



ÍNDICE DE SATISFACCIÓN HÍDRICA COMO ESTIMADOR DE RENDIMIENTOS DE MAÍZ

D.A. Carnelos^{1*}; M.E. Fernandez Long¹ y G.M. Murphy¹

¹Cátedra de Climatología y Fenología Agrícolas. Facultad de Agronomía.

Universidad de Buenos Aires. Av. San Martín 4453 (1417).

*Email carnelos@agro.uba.ar

Recibido: 10-12-13

Aceptado: 25-02-14

RESUMEN

Uno de los factores que afecta tanto la planificación como los rendimientos del cultivo de maíz es la disponibilidad de agua en el suelo al momento de la siembra y principalmente durante la floración. La manera más sencilla de conocer el estado hídrico del suelo es a través de un balance hidrológico. Se han desarrollado numerosos métodos de estimación, muchos de los cuales utilizan datos de superficie, registrados a través de la red de estaciones meteorológicas de la Argentina. La trama que forman deja amplias regiones productivas desprovistas de registros pluviométricos. Por este motivo, la estimación de la precipitación a través de sensores remotos resulta ser una alternativa para el cálculo del balance hidrológico. El objetivo de este trabajo fue analizar el grado de asociación entre los rendimientos departamentales de maíz de una serie de campañas y el índice de satisfacción hídrica (ISHi) obtenido a partir de los resultados del balance hidrológico, para los departamentos y/o partidos de las provincias de Chaco, Santiago del Estero, Santa Fe, Entre Ríos, Córdoba, La Pampa y Buenos Aires. Para una mejor captación de los aportes de lluvias convectivas, el balance hidrológico se calculó con precipitaciones estimadas a partir de información de satélites. Con los resultados obtenidos se demostró que este índice, calculado durante el período de floración, puede ser utilizado como estimador de los rendimientos en los departamentos de las provincias de Santa Fe, Entre Ríos y Buenos Aires, que forman parte de la zona núcleo de producción de maíz.

Palabras clave. Balance hídrico, sensores remotos, rendimientos de maíz, Región Pampeana.

SATISFACTION WATER INDEX AS CORN YIELD ESTIMATE

SUMMARY

The planning of corn cultivation and their yields are affected by water availability at time of planting and mainly during flowering. The water balance is the easiest way to estimate the water soil moisture. There are a lot of methods of estimation, many of which use surface data collected by rainfall network. This network leaves large production areas without rainfall records in Argentina. Therefore, rainfall estimation by remote sensing would be an alternative for water balance calculation. The objective of this paper is to analyze the association between county (or shire) corn yield and hydric satisfaction index (ISHi). Water balance was calculated using rainfall estimation by remote sensing in order to get a better consideration of convective rain contributions. If the ISHi is calculate around flowering, it can be use as estimator of crop yield of corn. This index can be use in the core area production of corn.

Key words. Water balance, remote sensing, crop yields of corn, pampas region.

INTRODUCCIÓN

La precipitación en la Región Pampeana varía entre años y es considerada como una de las variables meteorológicas de mayor influencia en la producción de cultivos de secano. El fenómeno de “El Niño – Oscilación del Sur” (ENOS), es uno de los principales responsables de la variabilidad interanual de este elemento, con una marcada influencia en la Región Pampeana (Magrin *et al.*, 1998; Podestá *et al.*, 1999; Fernández Long *et al.*, 2008, 2010, 2011b). Los rendimientos de maíz en la región tienden a ser mayores durante los años “El Niño” y menores en los años “La Niña” (Fernández Long *et al.*, 2008). Esta señal es más intensa en el norte de la Región Pampeana y se debilita hacia el sur, presentando un comportamiento inverso en el sudeste de la provincia de Buenos Aires (Carneiros y Fernández Long, 2008). Simultáneamente, desde la década de los sesenta hasta la actualidad, hubo un aumento generalizado de las precipitaciones que se tradujo en un desplazamiento hacia el oeste de las isoyetas que delimitan la región oriental de secano en la Argentina. Dicho cambio en la disponibilidad hídrica, junto a condiciones económicas favorables a la agricultura, determinaron una expansión de la frontera agrícola (Murphy, 2010).

La precipitación puede ser medida en superficie a través de una red pluviométrica o estimada a partir de sensores remotos. La precipitación medida en superficie es registrada en la red de estaciones del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) que funciona de forma operativa desde hace 140 años. Recién en los últimos años se han desarrollado diversas técnicas para estimar precipitación acumulada sobre la base de sensores remotos combinados con información de pluviómetros (Joyce *et al.*, 2004; Gebremichael *et al.*, 2005; Huffman *et al.*, 2007). Uno de los mayores avances en este campo fue la incorporación de sensores de microondas pasivas en varios satélites, lo que permite obtener mejores estimaciones de la tasa de precipitación (Kidd *et al.*, 2003). En particular, una de las estimaciones que hace uso de esta nueva tecnología es el CMORPH

(Climate Prediction Center Morphing Technique) (Joyce *et al.*, 2004). Estos datos han sido validados para el sudeste de Sudamérica, observándose que captura adecuadamente los eventos de precipitación como así también que existe una buena relación en la intensidad relativa de los mismos (Ruiz, 2009; Hobouchian *et al.*, 2012).

El agua disponible durante la floración del maíz afecta la tasa de crecimiento por planta y el rendimiento del cultivo. Existe un período de tiempo en el cultivo de maíz, conocido como “período crítico” (PC), que abarca desde 15 días antes de floración (R1) hasta 15 días después, durante el cual la ocurrencia de un estrés tanto hídrico, como lumínico, produce las mayores mermas en el rendimiento (Forte Lay y Scarpati, 2004). Durante esta etapa se define el número de granos (NG) por metro cuadrado (Carcova *et al.*, 2003). La tasa de crecimiento por planta (TCP) durante el PC es un buen estimador de la capacidad de la planta de maíz para fijar granos bajo una amplia gama de condiciones ambientales y prácticas de manejo (Andrade *et al.*, 2002). Un déficit hídrico en este subperíodo ocasiona una disminución de la conductibilidad estomática, que afecta el flujo transpiratorio y la fotosíntesis y provoca una reducción de la TCP y del NG; también modifica la sincronía floral, demorando la liberación de polen y retrasando, más que proporcionalmente, la aparición de los estigmas por la disminución del crecimiento de los mismos (Carcova *et al.*, 2003). Una alternativa para mitigar los efectos negativos del estrés hídrico sobre el rendimiento es el monitoreo de los índices de variabilidad climática (principalmente el ENOS) y de las condiciones hídricas del suelo que condicionan los distintos escenarios hídricos probables durante el ciclo del cultivo. Esta información permite ajustar prácticas de manejo (combinación de fecha de siembra y duración del ciclo a floración), para adelantar (siembra temprana) o atrasar (siembra tardía) el período crítico evitando la simultaneidad con las épocas de menor disponibilidad hídrica (escape) (Maddonni, 2011).

Como se indicó anteriormente, conocer el estado hídrico del perfil de suelo explorado por el sistema radical y la evolución del mismo a través del tiempo resulta esencial a la hora de decidir sobre el manejo de los cultivos conducidos en condiciones de secano. Para conocer dicho estado se puede realizar la medición simultánea de los aportes de agua al suelo (flujos positivos) y las salidas por evapotranspiración y escurrimiento profundo (flujos negativos) mediante el uso de lisímetros de distinto tipo y tamaño. De cualquier manera resulta difícil reproducir en un lisímetro las condiciones naturales y es prácticamente impensable disponerlos en un número y densidad suficiente (Pascale y Damario, 2004). Una variante más razonable para realizar el seguimiento del estado hídrico del suelo es a través de un modelo de balance hidrológico. Debido a esto la estimación del contenido de agua en el suelo ha sido motivo de estudio de numerosos autores (Thornthwaite & Mather, 1955; Holmes & Robertson, 1959; Pascale y Damario, 1977; Forte Lay y Burgos, 1978; Forte Lay y Villagra, 1983; Forte Lay *et al.*, 1987; Forte Lay y Troha, 1987; Troha y Forte Lay, 1990; Forte Lay *et al.*, 1995; Paruelo y Sala, 1995; Allen *et al.*, 1998; Senay y Verdin, 2003; Spescha *et al.*, 2004, 2008; Forte Lay *et al.*, 2005; Scarpati *et al.*, 2007; Senay, 2008; Hurtado *et al.*, 2007, 2008). Para la Argentina, se desarrolló recientemente un modelo de balance hidrológico operativo para el agro (BHOA) que permite conocer en tiempo y forma el agua almacenada en el suelo. A partir de las correlaciones con los datos de rendimientos departamentales de maíz y trigo se pudo comprobar que el mismo tiene un muy buen desempeño a esa escala, proporcionando una herramienta de decisión objetiva y en tiempo real a diversos actores vinculados a la producción agropecuaria (Fernández Long *et al.*, 2012).

