

EFFECTO DEL RIEGO SUPLEMENTARIO SOBRE EL SUELO Y EL RENDIMIENTO DEL MAÍZ (*Zea mays* L.) EN EL CENTRO NORTE DE LA PROVINCIA DE CÓRDOBA

Juan Pablo Giubergia^{1*}, Aquiles Salinas¹, Ignacio Severina¹,
Matías Boccardo¹, Federico Aimar¹ y Raúl S. Lavado^{2**}

¹ INTA, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Estación Experimental Agropecuaria Manfredi, Manfredi, Córdoba, Argentina

* E-mail: giubergia.juan@inta.gob.ar

² Universidad de Buenos Aires, Facultad de Agronomía e INBA, Instituto de Investigación en Biociencias Agrícolas y Ambientales (UBA-CONICET-INBA), Buenos Aires, Argentina. **E-mail: lavado@agro.uba.ar

Recibido: 13/04/2021
Aceptado: 23/06/2021

RESUMEN

El riego suplementario mejora el rendimiento de los cultivos cuando el suministro hídrico es limitado en algún momento del ciclo. Se estudiaron los efectos del riego suplementario sobre las propiedades del suelo, el rendimiento del maíz y la relación entre ellos. Se evaluaron dos tratamientos (irrigado y secano) en experimentos de campo realizados en la Estación Experimental INTA Manfredi, Córdoba, entre 1996 y 2020. Se sembraron dos secuencias (trigo, soja y maíz) utilizando labranza cero. En el suelo se determinaron conductividad eléctrica, pH, Porcentaje de Sodio Intercambiable (PSI), materia orgánica, tasa de infiltración, densidad aparente y estabilidad de los agregados, y se cuantificaron los rendimientos de maíz. En los tratamientos irrigados no hubo acumulación de sales; el pH del suelo y el Porcentaje de Sodio Intercambiable (PSI) aumentaron, equilibrando la Relación de Adsorción de Sodio (RAS) del agua irrigada, no observándose signos de degradación física. Los maíces tempranos (de primera) rindieron más que sus equivalentes tardíos (de segunda), sin mostrar efectos negativos de los cambios inducidos en el suelo. Los cultivos irrigados presentaron rendimientos interanuales más estables. Se determinó la Productividad del Agua (WP) de la producción del maíz, se analizaron las causas de los rendimientos obtenidos y se compararon los resultados con información modelada.

Palabras clave: maíz, irrigación, salinización del suelo, propiedades del suelo, rendimiento del cultivo.

EFFECT OF SUPPLEMENTARY IRRIGATION ON THE SOIL AND MAIZE (*Zea mays* L.) YIELD IN THE NORTH CENTER OF CÓRDOBA

SUMMARY

Supplementary irrigation improves crop yields when water supply is limited at any time of the crop cycle. We study the effects of supplementary irrigation on soil properties, maize yield and the relationship between them. Two treatments (irrigation and rain-fed) were evaluated in the experimental field from INTA Experimental Station, Manfredi, Córdoba, from 1996 to 2020. Two sequences of wheat, soybeans and corn were sown using zero tillage. Soil was sampled and Electrical Conductivity, pH, Exchangeable Sodium Percentage (ESP), organic matter, water infiltration rate, bulk density and aggregate stability were determined. The early and late sowing corn yields were quantified. There was not a buildup of salts in the irrigation treatment. Soil pH and Exchangeable Sodium Percentage (ESP) significantly increased, reaching equilibrium with the water's Sodium Adsorption Ratio (RAS) but soils did not show signs of degradation. The early sowing maize, both irrigated and rain-fed, presented higher yields than their equivalents of late sowing, showing no indication of any negative effect from the soil changes. Irrigated inter-annual crop yields were more stable. The Water Productivity (WP) of the maize production was determined; the causes of the increase in crop yield were analyzed using the available data, and the results were compared with modeled information.

Key Words: maize, irrigation, soil salinization, soil properties, crop yields.

INTRODUCCIÓN

El riego suplementario es la tecnología que suministra agua a los cultivos durante los períodos de deficiencia hídrica en áreas semiáridas, subhúmedas e incluso húmedas, expuestas a sequías periódicas. A diferencia del riego completo, que generalmente tiene el propósito de hacer posible el cultivo, el riego suplementario tiene dos objetivos principales: mejorar el rendimiento de los cultivos y su estabilidad a lo largo de los años (Li y Sun, 2016). Una medida confiable para evaluar la eficiencia de la producción de cultivos en relación con los recursos hídricos, en este contexto, es la denominada Productividad del Agua (WP), es decir la relación entre la cantidad del producto cosechado y el volumen del agua consumida (Grassini *et al.*, 2011).

El agua de riego generalmente transporta sales por lo que los suelos irrigados suelen estar sujetos a diversos grados de salinización y/o alcalinización. En condiciones de riego suplementario, la magnitud de ambos procesos está relacionada con los flujos del agua de riego y las características de las precipitaciones (cantidad, intensidad, época del año, etc.), que definen la acumulación de sales y su movimiento en el perfil del suelo (US Salinity Laboratory Staff, 1954; Tedeschi y Dell'Aquila, 2005). El agua subterránea disponible para riego en la Región Pampeana contiene sales, entre 0,2 y 4,7 dS m⁻¹, generalmente con predominio de bicarbonatos y una Relación de Adsorción de Sodio (RAS) entre 0,4 y 58 (Álvarez *et al.*, 2020).

Entre las áreas del mundo que reciben riego suplementario se encuentra la Región Pampeana, debido, en gran parte, a que existe una gran variación en la precipitación total a lo largo y dentro de los años. Además, en una simplificación extrema, la precipitación de la región muestra dos patrones superpuestos: la precipitación total disminuye aproximadamente desde el este húmedo al oeste semiárido y el régimen de precipitación pasa desde escasa variación estacional en el sur hasta un régimen quasi monzónico en el norte. Así, el estrés hídrico, el principal factor individual que causa la reducción del rendimiento (Bohnert y Bressan, 2001), es frecuente en la región y puede ocurrir en cualquier momento. La tecnología de riego suplementario, que suministra entre el 10 y 30% del agua que necesitan los cultivos, se aplica en la región desde la década de 1970 y su uso está aumentando lenta pero constantemente.

