo los climáticos. El monitoreo de las variaciones espacio-temporales de la temperatura del aire en el área del ESG permite caracterizar los impactos climáticos de dicha presa. En este estudio, utilizamos la temperatura de la superficie terrestre (LST) basada en sensores remotos y datos de temperatura del aire medidos en estaciones meteorológicas, para investigar los cambios de temperatura ocasionados por el ESG. Los resultados muestran que, durante el día, LST sobre el embalse es entre 3°C y 5°C menor que en la región circundante, mientras que LST durante la noche exhibe una temperatura entre 5°C y 7°C mayor. Los cambios en la temperatura del aire medida en estaciones meteorológicas vecinas fueron consistentes con los de LST, aunque de menor magnitud. Si bien estos efectos están localmente restringidos (5km a lo largo del embalse), se previene acerca de la utilización de información climática de estaciones meteorológicas próximas al ESG, para extrapolar espacialmente en estudios climáticos a escala regional.

Palabras clave: Argentina, temperatura del aire, Uruguay

G. Cruz, M. Bidegain, A. Bocco, S. Alvaríño and R. Terra, 2018. Climatic impacts produced by Salto Grande reservoir. RADA IX: 47-56

SUMMARY

The Salto Grande Reservoir (ESG) is one of the largest hydroelectric dams in South America. While it has brought benefits, it has also led to debates about its social and environmental impacts, including climate impacts. The spatio-temporal monitoring of air temperature variations in ESG area allows to characterize the climatic impacts of the dam. In this study, we use the Earth's surface temperature (LST) based on remote sensors and air temperature data measured in weather stations, to investigate the temperature changes caused by the ESG. The results show that, during the day, LST on the reservoir is between 3 ° C and 5 ° C lower than in the surrounding region, while LST during the night exhibits a temperature between 5 ° C and 7 ° C higher. The changes in air temperature measured in neighboring meteorological stations were consistent with those of LST, but of minor magnitude. These effects are

locally restricted (5km along the reservoir), but we alert about the use of climatic information from meteorological stations close to the ESG, to extrapolate in regional climatic studies.

Key words: Argentina, air temperature, Uruguay

G. Cruz: Centro Interdisciplinario Respuesta al Cambio y Variabilidad Climática y Facultad de Agronomía (Departamento de Sistemas Ambientales) (UDELAR). Av. Garzón 780, Montevideo CP 12900. Uruguay. M. Bidegain: Centro Interdisciplinario Respuesta al Cambio y Variabilidad Climática (UDELAR) e Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria. Ruta 48 km 10, Canelones CP 90100. Uruguay. A. Bocco: Facultad de Agronomía y Veterinaria (UNRC). Ruta Nacional 36, Km 601, Córdoba CP X5804BYA. Argentina. S. Alvaríño: Centro Universitario Regional Este (UDELAR). Tacuarembó entre avenida Artigas y Aparicio Saravia, Maldonado CP 20000. Uruguay. R. Terra: Centro Interdisciplinario Respuesta al Cambio y Variabilidad Climática y Facultad de Ingeniería (Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental) (UDELAR). Julio Herrera y Reissig 565, Montevideo CP 11300. Uruguay. Correspondencia a: gcruz@fagro.edu.uy

INTRODUCCIÓN

Las grandes presas, definidas por la Comisión Internacional de Grandes Represas (ICOLD) como aquellas con una altura de al menos 15 metros o que contienen un volumen de más de 3 millones de m³, juegan un papel importante en la reducción de los déficits de agua, generando energía eléctrica, navegación y control de inundaciones. Además de sus beneficios para la sociedad, la construcción de presas también causa diversos impactos climáticos locales principalmente debidos a un aumento en la energía potencial convectiva disponible, humedad específica y evaporación. (Degu et al., 2011; Hossain et al., 2012).

La presa de Salto Grande (ESG), ubicada en la cuenca del río Uruguay, es una de las mayores presas hidroeléctricas de Sudamérica y proporciona muchos beneficios a la sociedad. Sin embargo, durante las últimas décadas, con frecuencia se han producido sequías (1999, 2008-2009 y 2015) e inundaciones (1983, 1998, 2016) extremas en la cuenca del río Uruguay, lo que ha atraído la atención del público a los debates sobre los impactos ambientales y climáticos de estas infraestructuras.

Por otro lado, estudios recientes (Penalba y Rivera, 2016), muestran un claro vínculo entre las fases del ENOS y la temperatura de la superficie del mar de distintas regiones del mundo con los excesos y déficits hídricos en la región en estudio. La respuesta de la precipitación en los eventos La Niña

se caracteriza por déficits regionales. Mientras tanto, durante los eventos El Niño la respuesta se invierte y ésta resulta ser más consistente que en el caso anterior. Los caudales en la cuenca media y alta del río Uruguay también muestran modos de variabilidad compatibles con las señales del fenómeno ENOS y coincidente con los mencionado anteriormente para la precipitación (Krepper et al., 2003)

El embalse de Salto Grande (ESG) atravesó un período de llenado durante 1979 cuando su área inundada se expandió a 783 km². En la Figura 1 se muestra una imagen que comprende parte de la zona de estudio, antes (1976) y después (2018) del ESG.

Además, luego del ESG se verificó una inmigración hacia las principales ciudades cercanas (Salto en Uruguay y Concordia en Argentina), lo que produjo un aumento del área urbana. A la vez, algunos proyectos de protección ecológica iniciados por los gobiernos produjeron cambios en el área forestada del ESG y tierras de pastoreo se convirtieron en bosques. Es probable que tales cambios en la cobertura del suelo hayan afectado el clima local (Dale, 1997; Kalnay y Cai, 2003; Pielke et al., 2002). Son muy escasos los estudios de impacto climático de lagos artificiales y en particular para el lago de la represa binacional de Salto Grande. Como antecedente se puede mencionar el informe realizado por el Servicio Meteorológico Nacional de Argentina a fines de la década de los 70 (SMN, 1977). En ese informe se proyectaba aumento de las temperaturas mínimas,

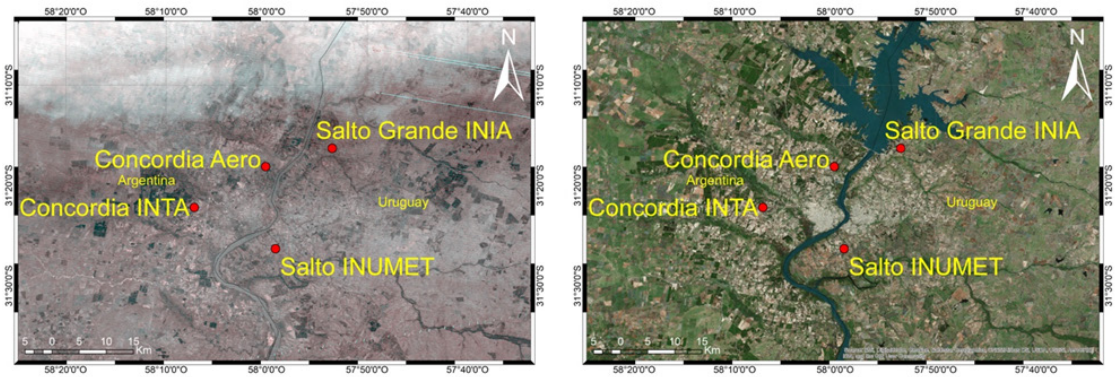


Figura 1: Región comprendida en el estudio antes (izquierda) y después (derecha) del Embalse de Salto Grande.

disminución de las máximas y de la amplitud térmica en todo el año.

La temperatura de la superficie terrestre (LST: Land Surface Temperature en inglés) y la temperatura del aire son indicadores importantes para caracterizar los sistemas climáticos locales (Mannstein, 1987; Sellers et al., 1992). Aunque los datos meteorológicos medidos en estaciones meteorológicas son precisos, solo están disponibles en un pequeño número de ubicaciones y, por lo tanto, no pueden capturar los patrones espaciales en el cambio climático local. Las observaciones satelitales adquiridas a altas resoluciones espaciales y temporales permiten superar las limitaciones de sensores y de los estudios basados en la medición en superficie. El LST basado en satélites, derivado de las mediciones infrarrojas térmicas de los sensores del satélite, se ha utilizado ampliamente en estudios climáticos (Jin y Dickinson, 2002; Li et al., 2015; Peng et al., 2014; Tomlinson et al., 2011; Yang et al., 2013; Zhou et al., 2012). Además, los datos satelitales también pueden capturar de forma realista cambios continuos en la cobertura y uso del suelo.

El objetivo de este estudio es analizar la existencia y magnitud de los cambios en la temperatura del aire a nivel local debido a la creación del ESG, utilizando para esto datos de LST y datos de temperatura del aire provenientes de estaciones meteorológicas permanentes.

Área de estudio

La presa de Salto Grande se encuentra sobre el río Uruguay, divisoria internacional entre Uruguay y Argentina, sobre el sudeste de Sudamérica. El

llenado del lago comenzó el 1 de abril de 1979 y el 21 de junio de 1979 alcanzó el nivel de 35 m sobre el nivel medio del mar, cota nominal de embalse con una profundidad media de 6,4 m. El ESG es una sección del río Uruguay y tiene un ancho máximo de 9 km y una longitud de 140 km. En nuestro estudio, nos centramos en la región 31,5°S - 30° S y 57°O - 58,5° O (Figuras 2, 3 y 4).

Las condiciones de relieve son relativamente suaves, el embalse de Salto Grande está rodeado por elevaciones suaves tanto al este como el oeste, la máxima altitud se ubica al este sobre la cuchilla de Haedo en Uruguay con 240 m sobre el nivel medio del mar. La región donde se encuentra el ESG presenta una temperatura media anual de aproximadamente 18°C, con máximas que promedian más de 30°C en el verano local y mínimas medias que apenas bajan de 8°C en el invierno (INUMET, 2018). La precipitación anual es de aproximadamente 1400 mm, sin embargo, la precipitación que acaece en las proximidades del embalse sólo contribuye al 12% del caudal medio del río Uruguay medido en la localidad de Concordia. El 88% restante corresponde a lo aportado por la cuenca alta donde las precipitaciones oscilan entre 1600 y 1800 mm (Krepper et al., 2003).

MATERIALES Y MÉTODOS

Como nuestro objetivo es analizar si existieron cambios locales de temperatura del aire atribuibles al ESG, utilizamos distintos conjuntos de datos:

1) Datos diarios de temperatura del aire medidos en estaciones meteorológicas permanentes de superficie, correspondientes a períodos previos y posteriores a la creación del ESG.

2) Temperatura de la superficie terrestre (LST) basada en satélite

Temperatura del aire medida en estaciones meteorológicas

Se analizaron datos diarios de temperatura máxima y mínima del aire para las estaciones meteorológicas de Salto Grande (31,27°S - 57,88°O) (INIA, Uruguay), Nueva Hespérides (31,43°S - 57,98°O) (INUMET, Uruguay), Concordia Aero (31,28°S - 58°O) (SMN, Argentina) y Concordia INTA (31,37°S - 58,12°O) (INTA, Argentina). En cuanto a las distancias al lago, Salto Grande es la estación meteorológica más cercana (2 km), Concordia Aero se ubica algo más lejos (7km) y Nueva Hespérides y Concordia INTA son las más alejadas (aproximadamente 19 km).

Los datos correspondientes al período anterior a la creación del ESG abarcan desde 1963 a 1977 para Nueva Hespérides y Concordia Aero, desde 1969 a 1977 para Concordia INTA, y desde 1971 a 1977 para Salto Grande (esta estación meteorológica fue creada a fines de 1970). El período posterior al ESG abarcó desde 2003 a 2017 en todos los casos.

El control de calidad de la base de datos incluyó la identificación de datos faltantes y valores fuera de los rangos. Se realizaron pruebas de rango fijo, tomando como criterio los umbrales determinados por la OMM para las variables en estudio (WMO, 2012) y pruebas de rango variable considerando un rango específico para cada mes definido como el intervalo comprendido entre la mediana \pm 3 desvíos medios absolutos (MAD). Los valores fuera de rango fueron reemplazados por la media correspondiente al mes del dato erróneo. Se siguió el mismo criterio para los datos faltantes. La homogeneidad se constató a través de la metodología HOMER (Mestre et al., 2013). Luego se unificó la base, controlando fecha y valores al comparar entre estaciones meteorológicas y/o períodos.

Se calcularon las amplitudes térmicas (temperatura máxima-temperatura mínima), así como los promedios y desvíos para cada mes de las tres variables (temperatura máxima, mínima y amplitud térmica), correspondientes a cada estación meteorológica y período.

De acuerdo a lo reportado en análisis de temperaturas máximas y mínimas, existe una tendencia climática creciente en toda la región (Giménez et al., 2009; Bettolli et al., 2010; Bidegain et al., 2012; Nagy et al., 2016). Considerando esto, se estimaron las diferencias de temperatura del

aire entre las estaciones meteorológicas de Salto Grande y Concordia INTA (elegida por ser una de las más alejadas) a nivel mensual, tanto durante un período previo a la represa (1971-1977) como en un período posterior (2003-2016).

Temperatura de la superficie terrestre basada en sensores remotos (LST)

Se recolectaron datos MODIS de 8 días del MODIS de nivel 3 (MOD11A2) entre 2000 y 2017, adquiridos por el satélite Terra. MOD11A2 se compone de la media de los píxeles del producto LST diario de 1 km (MOD11A1) en una ventana de 8 días y comprende las LST diurnas y nocturnas (Coll et al., 2005; Wan et al., 2002) y se ha informado que tiene una precisión global de menos de 1K (Wan, 2008). Se utiliza una ventana de 8 días ya que corresponde a la mitad del tiempo que tarda el satélite en repetir la trayectoria terrestre. El satélite MODIS Terra es sol sincrónico y con órbitas polares, siendo ésta descendente y atraviesa el ecuador a las 10.30 AM (horario solar local). Durante el día el satélite barre la zona de estudio entre 13:40 PM mientras que las mediciones nocturnas ocurren a las 02:40 AM. La temperatura del aire tiene una fuerte correlación positiva con LST (Gallo et al., 2011; Mildrexler et al., 2011; Schwarz et al., 2012).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

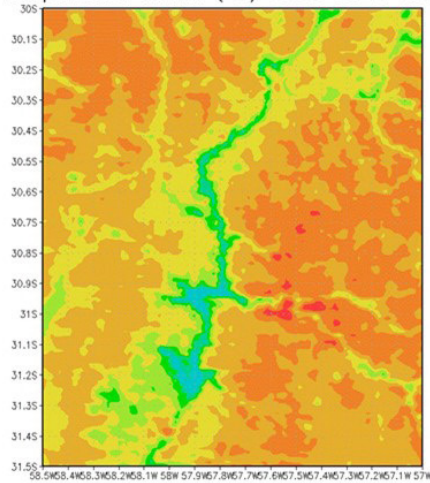
Evolución espaciotemporal de la temperatura de superficie terrestre basada en sensores remotos (LST)

La Figura 2 muestra la distribución espacial de la LST de 2000 a 2017 (promedio anual), durante el día (derecha) y la noche (izquierda).

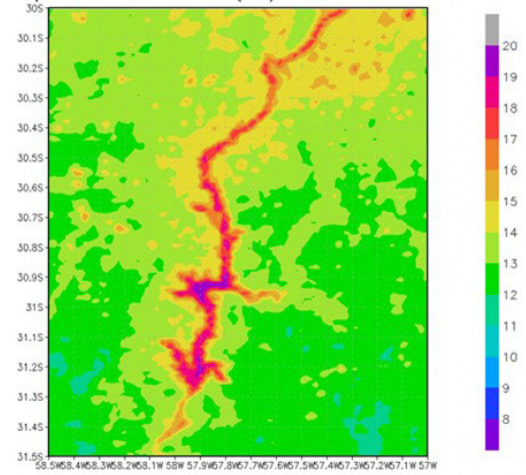
A escala anual (Figura 2 izquierda) se observa durante las horas diurnas temperaturas superficiales entre 20°C (sur del embalse) a 23°C sobre el norte del embalse donde el ancho del espejo de agua es menor, mientras que las regiones más alejadas del embalse muestran temperaturas entre 25 a 26°C, por lo tanto, en el área del embalse la temperatura máxima es de 3°C a 5°C menor. Durante las horas nocturnas (Figura 2, derecha) las temperaturas en superficie presentan valores promedio entre 17°C y 20°C sobre el embalse, mientras que las regiones más alejadas muestran valores entre 11°C a 14°C, por lo tanto, la diferencia de la temperatura mínima en superficie entre el embalse y sus alrededores es de aproximadamente 5°C a 7°C.

Durante las horas diurnas en verano (Figura

Temperatura diurna (°C) 2000–2017 MODIS



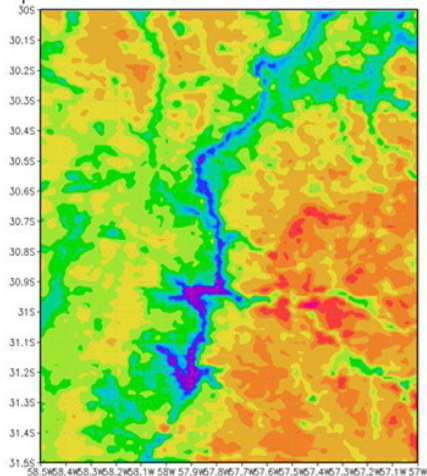
Temperatura nocturna (°C) 2000–2017 MODIS

**Figura 2:** LST anual media diurna (izquierda) y LST anual media nocturna (derecha)

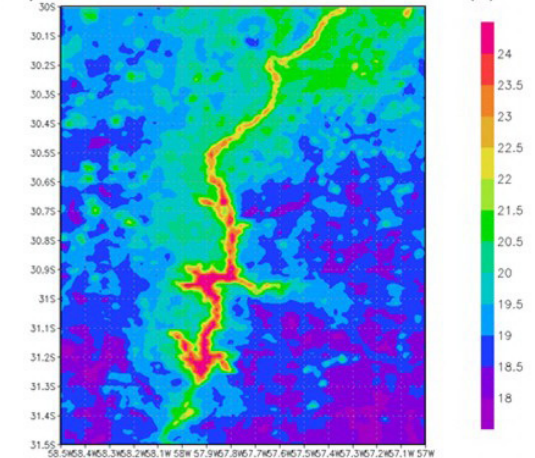
3, izquierda), se observa que las temperaturas superficiales sobre el embalse alcanzan los 27°C, mientras que en las zonas más alejadas al embalse (margen uruguayo) se alcanzan 37°C, por lo tanto, existe una disminución de la temperatura máxima de hasta 10°C. Durante las horas nocturnas (Figura 3 derecha), las temperaturas en superficie presentan valores promedio de 24°C sobre el espejo mayor del lago, mientras que las regiones más alejadas muestran valores de 18°C a 19°C, por lo tanto, el lago produce un máximo relativo en la temperatura mínima de 5°C o 6°C.

En invierno durante el día (Figura 4 izquierda), las temperaturas superficiales sobre el embalse alcanzan los 15°C, mientras que en las zonas más elevadas de la margen argentina los valores llegan a 18°C, por lo tanto, la diferencia en la temperatura máxima es de hasta 3°C. Durante las horas nocturnas (Figura 4 derecha), las temperaturas presentan valores entre 13°C y 14°C sobre el espejo mayor del lago, mientras que las regiones más alejadas al sur de la región muestran valores de 6°C a 7°C, por lo tanto, el lago genera un máximo relativo en la temperatura mínima de 5°C a 7°C.