Por el momento no existen antecedentes del grado de asociación entre los rendimientos departamentales de maíz y los resultados del balance hidrológico, calculado a partir de la precipitación estimada a partir de observaciones reali-

zadas por satélite. En su mayoría las metodologías de balance hidrológico utilizan la precipitación medida en superficie, registrada en la red de estaciones del SMN, dispuestas en nuestro país en forma heterogénea. Estas mediciones son observaciones puntuales que, en general, no representan áreas extensas, especialmente en el verano, cuando las lluvias son típicamente convectivas. (Penalba y Robledo, 2005; Robledo y Penalba, 2009; Vidal, 2009).

El objetivo del trabajo es analizar el grado de asociación entre los rendimientos departamentales de maíz en una serie de campañas y los resultados del balance hidrológico, calculado a partir de la precipitación estimada a partir de observaciones realizadas por satélite. Para ello se buscó comprender en qué medida la generación del rendimiento es explicada por la disponibilidad hídrica del suelo estimada a escala regional. Conocer dicho grado de asociación entre ambas variables permitiría, a partir del seguimiento periódico del estado hídrico del suelo (a día vencido), estar al tanto de la condición hídrica previa al inicio del cultivo y planificar su manejo de acuerdo a la situación particular de cada año, aumentando la eficiencia y la producción para una utilización más sustentable del agrosistema. Por otra parte, se contaría con información que permitiría desarrollar pronósticos de rendimientos para la región estudiada.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se trabajó con rendimientos de maíz de 54 departamentos y/o partidos de la región oriental de secano argentina para las campañas comprendidas entre 2003/04-2010/11 (MinAgri, 2012), que incluye las provincias de Buenos Aires, Santa Fe, Entre Ríos, Córdoba, La Pampa, Chaco y Santiago del Estero.

Como variables de entrada del balance hidrológico se emplearon los datos de evapotranspiración potencial (EP) obtenidos a partir de interpolaciones de los valores medios mensuales publicados por Murphy *et al.* (2008) estimados a través de la meto-

dología de Penman-Monteith recomendada por la FAO (Allen *et al.*, 1998). Se utilizaron los valores de capacidad de campo y punto de marchitez obtenidos consensuando valores determinados experimentalmente a campo por personal del ex Centro de Investigaciones Biometeorológicas (CIBIOM), valores estimados por Falasca *et al.* (1998) mediante el modelo de Ritchie y Crum (1989) y estimaciones del INTA (Damiano y Taboada, 2000), los cuales ya fueron utilizados en trabajos previos como por ejemplo: Forte Lay y Spescha, 2001; Hurtado, 2008; Spescha, 2008; Fernandez Long *et al.*, 2011a.

La precipitación utilizada es la estimada por el algoritmo CMORPH (NOAA Morphing Technique) basado en el uso de microondas pasivas, que resulta ser más exacta que otras estimaciones que usan sólo la temperatura de los topes nubosos (Joyce *et al.*, 2004; Ebert, 2007). La resolución espacial de los datos es de 0,25 grados y se trabajó con datos tri-horarios que luego fueron acumulados en 24 horas equivalentes al día pluviométrico, siguiendo la metodología utilizada por Fernández Long *et al.* (2011a). Para el cálculo del balance hidrológico se empleó el programa BHOA que fue realizado desde el momento a partir del cual se tienen datos CMORPH (enero de 2003) hasta noviembre de 2011, obteniéndose la evapotranspiración real diaria (ER) como variable de salida.

Utilizando las salidas obtenidas se procedió a calcular el índice de satisfacción hídrica (ISHi) según la siguiente expresión:

$$ISHi = \frac{\sum_{d=1}^n \frac{ER_d}{EP_d}}{n}$$

Donde:

ERd: evapotranspiración real diaria

EPd: evapotranspiración potencial diaria

n : número de días de la década considerada (8, 9, 10 u 11)

El ISHi se calculó para cada departamento y/o partido en estudio y para cada década de los meses de diciembre y enero de cada año de la serie en estudio. Una década se define como el período de diez días entre el 1° y el 10° y entre el 11° y el 20° día de cada mes. La última década del mes puede tener 8, 9, 10 u 11 días (O.M.M., 1966). De esta forma se obtuvieron para cada campaña seis valores del índice. Finalmente se efectuaron las correlaciones

entre los ISHi de cada una de las décadas de diciembre y enero con los rendimientos de los 54 departamentos seleccionados mediante la metodología de Spearman (rs). La prueba usada para determinar la significancia de la correlación fue la "t" de Student a tres niveles, 90%, 95% y 99%.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis del ISHi

A continuación se detalla la evolución de la condición hídrica del suelo en la región oriental de secano durante dos campañas contrastantes, utilizando el ISHi como indicador. En las figuras, el color blanco indica áreas con buen estado hídrico ($ISHi > 0,9$) y los tonos que varían de gris a negro, situaciones con crecientes restricciones hídricas.

Durante la primer década de diciembre (Fig. 1A) el ISHi es máximo en el sur de Santa Fe, norte de Buenos Aires y en el centro y sur de Córdoba, área que se reduce en la segunda década de diciembre (Fig. 1B). A pesar de que durante la tercera década se recuperan las condiciones favorable para Córdoba y mejoran para la región centro-oeste de Buenos Aires (Fig. 1C), esto no perdura en el tiempo, produciéndose una reducción del área óptima en las siguientes décadas del mes de enero (Fig. 1, D, E y F). En consecuencia, la zona núcleo de producción de maíz queda expuesta a condiciones poco favorables durante la floración del cultivo (Fig. 1, C y D), registrándose, en estas circunstancias, un rendimiento promedio de toda la región de 3500 kg ha⁻¹. Durante la campaña 2009/2010, el área de máximo valor del ISHi aumenta desde la primera década de diciembre (Fig. 1G) hasta abarcar casi la totalidad de la región en la segunda década de enero (Fig. 1K). De esta forma, el período crítico transcurre con mayor disponibilidad de agua en toda la región alcanzándose rendimientos promedio de 6150 kg ha⁻¹, casi el doble que en la campaña anterior.