Pese a esta baja relación agua de riego/agua de lluvia, desde hace años existe preocupación sobre los probables impactos negativos, a largo plazo, de la salinidad

y alcalinidad sobre las propiedades del suelo y el rendimiento de los cultivos. Esta preocupación dio paso a la realización de numerosos relevamientos y experimentos en columnas y a campo, en parcelas y lotes, aunque generalmente de corto plazo. Los resultados indicaron principalmente aumentos de salinidad en los suelos irrigados, aunque esta acumulación de sales no es suficiente para limitar la producción de cultivos (Maas, 1986). En cambio, la sodicidad y, en muchos lugares el pH, suelen aumentar significativamente en los suelos de regadío suplementario. Esto podría afectar las propiedades de los suelos y restringir el crecimiento radical de los cultivos. Algunos experimentos han mostrado aumentos en la densidad aparente, la resistencia mecánica y disminuciones en las tasas de infiltración en suelos irrigados. Sin embargo, no se ha podido establecer un patrón definitivo de cambios en los suelos. Entre los autores que analizaron este tema se pueden mencionar Lavado (1976/77), Peinemann *et al.* (1998), Costa (1999), Génova (2005), Ghiberto *et al.* (2007), Vázquez *et al.* (2008), Báez (1999) y Torres Duggan *et al.* (2012). Estos y otros trabajos fueron compendiados sucesivamente por Lavado (2009), Pilatti (2017) y Álvarez *et al.* (2020).

Aunque se han observado aumentos de rendimientos generalizados, de magnitud variable, el efecto a largo plazo del riego suplementario sobre el rendimiento de los cultivos y forrajes está mucho menos documentado que el comportamiento de los suelos. La mayoría de los datos provienen de observaciones de parcelas, en experimentos de campo o cultivos comerciales. Entre otros autores se pueden mencionar Fontanetto y Darwich (1995), Andriulo *et al.* (1998), Pilatti *et al.* (2003) y Camussi y Marano (2008). Mucha de esta información fue compilada por Pilatti (2017) y Álvarez *et al.* (2020).

En la región, globalmente, predominan los cultivos de verano en secano. Entre ellos, el maíz ocupa el segundo lugar en producción. Este cultivo, usualmente, sufre restricciones climáticas, principalmente limitaciones en el suministro de agua alrededor de la floración. Esta sequía estacional tiene lugar por un bajo nivel de lluvias en enero junto con una alta demanda atmosférica de agua (Otegui *et al.*, 1995). Para escapar a esta limitación, se tendió a adelantar la fecha de siembra (maíz temprano, llamado de primera) y, con otros híbridos, en los últimos años a atrasarla (maíz tardío, llamado de segunda). Esta última alternativa tiende, por razones ambientales y bióticas, a presentar menores rendimientos que el maíz sembrado en fecha adelantada. Concorre a

esto un ciclo más corto, el período de llenado de granos cuando disminuye la radiación solar y la temperatura, ataques de insectos, etc. (Maddonni, 2012).

Por su parte, en apretada síntesis, el rendimiento potencial es el que se logra cuando se optimizan los factores que definen el rendimiento y la calidad de los productos cosechables, de acuerdo con el régimen de radiación. Utilizando los modelos CROPGRO y CERES-Maize, Dardanelli (comunicación personal) calculó el rendimiento potencial del maíz dentro de la secuencia trigo/soja-maíz, para el área bajo estudio. Morla y Giayetto (2012) estimaron rendimientos potenciales para el maíz, utilizando el modelo AquaCrop en un área más amplia, y Maddonni (2012) estimó el rendimiento potencial del maíz en dos localidades situadas en el centro-sur de la provincia de Córdoba, utilizando un modelo desarrollado por Otegui *et al.* (1996).

Los objetivos del presente trabajo fueron (i) cuantificar los efectos del riego suplementario en las propiedades de un suelo limoso, representativo de la zona semiárida del centro-norte de la provincia de Córdoba, (ii) determinar los efectos a largo plazo del riego suplementario en los rendimientos de maíz de primera y de segunda, (iii) comparar esos rendimientos con el rendimiento potencial que surge de distintos modelos, y (iv) verificar la relación entre los cambios eventuales del suelo y los rendimientos del cultivo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Características de la región y del sitio experimental

El estudio se llevó a cabo en un experimento a largo plazo que se condujo en la Estación Experimental INTA Manfredi, en el centro-norte de la provincia de Córdoba, Argentina (31,6° S, 63,7° O, 292 ms.n.m.). La zona es templada y semiárida. La temperatura media (1964-2005) del mes más cálido (enero) es de 23,5 °C y la del mes más frío (julio) es de 9,6 °C. La precipitación anual (1931-2019) es, en promedio, 760 mm, con una distribución tipo monzónica, aunque con gran variación interanual. El suelo en el sitio experimental es un Haplustol Éntico, familia limo grueso, serie Oncativo, profundo, bien drenado (Cuadro 1). La Serie Oncativo, junto con otras series de suelos similares, ocupa más de un millón de ha en las cercanías de la Estación Experimental (Jarsun *et al.*, 1987). La zona estaba dedicada originalmente a la ganadería, pero en la actualidad predomina la agricultura. Soja, maíz y trigo, en este orden, son los principales cultivos del área y la siembra directa es el sistema de cultivo más utilizado (AAPRESID, 2016).

El área bajo riego en la zona de influencia de la Estación Experimental supera las 172.000 ha, lo cual significa menos del 10% del área que podría ser potencialmente irrigada (Salinas *et al.*, 2019). En el presente experimento, el riego se llevó a cabo mediante un equipo de pivote central, a partir de agua subterránea ubicada a 125 m de profundidad. La composición química del agua de riego se presenta en el Cuadro 2, mostrando predominio de bicarbonato y sulfato de sodio. Los momentos y láminas de riego para cada cultivo se decidieron en función de una planilla de balance hídrico (Martellotto *et al.*, 2004), la cual tiene en cuenta la reserva de agua útil acumulada en el perfil de suelo explorado por las raíces, el umbral de riego para cada cultivo, la salida de agua del suelo por evapotranspiración del cultivo y los ingresos de agua al suelo por precipitación efectiva. El balance hídrico se llevó a cabo en tiempo real y cuando se registró déficit hídrico se aplicó el riego.

Experimento y determinaciones

El experimento se inició en 1996 en una parcela de 40 ha que había sido arada convencionalmente y que, a partir de ese momento, fue sembrada mediante siembra

Cuadro 1. Características del perfil de la Serie Oncativo., Haplustol Éntico.