Temperatura diurna VER 2000–2017 MODIS (C)



Temperatura nocturna VER 2000–2017 MODIS (C)

**Figura 3:** LST diurna (izquierda) y LST nocturna (derecha) en verano.

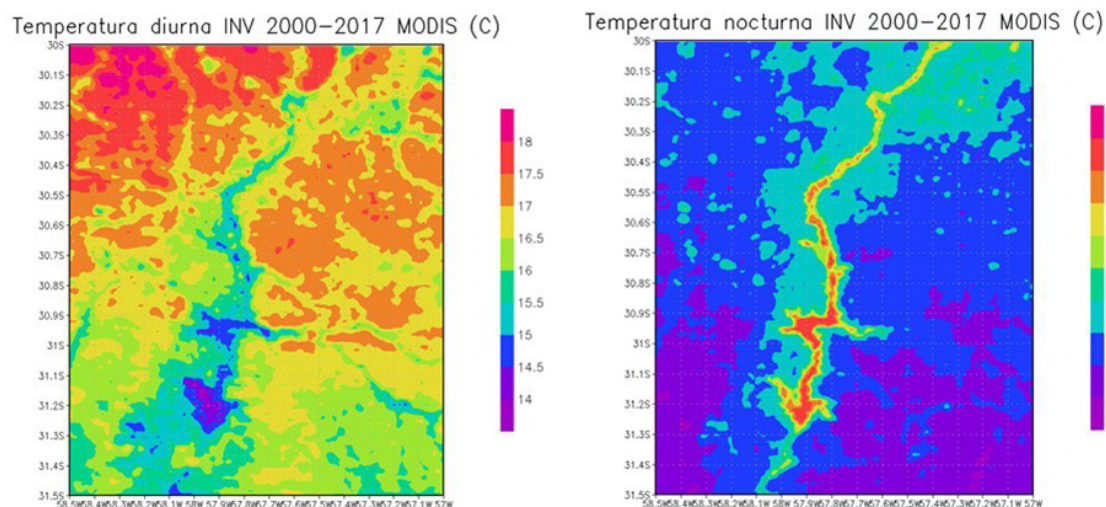


Figura 4: LST diurna (izquierda) y LST nocturna (derecha) en invierno.

Evolución espacio temporal de la temperatura del aire medida en estaciones meteorológicas

Respecto a los resultados obtenidos mediante los datos de las estaciones meteorológicas (Tabla 1), se observan aumentos de temperatura máxima y mínima en todos los puntos y meses (excepto mayo y julio en temperatura mínima). Sin embargo, como se señaló en el apartado de Materiales y Métodos, ésta es la señal que también se espera asociada al calentamiento global (Giménez et al., 2009; Bettolli et al., 2010; Bidegain et al., 2012; Nagy et al., 2016), por lo que no es evidente discriminar el efecto del embalse. Aun así, en SG

que es donde se espera que el efecto local del lago sea mayor por ser la estación más cercana, se presenta el mayor número de meses con disminución de la amplitud térmica, y es la única localidad con disminución de la amplitud a nivel anual (Tabla 1).

Como se señaló en Materiales y Métodos, para discriminar la tendencia regional (asociada al calentamiento global) del efecto del embalse, se analizó la evolución temporal de la diferencia de temperatura del aire entre las estaciones de Salto Grande y Concordia INTA en un período común previo (1971-1977) y posterior (2003-2016) a la represa (Figura 5). La diferencia de temperaturas

Tabla 1. Diferencias de amplitud térmica y temperaturas extremas (promedio mensual, °C) entre el período posterior y anterior al ESG

Mes	Amplitud Térmica				Temperatura máxima				Temperatura mínima			
	NH	SG	AC	CI	NH	SG	AC	CI	NH	SG	AC	CI
Ene.	0,5	0,7	0,3	0,7	1,2	1,5	1,0	1,0	0,7	0,8	0,7	0,3
Feb.	1,0	-0,5	-0,8	0,3	0,9	1,0	-0,1	0,9	-0,1	1,5	0,7	0,6
Mar.	0,4	0,2	-0,1	0,8	0,7	0,7	0,3	0,8	0,3	0,5	0,4	0,0
Abr.	0,6	-0,5	-0,2	0,2	1,2	0,7	0,3	0,6	0,6	1,2	0,5	0,4
May.	0,0	-0,7	-0,7	0,1	-0,1	-0,6	-1,0	-0,4	0,1	-0,1	-0,3	-0,5
Jun.	0,8	0,2	0,2	0,9	1,0	0,4	0,3	0,6	0,2	0,2	0,1	-0,3
Jul.	1,0	0,6	0,9	1,1	0,4	0,2	0,0	0,2	-0,6	-0,4	-0,9	-0,9
Ago.	0,7	0,2	0,7	0,9	1,3	1,1	1,2	1,4	0,6	0,9	0,5	0,5
Set.	0,3	-0,1	0,3	0,2	0,4	0,3	0,5	0,2	0,1	0,4	0,2	0,0
Oct.	-0,3	-1,4	-0,7	0,2	0,4	0,3	0,4	3,1	0,7	1,7	1,1	2,9
Nov.	0,2	-0,9	0,0	0,4	0,7	0,9	0,8	1,5	0,5	1,8	0,8	1,1
Dic.	0,1	-0,6	0,0	0,5	0,3	0,5	0,5	0,9	0,2	1,1	0,5	0,4
Verano	0,5	-0,1	-0,2	0,5	0,8	1,0	0,4	0,9	0,3	1,1	0,6	0,4
Inviern	0,8	0,4	0,6	0,9	0,9	0,6	0,5	0,7	0,1	0,2	-0,1	-0,2
Anual	0,4	-0,2	0,0	0,5	0,7	0,6	0,3	0,9	0,3	0,8	0,3	0,4

NH: Nueva Hespérides; SG: Salto Grande; AC: Aeropuerto de Concordia; IC: INTA Concordia

entre estas estaciones para cada período, despeja el impacto diferencial del lago entre ambos sitios, asumiendo que la señal regional de cambio climático es la misma. Complementariamente, se presenta la marcha anual de temperaturas máximas y mínimas en el período pre y post embalse para cada uno de estos sitios (Figura 6).

En la Figura 5 se verifica que, en el período previo al embalse, las temperaturas extremas son menores en Salto Grande que Concordia INTA de febrero a julio y mayores de setiembre a enero, contribuyendo a un ciclo anual más pronunciado. En el período posterior al embalse el patrón temporal de diferencias cambia totalmente. Salto Grande pasa a tener temperaturas máximas menores y temperaturas mínimas mayores durante prácticamente todo el año, aunque las diferencias son pequeñas (menores a $0,5^{\circ}\text{C}$). Conjuntamente, ambos resultados llevan a que la amplitud térmica que previo al embalse era mayor en Salto Grande durante la mayor parte del año, pase a ser menor todo el año.

Análisis conjunto

Los resultados obtenidos a partir de LST y de las observaciones meteorológicas son complementarios y consistentes entre sí. La comparación de las temperaturas extremas entre el período previo y posterior al embalse permitió cuantificar el efecto de ESG, mientras que el análisis de LST mostró la variación espacial de las temperaturas extremas debido al lago.

Se verifica un efecto apreciable del ESG sobre las temperaturas extremas y la amplitud térmica en la estación meteorológica de SG, la cual se ubica a una distancia al embalse de tan solo 2 km. Si bien en este trabajo se evaluó el impacto del ESG sobre las temperaturas extremas y la amplitud térmica, es altamente probable que también exista efecto del ESG sobre otras variables climáticas como la humedad relativa, la evaporación y la evapotranspiración de referencia. Además, es probable que los cambios de temperatura evidenciados en este artículo, hayan provocado

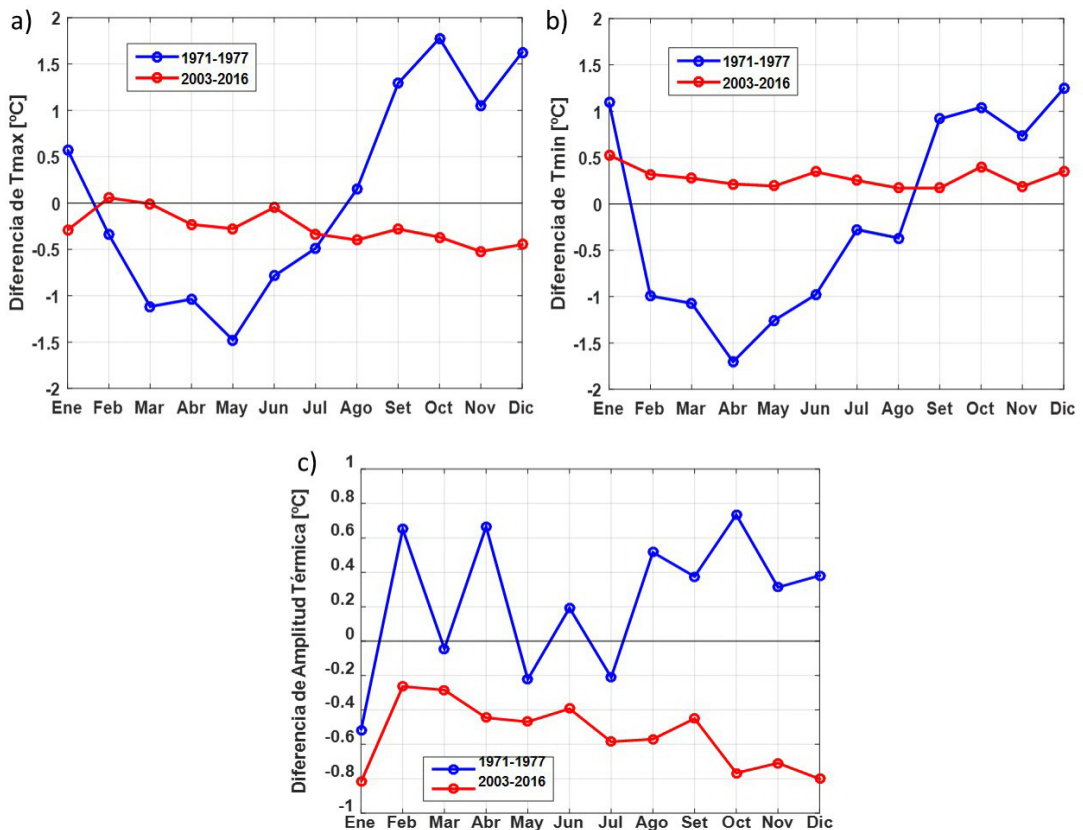


Figura 5: Diferencia de temperatura máxima (a), mínima (b) y amplitud térmica (c) entre Salto Grande y Concordia INTA para el período previo al embalse (1971-1977 en azul) y posterior al embalse (2003-2016 en rojo)

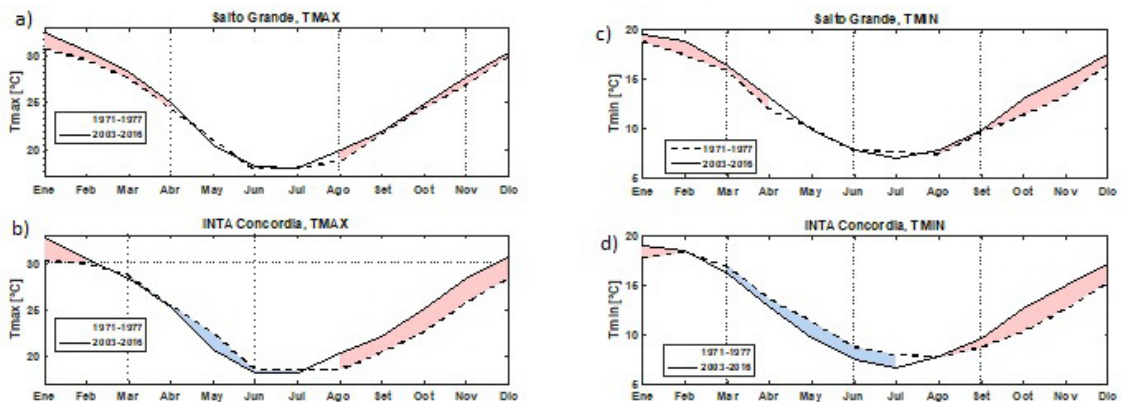


Figura 6: Marcha anual de temperatura máxima y mínima en el período posterior (línea llena) y anterior (línea punteada) al embalse en Salto Grande (a) y c) y Concordia INTA (b) y d)). En color se muestran las diferencias térmicas entre períodos (negativas en celeste y positivas en rosado).

también cambios en las variables mencionadas. Por todo esto, consideramos que la información meteorológica recabada en sitios afectados por el ESG (5km a lo largo del embalse) no debería utilizarse para realizar inter o extrapolaciones espaciales en estudios climáticos de mayor escala.

Es necesario aclarar que los cambios de temperatura a lo largo y alrededor del embalse no solo pueden ser el resultado de la presencia del espejo de agua, sino que también pueden estar influidos por el aumento demográfico y de la cubierta vegetal causada por algunos proyectos de reforestación en ambas orillas del embalse.

Comparando los resultados obtenidos con el informe realizado previamente al embalse (SMN, 1977), en el cual se proyectaba aumento de las temperaturas mínimas, disminución de las máximas y de la amplitud térmica en todo el año, encontramos que se ajusta parcialmente a los resultados obtenidos (Tabla 1). Para el mes de enero (verano) se esperaba disminuciones de la temperatura máxima entre 1°C (sur del embalse) y 0,5° (norte del embalse) y para julio (invierno) disminuciones de 0,5°C tanto al sur como al norte. En nuestro estudio las temperaturas máximas en el ESG aumentaron prácticamente durante todo el año (Tabla 1). La temperatura mínima se proyectaba que aumentaría todo el año, aumento que se verifica actualmente con magnitudes mayores en el período Set-Dic (Tabla 1). Se proyectaba disminución de la amplitud térmica a nivel anual, lo cual también se verifica hoy (Tabla 1). También se proyectaban aumentos de la humedad relativa durante todo el año, lo cual no puede verificarse en este estudio. En síntesis, las estimaciones previas

mostraban un efecto más pronunciado del embalse al efecto que se obtiene de las observaciones.

CONCLUSIONES

Del análisis con las dos metodologías (LST y temperatura del aire) se observa una señal climática del embalse de Salto Grande, que se traduce en una menor amplitud térmica a nivel anual en la estación meteorológica SG.

La comparación de temperaturas extremas entre las estaciones meteorológicas de Salto Grande y Concordia INTA asumiendo que el efecto del cambio climático regional es similar en ambas, muestra un ciclo anual más pronunciado en Salto Grande antes del embalse. En el período posterior al embalse el patrón temporal de diferencias cambia, pasando Salto Grande a tener temperaturas máximas menores y temperaturas mínimas mayores durante prácticamente todo el año. Estos resultados llevan a que la amplitud térmica que previo al embalse era mayor en Salto Grande durante la mayor parte del año, pase a ser menor todo el año.

Los efectos de la presencia del embalse sobre la temperatura del aire, son menores a los proyectados previamente a la creación del ESG por un estudio pionero de impacto ambiental realizado por el SMN-Argentina.

El impacto climático local del ESG debe inducir a precaución en el uso de los datos registrados de estaciones meteorológicas cercanas al embalse, en la forma de no extrapolar espacialmente el comportamiento observado localmente.

AGRADECIMIENTOS

A los Servicios Meteorológicos de Argentina (SMN), Instituto Uruguayo de Meteorología de Uruguay (INUMET), Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIA) de Uruguay y al Instituto de Tecnología Agropecuaria (INTA) de Argentina por ceder sus datos observacionales de temperaturas en estaciones meteorológicas. A National Aeronautic and Space Agency (NASA) por proveer los productos LST de MOD11A2 (MODIS) sin cargo.

Este trabajo se llevó a cabo con el apoyo del Instituto Interamericano para la Investigación en Cambio Global (IAI) CRN3106, que cuenta con el apoyo de la Fundación Nacional de Ciencias de EE. UU. (Grant GEO-1128040), y el apoyo de la Comisión Sectorial de Investigación Científica (CSIC) de la Universidad de la República (UDELAR, Uruguay)

BIBLIOGRAFÍA

- Bettolli, M.L.; M. A. Altamitano, G. Cruz, F. Rudorff, A. Martínez, J. Arroyo y J. Armoa, 2010. Pastura natural de Salto (Uruguay): relación con la variabilidad climática y análisis de contextos futuros de cambio climático. *Revista Brasileira de Meteorología* 25(2):248-259.
- Bidegain, M.; C. Crisci, L. Del Puerto, H. Inda, N. Mazzeo, J. Taks, y R. Terra, 2012. Clima de cambios: nuevos desafíos de adaptación en Uruguay. *Variabilidad climática de importancia para el sector productivo*. Vol 1. FAO - MGAP. Montevideo. pp 43-98.
- Coll, C.; C. Vaselles, J. Galve, E. Valor, R. Niclos, J. Sanchez, y R. Rivas, 2005. Ground measurements for the validation of land surface temperatures derived from AATSR and MODIS data. *Remote sensing of Environment* 97(3):288-300.
- Dale, V. H., 1997. The relationship between land-use change and climate change. *Ecological applications* 7(3):753-769.
- Degu, A. M.; F. Hossain, D. Niyogi, R. Pielke, J.M. Shepherd, N. Voisin, y T. Chronis, 2011. The influence of large dams on surrounding climate and precipitation patterns. *Geophysical Research Letters* 38(4) L04405, 7.
- Gallo, K.; R. Hale, D. Tarpley, y Y. Yu, 2011. Evaluation of the Relationship between Air and Land Surface Temperature under Clear- and Cloudy-Sky Conditions. *Journal of applied meteorology and climatology* 50(3):767-775.
- Giménez, A.; J.P. Castaño, W. Baethgen y B. Lanfranco, 2009. Cambio climático en Uruguay, posibles impactos y medidas de adaptación en el sector agropecuario. Serie técnica INIA 178: 56.
- Hossain, F.; A.M. Degu, W. Yigzaw, S. Burian, D. Niyogi, J.M. Shepherd y R. Pielke, 2012. Climate Feedback-Based Provisions for Dam Design, Operations, and Water Management in the 21st Century. *Journal of Hydrologic Engineering* 17(8):837-850.
- INUMET, 2018. www.inumet.gub.uy/clima/climatologia-estacional. Acceso 27/10/2018.
- Jin, M. y R.E. Dickinson 2002. New observational evidence for global warming from satellite. *Geophysical Research Letters* 29 (10) 1400, 10.
- Kalnay, E y M. Cai, 2003. Impact of urbanization and land-use change on climate. *Nature* 423(6939):528-531.
- Krepper, C. M.; García, N. O.; Jones, P. D. 2003. Interannual variability in the Uruguay river basin. *International Journal of Climatology* 23(1): 103-115.
- Li, Y.; M. S. Zhao, S. Motesharrei, Q. Z. Mu, E. Kalnay y S. C. Li, 2015. Local cooling and warming effects of forests based on satellite observations. *Nature communications* 6:6603-6611.
- Mannstein, H. 1987. Surface energy budget, surface temperature and thermal inertia. En Vaughan, R.A. (Ed.): *Remote sensing applications in meteorology and climatology*. Springer, Dordrecht. pp. 391-410.
- Mestre, O.; P. Domonkos; F. Picard; I. Auer; S. Robin; E. Lebarbier; R. Böhm; E. Aguilar; J.A. Guijarro; G. Vertacnik; M. Klancar; B. Dubuisson; P. Stepanek. 2013. HOMER : HOMogenisation software in R-methods and applications. *IDŐJÁRÁS - Quarterly Journal of the Hungarian Meteorological Service*, 117(1): 47-67.
- Mildrexler, D. J., M. Zhao, and S. W. Running, 2011. A global comparison between station air temperatures and MODIS land surface temperatures reveals the cooling role of forests, *J. Geophys. Res.*, 116, G03025, doi:10.1029/2010JG001486.
- Nagy, G.; M. Bidegain, J. Verocai y B. de los Santos, 2016. Escenarios climáticos futuros sobre Uruguay. Informe de la consultoría técnica realizada en el marco del Proyecto PNUD URU/11/G31 "Fortalecimiento Institucional para la preparación de la Cuarta Comunicación Nacional de Uruguay a la CMNUCC" de la División de Cambio Climático del MVOTMA. Montevideo. pp. 4-16.
- WMO (2008). Guide to meteorological instruments and methods of observation (WMO-No. 8). World Meteorological Organisation: Geneva, Switzerland.
- Penalba, O. C., y Rivera, J. A. 2016. Precipitation response to El Niño/La Niña events in Southern South America – emphasis in regional drought occurrences. *Advances in Geosciences*, 42:1-14.
- Peng, S.; S. Piao, Z. Zeng, P. Ciais, L. M. Zhou, L. Z. X. Li, R. B. Myneni, Y. Yin, y H. Zeng, 2014.