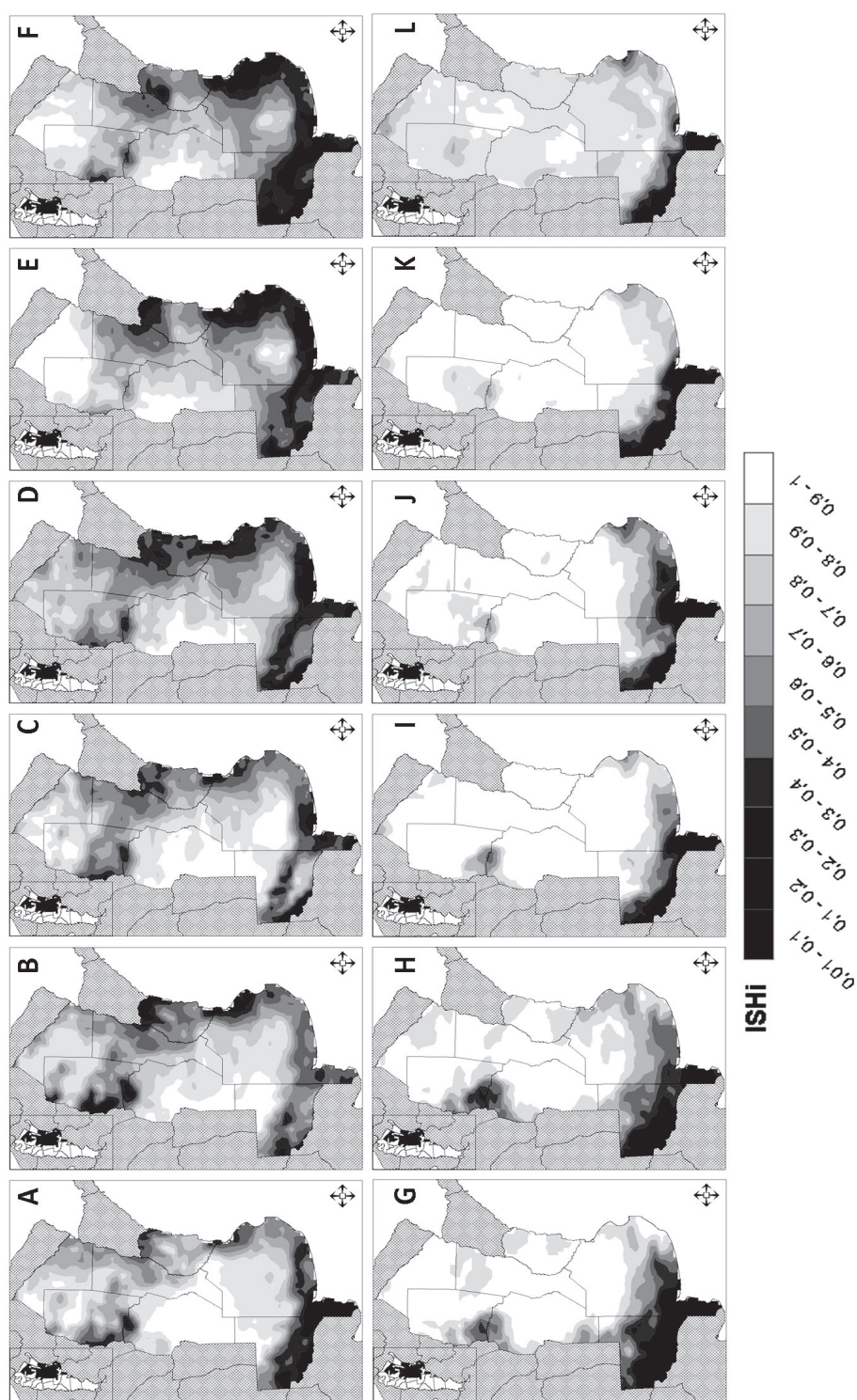


Figura 1. Evolución del ISHi durante las seis décadas de la campaña 2008-2009 (A a F) y las seis de la campaña 2009-2010 (G a L).

Relación entre el ISHi y los rendimientos

A continuación se detalla la relación entre el ISHi y los rendimientos de maíz en algunos departamentos y/o partidos mediante gráficos que representan la evolución anual de los rendimientos y del ISHi para cada década de diciembre y enero.

En Pergamino, provincia de Buenos Aires, no existe una marcada relación entre estas variables en la primera y segunda década de diciembre (Fig. 2, A y B), mientras que en la tercera década de diciembre y la primera de enero, el ISHi y los rendimientos presentaron un comportamiento muy similar (Fig. 2, C y D); en las dos últimas décadas de enero la sincronía disminuye notoriamente (Fig. 2, E y F). La gran extensión de la provincia de Buenos Aires hace que las variables agroclimáticas difieran marcadamente de norte a sur, ocasionando un atraso en las fechas de siembra, por lo que el período crítico se produce más tarde. Este atraso en la fecha de siembra en los partidos del sur de Buenos Aires provoca que la mayor coincidencia entre el ISHi y los rindes ocurra durante las dos últimas décadas de enero, tal como se observa en el caso de Benito Juárez (Fig. 3, E y F). Queda claro que en la utilización del ISHi como indicador de los rendimientos, el mismo debe calcularse para distintas épocas según la ubicación geográfica de la región. En las localidades ubicadas en el sur de Buenos Aires debería calcularse para las dos últimas décadas de enero y en el norte para la última de diciembre y la primera de enero.

En la provincia de Santa Fe se encuentra que la mayor sincronía entre el ISHi y los rendimientos departamentales comienza a partir de la segunda década de diciembre y continúa durante la tercera de diciembre y la primera de enero como el caso de Gral. López (Fig. 4, B, C y D) e Iriondo (Fig. 5, B, C y D) que muestra un alto nivel de concordancia durante el mismo período. En la provincia de Entre Ríos los resultados hallados fueron uniformes para todos los departamentos. Si bien todos manifiestan un alto nivel de sincronización, la mayor concordancia se produce

en la primera década de enero, como puede observarse claramente en el departamento de Victoria (Fig. 6, B, C y D). Por lo tanto, el ISHi de la segunda década de diciembre o el de la primera década de enero podría usarse como estimador de los rendimientos para las provincias de Santa Fe y Entre Ríos.

En el caso de la provincia de Chaco los resultados encontrados no fueron satisfactorios. En algunos departamentos no se observa ningún tipo de relación, mientras que en otros hay un muy bajo nivel de sincronización para la primera década de enero, por lo que el ISHi no puede utilizarse como estimador en esta región. Los departamentos que componen el margen oeste de la región oriental de secano, ubicados en las provincias de La Pampa, Córdoba, Santiago del Estero y Chaco, tampoco mostraron resultados concluyentes sobre la utilidad del ISHi como estimador. No fue posible determinar con certeza un período de mayor sincronía, probablemente porque los departamentos que componen esta región se encuentran en la zona de transición entre climas subhúmedos secos y subhúmedos húmedos, sometida a grandes variaciones interanuales en la precipitación que determinan frecuentes modificaciones en las condiciones de manejo del cultivo entre años.

Buscando encontrar una explicación a los resultados encontrados en las provincias que componen el margen oeste de la región oriental de secano, entre ellas Córdoba, La Pampa, Chaco y Santiago del Estero, se procedió al análisis de las fechas de siembra. Para cada año se determinaron las fechas en donde se alcanzaban el 5% y el 97% de la superficie sembrada, se calculó la media, el desvío estándar y el coeficiente de variación (Cuadros 1 y 2). Se puede ver que los coeficientes de variación de las fechas en que se alcanza el 97 % de la superficie sembrada (Cuadro 1), eran superiores a los del resto de la región en estudio (Cuadro 2). Esto ocurre porque los productores de estas regiones utilizan con frecuencia la modificación de las fechas de siembra como alternativa para mitigar los efectos negati-