Datos analíticos	Horizontes		
	A1	AC	Ck
Profundidad (m)	0,00-0,23	0,23-0,53	0,53 +
Materia Orgánica (g kg ⁻¹)	19,00	9,60	-
Nitrógeno Total (g kg ⁻¹)	1,02	1,00	-
Relación C/N	9,0	6,2	-
Arcilla (g kg ⁻¹)	167,0	122,0	102,0
Limo (g kg ⁻¹)	687,0	711,0	719,0
Arena (g kg ⁻¹)	165,0	161,0	158,0
Textura	Franco limoso	Franco limoso	Franco limoso
Calcáreo (g kg ⁻¹)	-	-	46,0
pH en agua (1:2,5)	6,4	7,1	8,3
Sodio intercambiable (m eq./100 g)	0,2	0,1	0,4
Capacidad de Intercambio Catiónico (m eq/100 g)	15,6	14,2	13,7
Porcentaje de Sodio Intercambiable	1,2	0,6	2,9

Fuente: Jarsun *et al.* (1987).

Cuadro 2. Conductividad eléctrica (CE), composición iónica y valor de Relación de Adsorción de Sodio (RAS) del agua de riego.

Componentes y características	Valores
CE (dS m ⁻¹)	1,07
Sulfatos (m eq. l ⁻¹)	3,05
Cloruros (m eq. l ⁻¹)	1,94
Bicarbonatos (m eq. l ⁻¹)	3,09
Carbonatos (m eq. l ⁻¹)	No detectado
Calcio (m eq. l ⁻¹)	1,70
Magnesio (m eq. l ⁻¹)	0,88
Sodio (m eq. l ⁻¹)	5,34
Valor RAS	7,5
Valor RAS ajustado*	7,9

*Ajuste realizado según Ayers y Westcot (1989).

directa. Se realizaron dos secuencias de cultivo de dos años: trigo/soja/maíz de primera y trigo/maíz de segunda/soja. En el presente se analiza el rendimiento logrado por los cultivos de maíz en ambas secuencias. Se sembraron híbridos simples de maíz, los mejores obtenidos en una red de experimentos que evaluaba híbridos, que fueron cambiando a lo largo de los años. Los híbridos que se utilizaron en los últimos años fueron AX 7822 Viptera 2 o VT3P (Nidera), o el DK 72-10 VT3P (Dekalb).

El riego cubrió una superficie circular de 28 ha, en adelante denominado tratamiento irrigado. El maíz de primera recibió una lámina de riego promedio de 152 mm año⁻¹ y el maíz de segunda, una lámina de 119 mm año⁻¹, que se sumó a la precipitación anual. La Productividad del Agua (WP) (kg grano ha⁻¹ mm⁻¹ suministro de agua) se calculó utilizando los rendimientos obtenidos y el suministro de agua, es decir, agua del suelo disponible en la siembra, lluvias y riego (Grassini *et al.*, 2011). El tratamiento de secano ocupó las 12 ha restantes del lote. Por lo demás, los cultivos tendieron a ser manejados en forma equitativa en toda la parcela. En el transcurso del experimento, el maíz de primera fue sembrado en septiembre-octubre y cosechado en marzo y el maíz de segunda sembrado en diciembre y cosechado en mayo. Se fertilizó con UAN (inyectado en el agua de riego en dos aplicaciones), con dosis de N entre 80 y 130 kg ha⁻¹ año⁻¹ y MAP o DAP como fuente de fósforo, con dosis de P entre 16 y 18 kg ha⁻¹ año⁻¹.

En 1996, al inicio del experimento, se tomaron 106 muestras de suelo de toda la parcela y se geoposicionaron.

En cada punto se tomó una muestra a dos profundidades, 0-20 cm y 20-40 cm, para determinar la conductividad eléctrica (CE) y el pH en una relación suelo: agua de 1:2,5. En 2007 y 2013, las muestras de suelo se tomaron a una profundidad de 0 a 20 cm, 20 a 40 cm y 40 a 80 cm después de la cosecha, siguiendo un patrón de cuadrículado similar al de 1996, pero utilizando 50 puntos de muestreo: 28 en el área irrigada y 22 en el área de secano. En todas las muestras se determinó la CE, el pH, la capacidad de intercambio catiónico, y el sodio intercambiable. El porcentaje de sodio intercambiable (PSI) se obtuvo a partir las dos últimas determinaciones. En todos los casos se siguió la metodología indicada por Sparks *et al.* (1996). En 1996, 1997 y 1998, se tomaron muestras de suelo que no siguieron el diseño de muestreo de cuadrícula original. Estas fueron muestras compuestas de cada sector del lote (el lote estaba dividido en 4 sectores, 2 para cada secuencia), a partir de 25 submuestras, que se utilizaron para determinar la CE del suelo (Salas *et al.*, 2000).

A su vez, en los 28 sitios irrigados y los 22 sitios de secano se determinaron la tasa de infiltración de agua usando el método de anillo único (USDA, 1999) y la estabilidad de los agregados (Kemper y Rosenau, 1986). La infiltración se testeó por triplicado en cada sitio y la estabilidad de los agregados se llevó a cabo por duplicado en muestras no perturbadas a 0-5 cm, 5-10 cm y 10-20 cm de profundidad. El carbono orgánico del suelo (COS) se determinó en 2007 y 2013, utilizando el método de Walkley y Black (Giubergia *et al.*, 2013; 2016). En 2007, se cuantificó la densidad aparente (DApar) utilizando la clásica metodología del cilindro (Giubergia *et al.*, 2013).

Para cuantificar el rendimiento, la cosecha en los cultivos de maíz se realizó con una cosechadora autopropulsada, equipada con un monitor de rendimiento. Durante el transcurso del experimento se determinaron dos componentes del rendimiento de maíz, peso del grano y número de granos m⁻², en ambos tratamientos (irrigado y secano) (Ferreyra y Piatti, 2012). Se registraron los siguientes datos meteorológicos diarios: temperatura del aire (max, min y media), humedad relativa del aire, velocidad del viento, radiación solar incidente y precipitaciones, con una estación meteorológica automática iMETOS (Pessl Instruments, Austria). Se utilizaron datos de temperatura y lluvia para determinar la evapotranspiración potencial.

Mayores detalles experimentales pueden verse en Giubergia (2013) y Giubergia *et al.* (2013).