- Afforestation in China cools local land surface temperature. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 111(8):2915-2919.
- Pielke, R. A.; G. Marland, R. A. Betts, T. N. Chase, J. L. Eastman, J. O. Niles, D. S. Niyogi y S.W. Running, 2002. The influence of land-use change and landscape dynamics on the climate system: relevance to climate-change policy beyond the radiative effect of greenhouse gases. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 360(1797):1705-1719.
- Schwarz, N.; U. Schlink, U. Franck y K. Großmann, 2012. Relationship of land surface and air temperatures and its implications for quantifying urban heat island indicators - An application for the city of Leipzig (Germany). *Ecological Indicators* 18:693-704.
- Sellers, P.J.; F.G. Hall, G. Asrar, D.E. Strelbel y R.E. Murphy, 1992. An overview of the first international satellite land surface climatology project (ISLSCP) field experiment (FIFE). *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 97(D17):18345-18371.
- SMN, 1977. Variación climática en el área de influencia del futuro lago de Salto Grande. Informe del Centro Climatológico del Servicio Meteorológico Nacional de Argentina. Material mimeógrafo.
- Tomlinson, C.J.; L. Chapman, J.E. Thornesb y C. Baker, 2011. Remote sensing land surface temperature for meteorology and climatology: A review. *Meteorological Applications* 18(3):296-306.
- Wan, Z., 2008. New refinements and validation of the MODIS Land-Surface Temperature/Emissivity products. *Remote sensing of Environment* 112(1):59-74.
- Wan, Z.; Y. Zhang, Q. Zhang y Z. Li, 2002. Validation of the land-surface temperature products retrieved from Terra Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer data. *Remote sensing of Environment* 83(1-2):163-180.
- Yang, J.; P. Gong, R. Fu, M. Zhang, J. Chen, S. Liang, B. Xu, J. Shi y R. Dickinson, 2013. The role of satellite remote sensing in climate change studies. *Nature climate change* 3(10):875-883.
- Zhou, L.; Y. Tian, B. S. Roy, C. Thorncroft, L.F. Bosart y Y. Hu, 2012. Impacts of wind farms on land surface temperature. *Nature Climate Change* 2(7):539-453.

Determinación de escenarios por sequía en la región del Organismo de Cuenca del Pacífico Norte, México

Douriet Cárdenas, J.C., A.C. Ravelo, A.I. Ramírez Orozco, C.E. Torrecillas Nuñez y C.M. García

RESUMEN

Las sequías constituyen adversidades climáticas que afectan todas las actividades humanas y causan directa o indirectamente la degradación de las condiciones ambientales. México ha experimentado siempre los efectos negativos de las sequías desde la prehistoria, pasando por la época prehispánica, hasta la actualidad. En particular, el Organismo de Cuenca del Pacífico Norte (OCPN) ha sido afectado por sequías severas como la ocurrida en 2011-2012, la cual fue de tal magnitud que, en consecuencia, los escurrimientos en ríos y arroyos fueron prácticamente nulos y se registraron volúmenes de almacenamiento de agua en las principales presas de la región, muy por debajo de su normal histórica. Se realizó un análisis temporal y espacial de sequías para el período 1978-2016 utilizando los índices estandarizado de precipitación (SPI) y el de severidad de sequía de Palmer (PDSI) para la región del OCPN. Se determinaron escenarios de sequías con 1, 2 y 3 meses de antelación, basada en el análisis multivariado temporal y uso de redes neuronales. Los resultados demostraron que un pronóstico preciso fue obtenido por el modelo de red neuronal Perceptron Multilayer de dos capas. Los parámetros estadísticos utilizados para evaluar los pronósticos indicaron una estrecha relación entre los valores observados y pronosticados con errores de estimación aceptables. La aplicación de estos métodos propuestos pueden contribuir a la gestión integral de cuencas para la prevención, mitigación, adaptación y respuesta ante la sequía.

Palabras clave: Redes neuronales, variabilidad climática, análisis multivariado temporal.

Douriet Cárdenas, J.C., A.C. Ravelo, A.I. Ramírez Orozco, C.E. Torrecillas Nuñez and C.M. García, 2018. Determining drought scenarios in the region of the North Pacific Basin Agency, Mexico . RADA IX: 57-73

SUMMARY

Droughts are meteorological adversity affecting all human activities which directly or indirectly cause the degradation of environmental conditions. Mexico

has experimented the negative effects of drought since the pre-Hispanic period to the present and, in particular, the Organismo de Cuenca del Pacífico Norte (OCPN) has been affected by severe droughts as the occurred in 2011-. During this period the runoff in rivers and streams were practically null and very low storage volumes were recorded in the main dams in the region. A temporal and spatial analysis of drought for the period 1978-2016 was carried out using the indices standardized precipitation (SPI) and the drought of Palmer (PDSI) for the region of the OCPN. Drought scenarios were determined at 1, 2 and 3 months, based on temporal multivariate analysis and use of neural networks. The results showed that accurate forecast was obtained by neural network model Perceptron Multilayer two-layer. The statistical parameters used to evaluate the forecasts indicated a close relationship between the observed and forecasted values and acceptable estimation errors. The proposed methods can contribute to the integral management of watersheds for the prevention, mitigation, adaptation and response to drought.

Key words: Neural networks, climate variability, temporal multivariate analysis.

Douriet Cárdenas, J.C.: Organismo de Cuenca Pacífico Norte-CONAGUA. Avenida Federalismo s/n, Col. Recursos Hidráulicos, 80105, Culiacán Rosales, Sinaloa, México. A.C. Ravelo: CREAN-IMBIV/CO-NICET, Ing. Agr. Félix A. Marrone 746, Ciudad Universitaria, Córdoba. Argentina. A.I. Ramírez Orozco: Centro del Agua para América Latina y El Caribe, ITM, Monterrey Nuevo León, México. C.E. Torrecillas Nuñez: Facultad de Ingeniería Culiacán de la Universidad Autónoma de Sinaloa. Calzada de las Américas y Universitarios, s/n, Ciudad Universitaria, 80040 Culiacán Rosales, Sinaloa. México. C.M. García: Fac. C. Exactas, Físicas y Naturales, UNC Ciudad Universitaria, Córdoba. Argentina. Correspondencia a: jose.douriet@conagua.gob.mx

INTRODUCCION

Las condiciones extremas del clima siempre han afectado a la humanidad (Magaña, 2000). Uno de los eventos climatológicos extremos más perjudiciales es la sequía, que afecta recurrentemente a distintas regiones de nuestro planeta. Cuando estos fenómenos son intensos y prolongados generan fuertes pérdidas en las actividades agrícolas, ganaderas e industriales, con consecuencias sociales y económicas conexas, como la inseguridad en los suministros alimentarios e importantes pérdidas monetarias (Ravelo, 2008; Ravelo *et al.*, 2016). Estos eventos tienen lugar en regiones tanto húmedas como áridas afectando a una amplia variedad de áreas geográficas, A nivel mundial, el 22% del daño económico es causado por los desastres naturales y el 33% del daño, en términos del número de personas afectadas, puede ser atribuido a la sequía (Keshavarz *et al.*, 2013).

La sequía es una de las principales causas de pobreza en el mundo y está empujando a millones

de personas a emigrar de sus países. Ante la persistente falta de lluvias, entre 10 y 12 millones de personas se enfrentan a una grave escasez de alimentos al sur de África (<http://historyabiografias.com>). En la actualidad, entre los países que más experimentan las sequías y sus efectos, se pueden citar: Etiopía, Eritrea, Somalia, Sudan, Uganda, Afganistán, China, India, Irán y Marruecos. (http://www.wearewater.org/es/la-fundacion_253356). En los Estados Unidos, las sequías causan pérdidas anuales por alrededor de \$ 7 billones de dólares (NTSC, 2005). Otros ejemplos de la afectación histórica de las sequías en el mundo, en los tiempos recientes, son: la peor sequía de los últimos 100 años en California, período 2014-2015 (www.rtve.es); sequías en el Amazonas en 2005 (www.elpais.com); sequías en el sur de Chile en 2015 (www.bio-biochile.cl); sequías en Argentina en 2009 y 2017 (www.crean.unc.edu.ar); sequías en China en período 2010-2015 (Zongxing *et al.*, 2012; Qiu, 2010; Department of Water Resources of Yunnan Province, 2011), sequías en el sur de Estados Unidos en

2010-2013 (Ma *et al.*, 2013), en Irán en 2001 (Moradi and Erfanzadeh, 2001).

A lo largo de su historia, México siempre ha experimentado los efectos negativos de las sequías desde la prehistoria, pasando por la época prehispánica hasta la actualidad, tal como lo muestran los registros documentados durante las diversas etapas del desarrollo nacional (Florescano, 2000; García, 1993). Algunas de ellas se han documentado a partir de una revisión histórica, documental y hemerográfica. Ante sucesos que rebasaban la comprensión cotidiana, las primeras explicaciones de la sequía fueron religiosas, atribuyéndolas a fuerzas divinas. De manera paulatina, la generación de conocimiento e información llevó a explicaciones científicas sobre la base de la observación y el análisis (Domínguez, 2016). La sequía es un evento natural que se presenta de manera recurrente en México, donde la mayor parte del territorio tiene características de aridez y el crecimiento urbano no ha tenido patrones de consumo de agua bien planificados. Los problemas de desabastecimiento de agua para consumo humano tienden a agravarse en distintas regiones, aun sin considerar los efectos de la sequía y del cambio climático. Es así que el cumplimiento del mandato constitucional de garantizar el acceso humano al agua está en riesgo. Por otro lado, frente a una situación de sequía extendida y prolongada la seguridad alimentaria nacional, exige tomar medidas de política social, económica y fiscal para garantizar el abastecimiento de alimentos, potenciar las capacidades productivas del sector rural y definir los cupos de importación de granos básicos en el país, en particular de frijol y maíz blanco para consumo humano (Arreguín *et al.*, 2016). Las sequías se manifiestan con mayor impacto, intensidad y frecuencia en la porción norte del país (Magaña, 2004), debido a que es el territorio más vulnerable (Velasco, 2002). En la zona noroeste del país, que incluye al Organismo de Cuenca Pacífico Norte (OCPN), los análisis estadísticos muestran claramente períodos de baja precipitación, que pueden extenderse por cinco, seis y hasta siete años consecutivos, como las ocurridas recientemente entre 1997 y 2004 y entre 2010 y 2012 (Sanz *et al.*, 2012). La sequía en 2010-2012 se considera la peor en los últimos 70 años que, de acuerdo a estimaciones realizadas por la Comisión de Agricultura de la Cámara de Diputados de México (2014), arrojó pérdidas por 150 mil millones de pesos. La sequía afectó un 90% del territorio nacional, de modo que prácticamente todo el país se encontraba con algún grado de sequía. Los estados más afectados fueron Aguascalientes, Chihuahua, Coahuila, Durango, Guanajuato, Jalisco, San Luis Potosí, Sina-

loa, Sonora y Zacatecas. A pesar del profundo impacto que produjo y que se adoptaron una serie de medidas reactivas, algunos la consideran la mejor atendida en el país, ya que hubo coordinación intersecretarial (Arreguín, *et al.*, 2016).

En el ámbito del Organismo de Cuenca del Pacífico Norte (OCPN) de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) de México, se registran recurrentemente los efectos de las sequías de diferente magnitud e intensidad. Durante el período 2010-2012 se presentaron sequías meteorológicas e hidrológicas extremadamente severas (CONAGUA, 2013), teniéndose escurrimientos prácticamente nulos en ríos y arroyos, así como muy bajos volúmenes de almacenamiento de agua en las principales presas de la región (CONAGUA, 2012). Asimismo, la sequía coincidió con una de las peores heladas que se han presentado en el noroeste de México, provocando la pérdida de más de 800,000 has de diferentes cultivos, principalmente el maíz, lo que agudizó el problema socioeconómico. Para afrontar los efectos de la helada se llevó a cabo la resiembra de cientos de miles de hectáreas, disponiendo del agua almacenada en las presas para los riegos normales posteriores, generando con ello una sequía hidrológica antrópica, que se vio agravada por la ocurrencia de la sequía natural. Las presas llegaron a su mínimo de almacenamiento histórico de entre un 3% y 9% de su capacidad de almacenamiento en junio de 2012 (Ravelo, 2012; Ravelo *et al.*, 2014; Torrecillas *et al.*, 2013). Los porcentajes de almacenamiento menores ocurrieron en las presas del Consejo de Cuenca de los Ríos Mocorito al Quelite, principalmente la presa Sanalona que llegó a estar prácticamente seca; seguido de los almacenamientos de las presas del Consejo de Cuenca de los ríos Fuerte y Sinaloa.

De acuerdo con el National Drought Mitigation Center (NDMC, 2016), cuanto más tiempo dura la escasez de la lluvia con respecto al valor normal, más severa es la sequía y los impactos económicos, sociales y ambientales son mayores, por lo que propone clasificar el evento en cinco tipos de sequías, que son: sequía meteorológica, sequía agrícola, sequía hidrológica, sequía socioeconómica y sequía ecológica.

Para el monitoreo de las fases de la sequía y para efectos de planeación, elaboración de planes de mitigación e implementación de programas de mitigación de sequías, se hace necesario elaborar escenarios probables de ocurrencia de sequías; para ello se aplican los programas de redes neuronales (Neurosolution, 2009), los cuales son métodos no paramétricos que trabajan a partir de una serie histórica de índices de sequía y datos hidroclimatológicos, con los cuales se entrena, aprende

y se calibra, para posteriormente inferir los índices a 1, 2 o 3 meses siguientes (Ravelo, 2008; Douriet, 2010; Ravelo *et al.*, 2014).

La aplicación de redes neuronales a la predicción de la ocurrencia de sequías ha sido documentada por diversos autores (Hyun-Suk and Salas, 2000; Morid *et al.*, 2007; Ravelo *et al.*, 2014).

El objetivo de esta investigación fue demostrar que el análisis multivariado temporal mediante la aplicación de las redes neuronales, contribuye a la determinación de escenarios por sequías en el Organismo de Cuenca Pacífico Norte, aportando elementos para estimar su vulnerabilidad y riesgo futuro en la ocurrencia de sequías.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El área de estudio está comprendida por las cuencas que corresponden al Organismo de Cuenca Pacífico Norte (OCPN. Considerando que

las sequías generalmente son de gran extensión (Velasco, 2002), la cuenca constituye la unidad de gestión y es la escala apropiada para evaluar los impactos ambientales, económicos y sociales (Ravelo, 2008; Douriet, 2010; Torrecillas *et al.*, 2013).

Las cuencas de los ríos Fuerte, Sinaloa, Mocorito, Culiacán, San Lorenzo, Elota, Piaxtla, Quelite, Presidio, Baluarte, Cañas, Acaponeta y San Pedro, así como las corrientes independientes que integran el OCPN, se encuentran ubicadas en el noroeste de México, entre las coordenadas 28°10'30"N y 21°41'49"N y 103°27'50"W y 109°25'55"W y comprende la totalidad del estado de Sinaloa y parte de los estados de Chihuahua, Durango, Zacatecas y Nayarit. Figura 1 (CONAGUA, 2014).

Los climas predominantes en esta región hidrológica son templado sub-húmedo y cálido sub-húmedo (INEGI, 1981). La temperatura media anual en la región presenta fuertes variaciones y oscila entre los 10 y los 26°C, por efecto de la altitud y posición geográfica. Se puede observar



Figura 1. Localización del Organismo de Cuenca Pacífico Norte.

que en la porción norte de la región se presentan temperaturas más cálidas y secas, aunque en las partes serranas pueden presentarse temperaturas bajo cero en ciertas épocas del año. Hacia el sur, la temperatura se hace más templada y húmeda, con temperaturas medias de 12 a 18°C, máximas de 22°C y mínimas bajo cero en las zonas serranas en ciertas épocas. En el caso de la región del Valle del Guadiana, la temperatura media es de entre 16 y 18°C, con mínimas bajo de cero en ciertas épocas y máximas mayores a 24°C.

Indicadores de sequía

Los indicadores de sequías son valores normativos que nos permiten la clasificación de las fases de la sequía y son útiles para el monitoreo y pronóstico del evento.

Los índices meteorológicos utilizados fueron: el Índice Estandarizado de Precipitación (SPI, por sus siglas en inglés), a diferentes escalas de tiempo (McKee *et al.*, 1993), y el Índice de Severidad de la Sequía de Palmer (PDSI, por sus siglas en inglés) (Palmer, 1965). A tal efecto, se generó una base de datos meteorológicos, edafológicos y agrológicos correspondientes a la zona en estudio; para su estimación en forma automatizada, con la finalidad de hacer los cálculos más rápidos, se utilizó el Sistema Operativo de Sequías (SOS), creado in situ en el desarrollo del Proyecto de Sequías del OCPN (Ravelo, 2008), el cual también grafica los mapas de la variabilidad espacial de la sequía.

El SPI es un indicador basado en la probabilidad de lluvias en cualquier período de tiempo. Fue desarrollado por McKee *et al* (1993, 1995) para cuantificar el déficit de precipitaciones durante múltiples escalas de tiempo.

El PDSI (Palmer, 1965; Alley, 1984), por su parte, se calcula a partir de un balance hídrico seriado, el cual utiliza datos de precipitación, temperatura (para obtener la evapotranspiración potencial) y capacidad de retención de agua del suelo, por lo que se le considera un índice de tipo edafo-meteorológico, ya que esencialmente monitorea la disponibilidad de agua en el suelo en forma mensual o cada diez días (Ravelo, 2007; Douriet, 2010).

La base de datos meteorológicos considerados en el estudio fueron los registros históricos de 49 estaciones, desde 1978 hasta 2015, a escala mensual. Una base de datos actualizada, validada y operativa, es un elemento fundamental de cualquier sistema de monitoreo de las sequías. Por lo que todos los datos fueron sometidos a un estricto control de calidad en lo referente a

continuidad, variabilidad, magnitud, consistencia y confiabilidad. Para ello se utilizaron métodos gráficos y estadísticos apropiados, los cuales se describen a continuación. Siguiendo un criterio de continuidad, no se utilizaron series incompletas (con datos faltantes), lo cual determinó que una cantidad de estaciones fueran eliminadas de la evaluación. La calidad de los datos fue controlada mediante el uso de parámetros estadísticos (desviación estándar), identificando a aquellas series y/o datos sospechosos. El uso de tres desviaciones ($p > 0,99$) por encima o debajo del valor medio se utilizó para identificar valores incorrectos que fueron eliminados. También se realizó una validación cruzada entre estaciones vecinas.

Los pasos que se siguieron son (Figura 2):

- Selección de estaciones meteorológicas
- Compilación y preparación de las bases de datos
- Estimación de los índices de sequía SPI y PDSI
- Análisis y evaluación
- Pronóstico de ocurrencia

Pronóstico de sequías

Para el pronóstico de la ocurrencia de sequías, se utilizaron Redes Neuronales Artificiales (RNA), las cuales son modelos matemáticos inspirados en sistemas biológicos, adaptados y simulados en computadoras convencionales (Bocco and Ovando, 2013). Una RNA tiene un conjunto de propiedades específicas, como son la habilidad de adaptarse o aprender, generalizar u organizar la información, todo ello basado en un procesamiento eminentemente paralelo (Kröse and Van der Smagt, 1993). En el proceso de aprendizaje, los enlaces ponderados de las neuronas se ajustan de manera que se obtengan ciertos resultados específicos. Una red neuronal no necesita un algoritmo para resolver un problema, ya que ella puede generar su propia distribución de pesos en los enlaces mediante el aprendizaje. Este proceso es realizado con series temporales de los índices de sequía de forma de lograr un sistema calibrado y validado para el pronóstico. Para la aplicación del pronóstico de sequías meteorológicas, mediante el programa Neurosolutions.xlsx, se utilizó la metodología propuesta durante el desarrollo del Proyecto de Sequías en el OCPN (Ravelo, 2007; Ravelo *et al.*, 2014).