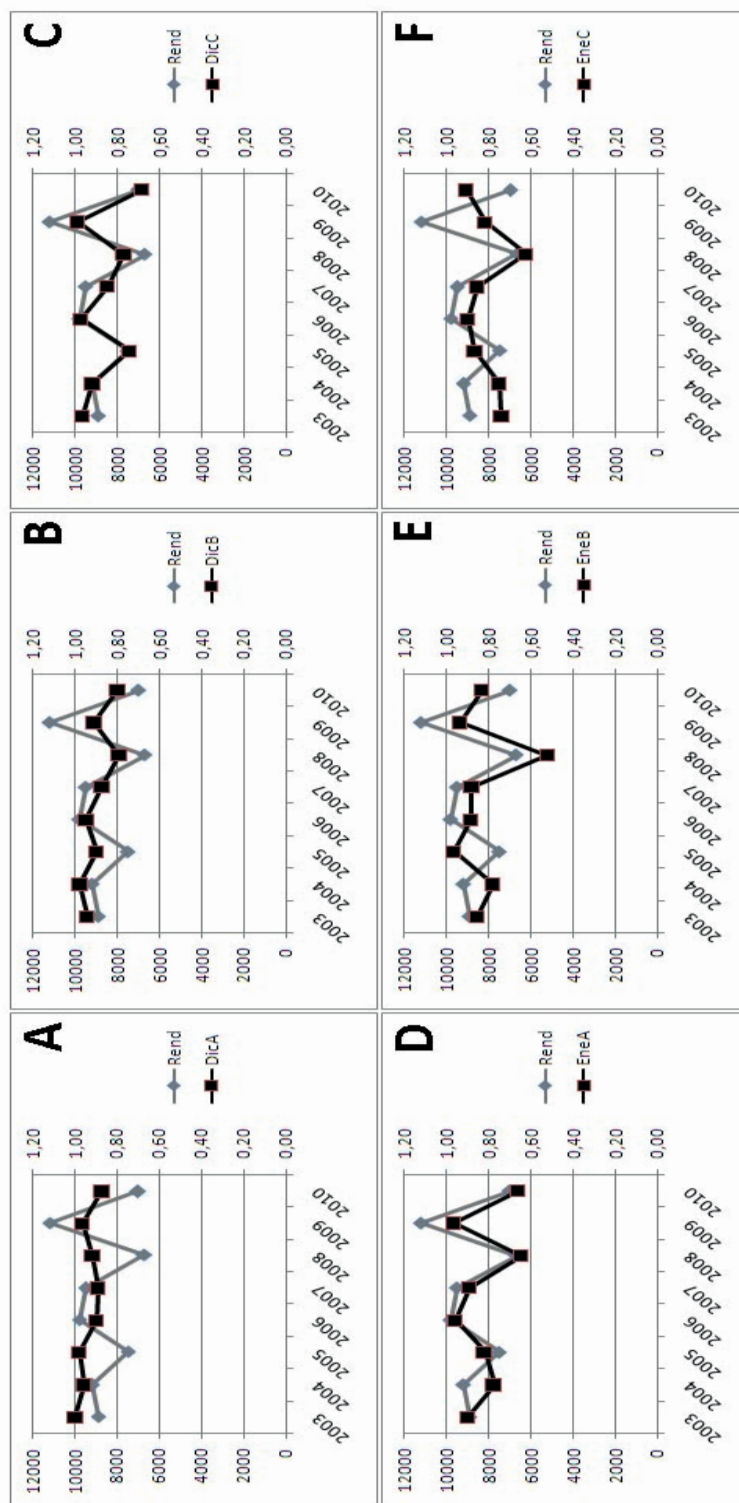


Figura 2. Variación interanual de los rendimientos y variación interanual del ISHi para las seis décadas correspondiente de diciembre a enero. En cada figura el eje de las ordenadas corresponde al rendimiento en kg/ha (a la izquierda) y el valor del ISHi (a la derecha) y el de las abscisas a los años. Las líneas grises representan la variación interanual de los rendimientos departamentales y las negras la variación interanual del ISHi en Pergamino (Buenos Aires).

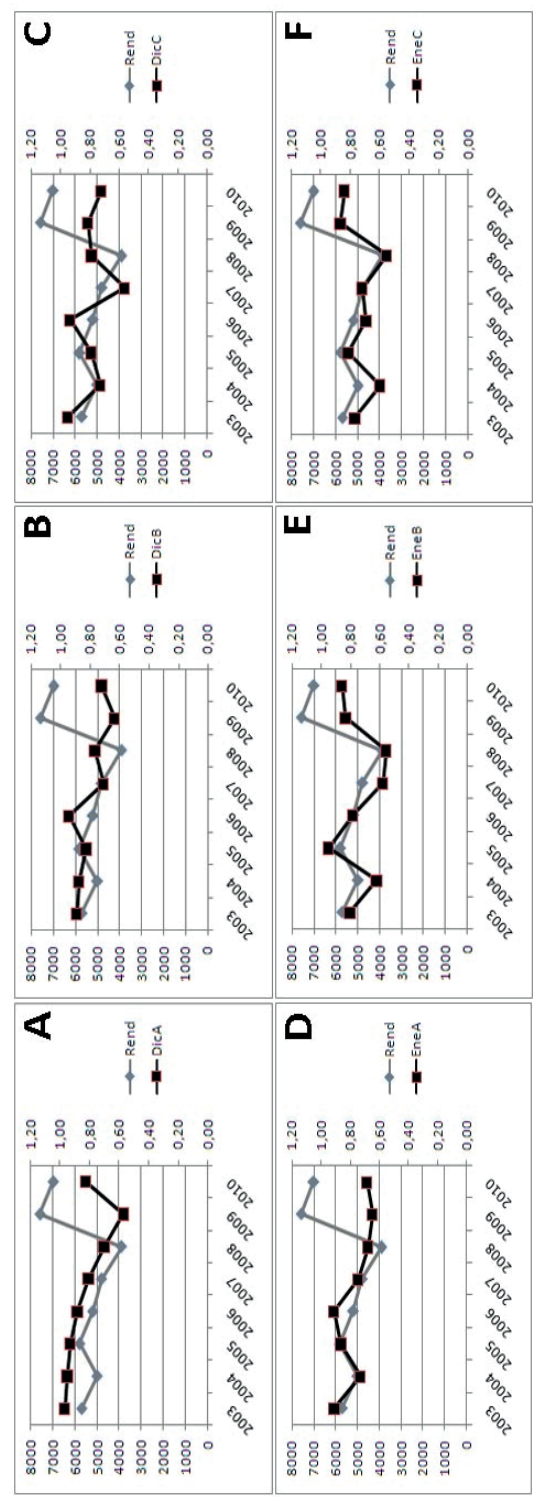


Figura 3. Ídem Figura 2 en Benito Juárez (Buenos Aires).

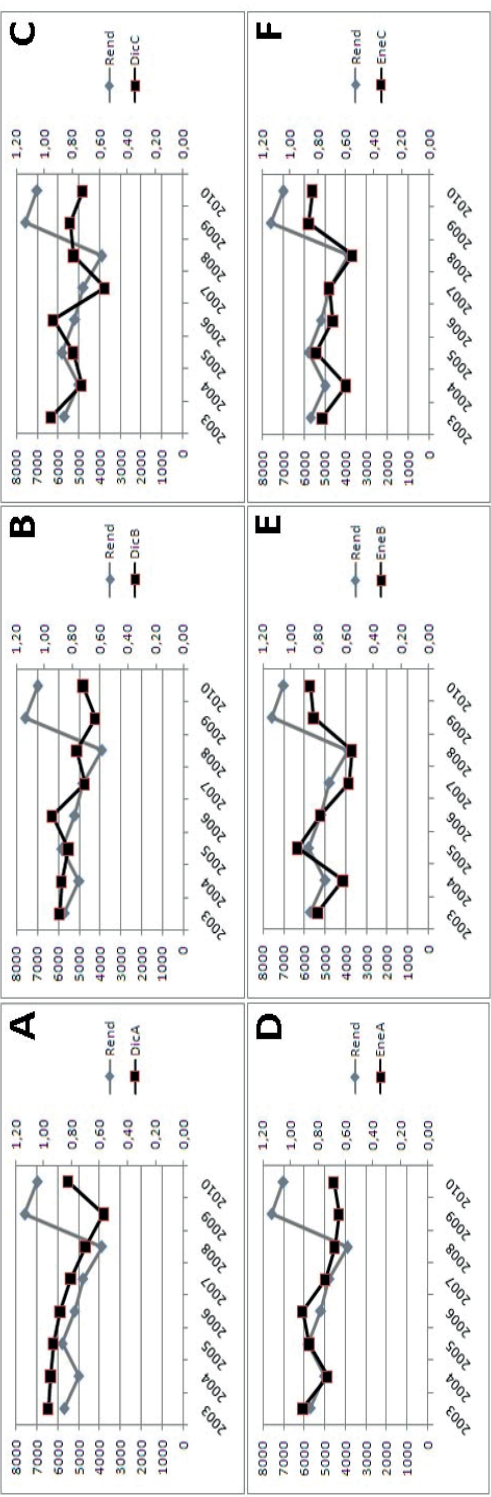


Figura 4. Ídem Figura 2 en General López (Santa Fe).