Análisis estadístico

Los resultados de todas las determinaciones en suelo y planta se analizaron mediante ANOVA con un modelo lineal mixto que incluyó los factores de tratamiento "riego vs. seco" y "año de medición" (1996, 2007 y 2013) como efectos fijos. El hecho de que no se pudieran aleatorizar los niveles del factor de tratamiento generó una dependencia espacial a ser contemplada. Para modelar la correlación espacial entre observaciones se utilizó un modelo exponencial (este modelo mostró el AIC y BIC más bajos, de varios modelos utilizados). En la estructura de varianzas y covarianzas se consideraron varianzas homogéneas entre los niveles del efecto de riego (e.g. se consideró que la varianza entre las observaciones bajo riego fueron iguales, pero diferente a la varianza de las observaciones en seco). Los resultados de los diferentes tratamientos se compararon con la prueba de LSD Fisher, con una significancia de 0,05. Los análisis estadísticos de las variables medidas en las muestras de suelo se realizaron a cada profundidad de extracción utilizada.

Todos los análisis se realizaron utilizando el programa de análisis estadístico InfoStat (Di Rienzo *et al.*, 2009).

RESULTADOS

Cambios en el suelo

Los valores de CE, PSI y pH determinados en muestras de suelo tomadas entre 1996 y 2013 se presentan en el Cuadro 3. Entre los valores de CE, el segundo conjunto de datos obtenido en 1996 sólo muestra el comportamiento de la CE del suelo inmediatamente después del inicio del riego suplementario (Cuadro 3). Los datos de CE obtenidos durante 1997 y 1998 no se incluyeron en el Cuadro 3, pero variaron de 0,10 a 0,35 dS m⁻¹. El suelo irrigado mostró una CE mayor que la medida en el suelo manejado en seco ($p < 0.05$), en el mismo año o comparado con el encontrado en el suelo antes del inicio del riego, aunque el patrón general fue de muy baja concentración de sales en el suelo.

Existe una estrecha relación entre la lluvia y el riego con la CE del suelo, lo que se observa en la ecuación 1.

Cuadro 3. Media y error estándar de la Conductividad Eléctrica (CE) y la alcalinidad (pH y PSI) de los suelos irrigados y no irrigados, medidos en muestras de suelo tomadas a 0-0,2, 0,2-0,4 y 0,4-0,8 m de profundidad previo al inicio de la irrigación, ó 9 meses (1996), 11 años (2007) y 17 años (2013) después del comienzo de la irrigación.

Profundidad (m)	Tratamiento	CE				pH				PSI			
		1996 ¹	1996 ²	2007	2013	1996 ¹	1996 ²	2007	2013	1996 ¹	1996 ²	2007	2013
0-0,2	Irrigado		0,31b	0,25c	0,42a		6,6c	7,1a	6,8b			6,6b	7,8a
			(0,02)	(0,02)	(0,02)		(0,05)	(0,05)	(0,05)		Nd	(0,42)	(0,42)
	Secano	0,18	0,19d	0,14e	0,25c	6,0	6,6c	6,7bc	6,4d	1,2		1,7d	3,3c
			(0,02)	(0,02)	(0,02)		(0,06)	(0,06)	(0,07)		Nd	(0,21)	(0,21)
0,2-0,4	Irrigado		0,21bc	0,23b	0,36a		6,8d	7,5a	7,2b			7,8a	9,0a
			(0,01)	(0,01)	(0,01)		(0,05)	(0,05)	(0,05)		Nd	(0,61)	(0,61)
	Secano	0,11	0,16d	0,12e	0,19cd	6,3	7,0c	7,3ab	7,0cd	0,6		1,7c	3,4b
			(0,01)	(0,01)	(0,01)		(0,08)	(0,08)	(0,08)		Nd	(0,43)	(0,44)
0,4-0,8	Irrigado			0,30b	0,46a			8,7a	8,5b			7,8a	9,5a
			Nd	(0,01)	(0,01)		Nd	(0,04)	(0,04)		Nd	(0,62)	(0,62)
	Secano	Nd		0,22c	0,28b	8,3		8,3c	8,2d	2,9		2,3c	3,9b
			Nd	(0,01)	(0,01)		Nd	(0,05)	(0,05)		Nd	(0,33)	(0,33)

Los datos de 1996¹ y 1996² refieren a las mediciones que se realizaron antes y después del comienzo de la irrigación (Salas *et al.*, 2000). Nd: Sin datos. Letras diferentes indican diferencias significativas ($P < 0,05$) dentro de la misma profundidad. El error estándar se presenta entre paréntesis.

$$CE_{\text{suelo}} = 0,284 - 0,379 \cdot 10^{-3} \text{ Rain6m} + 0,786 \cdot 10^{-3} \text{ IRRi6m}$$

Ecuación 1 ($R^2 = 0,87$)

donde:

Rain6m: lluvia acumulada desde 6 meses antes de la fecha de muestreo, en mm.

IRRI6m: irrigación acumulada desde 6 meses antes de la fecha de muestreo, en mm.

Esta ecuación corresponde a una profundidad de 0-0,20 m de profundidad, pero también se encontraron correlaciones en capas más profundas (e.g. $R^2 = 0,72$ en la capa 0,20-0,40 m de profundidad).

El suelo irrigado mostró valores de PSI de 3,5 a 4 veces mayores que los cuantificados en las muestras de suelo manejado en secano en el mismo año ($P < 0,05$) o con el encontrado en el suelo antes del inicio del riego ($P < 0,05$). Los valores de pH también fueron significativamente mayores en el tratamiento irrigado (0,5 unidades) ($P < 0,05$). El pH del suelo aumentó con la profundidad, en ambos tratamientos, aunque el aumento del pH fue significativamente mayor en el tratamiento irrigado. La tasa de infiltración no registró diferencias significativas ($P < 0,05$) entre los tratamientos (183 mm h⁻¹ vs. 199 mm h⁻¹ en promedio, respectivamente). Los resultados, sin embargo, mostraron una alta variabilidad entre las repeticiones (la desviación estándar fue de 89,6 y 107,1 mm h⁻¹, respectivamente).

En las parcelas sembradas con maíz (de primera y segunda), la estabilidad de los agregados del suelo fue mayor ($P < 0,05$) en el tratamiento irrigado en comparación con el de secano así como fue mayor ($P < 0,05$) en el

horizonte superficial que en los más profundos (Cuadro 4).