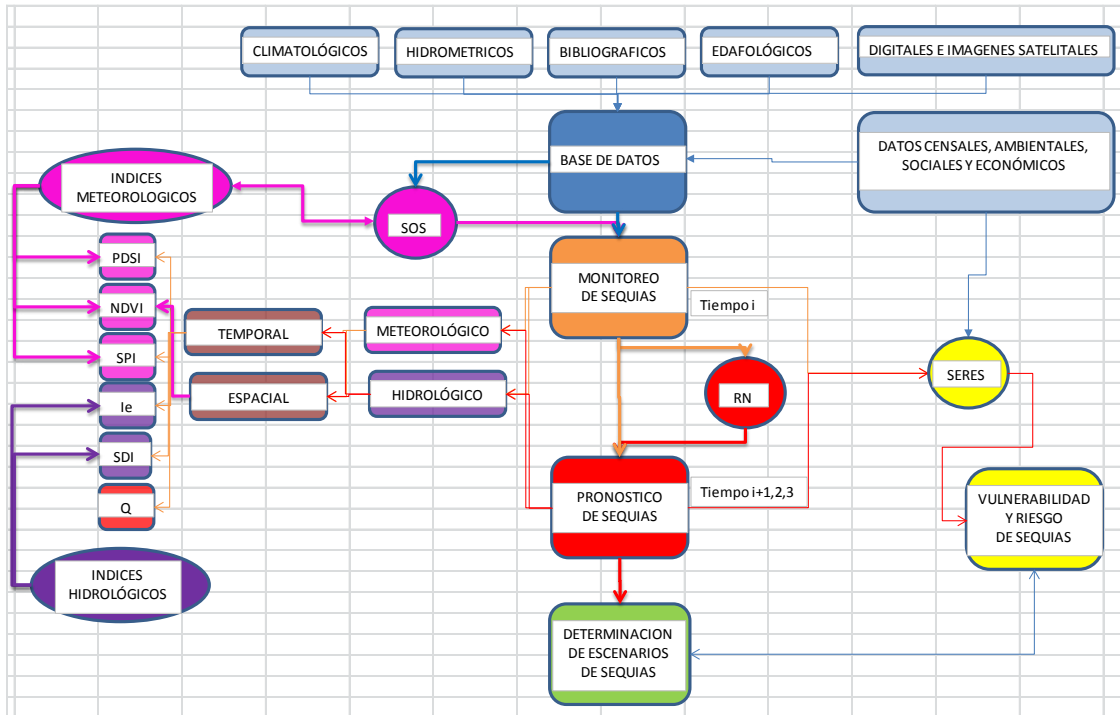


Figura 2. Diagrama del proceso para la determinación de escenarios por sequía

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Índice SPI

En la Tabla 1, se muestran los valores del SPI3 (índice estandarizado de precipitación de los últimos 3 meses) de la estación Culiacán para el periodo 1978-2015, indicativos de las sequías ocurridas en el valle agrícola de Culiacán y costa del centro del estado de Sinaloa. Se observan sequías de diversas intensidades y duraciones, que van desde sequías incipientes en diferentes meses del año hasta sequía extrema en los meses de julio, agosto y octubre en diferentes años, sobresaliendo las de 1979, 1982 y 1999. Si bien es cierto que son pocos los años con sequías extremas, las otras fases con diferentes duraciones se han combinado para provocar cuantiosos daños por sequía en la agricultura, ganadería, generación de energía eléctrica, abastecimiento de agua potable, acuacultura y medio ambiente con severos impactos sociales. Las sequías de fase severa se han presentado con mayor frecuencia que las de fase extrema, inclusive en los meses en donde no se han presentado las sequías extremas (septiembre y noviembre) para diferentes años. No existe ningún año durante el periodo de análisis

en el cual no se haya presentado el fenómeno en alguna de sus fases; asimismo, los periodos de sequía han sido variados, desde muchos de corta duración hasta muy pocos de larga duración.

De acuerdo al resultado del análisis del SPI en sus escalas de 3, 6 y 12 meses (en este documento solo se presentan los resultados del SPI3), los años más secos fueron, 1979-1980, 1982, 1987-1989, 1999-2000 y 2011-2012, en tanto los húmedos fueron 1983-1985, 1991-1992, 1994, 1996, 2004-2005, 2008 y 2013-2015. Como puede observarse durante la última década ha habido sequías y excesos de humedad muy intensos, lo cual representa un 24% del periodo expuesto a sequías extremas y un 29% a condiciones de abundante humedad. Esto es, alrededor del 50% del tiempo, el OCPN está expuesto a eventos extremos de los cuales prácticamente la mitad es por sequía.

En la Figura 3 se muestra la variación del índice SPI3 para la estación Culiacán a lo largo de todo el periodo analizado.

La Figura 4 presenta el SPI3 para agosto de 2011 en todo el territorio del OCPN, indicándose en general una sequía de incipiente a moderada y que alcanza incluso la condición de extrema en algunos sectores.

La sequía meteorológica extendida a través del

Tabla 1. Valores del SPI a 3 meses, período 1978-2015, Estación Culiacán.

Estación Climatológica Culiacán												
SPI3												
Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1978			0.45	1.05	0.16	-0.18	-0.63	-0.67	-1.03	-0.31	-0.31	0.54
1979	0.62	0.97	1.09	0.67	0.72	0.57	-0.86	-2.41	-1.56	-1.32	-0.11	-0.86
1980	-0.55	-0.33	-0.39	0.05	0.72	-0.31	-0.81	-0.22	0.11	1.75	1.55	1.44
1981	1.12	1.20	1.66	0.54	1.41	0.60	-0.89	-1.33	-1.91	-0.46	-0.06	0.59
1982	-0.78	-0.55	-0.19	-0.43	0.16	-0.58	-2.08	-2.59	-1.60	-0.90	0.62	0.80
1983	1.38	1.31	1.48	2.46	3.30	1.04	-0.06	0.04	-0.07	-0.29	0.70	1.15
1984	1.87	1.10	1.25	-0.43	0.93	2.84	2.49	2.04	1.18	0.00	0.19	1.02
1985	1.43	1.51	0.73	0.58	0.44	1.40	0.48	0.16	-0.91	-0.36	-0.37	0.47
1986	-0.55	-0.20	0.18	0.89	1.72	0.90	0.33	-0.34	-1.23	0.23	0.62	1.38
1987	-0.45	-0.23	-0.39	-0.43	0.16	-0.58	-0.10	0.25	-0.21	-0.64	-1.49	-0.29
1988	0.06	0.22	-0.92	-0.43	0.16	-0.58	-0.83	-0.30	-0.77	-0.73	-1.54	-0.71
1989	0.05	0.44	0.56	0.54	0.16	-0.58	0.09	0.18	-0.54	-0.64	-0.58	0.62
1990	0.54	0.29	0.24	0.63	0.16	0.84	1.82	1.08	0.16	-1.58	-0.80	0.90
1991	0.98	0.75	-0.61	-0.17	0.16	-0.58	0.79	-0.04	0.72	-0.36	0.59	1.30
1992	2.65	2.78	2.53	1.05	0.59	-0.18	0.00	0.28	0.11	-0.38	-0.95	-0.97
1993	-0.27	-0.17	0.21	0.13	0.16	-0.58	-1.76	-0.47	-0.83	-0.22	-0.59	-0.01
1994	0.20	-1.25	0.29	0.86	1.88	1.75	1.36	2.05	1.72	1.03	-0.09	0.19
1995	0.16	0.13	-0.92	-0.43	0.16	-0.58	-0.42	-0.28	-0.21	-0.41	-0.72	-1.41
1996	-1.41	-1.25	-0.92	-0.43	0.16	1.09	0.92	0.72	1.42	0.97	1.02	0.15
1997	0.37	0.29	0.69	1.35	2.93	1.89	0.68	-0.10	0.34	-0.25	0.63	0.52
1998	0.88	0.69	0.29	0.86	0.16	-0.58	-0.49	0.35	0.23	0.07	-0.99	-1.41
1999	-1.41	-1.25	-0.92	-0.43	0.16	1.09	0.45	-0.63	-1.70	-2.39	-1.74	-0.90
2000	-0.97	-0.75	-0.92	-0.43	0.16	0.67	-0.11	-0.18	-1.27	0.13	0.56	1.34
2001	0.35	-0.68	0.47	1.08	2.03	-0.18	1.06	0.65	0.08	-1.01	-1.20	-0.24
2002	-0.78	-0.14	0.08	0.54	0.16	-0.58	-0.33	-1.71	-0.14	-0.07	0.94	-0.12
2003	-0.55	-0.14	0.14	0.67	0.16	0.67	0.37	-0.13	0.65	0.34	0.62	-0.31
2004	0.77	1.16	1.75	1.35	1.47	0.33	-0.61	-0.34	0.22	1.67	1.87	1.55
2005	0.73	1.52	1.96	2.85	0.16	-0.58	-0.17	-0.14	-0.57	-0.68	-1.00	-0.36
2006	-0.90	-0.97	-0.61	-0.43	0.16	0.97	0.63	0.12	0.12	-0.32	-0.13	-0.29
2007	-0.22	0.20	0.45	0.49	0.16	0.18	-1.79	0.02	0.87	1.27	0.62	0.09
2008	0.42	0.13	-0.92	-0.43	0.16	0.28	-0.46	1.48	1.69	1.70	-0.07	-0.42
2009	-1.07	-0.85	-0.31	-0.05	0.59	0.95	0.30	0.33	-0.57	0.05	-0.23	0.74
2010	-0.01	0.81	1.10	1.62	0.83	-0.18	-1.47	-0.68	0.22	0.53	0.19	-1.41
2011	-1.41	-1.25	-0.92	-0.43	0.16	-0.58	0.82	1.09	0.61	-0.51	-1.34	-0.61
2012	-0.27	-0.75	-0.39	0.05	0.16	0.37	0.26	0.54	0.69	0.55	0.08	0.23
2013	-0.03	0.19	-0.14	-0.43	0.16	-0.18	-1.09	-0.94	2.39	2.37	2.84	0.53
2014	0.87	-0.61	-0.48	-0.43	0.59	1.57	2.02	1.74	0.92	-0.76	-0.91	-0.16
2015	0.05	0.33	1.00	1.66	1.77	0.70	-0.28	0.43	0.69	1.90	1.47	1.67

tiempo genera una sequía hidrológica en la cuenca. Existen pequeñas zonas en el OCPN con sequía extrema, como en la cuenca alta del río Culiacán y con humedad de incipiente a moderada en la costa del centro y sur del Organismo. En el mes de agosto la sequía extrema se incrementó notablemente en la Sierra Madre Occidental en las cuencas de los ríos Fuerte y Sinaloa hacia la parte norte del OCPN y en la cuenca del río San Pedro en el estado de

Durango; la pequeña zona de sequía extrema en la cuenca del río Culiacán se extendió a la cuenca del río San Lorenzo; también las sequías severa y moderada crecieron disminuyendo la incipiente; en cambio, también aumentó la zona de humedad incipiente y moderada en la línea de costa de la parte centro al sur del OCPN, apareciendo zonas de humedad excesiva y extrema en la parte sur del OCPN.

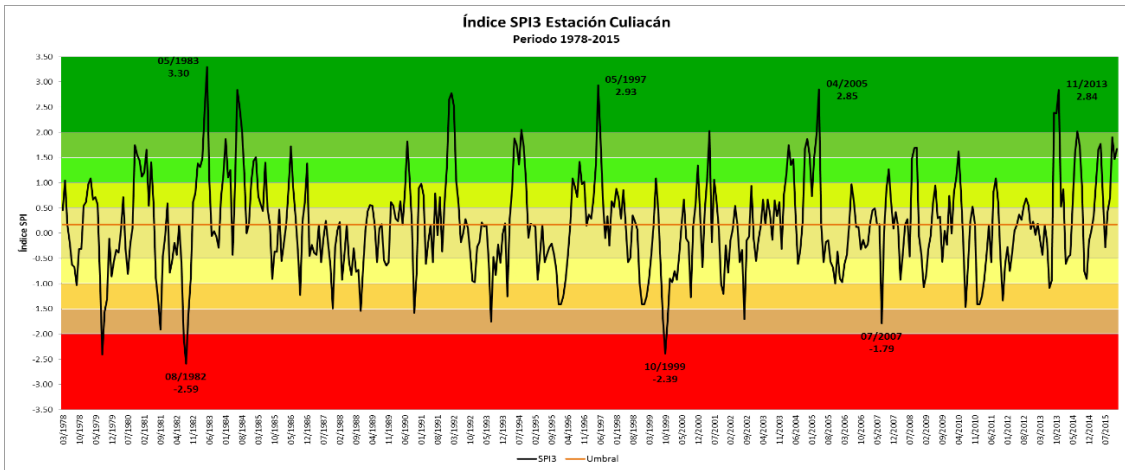


Figura 3. Variación del índice Índice Estandarizado de Precipitación para 3 meses (SPI3) para el período 1978-2015

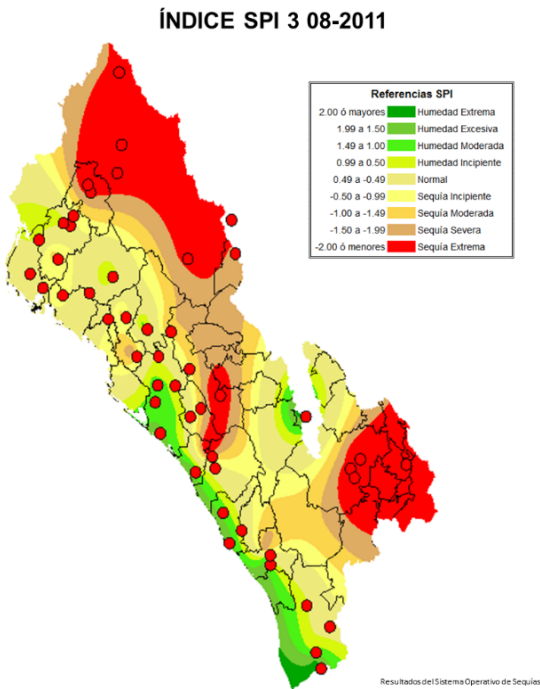


Figura 4. Condición de sequía/humedad en el OCPN evaluada a partir de Índice Estandarizado de Precipitación para 3 meses (SPI3), en agosto de 2011. Los puntos rojos corresponden a las estaciones meteorológicas utilizadas en el estudio

Índice PDSI

La Figura 5 presenta los resultados del PDSI para la estación de Culiacán durante el período analizado entre 1978 y 2015.

Los periodos más secos fueron 1979-1980, 1982, 1988-1989, 1999-2000, 2011-2012, en tanto los más húmedos fueron 1983-1985, 1992, 1995, 1996-1997, 2001, 2005, 2014 y 2015.

De manera similar a la descripción de la Figura 4, en la Figura 6 se observa que para el índice PDSI en el mes de agosto, la sequía extrema aumentó notablemente en la Sierra Madre Occidental, en las cuencas de los ríos Fuerte y Sinaloa y aparece en la parte alta de las cuencas de los ríos Mocorito y Culiacán; también se registra una sequía severa en la parte centro norte del OCPN y en la cuenca del río San Pedro en el estado de Durango; aparece una humedad incipiente y moderada en la línea de costa de la parte centro al sur del OCPN, apareciendo zonas de humedad excesiva y extrema en la parte sur.

Los resultados del análisis de la sequía en el OCPN para el período 2010-2015, muestran años con sequía del 2010 al 2013, ya que los años 2014 y 2015, fueron húmedos. La mayor densidad de estaciones climatológicas utilizadas en este trabajo permite un monitoreo y evaluación de la sequía más preciso geográficamente que los producidos por los monitores de sequías de América del Norte (NADM, 2016) y el Monitor de sequías de México (SMN, 2016), que operan a una escala mayor y utilizan menor cantidad de estaciones climatológicas. La precisión del monitoreo de la sequía a la escala utilizada en este trabajo, asegura la estimación adecuada de la vulnerabilidad y riesgo vinculados a esta adversidad en los municipios y cuencas que conforman el OCPN.

Pronóstico temporal y espacial de las sequías meteorológicas

Se describen los resultados del pronóstico temporal y espacial de las sequías meteorológicas en el OCPN, mediante el uso generalizado de

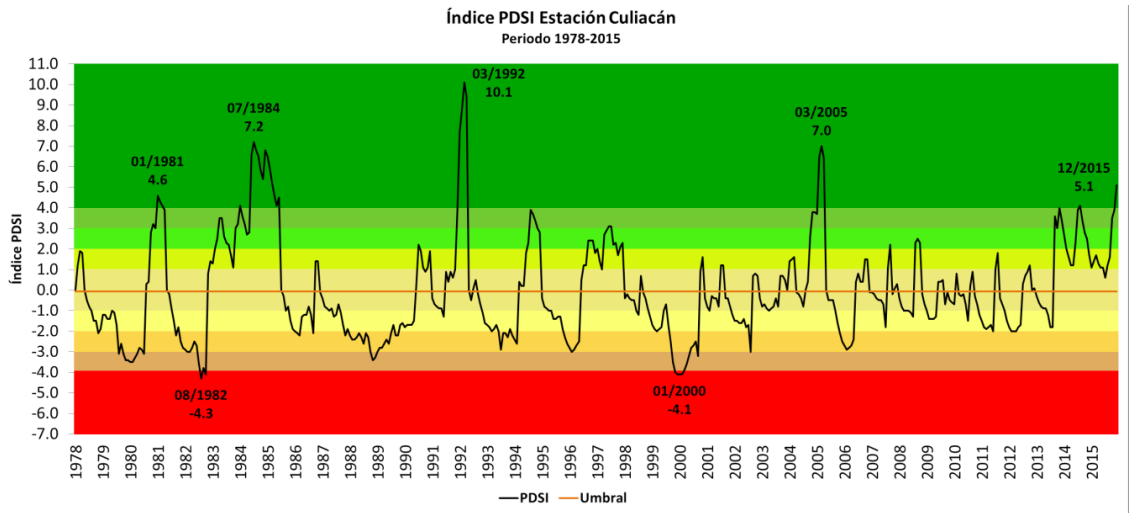


Figura 5. Variación del índice de severidad de sequía de Palmer (PDSI) para la estación de Culiacán en el período 1978-2015.

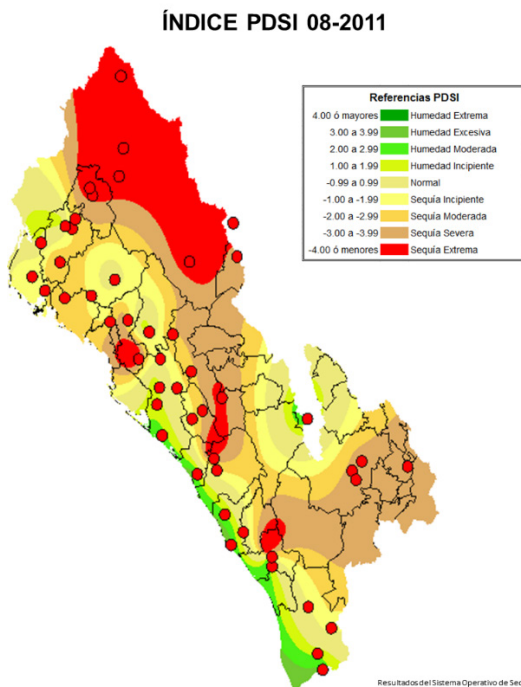


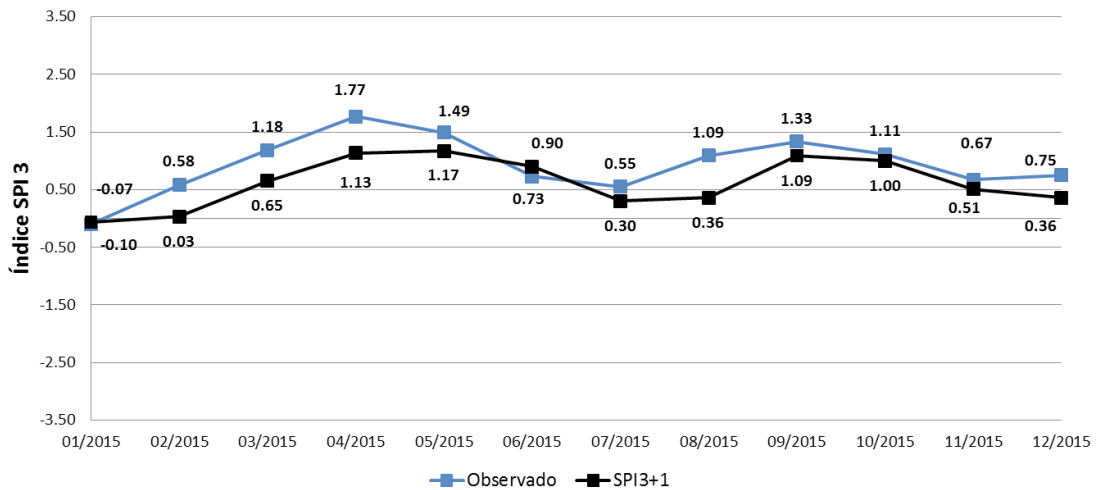
Figura 6. Condición de sequía/humedad en el OCPN en agosto de 2011 de acuerdo al índice de severidad de sequía de Palmer (PDSI). Los puntos rojos corresponden a las estaciones meteorológicas utilizadas en el estudio.

las redes neuronales con índices de sequía. Los resultados en ambos casos indican que, el pronóstico con un mes de anticipo fue mejor invariablemente que a dos meses y el de dos meses mejor que el de tres meses, como lo muestran los resultados de los pronósticos para el año 2015 para el índice SPI3 en la Figura 7 y Tabla 2.