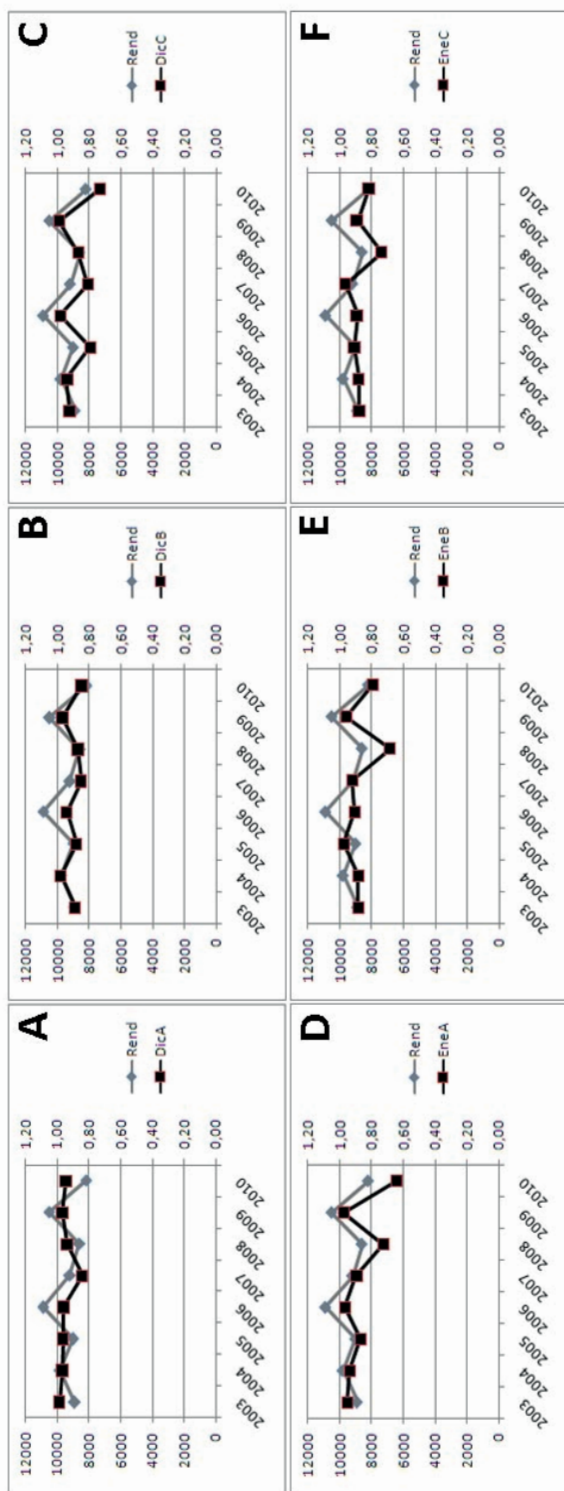


Figura 5. Ídem Figura 2 en Iriondo (Santa Fe).

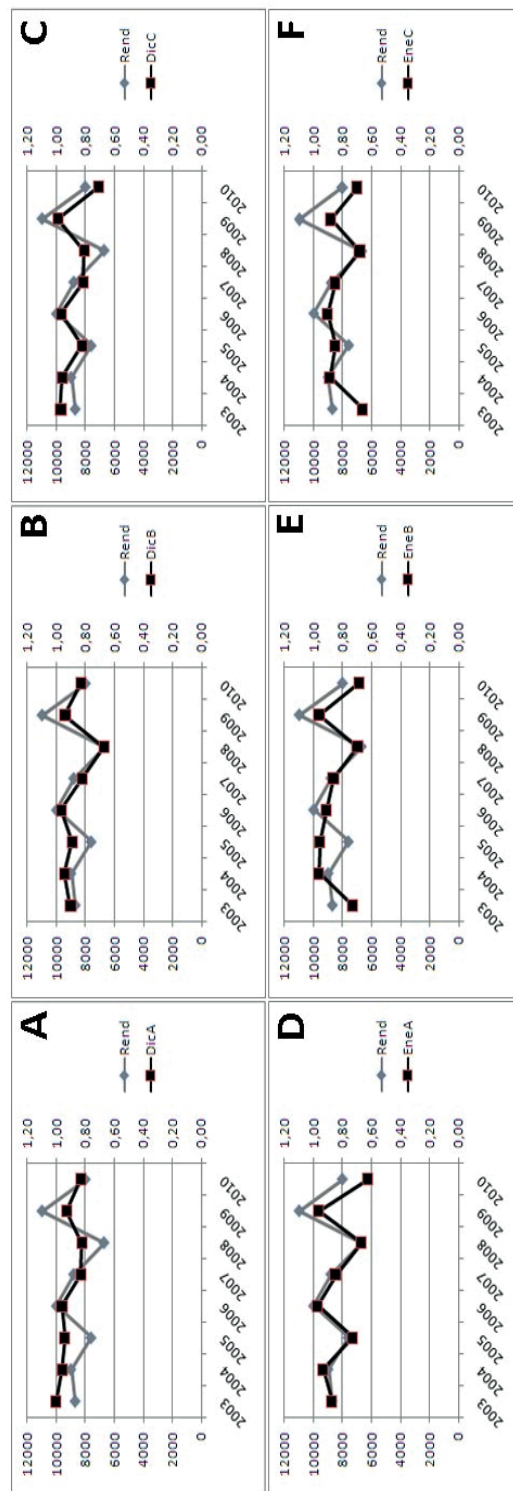


Figura 6. Ídem Figura 2 en Victoria (Entre Ríos).

	Córdoba			
	Marcos Juárez		Presidente Roque S. Peña	
	5% sup sem.	97% sup sem.	5% sup sem.	97% sup sem.
2003	05-sep	28-nov	26-sep	29-dic
2004	03-sep	22-oct	08-oct	03-dic
2005	01-sep	29-dic	29-sep	22-dic
2006	05-oct	04-ene	12-oct	07-dic
2007	27-sep	18-oct	04-oct	29-nov
2008	18-sep	30-oct	09-oct	11-dic
2009	17-sep	15-oct	01-oct	07-ene
Media	15-sep	16-nov	04-oct	15-dic
Período		62		72
Desviac. Estándar	12,9	34,6	5,8	14,4
Media (día julian)	259	268	278	298
Coef. variabilidad	5,0	12,9	2,1	4,8

Cuadro 1.
Fechas en las
cuales se
alcanza el 5%
y 97% de la
superficie
sembrada de
dos departa-
mentos de la
provincia de
Córdoba.

	Santa Fe		Entre Ríos	
	Gral. López		Paraná	
	5% sup sem.	97% sup sem.	5% sup sem.	97% sup sem.
2003	19-sep	14-nov	29-ago	24-oct
2004	10-sep	05-nov	10-sep	05-nov
2005	08-sep	13-oct	01-sep	13-oct
2006	21-sep	26-oct	07-sep	19-oct
2007	20-sep	25-oct	06-sep	25-oct
2008	02-oct	06-nov	04-sep	30-oct
2009	17-sep	22-oct	10-sep	22-oct
Media	18-sep	29-oct	05-sep	24-oct
Período		41		49
Desviac. Estándar	7,9	10,8	4,5	7,4
Media (día Julian)	262	303	249	298
Coef. variabilidad	3,0	3,6	1,8	2,5

Cuadro 2.
Fechas en las
cuales se alcanza
el 5% y 97% de
la superficie
sembrada de dos
departamentos
de las provincias
de Entre Ríos y
Santa Fe.

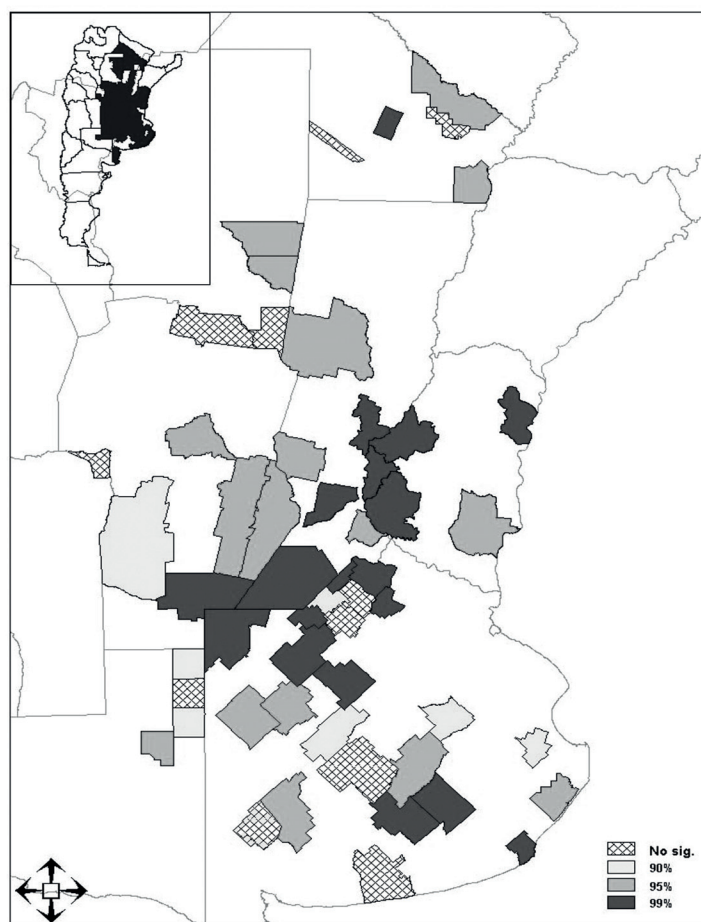
vos del estrés por deficiencia hídrica durante el período crítico. Las siembras tempranas se realizan en años con buena disponibilidad hídrica mientras que en los años secos éstas se retrasan. La duración del periodo entre el comienzo y fin de la siembra, también varía considerablemente entre departamentos. En promedio, ese lapso es de algo más de sesenta días en los departamentos ubicados al oeste (Cuadro 1) y de menos de cincuenta en los del resto de la región (Cuadro 2). Estos resultados señalan la necesidad de analizar, año a año, cual fue la fecha de floración en cada departamento y tomar el valor del ISHi para ese período, que será diferente de una campaña a la otra, pudiendo variar en algunos casos en más de un mes.