En 2007, los valores de Carbono Orgánico del Suelo (COS) tendieron a ser más elevados en el tratamiento irrigado ($P < 0,05$). En cambio, en 2013 (luego de 17 años de aplicar riego suplementario), los valores de COS cuantificados mostraron diferencias significativas: 2,59% vs. 2,12% en secano ($P < 0,05$), en el estrato superficial (0-5 cm). La densidad aparente (DApar), medida después de 11 años de inicio del experimento (en 2007), aumentó con la profundidad, pero siempre fue significativamente mayor en el tratamiento irrigado que en el de secano (1,09 a 1,41 g cm⁻³ vs. 1,03 a 1,35 g cm⁻³) (Giubergia *et al.*, 2013).

La radiación durante el ciclo de cultivo del maíz fue, en promedio, de 21,5±1,5 MJ m⁻² d⁻¹.

Rendimiento del cultivo

Los rendimientos de los cultivos de maíz de primera y segunda fueron más altos en el tratamiento irrigado que en el tratamiento secano ($P < 0,05$), en todos los años estudiados (Figuras 1 y 2). Los rendimientos promedio obtenidos a lo largo de 20 años de experimentación presentaron menores coeficientes de variación cuando los cultivos fueron irrigados que en condiciones de secano, particularmente en el maíz de primera (Cuadro 5). Los valores de Productividad del Agua (WP) fueron también obtenidos para los dos tratamientos comparados (Cuadro 5). Las regresiones entre nivel de agua y rendimientos mostraron resultados diversos. Los R^2 entre agua disponible (humedad inicial + lluvias + riego) y rendimiento del cultivo irrigado fueron: maíz de primera $R^2 = 0,15$ y maíz de segunda $R^2 = 0,28$. En el maíz en secano los R^2 de las correlaciones agua disponible (humedad inicial + lluvias) y rendimiento fueron:

Cuadro 4. Estabilidad de agregados medida en 2007 y 2013, en los suelos irrigados y no irrigados.

Profundidad (cm)	Tratamiento	Estabilidad de agregados			
		2007		2013	
		%	Índice relativo	%	Índice relativo
0-5	Irigado	67a*	140	82a	149
	Secano	48b	100	55b	100
5-10	Irigado	36a	105	66a	135
	Secano	34a	100	49b	100
10-20	Irigado	25a	89	57a	119
	Secano	28a	100	48a	100

* Las letras diferentes indican diferencias significativas ($P < 0,05$) dentro de la misma profundidad y el mismo año.

maíz de primera $R^2 = 0,45$ y maíz de segunda $R^2 = 0,29$.

El peso del grano en el maíz de primera fue, en promedio, 337 mg en el tratamiento irrigado y 317 mg en el tratamiento secano con un Coeficiente de Variabilidad del orden del 5,8% en ambos casos, mientras que el número

de granos m^{-2} fue de 4.414 y 3.379, respectivamente.

DISCUSIÓN

La composición química del agua utilizada para el riego registrada en el presente trabajo (Cuadro 2) se

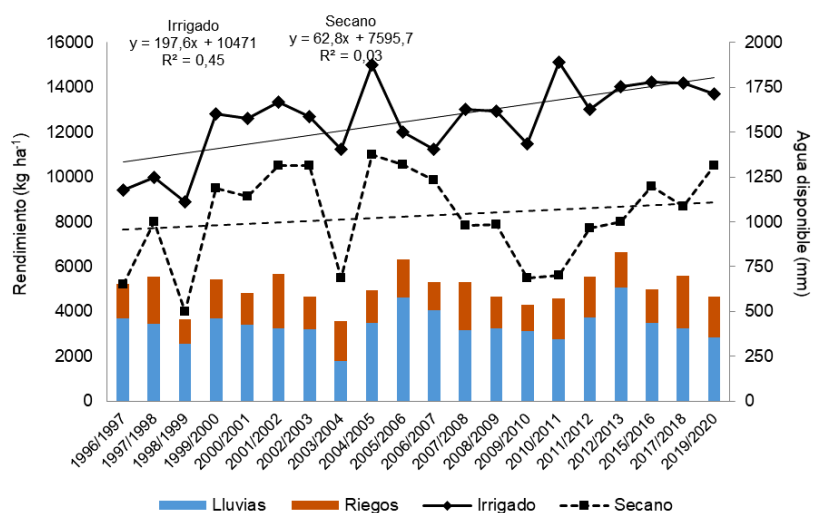


Figura 1. Rendimientos del maíz ($kg\ ha^{-1}$) de primera, irrigado y en seco, a través de los años estudiados, con sus rectas de ajuste de regresión lineal (y sus respectivos R^2). Las barras presentan la precipitación pluvial anual y la suma de agua aplicada por el riego (en mm).

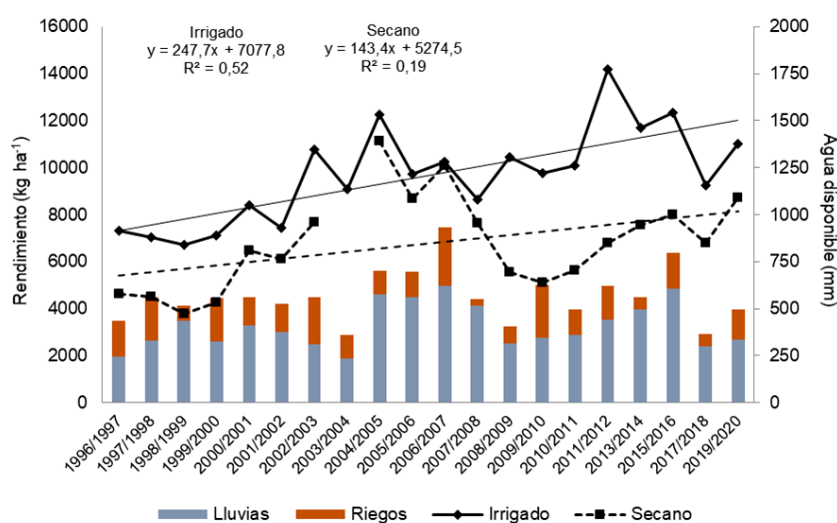


Figura 2. Rendimientos del maíz ($kg\ ha^{-1}$) de segunda, irrigado y en seco, a través de los años estudiados, con sus rectas de ajuste de regresión lineal (y sus respectivos R^2). Las barras presentan la precipitación pluvial anual y la suma de agua aplicada por el riego (en mm).

Cuadro 5. Promedio de rendimientos de grano, desviación estándar (entre paréntesis) y coeficientes de variación de los rendimientos. Productividad del Agua (WP), desviación estándar (entre paréntesis) y coeficiente de variación de la Productividad del Agua (WP). Valores obtenidos para cultivos de maíz de primera y de segunda (1996-2020).