Puede apreciarse que para el primer mes existe una pequeña diferencia entre el valor pronosticado del SPI3 para febrero en el mes anterior y el calculado con los datos del mes de febrero, quedando en fase de normalidad hídrica para los meses de estiaje de febrero a mayo. La diferencia entre lo pronosticado y lo observado se incrementa un poco quedando algunos de ellos en fases de sequía diferentes; vuelven a ser similares en junio y julio, incrementando la brecha en los meses de agosto y septiembre que son los más lluviosos del año; en octubre y noviembre la diferencia es pequeña quedando ambos en la fase de humedad moderada e incipiente, respectivamente. Finalmente, en diciembre de 2015, la brecha se incrementa de nuevo. Las tendencias entre lo observado y lo pronosticado a un mes son muy similares siendo mayor el valor observado que el pronosticado en este intervalo de tiempo, por lo que el pronóstico quedó subestimado.

La verificación de la precisión de los pronósticos para cuatro localidades se presenta en la Tabla 2. Se debe destacar que el coeficiente de determinación más alto lo presenta el pronóstico que se anticipa un mes en la estación El Varejonal con 0.7067. En las otras estaciones los valores son menores a 0.54. El coeficiente de determinación para el pronóstico a dos y tres meses fue de bajo a muy bajo, con valores menores a 0.42 a dos meses y menores a 0.20 a tres meses. Estos coeficientes indican bajo grado de asertividad en el pronóstico de los índices de sequía SPI3 a uno, dos y tres meses usando redes neuronales.

Pronóstico a 1 mes Estación El Varejonal Año 2015



Pronóstico a 2 meses Estación El Varejonal Año 2015

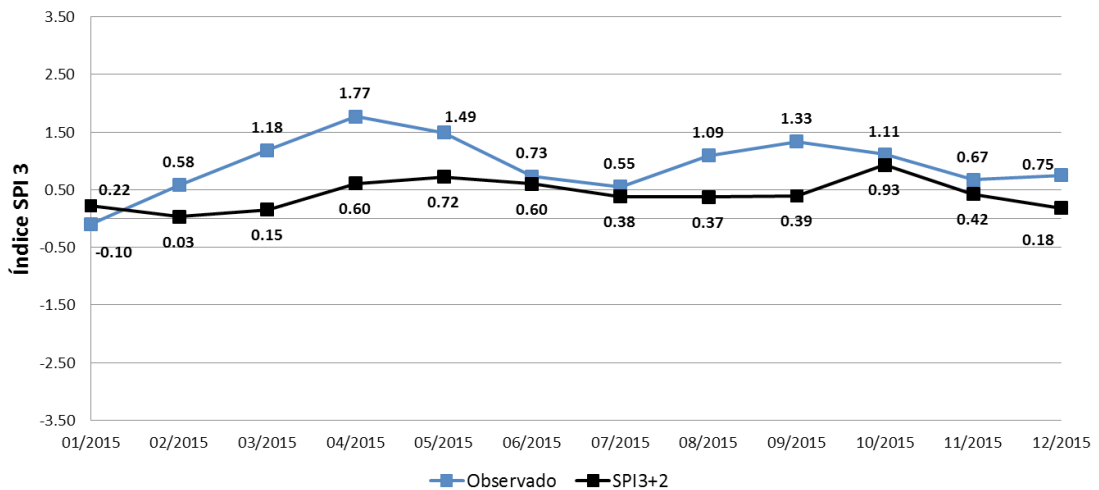


Figura 7. Pronóstico de SPI3 con 1, 2 y 3 meses de antelación con respecto al valor observado para la estación El Varejonal en el año 2015.

En la Tabla 3 y Figura 8 se presenta el pronóstico de la sequía meteorológica para la localidad de El Varejonal para el índice PDSI durante todos los meses del año 2015. El de enero se realizó para los meses de febrero, marzo y abril; en febrero para los meses marzo, abril y mayo, y así sucesivamente hasta diciembre.

La verificación de la precisión de los pronósticos se presenta en la Tabla 4. Se debe destacar que el coeficiente de determinaciones siempre igual o

superior a 0.68 para pronósticos con un mes de antelación en las estaciones Culiacán, Sanalona y Varejonal, localizadas en la zona centro del OCPN; en cambio para la estación Huites, localizada en la zona norte del Organismo, el coeficiente es muy bajo con valores inferiores a 0.46 para los pronósticos a 2 y 3 meses.

Los coeficientes altos indican una buena correlación entre el índice de sequía calculado con los datos del mes y el valor pronosticado mediante

Tabla 2. Coeficiente de determinación (R²), Índice de concordancia de Willmott (d), error absoluto medio (MAE), error cuadrático medio (RMSE), y porcentaje del error cuadrático medio (%MRSE) entre valores calculados y pronosticados del SPI3 mensual para las estaciones Culiacán, Sanalona, El Varejonal y Huities en el año 2015 (n=12).

Fecha	Índice SPI 3 Estación El Varejonal			Índice SPI 3 Estación Culiacán			Índice SPI 3 Estación Sanalona			Índice SPI 3 Estación Huities							
	Obs.	SPI3+1	SPI3+2	SPI3+3	Obs.	SPI3+1	SPI3+2	SPI3+3	Obs.	SPI3+1	SPI3+2	SPI3+3	Obs.	SPI3+1	SPI3+2	SPI3+3	
ene-15	-0,10	-0,07	0,22	0,40	0,05	0,33	-0,02	-0,04	-0,01	-0,08	-0,30	0,04	0,04	-0,47	0,50	0,36	
feb-15	0,58	0,03	0,03	0,31	0,32	0,11	0,42	0,15	0,52	0,04	-0,03	-0,26	-0,26	-0,02	-0,55	0,42	
mar-15	1,18	0,65	0,15	0,13	1,00	-0,05	-0,23	0,09	1,51	0,63	0,09	0,02	0,02	0,72	0,63	-0,15	
abr-15	1,77	1,13	0,60	0,23	1,64	0,78	-0,16	-0,31	2,22	1,44	0,59	0,08	0,08	1,32	0,56	0,22	
may-15	1,49	1,17	0,72	0,28	1,77	1,49	0,73	-0,19	2,79	1,78	1,11	0,39	0,39	1,27	1,20	0,32	
jun-15	0,73	0,90	0,60	0,35	0,70	1,40	1,14	0,43	1,01	1,95	0,95	0,52	0,52	1,02	0,93	0,25	
jul-15	0,55	0,30	0,38	0,24	-0,28	0,28	0,94	0,73	1,14	0,10	1,07	0,15	0,15	1,71	0,20	0,57	
ago-15	1,09	0,36	0,37	0,21	0,42	-0,41	0,09	0,62	0,43	0,36	-0,28	0,34	0,34	2,05	1,53	0,48	
sep-15	1,33	1,09	0,39	0,60	0,66	0,48	-0,18	0,30	0,40	0,47	0,40	0,05	0,05	2,19	1,72	0,13	
oct-15	1,11	1,00	0,93	0,27	1,89	0,88	0,67	0,18	0,62	0,19	0,28	0,37	0,37	1,44	1,39	0,95	
nov-15	0,67	0,51	0,42	0,47	1,48	1,36	0,64	0,43	1,07	0,58	-0,01	0,14	0,14	1,33	0,90	0,53	
dic-15	0,75	0,36	0,18	0,18	1,69	1,07	1,04	0,40	1,29	0,92	0,50	-0,04	-0,04	0,72	0,98	0,61	
	R ²	0,7067	0,2324	0,0271	R ²	0,3947	0,0183	0,1958	R ²	0,5346	0,4180	0,0415	0,0415	R ²	0,5346	0,4180	0,0415
	d	0,8157	0,5447	0,4147	d	0,7371	0,4261	0,3551	d	0,7867	0,6043	0,4454	0,4454	d	0,7867	0,6043	0,4454
CDE	MAE	0,3440	0,5671	0,7070	MAE	0,5581	0,8152	0,9149	MAE	0,5518	0,7187	0,9405	0,9405	MAE	0,5518	0,7187	0,9405
	RMSE	0,4049	0,6638	0,8096	RMSE	0,6447	0,9565	1,1356	RMSE	0,6560	0,9264	1,1976	1,1976	RMSE	0,6560	0,9264	1,1976
	%RMSE	43,5788	71,4417	87,1361	%RMSE	68,2192	101,2190	120,1713	%RMSE	60,6039	85,5804	110,6371	110,6371	%RMSE	60,6039	85,5804	110,6371

Tabla 3. Pronóstico del PDSI a 1, 2 y 3 meses de la estación Varejonal, año 2015

		Estación El Varejonal			
Año	Mes	Índice PDSI			
2015	Enero	Mes	Febrero	Marzo	Abril
		Pronostico	-1,07	-1,12	-1,10
	Observado	0,90	1,20	1,00	
	Febrero	Mes	Marzo	Abril	Mayo
		Pronostico	0,94	0,90	0,97
	Observado	1,20	1,00	0,80	
	Marzo	Mes	Abril	Mayo	Junio
		Pronostico	1,19	1,27	1,29
	Observado	1,00	0,80	1,00	
	Abril	Mes	Mayo	Junio	Julio
		Pronostico	0,98	0,96	1,10
	Observado	0,80	1,00	1,00	
	Mayo	Mes	Junio	Julio	Agosto
		Pronostico	0,75	0,86	0,85
	Observado	1,00	1,00	2,00	
	Junio	Mes	Julio	Agosto	Septiembre
		Pronostico	1,08	1,07	1,06
	Observado	1,00	2,00	2,30	
	Julio	Mes	Agosto	Septiembre	Octubre
		Pronostico	1,03	1,05	1,05
	Observado	2,00	2,30	2,30	
	Agosto	Mes	Septiembre	Octubre	Noviembre
		Pronostico	2,05	2,00	2,01
	Observado	2,30	2,30	2,40	
Septiembre	Mes	Octubre	Noviembre	Diciembre	
	Pronostico	2,23	2,24	2,14	
Observado	2,30	2,40	2,70		
Octubre	Mes	Noviembre	Diciembre	Enero	
	Pronostico	2,42	2,44	2,49	
Observado	2,40	2,70	-0,30		
Noviembre	Mes	Diciembre	Enero	Febrero	
	Pronostico	2,39	2,46	2,51	
Observado	2,70	-0,30	-0,60		
Diciembre	Mes	Enero	Febrero	Marzo	
	Pronostico	2,58	2,49	2,43	
Observado	-0,30	-0,60	-0,50		

las redes neuronales. Los errores entre el valor calculado y el pronosticado no superan los límites de la clase de sequía, excepto para la localidad de Huites y para pronósticos a 2 y 3 meses. Esto significa que, si bien hay diferencias entre ambos valores, el pronóstico corresponde a la misma clase de sequía que el índice calculado para ese mes. Resultados similares fueron presentados por Serio *et al.* (2010) en la evaluación de la precisión del SPI y Ravelo *et al.* (2014) en la evaluación de la precisión del PDSI como indicadores de la ocurrencia de sequías.

En la Figura 9 se ilustra el pronóstico espacial de

la sequía meteorológica mediante el índice PDSI y el comportamiento real de las condiciones hídricas en el OCPN. Los pronósticos se elaboraron para el mes de febrero y se validaron en los meses de marzo, abril y mayo. Para el mes de marzo se pronosticó el estado de sequía de acuerdo al índice PDSI del mes de febrero de 2015 cuando había pequeñas zonas con sequía incipiente en las localidades de Ahome, Tubares, El Dorado y La Estancia. Mientras en el Dorado y La Estancia se presentó una fase de sequía incipiente (índice PDSI-0,3), en Ahome se tuvo normalidad hídrica y en Tubares humedad incipiente. En cambio, en Huites que se

Tabla 4. Coeficiente de determinación (R²), Índice de concordancia de Wilcoff(d), error absoluto medio (MAE), error cuadrático medio (MRSE), y porcentaje del error cuadrático medio (%AMRSE) entre valores calculados y pronosticados del PDSI mensual para las estaciones Culliacán, Sanalona, El Varejonal y Huites para el año 2015 (n=12).

Fecha	Índice PDSI Estación El Varejonal			Índice PDSI Estación Culliacán			Índice PDSI Estación Sanalona			Índice PDSI Estación Huites						
	Obs.	PDSI+1	PDSI+2	PDSI+3	Obs.	PDSI+1	PDSI+2	PDSI+3	Obs.	PDSI+1	PDSI+2	PDSI+3	Obs.	PDSI+1	PDSI+2	PDSI+3
ene-15	-1,10	-0,85	-0,21	-0,43	1,10	-0,84	1,99	2,11	-2,20	-1,94	-1,42	-1,39	-0,90	-0,65	-0,66	-0,33
feb-15	0,90	-1,07	-0,82	-0,21	0,40	-1,69	-1,37	1,79	0,80	-2,11	-1,75	-1,32	0,40	-0,89	-0,77	-0,67
mar-15	1,20	0,94	-1,12	-0,92	0,80	0,38	-1,83	-1,54	2,20	1,18	-1,83	-1,56	0,50	0,23	-1,07	-0,78
abr-15	1,00	1,19	0,90	-1,10	0,60	0,86	0,28	-1,90	1,90	2,58	1,38	-1,57	0,90	0,17	0,09	-1,03
may-15	0,80	0,98	1,27	0,97	0,40	0,61	0,87	0,13	2,20	1,82	2,53	1,08	0,70	0,90	0,13	-0,08
jun-15	1,00	0,75	0,96	1,29	0,50	0,15	0,46	0,71	2,50	2,22	1,68	2,57	0,50	0,72	0,88	0,00
jul-15	1,10	1,08	0,86	1,10	0,00	0,51	0,11	0,49	3,00	2,41	2,08	2,09	2,40	0,26	0,62	0,85
ago-15	2,10	1,03	1,07	0,85	0,60	-0,22	0,37	0,00	2,30	2,87	2,34	1,76	3,40	2,10	0,08	0,63
sep-15	2,30	2,05	1,05	1,06	1,10	0,56	-0,48	0,15	2,40	1,92	2,56	2,06	3,50	3,58	2,06	-0,20
oct-15	2,30	2,23	2,00	1,05	3,50	1,05	0,42	-0,76	3,50	2,21	1,57	2,26	3,80	3,80	3,96	2,49
nov-15	2,40	2,42	2,24	2,01	3,90	4,01	1,07	0,38	3,30	2,97	1,99	1,29	4,40	4,11	3,93	4,06
dic-15	2,70	2,39	2,44	2,14	5,10	3,99	4,17	0,98	3,90	3,18	2,57	1,77	-0,10	4,53	4,37	4,08
ene-16	-0,30	2,58	2,46	2,49	4,60	5,09	4,15	4,19	3,40	3,62	2,84	1,86	0,31	4,66	4,55	1,86
feb-16	-0,60	-0,34	2,49	2,51	3,90	3,98	4,70	3,96	2,80	3,07	3,36	2,58	-1,09	0,20	4,77	2,58
mar-16	-0,50	-0,39	-0,22	2,43	3,70	3,49	3,64	4,31	2,70	2,52	2,72	3,04	-0,97	-1,02	-0,66	3,04
	R ²	0,4407	0,0720	0,0004	R ²	0,7889	0,6082	0,2616	R ²	0,7284	0,4655	0,4242	R ²	0,4918	0,1341	0,0028
	d	0,8197	0,5792	0,3880	d	0,9185	0,8461	0,6912	d	0,8983	0,7552	0,6814	d	0,8427	0,6534	0,4730
CDE	MAE	0,5387	0,9940	1,3312	MAE	0,7730	1,0793	1,5155	MAE	0,6781	1,0562	1,3756	MAE	0,8289	1,5113	2,0687
	RMSE	0,9596	1,4007	1,6694	RMSE	1,0745	1,4815	2,0714	RMSE	0,9523	1,4853	1,7610	RMSE	1,4364	2,1503	2,6895
	%RMSE	94,0813	137,3274	163,6648	%RMSE	53,3711	73,5838	102,8817	%RMSE	41,1650	64,2057	76,1218	%RMSE	126,0042	188,6193	235,9215

Pronóstico a 1 mes Estación El Varejónal Año 2015

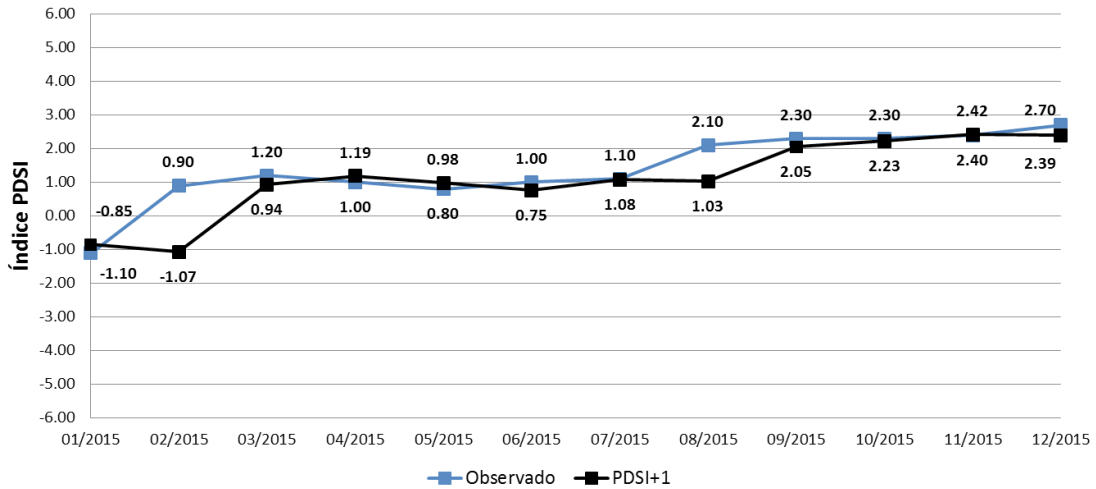


Figura 8. Pronóstico a un mes y cálculo del PDSI en la estación El Varejónal para el año 2015

pronosticó fase de normalidad hídrica se cumplió con el pronóstico; zonas como el norte de Sinaloa en la cuenca del río Fuerte y en la Sierra Madre Occidental se pronosticaron condiciones de humedad en diferentes fases y estas fueron superadas por la realidad, alcanzando una fase de humedad superior a la esperada; lo mismo ocurrió en la zona del río San Pedro en el estado de Durango a excepción de la localidad de Francisco Villa donde fueron coincidentes. En la parte sur del OCPN las condiciones hídricas entre lo pronosticado y lo real fueron similares, principalmente en la zona de las localidades de Rosamorada y Ruiz.

Los resultados del monitoreo y pronóstico de sequías mediante el índice PDSI pueden mejorarse al utilizar los valores de humedad del suelo dinámicos en lugar de valores promedios en sus umbrales. Estos valores dinámicos pueden obtenerse mediante los datos de humedad proporcionados por las imágenes EUMETSAT (SCADO, 2013; EDO, 2016; Ravelo *et al.*, 2016), o con los datos CCI de humedad de suelo satelitales de la ESA (<http://www.esa-soilmoisture-cci.org/node/145>) ó utilizando el índice de humedad de suelo SWI disponible en ESA Copernicus (<http://land.copernicus.eu/global/products/swi>).