Realizadas las correlaciones entre los rendimientos departamentales y el ISHi para cada década de diciembre a enero, 19 departamentos presentaron valores significativos al 99%, 17 al 95%, 7 al 90% y 11 departamentos mostraron valores no significativos. La Figura 7 muestra la distribución espacial de estos valores, pudiéndose observar que la mayoría de los departamentos con elevado nivel de significancia se concentra en la zona núcleo de producción.

En la mayor parte de los departamentos analizados se observa un incremento temporal del nivel de correlación hasta alcanzar valores significativos, dicha condición se mantiene por un período aproximado de tres décadas, después de

Figura 7.
Departamentos que
en alguna década
de las 6 analizadas
presentan correlaciones
significativas al
90%, 95% y 99%.

90%, 95% 99%.



las cuales la correlación no es significativa a los niveles considerados.

Cuando se utilizan rendimientos departamentales existe una cantidad de variables que afectan su estimación, tales como los distintos híbridos utilizados comercialmente, las condiciones de manejo, la tecnología empleada, los objetivos de cada productor y principalmente las fechas de siembra, las cuales pueden ser óptimas o tardías según exista o no un cultivo antecesor. Esto ocasiona que para una misma localidad las fechas en las cuales florece el cultivo, puedan diferir considerablemente, modificando sustancialmente

el momento de ocurrencia del período crítico y con ello el rendimiento logrado. En departamentos donde no se modifican en gran medida las condiciones de manejo se encuentra que durante los treinta días alrededor de floración el valor de correlación obtenido entre el índice y los rendimientos medios de maíz adopta el máximo valor.

La variación espacial y la temporal de la asociación de los rendimientos con el ISHi, analizada a través de su significancia, muestra una casi nula relación para la primera década de diciembre (Fig. 8A). Durante la segunda década de diciembre (Fig. 8B) ciertos departamentos y/o

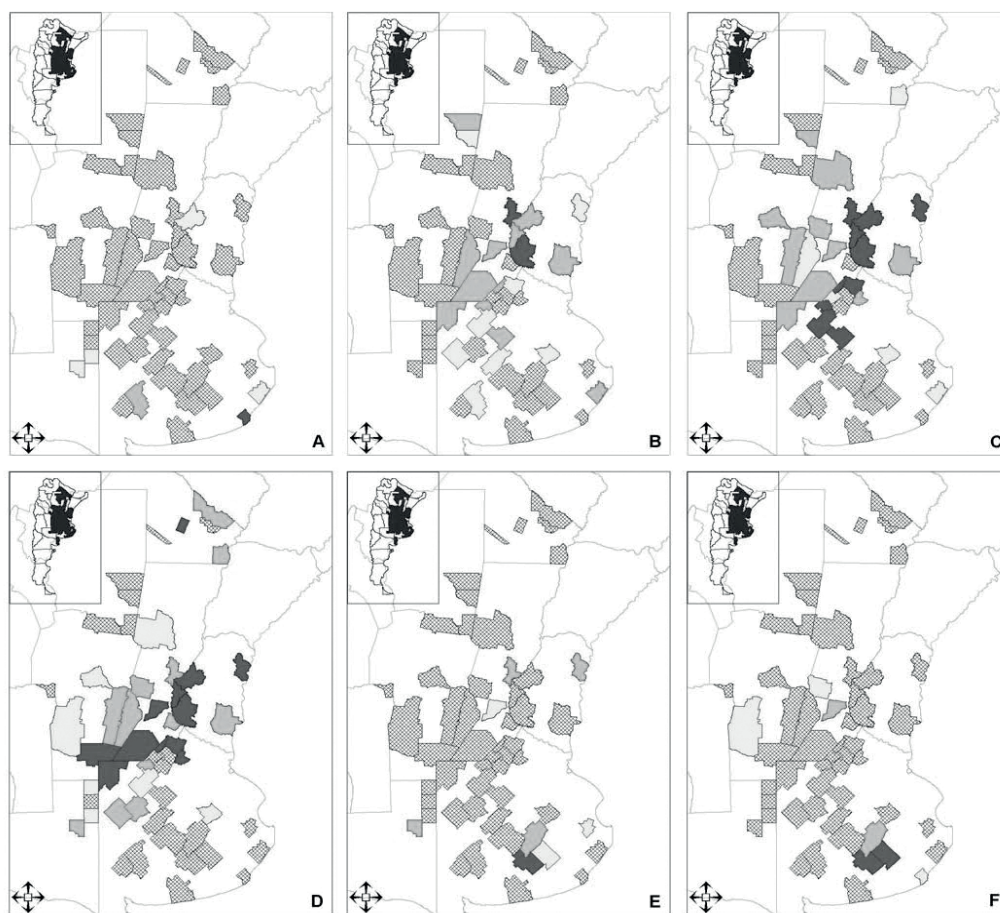


Figura 8. Departamentos que presentan correlaciones significativas al 90%, 95% y 99% en la primera década de diciembre (A), en la segunda (B), en la tercera (C), en la primera década de enero (D), en la segunda (E) y en la tercera (F).