Cultivo	Rendimiento* ($kg\ ha^{-1}$)		Coeficiente de variación Rendimiento (%)		Productividad del Agua ($kg\ granos\ ha^{-1}\ mm^{-1}\ agua$)		Coeficiente de variación Productividad del Agua (%)	
	Irrigado	Secano	Irrigado	Secano	Irrigado	Secano	Irrigado	Secano
Maíz primera	12546 (1741)	8255 (2117)	13,9	25,9	16,1 (2,4)	14,6 (3,0)	15,0	20,8
Maíz segunda	9679 (2035)	6799 (2000)	21,0	29,4	14,2 (2,5)	13,9 (4,3)	17,4	30,7

*Los rendimientos fueron estandarizados a 14% humedad en los granos.

encuentra dentro de los valores normales estándar del agua subterránea local (Rampoldi *et al.*, 2010) y presenta un riesgo moderado de salinización y alcalinización, según el estándar de calidad del agua de Ayers y Westcot (1989). El aumento de la salinidad en el suelo parece ocurrir inmediatamente después del inicio del riego pero, después de 17 años de riego suplementario, la acumulación de sales sigue siendo limitada (Cuadro 3). La aplicación de agua de riego hasta en un 30% del requerimiento del cultivo, la ocurrencia de lluvias durante todo el año y el buen drenaje interno del suelo, son algunos de los factores involucrados en la baja acumulación de sales solubles registradas en el perfil. Otras investigaciones respaldan estos resultados, a nivel local (Lavado, 2009; Álvarez *et al.*, 2020) y en otros lugares (Tedeschi y Dell'Aquila, 2005).

La evolución del PSI y el pH en el perfil del suelo del tratamiento de riego (Cuadro 3) fue similar pero menos severa a la descrita en otras subregiones de la región pampeana (Lavado, 2009; Pilatti, 2017; Álvarez *et al.*, 2020) y en otras partes del mundo (Gupta y Abrol, 1990; Wienhold y Trooien, 1995; Nunes *et al.*, 2007). El PSI medido en el perfil del suelo está cerca del valor RAS del agua de riego (RAS= 7,5) (Cuadro 2). El aumento de los valores de pH con la profundidad es una característica común de la mayoría de los suelos de la región, causado, frecuentemente, por la presencia de carbonato de calcio en los horizontes subsuperficiales (Rubio *et al.*, 2018).

El efecto negativo del sodio en la infiltración de agua se ha demostrado ampliamente en una gran variedad de condiciones de suelo, manejo y medio ambiente (U.S. Salinity Laboratory Staff, 1954; Gupta y Abrol, 1990; Baumhardt *et al.*, 1992; Crescimanno *et al.*, 1995; Ghiberto *et al.*, 2007). De acuerdo con los estándares originales (U.S. Salinity Laboratory Staff, 1954), valores de sodio intercambiable superiores al 15% afectan las propiedades físicas de los suelos. Sin embargo, a partir de la década de 1970, el umbral de PSI para verificar los problemas de sodicidad se redujo al 10% o incluso al 6% en varios suelos (e.g. McIntyre, 1979). En el presente caso, a diferencia de otros suelos limosos/arcillosos o arcillosos de la región que muestran niveles similares de PSI, no se afectaron significativamente las propiedades físicas determinadas en este suelo.

El COS en ambos tratamientos mostró la distribución característica de los perfiles de suelo cultivados en siembra directa continua durante varios años: mayores valores en la capa superior del suelo y menores

en capas más profundas (datos no mostrados). Los mayores valores de COS obtenidos en las capas superficiales se debieron a mayores valores de las fracciones de 53-200 μm y $>200 \mu\text{m}$, independientemente del tratamiento (Giubergia *et al.*, 2016). Las diferencias en la concentración de COS entre ambos tratamientos fueron de baja magnitud en el primer muestreo, solo una tendencia, pero luego de 17 años la diferencia a favor del suelo irrigado fue significativa en comparación con el tratamiento seco. Ese aumento de COS en suelos puede explicarse por el aumento en la cantidad de residuos de cultivos añadidos a la capa superior del suelo (Giubergia *et al.*, 2013).

La densidad aparente (DApar) en los perfiles de suelos siguió el patrón estándar registrado para el área. La DApar estuvo dentro del rango normal para suelos franco-limosos y en ninguno de los dos tratamientos se afecta el crecimiento de las raíces. Los valores más altos de DApar encontrados en el tratamiento irrigado podrían acreditarse a un mayor contenido de agua en este suelo y, en esa condición, una menor capacidad de soporte a la maquinaria pesada utilizada en el experimento. Esto explica la pérdida de porosidad total en este tratamiento (Giubergia *et al.*, 2013). La tasa de infiltración de agua fue muy elevada y no mostró cambios después de 17 años de riego en el suelo irrigado. Las mediciones efectuadas mostraron una alta variabilidad entre determinaciones, como se encontró en otros lugares (Álvarez *et al.*, 2009). La textura gruesa de este suelo limoso (Cuadro 1) podría ser la principal razón de la tasa de infiltración encontrada. El incremento registrado en el PSI no afectó la estabilidad estructural en el área irrigada en ambos maíces (Cuadro 4). Por el contrario, hubo una mejora significativa en comparación con los datos iniciales de la estructura del suelo, que fue aumentando con los años (Giubergia *et al.*, 2013). Este comportamiento podría también atribuirse a la textura del suelo, sumado al aumento registrado en el nivel de COS y al efecto floculador de la concentración salina del suelo.

El maíz, por otro lado, es un cultivo moderadamente tolerante a la salinidad (Maas, 1986), aunque su tolerancia varía según el material genético, el clima, las características del suelo, la composición de sales solubles, etc. El umbral general de tolerancia a las sales para este cultivo varía entre 2 y 7 dS m^{-1} (Maas, 1986), mientras en el presente caso la CE del suelo fue un orden de magnitud menor (Cuadro 3). El PSI en todo el perfil del suelo y los valores de pH registrados en los primeros

40 cm del perfil están dentro del intervalo óptimo para la mayoría de los cultivos (USDA, 1999). En consecuencia, la CE, el PSI o el pH del suelo (Cuadro 3) en ningún caso cambiaron lo suficiente como para causar estrés en el maíz y provocar una disminución de sus rendimientos (Figuras 1 y 2). No se verificó que estos ligeros cambios que tuvieron lugar en el suelo sometido a riego suplementario presentaran alguna vinculación con el rendimiento del maíz Irrigado. No sólo no se registraron efectos negativos sobre el rendimiento, sino que, por el contrario, aumentaron con el riego a lo largo del tiempo (Figura 3). Entre otros factores, el aumento de los rendimientos en ambos maíces observado a lo largo de 20 años de estudio, se asocia estrechamente a las mejoras continuas del material genético, particularmente en el tratamiento seco (Salvagiotti, 2009).