Asimismo, el monitoreo y pronóstico de sequías meteorológicas a uno, dos y tres meses puede llevarse a cabo para otras regiones o localidades

de México en particular, o para Latinoamérica en general (Ravelo, 2012; Ravelo *et al.*, 2014; Ravelo *et al.*, 2016).

CONCLUSIONES

- El Sistema Operativo de Sequías (SOS) permite identificar acertadamente las condiciones hídricas extremas que afectan recurrentemente al Organismo de Cuenca Pacífico Norte (OCPN).

- Un número de estaciones climatológicas y la escala a nivel de cuenca utilizada en el SOS permiten lograr una mejor aproximación al fenómeno de la sequía meteorológica. Asimismo, el monitoreo de la sequía a escala regional permite una mejor estimación del riesgo de sequía por municipio, cuenca y consejos de cuenca del OCPN y la determinación de escenarios de sequía puede contribuir a una mejor gestión del riesgo y la respuesta al evento.

- Los pronósticos de sequías meteorológicas mediante el índice PDSI mensual han probado una alta asertividad, por lo que pueden utilizarse en otros modelos de escala múltiple como el SCADO de la Comunidad Europea (UE, 2017; CIIFEN, 2017).

- El modelo de red neuronal Multilayer Perceptron de dos capas pronosticó adecuadamente los

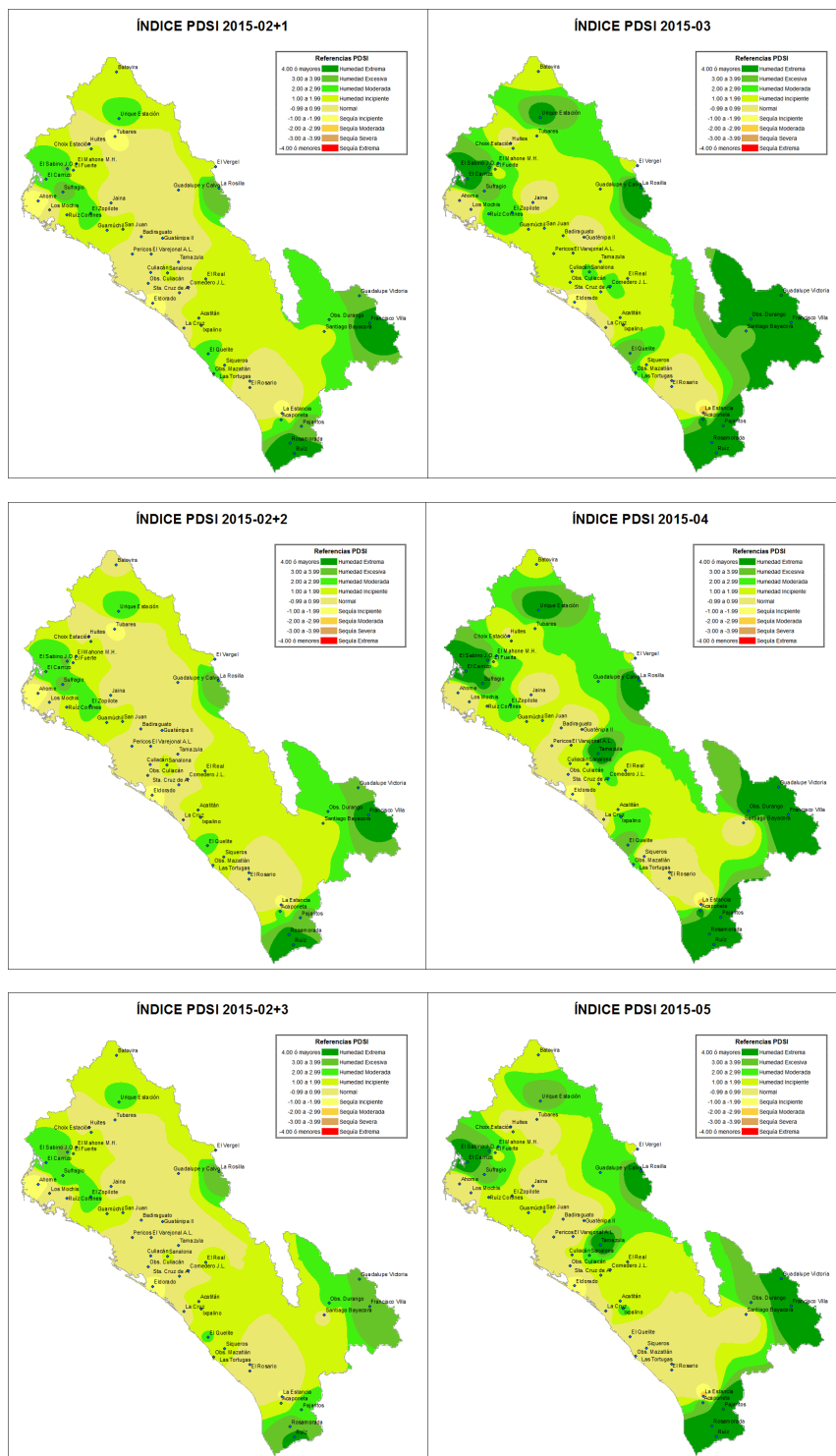


Figura 9. Pronóstico de las condiciones hídricas en el OCPN. PDSI pronosticado en febrero para los meses de marzo, abril y mayo 2015 vs. el PDSI calculado para esos meses

índices de sequía para las localidades de El Varejonal y Sanalona, al obtener coeficientes de determinación de 0.7067 y concordancia de Willmott menores a 0.8157.

- Los resultados del monitoreo y pronóstico de sequías mediante los índices SPI y PDSI pueden servir de insumo para evaluar los impactos ambientales y de degradación de tierras por sequía para condiciones actuales y futuras (INPE, 2013).

BIBLIOGRAFÍA

- Alley, W.M., 1984. The Palmer Drought Severity Index: limitations and assumptions. *Journal of Climate and Applied Meteorology* 23:1100-1109
- Arreguín C., López P.M.A., Ortega G.D., Ibáñez H.O., 2016. La política pública contra la sequía en México: avances, necesidades y perspectivas. ISSN 2007-2422. *Tecnología y Ciencias del Agua*, vol. VII, núm. 5, septiembre-octubre de 2016, pp. 63-76.
- Bocco M., and Ovando, G, 2013. Notas sobre redes neuronales artificiales. CREAN, UNC. 83 páginas.
- CIIFEN, 2017. <http://crc-osa.ciifen.org/> . <http://www.ciifen.org/>
- CONAGUA, 2013. Comisión Nacional del Agua/ Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Organismo de Cuenca Pacífico Norte. Boletines de monitoreo, evaluación y pronóstico de sequías. (<http://www.conagua.gob.mx/ocpn/> Contenido.aspx?n1=2&n2=5&n3 = 11)
- CONAGUA, 2012. Comisión Nacional del Agua/ Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Organismo de Cuenca Pacífico Norte. Informes del estado de las presas.<http://www.conagua.gob.mx/OCPN07/Contenido/Documentos/PRESASgrpn.pdf>.
- CONAGUA, 2014. Comisión Nacional del Agua/ Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Programa de Medidas Preventivas y de Mitigación de la Sequía, Consejos de Cuenca Ríos Presidio al San Pedro, Ríos Mocarito al Quelite y Fuerte al Sinaloa. <http://www.conagua.gob.mx/pronacose/Contenido.aspx?n1=7&n2=54> Consultada el 12/01/2014.
- Department of Water Resources of Yunnan Province, 2011. 2010 bulletin of water resources in Yunnan Province, Kunming, Yunnan, China.
- Domínguez J., 2016. Revisión de las sequías en México: de la explicación divina a la incorporación de la ciencia. ISSN 2007-2422. *Tecnología y Ciencias del Agua*, vol. III, núm. 5, pp. 77-93.
- Douriet J.C., 2010. Caracterización y evaluación de escenarios por sequía en la cuenca y acuífero del río Culiacán. Tesis de Maestría. Consultada el 22/03/2013
- EDO, 2016. <http://edo.jrc.ec.europa.eu/scado/php/index.php?id=3120>
- Florescano E. 2000. Breve historia de la sequía en México (2ª ed.). México, DF: Consejo Nacional para Cultura y las Artes.
- García-Acosta V., 1993. Las sequías históricas de México: desastres y sociedad. *Revista semestral de la Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina*, 1(1), 5-185.
- Hyun S. and Salas J. D., 2000. Regional drought analysis based on neural networks. *J. of Hydrologic Engineering* 5(2):145-155.
- Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), 2013. TerraMa2 Monitoreo Análisis y Alerta. Manual de Instalación.
- Keshavarz M., Karami E., Vanclay F., 2013. The social experience of drought in rural Iran. *Journal of Land Use Policy* 30, 120–129.
- Krose B.J.A.; Van der Smagt P.P., 1993. *An Introduction to Neural Networks*. Eighth edition. University of Amsterdam, 1996.
- Ma M., Song S., Ren L., Jiang S., Song, J., 2013. Multivariate drought characteristics using trivariate Gaussian and Student t copulas. *Hydrol.Process*.27 (8), 1175– 1190.<http://dx.doi.org/10.1002/hyp.8432>.
- Magaña V, 2000. Los impactos de “El Niño” en México. Centro de Ciencias de la Atmósfera UNAM, Dirección General de Protección Civil, Secretaría de Gobernación, México. 229 pp.
- Magaña V. (Editor) 2004. *Los impactos de El Niño en México*. Centro de Ciencias de la Atmósfera, Universidad Nacional Autónoma de México, Secretaría de Gobernación. México, 229 p. http://www.atmosfera.unam.mx/editorial/libros/el_nino/.
- McKee T.B., Doesken N.J., Kleist J., 1993. The relationship of drought frequency and duration to time scales. In: *Proceedings of Eighth Conference on Applied Climatology*, Anaheim, CA. American Meteorological Society, Boston, MA, pp. 179–184.
- McKee, T.B., Doesken N.J.y Kleist, J. 1995. Drought monitoring with multiple time scales -Preprints of the 9th Conference on Applied Climatology. Anaheim, California.
- Moradi H.R., Erfanzadeh R., 2001. Investigation of droughts trend in Haraz River Watershed, pp. 283–292.
- Morid S., V. Smakhtin and K. Bagherzadeh, 2007: Drought forecasting using artificial neural networks and time series of drought indices. *Int. J. Climatol.*, 27, 2103–2111.
- North American Drought Monitor (NADM) Workshop, 2016. <https://www.drought.gov/nadm/content/2016-nadm-workshop>.

- National Drought Mitigation Center (NDMC), 2016. What is drought? National Drought Mitigation Center. <http://drought.unl.edu/whatis/what.htm>.
- NeuroDimension, 2014. NEUROSOLUTIONS, versión V4.3.
- NSTC, 2005: Grand challenges for disaster reduction. National Science and Technology Council Rep., 25 pp. [Available online at <http://www.sdr.gov/docs/SDRGrandChallengesforDisasterReduction.pdf>].
- Palmer W.C., 1965. Meteorological droughts. U.S. Department of Commerce Weather Bureau Research Paper 45, 58 pp.
- Qiu J., 2010. China drought highlights future climate threats. *Nature*, 465(7295), 142–143.
- Ravelo A.C., 2007. Monitoreo, evaluación y pronóstico de sequías en el OCPN. Proyecto PREMIA CONAGUA. Informe OMM/PREMIA No. GINT 01/2007. OMM-CONAGUA.
- Ravelo A.C., 2008. Desarrollo de un Sistema Operativo para el Monitoreo, Evaluación y Pronóstico de Sequías (SOS) en el ámbito del Organismo de Cuenca Pacífico Norte (OCPN/CNA), Área de estudio: Cuenca del río Culiacán. Informe OMM/PREMIA No. GINT 02/2008. OMM-CONAGUA.
- Ravelo A.C., 2012. Monitoreo, Pronóstico y Evaluación de Riesgo por Sequía Hidrológica en la RH10 el OCPN; Utilización de información satelital en el monitoreo de las sequías. Informe OMM/PREMIA No. GINT 01/2012. OMM-CONAGUA. 85 págs.
- Ravelo A.C., Douriet, J.C., 2014. Determinación de la Vulnerabilidad y el Riesgo de Sequías en Sinaloa, México. En el International Expert Symposium en Santiago de Chile "Coping with Droughts" 'Building a Community of Practice on Drought Management Tools'.
- Ravelo A.C., Sanz R. & Douriet J.C., 2014. Detección, evaluación y pronóstico de las sequías en la región del Organismo de Cuenca Pacífico Norte, México. *Agriscientia* 31(1):11-24.
- Ravelo A.C.; Planchuelo A.M.; Zanvetor R.E.; Boletta, P.E.C., 2016. Sistema de monitoreo y evaluación de las sequías en Argentina. *Agrometeoros*, Passo Fundo, v.24, n.1, p.113-120.
- Ravelo A.C., Planchuelo A.M., Aroche R., Douriet C.J.C., Hallack A.M., Jimenez R., Maureira H., Peña P.T., Tiscornia G., Zamvetor R., and Zimmermann R., 2016. Monitoreo y Evaluación de las Sequías en América Central, Estudio de Caso: Corredor seco de El Salvador, Honduras y Nicaragua. Serie de Estudios Temáticos EUROCLIMA-acción en desertificación, degradación de tierras y sequías (DDTS). Reporte Técnico del Joint Research Centre de European Commission. JRC Science Hub, <https://ec.europa.eu/jrc>. JRC102117, EUR27974ES. ISBN9789279594106.
- Sanz R.R.; Douriet C. J.C., Ravelo A. y Ornelas S.V.J., 2012. Monitoreo de la sequía 2011-2012 en la RH10-OCPN. XXII Congreso Nacional de Hidráulica. http://www.revistatlatloc.org.mx/amh-congreso/articulos/CambioClimaticoyEventosExtremos/021Art_rsr1.pdf> Consultada el 22/11/2013.
- SCADO 2013. Factsheets of SCADO Indicators. Vegetation Productivity Anomaly (FAPAR Anomaly).: South-Central American Drought Observatory.. Joint Research Center. scado.jrc.ec.europa.eu/.../factsheets/factsheet_fapar.pdf 6 pp.
- Serio, D., Afechtal, M., Attard D.,Choueiri, E., Gumus, M., Kaymark, S., 2010. Detection by tissue printing hybridizaSCADO 2013. Factsheets of SCADO Indicators. Vegetation Productivity Anomaly (FAPAR Anomaly). : South-Central American Drought Observatory.. Joint Research Center. scado.jrc.ec.europa.eu/.../factsheets/factsheet_fapar.pdf 6 pp.
- Serio, L; P. Martín y G. Murphy, 2010. Evaluación de una metodología de pronóstico estadístico para la condición hídrica del suelo en la región pampeana argentina. *Agriscientia* 27(1): 11-17.
- Servicio Meteorológico Nacional (SMN), 2016. El uso correcto de términos climáticos. XXX Foro de Perspectivas Climáticas en la República Mexicana y VI Encuentro de Servicios Climáticos, Gerencia de Meteorología y Climatología. CONAGUA. Consultor Oscar Sánchez M.,
- Torrecillas N., Miguel A. Ravelo A., 2013. PMPMS 2013. Programa de Medidas Preventivas y de Mitigación de Sequías de los Consejos de Cuenca de los ríos Fuerte y Sinaloa, Mocrorito al Quelite y Presidio al San Pedro. www.conagua.gob.mx.
- UE, 2017.<http://edo.jrc.ec.europa.eu/scado/php/index.php?id=3000>.
- Velasco I., 2002. Plan de Preparación para Afrontar sequías en un Distrito de Riego. Tesis Doctoral. División de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería. UNAM. Campus Cuernavaca Morelos. México.
- Zongxing L., He Y., Wang P., H., Theakstone W.H., An W., Wang X., Lu A., Zhang W., Cao W., 2012. Changes of daily climate extremes in southwestern China during 1961–2008. *Global and Planetary Change*, 80–81, 255–272. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gloplacha.2011.06.008>

Efectos de la cobertura de la superficie, agua y nitrógeno sobre atributos del canopeo de maíz en panojamiento

Irigoyen, A.I., Cambareri, M.A., Echarte, L., Bayala, M. I. y Rivas, R.E.

RESUMEN

La estructura del canopeo comprende el tamaño, la orientación y distribución espacial de los órganos aéreos y su descripción es esencial para comprender los procesos de intercambio de masa y energía, que explican la interceptación de la radiación, la evapotranspiración y el rendimiento del cultivo. Además, la funcionalidad del canopeo puede describirse por el contenido de clorofila. El objetivo de este trabajo es caracterizar atributos de la estructura y de la funcionalidad del canopeo en el momento de máximo desarrollo del cultivo de maíz, un estado crítico para la definición de rendimiento, bajo diferentes condiciones de disponibilidad de agua y nitrógeno, en manejos con y sin cobertura de la superficie por residuos vegetales. Un experimento a campo fue conducido en Balcarce (Argentina) durante la campaña agrícola 2015-2016. Se sembró un híbrido de ciclo intermedio el 4 de noviembre con densidad de 6,2 plantas m². Los tratamientos incluyeron la combinación de (i) dos niveles de disponibilidad de agua (con riego, R y secano, S), (ii) dos tipos de cobertura (sin cobertura, Conv, y suelo con un cultivo de cobertura previo de vicia (*Vicia villosa* Roth.) y avena (*Avena sativa* L.), CC), y (iii) dos niveles de fertilización nitrogenada (0, N0 y 200 kg N ha⁻¹, N1). En panojamiento (VT) fueron caracterizados los atributos altura de plantas (Afin), altura de inserción de la última hoja (AUL), número de hojas (NTH), índice de área foliar verde (IAFV) y contenido de clorofila (unidades SPAD). Se representaron los perfiles verticales de área verde de cada hoja individual (AFV), unidades SPAD y unidades funcionales (SPAD x AFV). Los canopeos CC alcanzaron menor IAFV y porte que los canopeos Conv. Sin restricciones de agua, la mayor reducción del área foliar por efecto de CC ocurrió en la porción media del canopeo. Los atributos NTH, IAF AUL y Afin no fueron afectados por la fertilización nitrogenada, independientemente del tipo de cobertura de la superficie y disponibilidad de agua. La distribución vertical de los atributos funcionales (unidades SPAD x área foliar verde) fue más uniforme sin restricciones de agua en el suelo (R) que en condiciones limitantes (S).

Palabras clave: área foliar, altura, número de hojas, unidades SPAD, índice verde normalizado

Irigoyen, A.I., Cambareri, M.A., Echarte, L., Bayala, M. I. and Rivas, R.E., 2018. Effects of surface cover, water and nitrogen on attributes of maize canopy at tasseling. RADA IX: 75-84

SUMMARY

Canopy structure includes size, orientation and spatial distribution of aerial organs and its description is essential to understand the exchanges of mass and energy that determine radiation interception, evapotranspiration and crop yield. Besides the canopy functionality can be also described by chlorophyll content. The objective of this manuscript is to characterize attributes of the canopy structure and functionality at tasseling, a critical stage for grain yield definition, in maize grown under contrasting soil water availability, nitrogen supply and soil surface cover. One field experiment was conducted at Balcarce (Argentina) during the 2015-2016 growing season. An intermediate hybrid was sown on 4 November with a density of 6,2 plants m⁻². Treatments included the combination of (i) two water regimes (irrigated, R and rainfed, S), (ii) two soil covers (without soil cover, Conv, and soil with a previous cover crop of vicia (*Vicia villosa* Roth.) and oat (*Avena sativa* L.), CC), and (iii) two N supplies (0, N0 and 200 kg N ha⁻¹, N1). Canopy structural and functional attributes (i.e. plant height, number of leaves, green leaf area index, IAFV, and chlorophyll content, SPAD units) were characterized at tasseling (VT). Vertical distribution of green leaf area, SPAD units and functional leaf units were analyzed as a function of leaf insertion. Maize canopy height and green leaf area index was lower in maize with CC than in conventional maize; and the greatest leaf area reduction occurred in the middle part of the canopy, in soils without water limitations. Final number of leaves (NTH), plants height (AUL and Afin) and green leaf area index (IAFV) were not affected by N supply, regardless of soil cover or water availability. Vertical distribution of functional attributes (SPAD units x green leaf area) was more uniform within canopy, in non-water limited (R) than in water limited conditions (S).