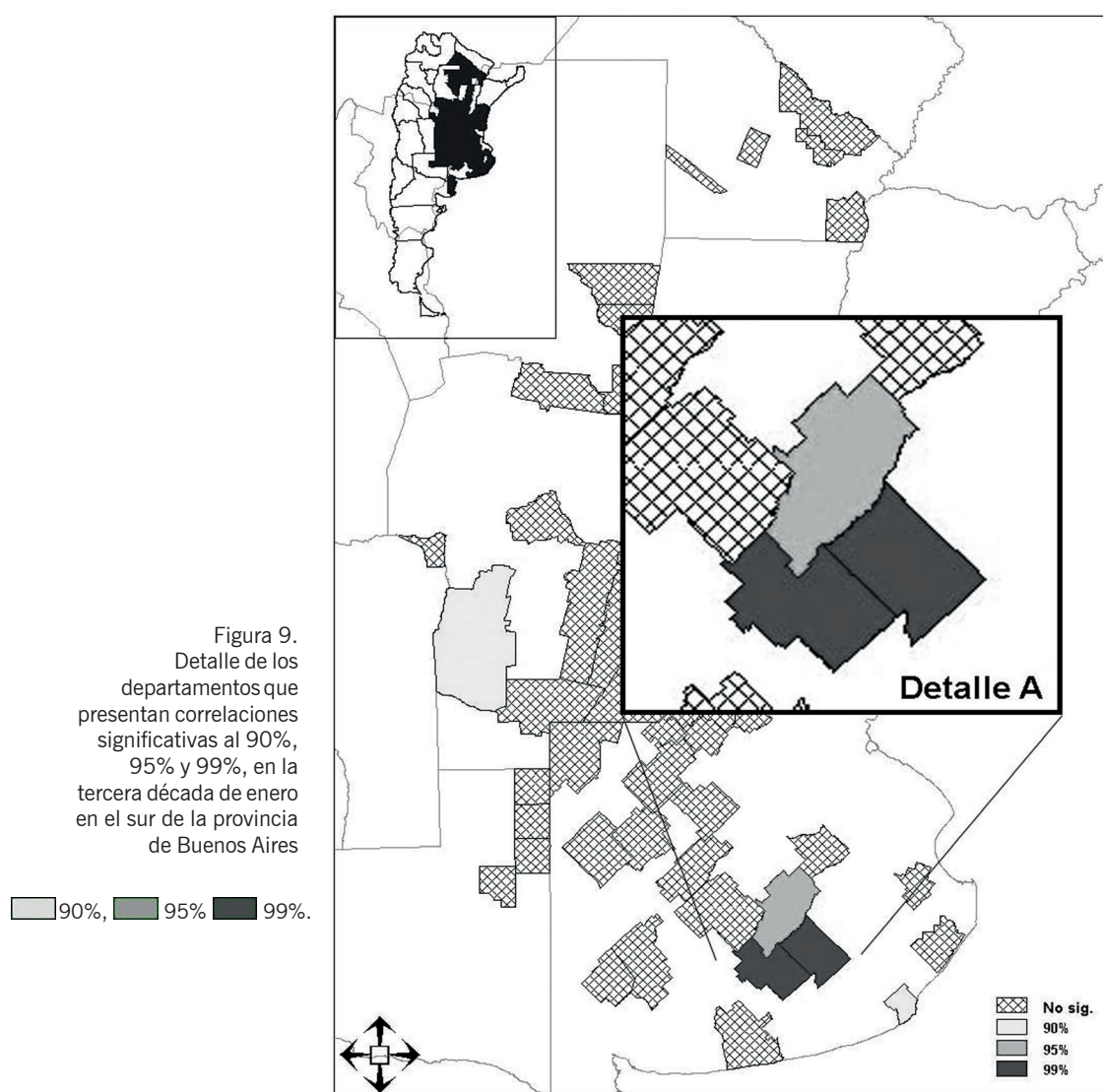
90%, 95% 99%.

partidos en el centro de la región en estudio comienzan a mostrar algún nivel de relación entre las variables. Estas localidades alcanzan su máximo valor entre la tercera década de diciembre y la primera de enero (Fig. 8C y D), coincidiendo, a grandes rasgos, con el momento de ocurrencia del período crítico de maíz en esa zona. En el sur de la provincia de Buenos Aires existen tres partidos limítrofes entre sí (Tandil, Benito Juárez y Azul), que presentan un patrón estacional diferente (Fig. 9, A). En éstos, la significancia es-

tadística se alcanza recién durante las dos últimas décadas de enero, debido a la época de siembra más tardía que se practica en la región, como se mencionó anteriormente.

CONCLUSIONES

Se concluye que el ISHi calculado con datos satelitales se encuentra asociado en forma positiva con los rendimientos promedio departamental-



les y que el valor de correlación obtenido entre el índice y los rendimientos medios de maíz adopta el máximo valor durante los treinta días alrededor de floración.

Este índice, calculado durante el período de floración, puede ser utilizado como estimador de los rendimientos en los departamentos y/o partidos de las provincias de Santa Fe, Entre Ríos y Buenos Aires, que forman parte de la zona núcleo de producción de maíz, mientras que no resulta conveniente su utilización en los departamentos próximos al límite de la región oriental de secano determinado por la isoyeta de 500 mm.

La alta variabilidad interanual de las fechas de siembra en esta región ocasiona una distorsión en el momento de ocurrencia del máximo valor de correlación, determinando la necesidad de analizar la fecha de floración de cada año en particular en cada departamento para luego relacionarlo con el ISHi.

Agradecimientos

Este trabajo fue realizado en el marco del proyecto UBACyT G477.

BIBLIOGRAFÍA

- Allen, R.G.; L.S. Pereira; D. Raes and M. Smith. 1998. Crop evapotranspiration -Guidelines for computing crop water requirements. FAO irrigation and drainage. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, paper 56:1-15.
- Andrade, F.H.; L. Echarte; R. Rizzalli; A. Della Mggiora and M. Casanovas. 2002. Kernel Number Prediction in Maize under Nitrogen or Water Stress. *Crop Science* 42: 1173-1179.
- Cárcova, J.; L. Borrás y M.E. Otegui. 2003. Ciclo Ontogénico, Dinámica del Desarrollo y Generación del Rendimiento y la Calidad en Maíz. En: Satorre, E.H.; R.L. Benech Arnold; G.A. Slafer; E.B de la Fuente; D.J. Miralles; M.E. Otegui y R. Savin (eds.): Producción de Granos, bases funcionales para su manejo. Ed. Facultad de Agronomía, pp. 133-163.
- Carnelos, D.A. y M.E. Fernández Long. 2008. Relación del ENOS con los rendimientos de maíz en un grupo de partidos del sudeste de la provincia de Buenos Aires. *Actas XII Reunión Argentina de Agrometeorología*. San Salvador de Jujuy, Argentina, 2 pp.
- Damiano, F. y M.A. Taboada. 2000. Predicción del agua disponible usando funciones de pedotransferencia en suelos agrícolas de la Región Pampeana. *Ciencia del Suelo* 18: 77-88.
- Ebert, E.E.; J.E. Janowiak and C. Kidd. 2007. Comparison of Near Real Time Precipitation Estimates from Satellite Observations and Numerical Models. *Bulletin American Meteorological Society* 88: 47-64.
- Falasca, S.; A. Ulberich y S. Morddenti. 1998. Constantes hidrológicas de la provincia de Buenos Aires por dominio edáfico. *Actas XVII Congreso Nacional del Agua*, Buenos Aires, Argentina, 8 pp.
- Fernández Long, M.E.; D.A. Carnelos y R.H. Hurtado. 2008. Respuesta de los rendimientos de maíz al ENOS, en grupos homogéneos de la región pampeana. *Actas XII Reunión Argentina de Agrometeorología*. San Salvador de Jujuy, Argentina, 2 pp.
- Fernández Long, M.E.; L. Serio; L. Spescha y R.H. Hurtado. 2010. Relación entre los rendimientos de maíz y algunos índices de variabilidad climática. *Actas IX Congreso Nacional de maíz, Simposio Nacional de sorgo*. Rosario, Argentina, 2 pp.
- Fernández Long, M.E.; Y. García Skabar; L. Ferreira y L. Spescha. 2011a. Balance de agua en el suelo con precipitación estimada a partir de sensores remotos. Inédito.
- Fernández Long, M.E.; L. Spescha; R.H. Hurtado y G.M. Murphy. 2011b. Impacto del ENOS sobre los rendimientos de maíz en la región pampeana argentina. *Agriscientia* 28: 31-38.
- Fernández Long, M.E.; L. Spescha; I. Barnatán y G.M. Murphy. 2012. Modelo de Balance Hidrológico Operativo para el Agro (BHOA). *Revista de la Facultad de Agronomía, Agronomía & Ambiente* 32: 31-47.
- Forte Lay, J.A. y J.J. Burgos. 1978. Verificación de métodos de estimación de la variación de almacenaje de agua en suelos pampeanos. *Actas del taller Argentino-Estadounidense sobre sequías (CONICET-NSF)*, 1983. Mar del Plata, Argentina, 19 pp.