Los cultivos de verano como el maíz se benefician por el patrón de lluvias tipo monzónico. Sin embargo, el rendimiento del cultivo de maíz es muy afectado cuando ocurren sequías durante sus etapas reproductivas (Otegui *et al.*, 1995). Por eso, los rendimientos del maíz de primera en el tratamiento Irrigado superaron, en promedio, en un 35% a los logrados en el tratamiento Secano (Figura 1), mientras que en el maíz de segunda esta brecha fue del ~30% (Figura 2). Las diferencias absolutas en los rendimientos oscilaron entre un máximo de 9.495 kg ha⁻¹ y un mínimo de 1.450 kg ha⁻¹ en el maíz de primera y, descartando el ciclo 2005/06 donde el maíz en seco no presentó rendimientos, entre 7400 y 157 kg ha⁻¹ en el maíz de segunda. Las diferencias más elevadas en los rendimientos superan los valores registrados en la Provincia de Santa Fe, donde, entre seco y riego suplementario, se registraron valores entre 1.000 y 5.000 kg ha⁻¹ explicado, en gran medida, por las variaciones en la precipitación pluvial que afectó al maíz de seco (Salvagiotti, 2009). Las regresiones entre el agua disponible y el rendimiento del maíz de primera irrigado fueron bajas, mientras que en el maíz en seco la relación entre el agua disponible y sus rendimientos mejoraron un poco, particularmente en el maíz de segunda (Figuras 1 y 2). La variabilidad de los rendimientos estuvo más influenciada por otras variables entre las que se encuentran el avance genético y la presencia de factores no controlados, por tratarse de un experimento a campo.

Por otro lado, la variación del rendimiento interanual del maíz Irrigado fue menor en comparación con la variación de los rendimientos en seco, particularmente en el maíz de primera. Esta mayor estabilidad de la

producción fue encontrada también por otros autores locales (citados por Pilatti, 2017). Salvagiotti (2009) indicó que en Estados Unidos los rendimientos de maíz bajo riego suplementario no han mostrado incrementos importantes en los últimos años y, en cambio, los niveles de rendimiento aumentaron en seco. Esto indicaría que la distancia entre la producción de seco y de riego ha disminuido, pero este fenómeno no se verifica en este caso.

La Productividad del Agua (WP) determinada para el maíz de primera irrigado (Cuadro 5) fue ligeramente menor a la calculada para el maíz sujeto a riego suplementario en Nebraska (WP de 19,3) (Grassini *et al.*, 2011), pero fue casi 10% más alta que la obtenida en este trabajo para el maíz de primera en Seco (Cuadro 5). Estos datos muestran un mejor uso del recurso hídrico en el maíz irrigado. El maíz de segunda presentó una menor eficiencia en el uso del agua, pero se mantiene la diferencia a favor del maíz irrigado. Por su parte, en el presente estudio los datos de radiación mostraron una variación muy baja entre los períodos establecidos, con un coeficiente de variación que osciló entre el 6,7% y el 10,1% y no se encontró relación entre la radiación y el rendimiento de los cultivos. Sin embargo, se conoce que la radiación afecta la productividad de los cultivos (Mahbod *et al.*, 2014) y que existe una clara y estrecha relación entre la radiación interceptada y los rendimientos (Slafer *et al.*, 1994). En nuestro caso, además de tratarse de determinaciones globales, otros eventos locales, tales como fenómenos climáticos adversos (granizo, heladas) podrían haber cobrado más importancia.

En el presente trabajo, los incrementos en el rendimiento de los maíces irrigados se explicaron principalmente por el aumento en el número de granos por unidad de área. Este componente del rendimiento suele acompañar a los aumentos de rendimiento cuando mejoran las condiciones de producción (Slafer *et al.*, 1994). Los rendimientos obtenidos en el maíz de primera en el tratamiento Irrigado (en promedio 12.546 kg ha⁻¹) fueron similares a los rendimientos potenciales simulados con los modelos CROPGRO y CERES-Maize, Dardanelli (Comunicación personal), los cuales fueron del orden de 13.040 kg ha⁻¹, o con el modelo de Otegui y colaboradores (Maddonni, 2012) estimado, en condiciones de seco, en promedio 13.450 kg ha⁻¹. Por el contrario, cuando se compara con el modelo AcquaCrop (Morla y Giayetto, 2012), los rendimientos obtenidos experimentalmente fueron menores que los rendimientos potenciales estimados en 19.701 kg ha⁻¹.

CONCLUSIÓN

Los cuatro objetivos planteados fueron alcanzados. Por un lado, se registró que la magnitud de los cambios en la salinidad y, especialmente, la alcalinidad, no fueron suficientes para generar la degradación física del suelo en el área de estudio. Esto presenta una diferencia marcada con el comportamiento de otros suelos pampeanos más pesados sometidos a riego suplementario. En relación con los efectos sobre los cultivos, en el maíz de primera los rendimientos fueron mayores y más estables entre años cuando se aplicó el riego suplementario, en comparación con el cultivo de secano y con el maíz de segunda. Además, el maíz de primera irrigado presentó la producción de granos más elevada en relación al agua disponible y su rendimiento promedio se encontró muy cerca del rendimiento potencial simulado por distintos modelos. En tercer lugar, los

efectos del riego sobre las propiedades del suelo no afectaron negativamente el rendimiento de los cultivos, sino que, por el contrario, tanto en los maíces de primera, como en los de segunda, se verificó un aumento de la productividad a lo largo de los años.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a Carolina Álvarez, Ariel Rampoldi, Sebastián Salas, Francisco Ghigo y Matías Gino por su asistencia en las tareas de muestreo y de laboratorio, y a Cecilia Bruno por su asesoramiento en el análisis estadístico de los datos. La investigación fue financiada por los Proyectos PNAGUA 1133043 "Tecnología de irrigación para diferentes sistemas de producción" y PE I505 "Uso y gestión eficiente del agua en sistemas de regadío" del INTA.