Key words: leaf area, height, number of leaves, SPAD units, normalized green index

Irigoyen, A.I., Cambareri, M.A., Echarte, L., Bayala, M. I. y Rivas, R.E.: Unidad Integrada Balcarce: Facultad de Ciencias Agrarias UNMdP -INTA Balcarce. Ruta Nac. 226, km 73,5, Balcarce CC 276 (7620), Argentina. Correspondencia a: irigoyen.andrea@inta.gov.ar

INTRODUCCIÓN

La estructura del canopeo comprende el tamaño, la orientación y distribución espacial de los órganos aéreos y su descripción es esencial para comprender los procesos de intercambio de masa y energía (Norman y Campbell, 1989).

En maíz, el tipo de crecimiento del híbrido afecta la generación de área foliar verde (Birch *et al.*, 2003; Maune, 2014). La estructura del canopeo también se modifica por prácticas de manejo como la fecha de siembra, la densidad de plantas y la disponibilidad de nutrientes y agua (Maddonni *et al.*, 2001; Valentinuz y Tollenaar, 2006; Birch *et al.*, 2008; Díaz, 2015, Corral, 2016). Curvas en forma de campana para la distribución de área foliar verde (AFV) han sido descritas en la literatura bajo diferentes tratamientos (Keating y Wafula, 1992; Dwyer y Stewart; 1996; Boedhram *et al.*, 2001; Corral, 2016).

Nitrógeno y agua son factores determinantes del desarrollo foliar, condicionando además del área foliar verde (AFV) alcanzado, la senescencia de las hojas y la actividad fotosintética. La deficiencia de nitrógeno reduce la producción de biomasa al disminuir la expansión foliar y la eficiencia de conversión de la radiación (Andrade *et al.*, 1996). Sin embargo, el efecto del nitrógeno es escaso sobre el número final de hojas (Lemcoff y Loomis, 1986; Muchow y Davis, 1988). Las deficiencias de agua durante el desarrollo vegetativo del cultivo reducen la tasa de expansión y división celular, provocando una disminución en el AFV y en la altura de las plantas (Andrade *et al.*, 1996; Tardieu *et al.*, 2000).

En Balcarce, han sido descritos atributos morfológicos en canopeos de maíz sin limitantes hídricas ni nutricionales bajo siembra directa y convencional (Maune, 2014; Corral, 2016) y en seco (siembra directa) bajo dos manejos agronómicos con diferente nivel de intensificación (Díaz, 2015). Es de interés, describir los efectos de la disponibi-

lidad de agua y de nutrientes asociados al empleo de cultivos de cobertura (CC) previos al maíz. Los CC muestran algunos beneficios adicionales con respecto a los manejos conservacionistas tradicionales por sus efectos sobre la eliminación de malezas, el posible aumento en la disponibilidad de agua para el cultivo siguiente, la reducción de la erosión y el reciclado de nutrientes, entre otros (Clark, 2012).

La presencia de residuos en superficie por sus efectos sobre la temperatura del suelo (Stone *et al.*, 1999) y la disponibilidad de agua (Murungu *et al.*, 2011, Restovich *et al.*, 2012) puede afectar tanto la generación de área foliar como la elongación y entonces el patrón vertical de área foliar. A su vez, las variaciones en el desarrollo y en el estado nutricional e hídrico del cultivo pueden ser monitoreados a partir de algunos índices que consideran las variaciones de reflectancia espectral (Rousse *et al.*, 1973; Viña *et al.*, 2004; Ciganda *et al.*, 2008; Nguy Robertson *et al.*, 2012; Carmona *et al.*, 2015).

Se ha encontrado que el perfil de clorofila puede ser sensible a algunas prácticas de manejo agronómico como la densidad de plantas y el nivel de fertilización (Díaz, 2015, Irigoyen *et al.* 2015) y es de interés evaluar si la presencia de residuos en superficie por cultivos de cobertura previos al maíz provoca en los canopeos variaciones en la distribución vertical de la clorofila y en la respuesta espectral. En ocasiones, se emplea el nivel de clorofila en la hoja de la espiga (Ciganda *et al.*, 2009) o en la porción superior del canopeo (Gitelson *et al.*, 2005) para predecir el contenido total en el canopeo.

El objetivo del presente trabajo es caracterizar atributos de la estructura y de la funcionalidad del canopeo en el momento de máximo desarrollo del cultivo de maíz bajo diferentes condiciones de disponibilidad de agua y nitrógeno, en manejos con y sin cobertura de la superficie por residuos vegetales.

MATERIALES Y MÉTODOS

Sitio y condiciones de cultivo

El ensayo fue conducido durante la campaña agrícola 2015-16 en Balcarce (-37°45', 58°18' W; 130 m snm) sobre un Argiudol típico de 1,7 m de profundidad. Los tratamientos evaluados incluyeron la combinación de (i) dos niveles de disponibilidad de agua (con riego, R y secano, S), (ii) dos tipos de cobertura (sin cobertura, Conv, y suelo con un cultivo de cobertura previo CC), y (iii) dos niveles de fertilización nitrogenada (0, N0 y 200 kg N ha⁻¹, N1).

El 27 de mayo se realizó la siembra del cultivo de cobertura compuesto por vicia (*Vicia villosa* Roth.) y avena (*Avena sativa* L.), con una densidad de 34 kg ha⁻¹ para cada uno de los componentes de la mezcla. La emergencia del CC fue el 8 de junio y se le permitió crecer hasta el 7 de octubre (*i.e* aproximadamente 20 días antes de la siembra del maíz), momento en el que se realizó el matado químico (con glifosato a la dosis de 4 l ha⁻¹). Posteriormente, se picó mecánicamente la cobertura y se determinó el rendimiento en materia seca (827 y 673 kg ha⁻¹ para avena y vicia, respectivamente).

Un híbrido de maíz de ciclo intermedio (DK692 VT3, MR118) se sembró el 3 de noviembre. Se logró una densidad media de 6,2 plantas m⁻². La fertilización nitrogenada (N1, 200 kg N ha⁻¹) se realizó en el estado de seis hojas desarrolladas (V6).

El riego fue aplicado por goteo manteniendo el agua en el suelo por encima del 50% de agua disponible y se inició el 28 de diciembre, a los 44 y 47 días desde emergencia (DDE) para los tratamientos Conv y CC, respectivamente. El contenido de agua en el suelo fue monitoreado periódicamente, mediante el método gravimétrico (0-0,10 m) y el de dispersión de neutrones (0,1-1,7 m) con equipo Troxler mod.4300. En este caso, se obtuvo la lámina de agua según la calibración de Suero y Travasso (1988). La disponibilidad de agua en el suelo fue expresada como porcentual según la expresión:

$$AD (\%) = (Alm - Alm_{Lmin}) / AD \times 100 \quad (1)$$

Siendo Alm (mm) el almacenaje de agua en el suelo en la fecha en cuestión, Alm_{Lmin} (mm) el almacenaje al límite mínimo o punto de marchitez y AD (mm) el agua disponible.

Determinaciones a campo de atributos del canopeo

En el estado de tres hojas desarrolladas (V3) se marcaron cinco plantas consecutivas en cada sub-subparcela y, a partir de ese momento, las determinaciones fenométricas y fenológicas fueron realizadas semanalmente sobre 15 plantas para cada tratamiento.

Se seleccionó el estado de aparición de la inflorescencia masculina (VT) para caracterizar la estructura y funcionalidad del canopeo, dada su importancia en el momento crítico para la definición del rendimiento en maíz.

Fueron evaluados los tratamientos de acuerdo con: a) número total de hojas (NTH), b) altura de inserción de la lígula de la última hoja expandida

(AUL) medida desde superficie, c) altura final (Afin) medida desde la superficie del suelo al tope del canopeo, d) índice de área foliar verde (IAFV) y e) índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI).

El área foliar verde por planta (AFV) fue determinada mediante la integración del área de hojas individuales, que a su vez fue estimada mediante un modelo multiplicativo entre longitud, ancho máximo de la lámina y un factor constante (0,75) atribuido a la forma de la hoja. El IAFV fue determinado ajustando con la densidad de 6,2 plantas m^{-2} .

Para describir el efecto de los tratamientos sobre la distribución vertical de los atributos en el estado VT se representaron perfiles con base en la altura relativa de inserción de cada hoja verde en relación con la altura de inserción de la última hoja desarrollada (AUL) en cada canopeo:

- Perfil de distribución del AFV (cm^2) de cada hoja verde presente.
- Perfil de distribución de unidades de clorofila foliar provenientes de las determinaciones con SPAD-502 meter (Minolta, Illinois, USA), realizadas en la porción media de la lámina de cada hoja verde presente. Valores menores a 50 unidades SPAD, indican que se encuentra comprometido el rendimiento del cultivo (Sainz Rozas y Echeverría, 1998).
- Perfil de distribución de unidades funcionales obtenido a partir del producto de unidades SPAD x área foliar de cada hoja verde presente.

En el eje vertical de esos tres perfiles, el valor máximo 1 representa la altura normalizada de inserción de la última hoja desarrollada en cada tratamiento. Las hojas que mostraban senescencia completa (0% de área foliar verde) no se consideraron para la representación.

Se construyó un perfil adimensional para caracterizar la uniformidad de la distribución vertical de atributos funcionales. En el eje vertical de ese perfil, el valor 1 representa la altura normalizada de inserción de la última hoja desarrollada en cada tratamiento. En el eje horizontal de ese perfil, el valor 1 representa la integración de los atributos funcionales (desde el tope hacia la base del canopeo) normalizada por el valor máximo en cada tratamiento. La línea 1:0 representa una distribución homogénea de los atributos de funcionalidad desde el tope (altura relativa=1) hasta la base (altura relativa=0).

También se seleccionó el estado de aparición de la inflorescencia masculina (VT) para describir el NDVI en el estado de desarrollo máximo del cul-

tivo. La reflectancia del canopeo se determinó con espectroradiómetro de campo portátil JAZ (Ocean Optics, Dunedin, FL) entre las 10:00 y las 14:00 horas y en condiciones de cielo descubierto. La calibración de cada una de las mediciones fue realizada usando superficies de reflectancia máxima (blanco) y mínima (negro). La máxima reflectancia se determinó mediante el empleo de una superficie estándar de reflectancia difusa (Ocean Optics WS-1) y la mínima reflectancia se obtuvo mediante el cierre de la entrada de luz a la fibra óptica. El sensor (visible-infrarrojo cercano) se colocó manteniendo una distancia de 0,50 m sobre la superficie. Los espectros fueron obtenidos mediante la conexión del espectroradiómetro de campo y el software SpectraSuite (Ocean Optics, Dunedin FL). El NDVI se calculó a partir de las mediciones de la reflectancia en el rango de luz roja (entre 0,6 y 0,7 μm) e infrarrojo cercano del espectro (entre 0,7 y 1,1 μm), de acuerdo con Rouse *et al.* (1973). La aparición de las inflorescencias masculinas en la parte superior del canopeo en el estado VT no afecta sensiblemente el NDVI en el máximo desarrollo del cultivo, ya que modifica en forma similar la reflectancia en el numerador y en el denominador del índice (Viña *et al.*, 2004). Se ajustó una relación no lineal entre el índice de vegetación NDVI y el índice de área foliar verde del canopeo (a escala de parcela= 24 puntos; 8 tratamientos y 3 repeticiones).

Diseño experimental y análisis de datos

Los tratamientos fueron distribuidos en un diseño con parcelas sub-subdividas con tres repeticiones, con los niveles de disponibilidad de agua (S y R) en las parcelas principales, los niveles de cobertura en las subparcelas (Conv y CC) y los niveles de fertilización nitrogenada (N0 y N1) en las sub-subparcelas. Cada sub-subparcela incluía 6 hileras de 12 m de extensión distanciadas entre sí a 0,70 m.

Se realizó el análisis de varianza (ANOVA) previa evaluación de la homogeneidad de varianza (Littell *et al.*, 1996) empleando el procedimiento PROC MIXED del paquete SAS (SAS/IML® 14.1, 2015) para testear los efectos de la disponibilidad de agua (A), cobertura de la superficie (C) y fertilización nitrogenada (N) y sus interacciones en los atributos del canopeo. Cuando las interacciones fueron significativas se aplicó test de contrastes para comparar los valores medios (con nivel de significancia 0,05).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El estado VT se alcanzó a los 70 días desde siembra (DDS) bajo siembra convencional (Conv) y entre los 78 y 80 DDS con cobertura (CC). En la Figura 1 se muestra la evolución del agua en el suelo hasta aproximadamente los 80 días desde siembra (cuando todos los tratamientos alcanzaron el estado VT). Los tratamientos S exhibían una condición más limitante en la disponibilidad de agua para el cultivo (0,32 a 0,40 de la fracción de agua disponible, FAD) que los tratamientos R (0,53 y 0,74 de FAD). La lámina de riego aplicada hasta VT alcanzó 158 mm para RConv y 194 mm para los tratamientos RCC.

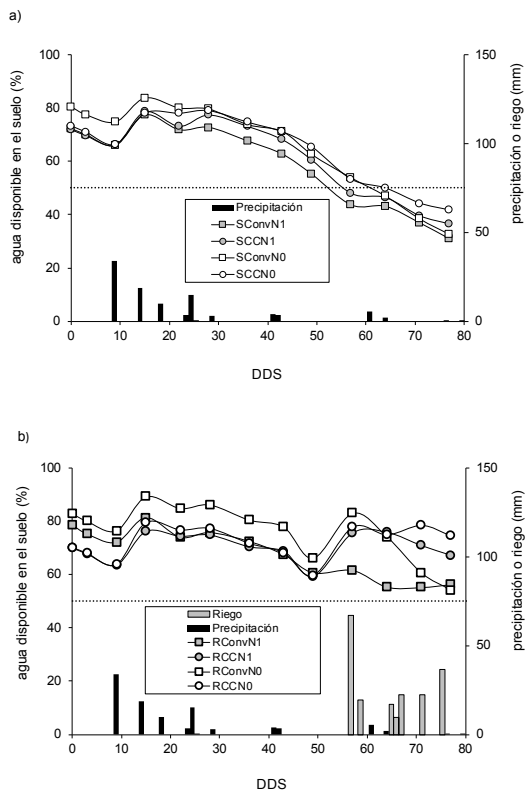


Figura 1. Evolución del agua en el suelo bajo cultivo de maíz desde siembra (DDS) al momento de aparición de la inflorescencia masculina (VT) con manejos contrastantes de agua y nitrógeno, con y sin cultivo de cobertura previo (Balcarce, campaña agrícola 2015-2016). a. secano (S). b. bajo riego (R). CC: con cultivo de cobertura, Conv: siembra convencional, N0: sin fertilización nitrogenada, N1: fertilización nitrogenada en estado V6. La línea punteada representa el nivel de 50 % de agua disponible.

En la Tabla 1 se muestran los atributos observados en panojamiento. La altura del canopeo (AUL y Afin) fue menor en CC (en cada nivel de disponibilidad de agua). El número de hojas no fue afectado

por los tratamientos de fertilización (N0 y N1) para un mismo nivel de disponibilidad de agua, en concordancia con lo reportado en la literatura (Lemcoff y Loomis, 1986; Muchow y Davis, 1988). Los efectos de CC fueron más evidentes en el tamaño final alcanzado en las hojas que en el número total de hojas desarrolladas (NTH). El IAFV del canopeo de maíz con cultivo de cobertura previo a la siembra (CC) fue 0,57 del IAFV en siembra convencional (Conv), independientemente si fue o no fertilizado y de la condición hídrica (R o S).

Tabla 1. Número total de hojas (NTH), altura de inserción de la lígula de la última hoja expandida (AUL), altura final de la planta (Afin), índice de área foliar verde (IAFV) al momento de aparición de la inflorescencia masculina (VT) en maíz bajo manejos contrastantes en disponibilidad de agua y nitrógeno, con y sin cultivo de cobertura previo.

Agua	Cobertura	Nitrógeno	NTH *	AUL (m) *	Afin (m) *	IAFV (m ² m ⁻²) *
R	CC	N0	20,2 b	1,52 B	1,88 b	2,82 B
		N1	19,9 b	1,53 B	1,90 b	2,86 B
	Conv	N0	21,0 a	1,80 A	2,13 a	4,68 A
		N1	21,0 a	1,72 A	2,10 a	4,86 A
S	CC	N0	20,6 b	1,27 b	1,61 b	2,51 b
		N1	20,6 b	1,25 b	1,59 b	2,47 b
	Conv	N0	21,3 a	1,61 a	1,99 a	4,51 a
		N1	21,1 a	1,57 a	2,00 a	4,48 a

* Interacción Agua x Cobertura x Nitrógeno no significativa ($p > 0,05$). Letras minúsculas iguales indican diferencias no significativas entre coberturas, a través del nivel de disponibilidad de agua y nitrógeno. Letras mayúsculas y minúsculas iguales en una misma columna indican diferencias no significativas entre coberturas a través de niveles de nitrógeno, para un mismo nivel de disponibilidad de agua.

R: riego, S: secano, CC: con cultivo de cobertura, Conv: siembra convencional, N0: sin fertilización nitrogenada, N1: fertilización nitrogenada en estado V6.

Los canopeos de maíz bajo siembra convencional mostraron mayores índices de vegetación (i.e. NDVI). Cabe destacar que los canopeos del manejo sin residuos en superficie (Conv), tanto cuando se desarrollaron bajo riego como en secano, exhibieron índices que se ubicaron en el plateau de la relación con el índice de área foliar verde (Figura 2), mientras que los canopeos de maíz siguiendo al CC estuvieron en la porción creciente de la curva. Algunas funciones que han sido empleadas anteriormente para relacionar NDVI y área foliar verde en maíz son del tipo no lineal, con una asíntota alrededor de valores de 0,7 y sin variaciones por encima de los 4 m² m⁻² de IAFV (Nguy-Robertson *et al.*, 2012). Los datos obtenidos en el rango de condiciones de manejo del presente trabajo muestran un ajuste semejante.

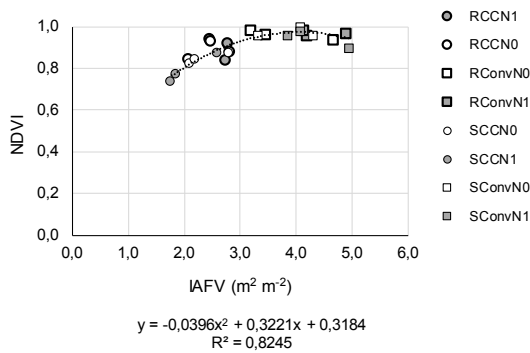


Figura 2. Relación entre el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) y el índice de área foliar verde (IAFV) en el momento de aparición de inflorescencia masculina (VT) en maíz bajo manejos contrastantes en disponibilidad de agua y nitrógeno, con y sin cultivo de cobertura previo (escala de parcela).

En la Figura 3 se representa la distribución vertical del AFV para los tratamientos evaluados con un comportamiento diferente entre el cultivo con riego y sin riego con curvas en forma de campana similares a las descritas en la literatura (Keating y Wafula, 1992; Dwyer y Stewart, 1996; Boedhrum *et al.*, 2001; Corral, 2016). Se observó que la mayor reducción en el área foliar en los tratamientos RCC ocurrió en la porción media del canopy, que corresponde a las hojas de mayor tamaño potencial (Birch *et al.*, 2003; Maune, 2014; Corral, 2016), mientras que en secano la reducción ocurrió desde la porción inferior del canopy, indicando que el efecto de falta de agua sobre la generación de área foliar se manifestó desde las primeras hojas desarrolladas. Además, el progreso de la senescencia en VT fue más evidente en manejos CC, con 7 u 8 completamente inertes en la mitad inferior, quedando apenas 4 o 5 hojas que aportan área foliar activa fotosintéticamente en esa porción de canopy.