- Forte Lay, J.A. y M.M. Villagra. 1983. El balance hidrológico de Thornthwaite y Mather (1955) aplicado bajo diferentes unidades de tiempo. Verificación con valores observados y comparación de resultados. *Actas del XI Congreso Nacional del Agua*. Tomo I, Aguas Superficiales. Córdoba, Argentina, 31 pp.
- Forte Lay, J.A.; A. Troha y M.M. Villagra. 1987. Estudio de las variaciones del agua edáfica en pradera permanente, barbecho y cultivos estacionales. *Actas de la III Reunión Argentina de Agrometeorología*. (AADA). Córdoba, Argentina, 7 pp.
- Forte Lay, J.A. y A. Troha. 1987(1). «Distribución de probabilidad de valores de humedad edáfica». *GEOACTA (AAGG)*. Argentina. 14(1): 141-152.
- Forte Lay, J.A.; J.L. Aiello y J. Kuba. 1995. Software AGROAGUA Versión 4.0. Congreso Agrosoft'95. Juiz de Fora, Brasil, 1 p.
- Forte Lay, J.A. y L. Spescha. 2001. Método para la estimación de la climatología del agua edáfica en las provincias pampeanas de la Argentina. *Revista Argentina de Agrometeorología* 1: 67-74.
- Forte Lay, J.A. y O.E. Scarpati. 2004. El ENOS y las diferencias en la distribución estival (Diciembre-Enero) de la disponibilidad de agua en el suelo en la Región Pampeana *Actas X Reunión Argentina y IV Latinoamericana de Agrometeorología*. Agrometeorología y seguridad alimentaria en América Latina. Argentina.
- Forte Lay, J.A.; O.E. Scarpati; L. Spescha and A. Capriolo. 2005. Drought Risk In The Pampean Region Using Soil Water storage Analysis Water use efficiency of the major grain crops grown in the Pampas region. International Conference «Environmental change and rational water use». Commission for Water Sustainability of the International Geographical Union». Buenos Aires, September, 2005.
- Gebremichael, M.; W.F. Krajewski; M.L. Morrissey; G.J. Huffman and R.F. Adler. 2005. A Detailed Evaluation of GPCP 1° Daily Rainfall Estimates over the Mississippi River Basin. *Journal of Applied Meteorology* 44: 665-681.
- Hobouchian, M.P.; P. Salio; D. Vila y Y. Garcia Skabar. 2012. Validación de estimaciones de precipitación por satélite sobre Sudamérica utilizando una red de observaciones de alta resolución espacial. *Actas Congremet XI*, Mendoza, Argentina, 16 pp.
- Holmes, R.M. and S.W. Robertson. 1959. A modulated soil moisture budget. *Monthly Weather Rev.* 87(3): 101-106.
- Huffman, G.J.; R.F. Adler; D.T. Bolvin; G. Gu; E.J. Nelkin; K.P. Bowman; H. Yang; E.F. Stoker and D.B. Wolff. 2007. The TRMM Multisatellite Precipitation Analysis (TMPA): Quasi-Global, Multiyear, Combined-Sensor Precipitation Estimates at Fine Scales. *J. Hydrometeorology* 8: 38-55.
- Hurtado, R.H.; M.E. Fernández Long; G. Barberis y E. Bombelli. 2007. Programas de Aplicación de Agroclimatología. Software CD, Editorial Facultad de Agronomía.
- Hurtado, R.H. 2008. Relación entre el rendimiento del cultivo de trigo y el almacenaje estimado de agua en el suelo, en las cinco provincias pampeanas. *Tesis de maestría en Meteorología Agrícola*. UBA, 117 pp.
- Joyce, R.J.; J.E. Janowiak; P.A. Arkin and P. Xie. 2004. CMORPH: A method that produces global precipitation estimates from passive microwave and infrared data at high spatial and temporal resolution. *J. Hydrometeor* 5: 487-503.
- Kidd, C.K.; M.C. Kniveton, M.C. Todd and T.J. Bellerby. 2003. Satellite rainfall estimation using combined passive microwave and infrared algorithms. *J. Hydrometeor* 4: 1088-1104.
- Maddonni, G.A. 2011. Analysis of the climatic constraints to maize production in the current agricultural region of Argentina- a probabilistic approach. *Theoretical and Applied Climatology* 107: 325-345.
- Magrin, G.O.; M.O. Grondona; M.I. Travasso; D.R. Boullón; G.R. Rodríguez y C.D. Messina. 1998. Impacto del fenómeno «El Niño» sobre la producción de cultivos en la Región Pampeana. INTA, Instituto de Clima y Agua, Castelar, Argentina, 16 pp.
- MinAgri. 2012. Cultivo de maíz, rendimientos departamentales. <http://www.siiia.gov.ar/index.php/series-por-tema/agricultura> consultada el 1/12/2012.
- Murphy, G.M.; R.H. Hurtado; M.E. Fernández Long; L. Serio; P.A. Faroni; S. Maio; L.B. Spescha y I.E. Barnatan. 2008. Atlas agroclimático de la Argentina. Ed. Facultad de Agronomía, 130 pp.
- Murphy, G.M. 2010. El clima y el crecimiento de la producción agrícola. *En: Reca, L.G., D. Lema y C. Flood (eds)*. El crecimiento de la agricultura Argentina, medio siglo de logros y desafíos. Ed. Facultad de Agronomía, pp. 117-140.
- O.M.M. 1966. Organización meteorológica mundial. Vocabulario internacional de meteorología. OMM N° 182, TP91, 276 pp.
- Paruelo, J.M. and O.E. Sala. 1995. Water losses in the Patagonian Steppe: a modelling approach. *Ecology* 76: 510-520.
- Pascale, A.J. y E.A. Damario. 1977. El Balance Hidrológico Seriado y su utilización en estudio agroclimáticos. *Revista de la Facultad de Agronomía* Universidad Nacional de la Plata (Argentina) 53(1-2): 15-34.

- Pascale, A.J. y E.A. Damario. 2004. Bioclimatología Agrícola y Agroclimatología. Ed. Facultad de Agronomía, 550 pp.
- Penalba, O. y F. Robledo. 2005. Diagnóstico estacional de la lluvia diaria y su variabilidad temporal. *Actas del IX Congreso Argentino de Meteorología*, Buenos Aires, Argentina, 9 pp.
- Podestá, G.; C. Messina; M. Grondona and G. Magrin. 1999. Associations between Grain Crop Yields in Central-Eastern Argentina and El Niño-Southern Oscillation. *Journal of applied meteorology* 30: 1488-1498.
- Ritchie, J.T. and J. CRUM. 1989. Converting soil survey characterization data into IBSNAT crop model input. Symposium organized by the International Society of Soil Science (ISSS), Wageningen, Netherlands, 13 pp.
- Robledo, F. and O. Penalba. 2009: Temporal and spatial variability of daily intensity rainfall and it relation with surface atmospheric circulation in Southeastern South America. 9th International Conference on Southern Hemisphere Meteorology and Oceanography (9ICSHMO). Melbourne, Australia, 10 pp.
- Ruiz, J.J. 2009. Evaluación de diferentes metodologías para la calibración de las estimaciones de precipitación CMORPH sobre Sudamérica. *Revista Brasileira de Meteorologia* 24(4): 473-488.
- Scarpati, O.E.; J.A. Forte Lay; L. Spescha and A. Capriolo. 2007. Drought risk in the pampean región argentina using soil water storage. Environmental Change and rational water use. Editores: Olga Scarpati y Anthony Jones. Ed. Orientation Graphic Argentina, 24 pp.
- Senay, G.B. and J.P. Verdin. 2003. Characterization of yield reduction in Ethiopia using a GIS-based crop water balance model. *Canadian Journal of Remote Sensing* 6: 687-692.
- Senay, G.B. 2008. Modelling landscape evapotranspiration by integrating land surface phenology and a water balance algorithm. *Algorithms* 1(2): 52-68.
- Spescha, L.; J.A. Forte Lay; O.E. Scarpati y R. Hurtado. 2004. Los Excesos de agua edáfica y su relación con el «Enso» en la Región Pampeana. *Revista de la Facultad de Agronomía UBA* 24(2): 164-168.
- Spescha, L. 2008. Relación entre la reserva del agua en el suelo y los rendimientos de soja de la región oriental de secano de la Argentina. Tesis de maestría de Meteorología Agrícola UBA, 120 pp.
- Thornthwaite, C.W. and J.R. Mather. 1955. The water balance. Publications in Climatology VIII. Drexel Inst. of Tech., New Jersey, USA, 104 pp.
- Troha, A. y J.A. Forte Lay. 1990. Estimación de la humedad edáfica mediante distintos métodos de balance hidrológico diario. *GEOACTA (AAGG)* 17: 69-78.
- Vidal, L. 2009. Caracterización de los sistemas convectivos sobre el sudeste de Sudamérica a partir de observaciones TRMM con énfasis en la convección extrema. Tesis de Licenciatura. Departamento de Ciencias de Atmósfera y los Océanos, FCEN, UBA, 120 pp.