Los canopeos bajo siembra convencional, que exhibieron mayor IAFV también exhibieron mayor contenido de clorofila en la mayoría de las hojas (Figura 4). Los perfiles de clorofila en hoja fueron diferentes entre coberturas de la superficie (CC vs. Conv), pero no entre los niveles de fertilización (N0 vs. N1). Los canopeos de maíz sin cultivo de cobertura previo (Conv) exhibieron de 8 a 10 hojas sin limitaciones nutricionales (50 a 60 unidades SPAD), de acuerdo con lo descrito por Sainz Rozas y Echeverría (1998). Por su parte, con riego y con manejo convencional (N0 y N1) se observó una menor variabilidad en las unidades SPAD, especialmente en la mitad inferior del canopy. La fertilización con N no modificó el perfil de unidades SPAD, excepto para maíz siguiendo a CC y bajo riego.

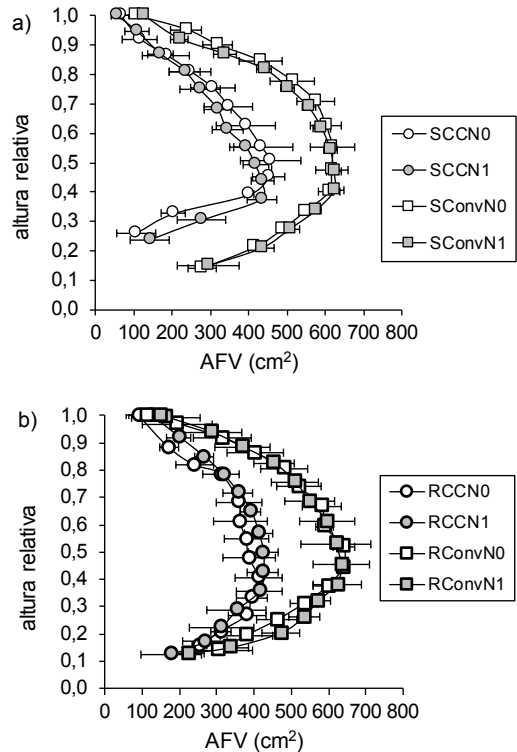


Figura 3. Perfil medio de distribución de área foliar verde (AFV) con la altura relativa del canopy en el momento de aparición de inflorescencia masculina (VT) en maíz bajo manejos contrastantes en disponibilidad de agua y nitrógeno, con y sin cultivo de cobertura previo. a. secano (S). b. bajo riego (R). CC: con cultivo de cobertura, Conv: siembra convencional, N0: sin fertilización nitrogenada, N1: fertilización nitrogenada en estado V6. La altura relativa indica la altura de inserción de cada hoja verde en relación con la altura de inserción de la última hoja desarrollada en el canopy. Se indica con barra horizontal el error estándar.

En la Figura 5 se muestra el perfil de distribución de los atributos funcionales (producto de unidades SPAD x área foliar verde) para los tratamientos evaluados, distinguiéndose más claramente una curva en forma de campana con máximos en la porción media del canopy en los tratamientos sin cultivo de cobertura (Conv). Esa forma típica de distribución vertical puede observarse desde los estados vegetativos hasta VT (Dwyer y Stewart, 1986; Keating y Wafula, 1992; Valentinuz y Tollenaar, 2006; Corral, 2016) y luego puede progresar en forma diferente de acuerdo con los tratamientos (Ciganda *et al.*, 2008; Díaz, 2015; Corral, 2016). En general, las hojas próximas a la espiga (parte central del canopy) mantienen las tasas de fotosíntesis y se tornan senescentes más lentamente que las de la porción superior o inferior del canopy (Dwyer y Stewart, 1986).

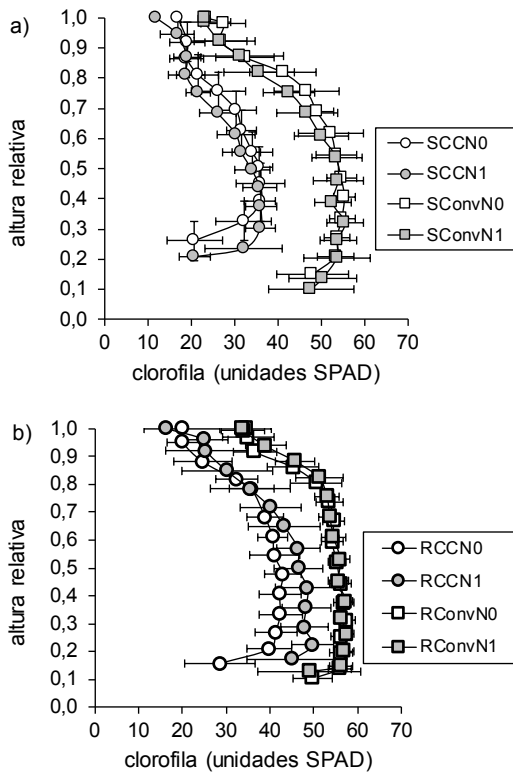


Figura 4. Perfil de distribución de clorofila (unidades SPAD) con la altura relativa del canopeo en el momento de aparición de inflorescencia masculina (VT) en maíz bajo manejos contrastantes en disponibilidad de agua y nitrógeno, con y sin cultivo de cobertura previo. a. secano (S). b. bajo riego (R). CC: con cultivo de cobertura, Conv: siembra convencional, N0: sin fertilización nitrogenada, N1: fertilización nitrogenada en estado V6. Se indica con barra horizontal el error estándar. La altura relativa indica la altura de inserción de cada hoja verde en relación con la altura de inserción de la última hoja desarrollada en el canopeo.

La inclusión de CC redujo la funcionalidad del canopeo respecto al manejo Conv y ese efecto fue mayor en condiciones de secano. Además de un perfil diferente entre manejo CC y Conv (tanto con adecuada o baja disponibilidad de agua) y que es resultante de la integración de las Figuras 3 y 4, se puede describir la distribución relativa de la funcionalidad dentro de cada canopeo (Figura 6). En la forma propuesta en este trabajo, es posible distinguir una menor funcionalidad en la porción superior del canopeo en secano (CC y Conv), mientras que los manejos bajo riego (independientemente del tratamiento de cobertura) exhibieron una distribución más uniforme de la funcionalidad del canopeo.

A partir de la descripción de una distribución no uniforme a través del canopeo de los atributos

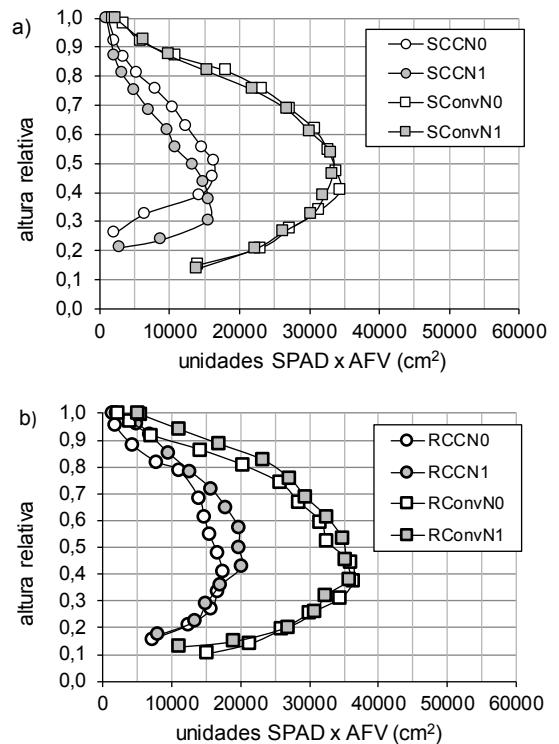


Figura 5. Perfil de distribución de unidades funcionales (unidades SPAD x área foliar verde) con la altura relativa del canopeo en el momento de aparición de inflorescencia masculina (VT) en maíz, bajo manejos contrastantes en disponibilidad de agua y nitrógeno, con y sin cultivo de cobertura previo. a. secano (S). b. bajo riego (R). CC: con cultivo de cobertura, Conv: siembra convencional, N0: sin fertilización nitrogenada, N1: fertilización nitrogenada en estado V6. La altura relativa indica la altura de inserción de cada hoja verde en relación con la altura de inserción de la última hoja desarrollada en el canopeo.

funcionales, se entiende que la aplicación de modelos de estimación de la clorofila total a partir del contenido medido exclusivamente en las hojas de la parte superior del canopeo y del área foliar total, como el propuesto por Gitelson *et al.* (2005), podría distorsionar el resultado para el estado de desarrollo máximo bajo condiciones limitantes de agua.

La interpretación de las relaciones entre agua disponible, área foliar funcional (área foliar verde más nivel de clorofila) e índices de vegetación, determinados bajo diferentes manejos agronómicos y en forma secuencial durante la estación completa del cultivo, posibilitará la implementación de índices agrometeorológicos de predicción de rendimiento.

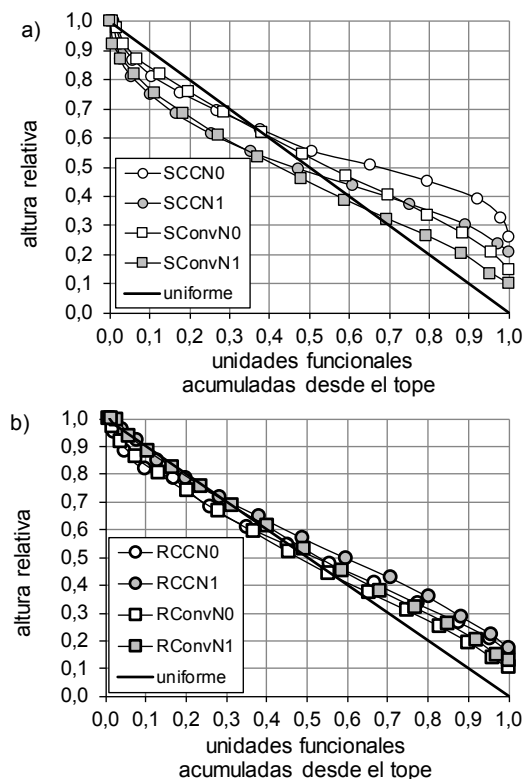


Figura 6. Perfil normalizado de unidades funcionales (unidades SPAD x área foliar verde) acumuladas desde el tope del canopeo y expresadas respecto al valor máximo observado en cada tratamiento en el momento de aparición de inflorescencia masculina (VT) en maíz, bajo manejos contrastantes en disponibilidad de agua y nitrógeno, con y sin cultivo de cobertura previo. a. seco (S). b. bajo riego (R). CC: con cultivo de cobertura, Conv: siembra convencional, N0: sin fertilización nitrogenada, N1: fertilización nitrogenada en estado V6. La altura relativa indica la altura de inserción de cada hoja verde en relación con la altura de inserción de la última hoja desarrollada en el canopeo.

CONCLUSIONES

En este estudio se caracterizó la influencia de la inclusión de un cultivo de cobertura sobre atributos estructurales y funcionales del canopeo de maíz (*i.e.* área foliar verde, unidades de SPAD y unidades funcionales) en un momento crítico para la definición del rendimiento (*i.e.* panojamiento) y en condiciones de agua contrastante en el suelo. Se demostró que la presencia de un cultivo de cobertura modifica la estructura del canopeo y reduce su funcionalidad, en cualquier condición de agua en el suelo; aunque las disminuciones son mayores en condiciones de agua limitante (*i.e.* tratamientos en seco) que en condiciones sin restricciones de agua (*i.e.* tratamientos regados). En este sentido, en condiciones de agua no limitante,

la mayor reducción del área foliar por efecto de la cobertura ocurre en la porción media del canopeo; mientras que, en condiciones de agua limitante, la disminución en el área foliar se evidencia desde la porción inferior. La distribución vertical de las unidades funcionales (unidades SPAD de clorofila x área foliar verde) es más uniforme dentro del canopeo sin restricciones de agua que en condiciones de agua limitante.

Se presume que estos cambios en los atributos funcionales y estructurales del canopeo de maíz, asociados a la presencia de un cultivo de cobertura, resulten en reducciones de la interceptación y de la eficiencia en el uso de la radiación fotosintéticamente activa, razón por la cual el cultivo de cobertura disminuiría la producción de biomasa del cultivo de maíz. Futuros trabajos deberían evaluar los elementos y factores que influyen en el manejo con cultivo de cobertura (*e.g.* temperatura del suelo y del aire, humedad del suelo, contenido de nutrientes) y que pueden contribuir a explicar la respuesta de los atributos estructurales y funcionales de maíz subsiguiente, con el fin de orientar prácticas de manejo (*i.e.* fecha de secado del cultivo de cobertura, densidad de plantas y espaciamiento entre hileras de maíz, fertilización del cultivo de cobertura y del maíz) para promover un incremento o el mantenimiento de la producción ante la inclusión de un cultivo de cobertura.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad Nacional de Mar del Plata (UNMdP) que ha provisto la financiación del presente trabajo en el marco del proyecto "Atributos biofísicos y estructurales del canopeo en maíz" (UNMdP-AGR505/16). A. Irigoyen y R. Rivas son investigadores de la Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires (CIC). L. Echarte es investigadora del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (Conicet). M. I. Bayala es personal de apoyo de la Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires (CIC).

BIBLIOGRAFÍA

- Andrade, F.H.; Cirilo, A.; Uhart, S. y M.E. Otegui, 1996. *Ecofisiología del cultivo de maíz*. Dekalb Press. Balcarce, Argentina. 292 p.
- Birch, C.J.; Thornby D.; Adkins S.; Andrieu B. and J. Hanan, 2008. Architectural modelling of maize under water stress. *Australian J. of Exp. Agriculture* 48: 335-341.

- Birch, C.J.; Vos, J. and P.E.L. Van Der Putten, 2003. Plant development and leaf area production in contrasting cultivars of maize grown in a cool temperate environment in the field. *European Journal of Agronomy*. 19: 173-188.
- Boedhram, N.; Arkebauer, T.J. and W.D. Batchelor, 2001. Season-long characterization of vertical distribution of leaf area in corn. *Agronomy Journal* 93:1235-1242.
- Carmona, F.; Rivas, R. and D. Fonnegra, 2015. Vegetation Index to estimate chlorophyll content from multispectral remote sensing data. *European Journal of Remote Sensing* 48: 319-326.
- Clark, A. 2012. *Managing crop cover profitability*. 3th ed. United Book Press, USA., 244 p.
- Ciganda, V.; Gitelson, A. and J.S. Schepers, 2008. Vertical profile and temporal variation of chlorophyll in maize canopy: quantitative "crop vigor" indicator by means of reflectance-based techniques. *Agronomy Journal* 100: 409-417.
- Ciganda, V.; Gitelson, A. and J. Schepers, 2009. Non-destructive determination of maize leaf and canopy chlorophyll content. *Journal of Plant Physiology* 166: 157-167.
- Corral, A. 2016. Densidad de plantas y estructura del canopeo de maíz. Tesis de graduación. UNMdP, Balcarce, Argentina. 54 p.
- Díaz, V. 2015. Área foliar verde y estructura del canopeo en el cultivo de maíz bajo sistemas con diferente grado de intensificación en la producción de granos. Tesis de graduación. UNMdP, Balcarce, Argentina. 42 p.
- Dwyer, L.M. and D.W. Stewart, 1986. Leaf area development in field-grown maize. *Agronomy Journal* 78:334-343.
- Dwyer, L.M.; Stewart, R.I. Hamilton, R.I. and L. Houwing, 1992. Ear position and vertical distribution of leaf area in corn. *Agronomy Journal* 84:430-438.
- Gitelson, A. A., Viña, A.; Verma, S.B.; Rundquist, D.C.; Arkebauer, T.J.; Keydan, G.; Leavitt, B.; Ciganda, V.; Burba, G.G. and A.E. Suyker, A.E. 2006. Relationship between gross primary production and chlorophyll content in crops: Implications for the synoptic monitoring of vegetation productivity. *Journal of Geophysical Research* 111, D08S11, doi:10.1029/2005JD006017.
- Keating, B.A and B.M. Wafula, B.M. 1992. Modelling the fully expanded area of maize leaves. *Field Crops Research* 29:163-176.
- Irigoyen, A.; Corral, A.; Díaz, V.N. and L. Echarte. 2015. Chlorophyll leaf profile and light attenuation during reproductive stages of maize as affected by plant population. In: de Campos, A.B.; Gabriels, D. and Deyanira, L.L. (ed.) *Impacts of Agroecosystems on Environment*. CH. I. Environmental sustainability of agrosystems: 23-28. UNESCO Chair of Eremology, Ghent University, Belgium and International Centre of Eremology (ICE), Ghent University, Belgium.
- Lemcoff, J.H. and R.S. Loomis, 1986. Nitrogen influences on yield determination in maize. *Crop Science* 26: 1017-1022.
- Littell, R. C.; Milliken, G. A.; Stroup, W. W.; R.D. Wolfinger. 1996. *SAS System for Mixed Models*. SAS Institute Inc.: New York. 633 p. Maddonni, G.A.; Otegui, M.E. and A.G. Cirilo, 2001. Plant population density, row spacing and hybrid effects on maize architecture and light attenuation. *Field Crops Research* 71: 183-193.
- Maune, C. 2014. Fechas de siembra y desarrollo del área foliar pre-antesis en híbridos de maíz de diferente madurez relativa. Tesis de graduación, UNMdP, Balcarce, Argentina. 46 p.
- Muchow, R. and R. Davis, 1988. Effect of nitrogen supply on the comparative productivity of maize and sorghum in a semiarid tropical environment. *Field Crop Research* 18: 17-30.
- Murungu, F.S.; C. Chiduzza, C. and P. Muchaonyerwa, 2011. Effects of relay inter-cropping summer cover crops with maize on cover crop biomass and maize yields in a warm-temperate region of South Africa, *South African Journal of Plant and Soil* 28:2, 147-150
- Nguy-Robertson, A.; Gitelson, A.; Peng, Y.; Viña, A.; Arkebauer, T. and D. Rundquist, 2012. Green leaf area index estimation in maize and soybean: combining vegetation indices to achieve maximal sensitivity. *Agronomy Journal* 104: 1336-1347.
- Norman, J.M. and G.S. Campbell, 1989. Canopy structure. In: Percy, R.W., Ehleringer, J. R., Rundel, P.W. (ed.) *Plant Physiological Ecology*, Springer, Netherlands, p. 301-325.
- Restovich, S. B.; Andriulo, A.E and S.I. Portela, 2012. Introduction of cover crops in a maize-soybean rotation of the Humid Pampas. *Field Crops Research* 128: 62-70.
- Rouse J.W.; Haas, R.H.; Schell, J.A. and D. Deering, 1973. Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation. *Prog. Rep. RSC 1978-1*. Remote Sensing Cent., Texas A&M Univ., College Station.
- Sainz Rozas, H. and H.E. Echeverría, 1998. Relación entre las lecturas del medidor de clorofila (Minolta SPAD 502) en distintos estadios del ciclo del cultivo de maíz y el rendimiento del grano. *Revista de Facultad de Agronomía de La Plata*. 103: 37-44.
- SAS University Edition. 2015. *SAS/IML® 14.1 User's Guide*. Cary, NC: SAS Institute Inc.
- Stone, P.J.; Sorensen, I.B. and P.D. Jamieson, 1999. Effect of soil temperature on phenology, canopy development, biomass and yield of maize in a cool temperate climate. *Field Crops Research* 63:169-178.

- Tardieu, F.; Reymond, M.; Hamard, P.; Granier, C. and B. Muller, 2000. Spatial distributions of expansion rate, cell division rate and cell size in maize leaves. *Journal of Experimental Botany* 51: 1505-1514.
- Suero, E.E. y M.I. Travasso, 1988. Determinación de humedad y densidad de suelos. Métodos de radiación. Actas de XII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Corrientes.
- Valentinuz, O.R. and M. Tollenaar, 2006. Effect of genotype, nitrogen, plant density and row spacing on the area-per-leaf profile in maize. *Agronomy Journal* 98:94-99.
- Viña, A.; Gitelson, A.; Rundquist, D.C.; Keydan, D.; Leavitt, B. and J. Schepers, 2004. Monitoring maize (*Zea mays* L.) phenology with remote sensing. *Agronomy Journal* 96: 1139-1147.