BIBLIOGRAFÍA

- Asociación Argentina de Productores de Siembra Directa (AAPRESID). (2016). Estimación de la superficie en siembra directa. Campaña 2014-2015. <http://www.aapresid.org.ar/superficie/>
- Álvarez, C. R., Taboada, M. A., Gutiérrez Boem, F. H., Bono, A., Fernández, P. L. y Prystupa, P. (2009). Topsoil properties as affected by tillage systems in the Rolling Pampa Region of Argentina. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 73, 1242-1250.
- Álvarez, C. A., Rimski Korsakov, H. y Torres Duggan, M. (2020). Effects of supplementary irrigation on soils and crops in sub-humid areas in the Pampas Region of Argentina. Taleisnik, E. y Lavado, R.S. (eds.). *Saline and Alkaline soils in Latin America: Natural Resources, Management and Productive Alternatives*. 285-294 pp. Springer Nature.
- Andriulo, A., Galetto, M. L., Ferreyra, C., Cordone, C., Sasal, C., Abrego, F., Galin, J. y Rimatori, F. (1998). Efecto de once años de riego complementario sobre un argiudol típico pampeano. *Ciencia del Suelo*, 16, 125-127.
- Ayers, R. y Westcot, D. (1989). *Water quality for agriculture. Irrigation and Drainage*, Nº 29. Roma, Italia. FAO.
- Báez, A. 1999. *Efecto de la calidad del agua de riego sobre las propiedades del Suelo*. Postgrado en Producción Vegetal. Unidad integrada Facultad de Ciencias Agrarias UNMdP/INTA Balcarce.
- Baumhardt, R. L., Wendt, C. W. y Moore, J. (1992). Infiltration in response to water quality, tillage and gypsum. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 56, 261-266.
- Bohnert, H. y Bressan, R. A. (2001). Abiotic stresses, plant reactions and new approaches towards understanding stress tolerance. En: *Crop Science: Progress and Prospects* (pp. 81-100), Wallingford, Reino Unido: CABI publishing.
- Camussi, G. y Marano, R. (2008). Respuesta del trigo al riego suplementario en la región central de Santa Fe. *Revista FAVE*, 7, 7-21.
- Costa, J. L. (1999). Effect of irrigation water quality under supplementary irrigation on soil chemical and physical properties in the southern humid pampas of Argentina. *J. of Crop Production*, 2, 85-99.
- Crescimanno, G., Iovino, M. y Provenzano, G. (1995). Influence of salinity and sodicity on soil structural and hydraulic characteristics. *Soil Sci. Am. J.*, 59, 1701-1708.
- Di Rienzo, J. A., Casanoves, F., Balzarini, M. G., Gonzales, L., Tablada, M. y Robledo, C. W. (2009). *InfoStat versión 2009*. FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
- Ferreyra, L. y Piatti, F. D. (2012). Rendimiento y comportamiento agronómico de híbridos de maíz en INTA Manfredi, campaña 2011/12. Manfredi, Córdoba. INTA. Estación Experimental Agropecuaria.
- Fontanetto, H. y Darwich, N. (1995). Efecto del método de aplicación del fósforo en maíz a dos niveles de disponibilidad hídrica. *Ciencia del Suelo*, 13, 1-5.
- Génova, L. (2005). Sostenibilidad de agroecosistemas pampeanos regados complementariamente. VIII Congreso Argentino de Ingeniería Rural, 58,1-6.
- Ghiberto, P. J., Pilatti, M.A., Imhoff, S. y de Orellana, J. A. (2007). Hydraulic conductivity of Molisolls irrigated with sodic-bicarbonate waters in Santa Fe (Argentina). *Agric. Water Manage.*, 88,192-200.
- Giubergia, J. P. (2013). *Efectos del riego complementario sobre propiedades del suelo en sistemas de producción con siembra directa* [Tesis Maestría]. Escuela Para Graduados, Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires.
- Giubergia, J. P., Martellotto, E. y Lavado, R. S. (2013). Complementary irrigation and direct drilling have little effect on soil organic carbon content in semiarid Argentina. *Soil and Tillage Res.*, 134, 147-152.

- Giubergia, J. P., Ghigo, F., Gino, M. y Lavado, R. S. (2016). Evolución del carbono orgánico de un suelo Haplustol Éntico bajo riego suplementario y siembra directa. XXV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo.
- Grassini, P., Yang, H., Irmak, S., Thorburn, J., Burr, C. y Cassman, K. G. (2011). High-yield irrigated maize in the Western U.S. Corn Belt: II. Irrigation management and crop water productivity. *Field Crops Res.*, 120, 133-141.
- Gupta, R. K. y Abrol, I.P. (1990). Salt affected soils: their reclamation and management for crop production. *Adv. Soil Sci.*, 11, 223-288.
- Jarsun, B., Bosnero, H. y Lovera, E. (1987). Carta de suelos de la República Argentina. Hoja 3163-32 Oncativo. Plan Mapa de suelos. Córdoba
- Kemper, W. y Rosenau, R. (1986). Aggregate stability and size distribution. En: *Methods of Soil Analysis*. Part 1. American Society of Agronomy and Soil Science Society of America (pp. 425-442). Madison, WI: Estados Unidos.
- Lavado, R. S. (1976/77). Salinización y alcalinización de suelos pampeanos bajo riego complementario. *Rev. Inv. Agrop. (INTA)*. Serie 3 XIII, 41-57.
- Lavado, R. S. (2009). Salinización y sodificación de suelos de producción agrícola extensiva por riego complementario. En: M. A. Taboada y R.S. Lavado (eds.). *Alteraciones de la fertilidad de los suelos: el halomorfismo, la acidez, el hidromorfismo y las inundaciones* (pp. 45-58). Buenos Aires: EFA.
- Li, Z. y Sun, Z. (2016). Optimized single irrigation can achieve high corn yield and water use efficiency in the Corn Belt of Northeast China. *European J. of Agron.*, 75, 12-24.
- Maas, E. V. 1986. Salt tolerance of plants. *Applied Agricultural Res.*, 1, 12-26.
- Maddonni, G. A. (2012). Analysis of the climatic constraints to maize production in the current agricultural region of Argentina, a probabilistic approach. *Theor Appl Climatol.*, 107, 325-345.
- Mahbod, M., Zand-Parsa, S. y Sepaskhah, A. R. (2014). Adjustment of radiation use efficiency of winter wheat by air temperature at different irrigation regimes and nitrogen rates. *Archives of Agron. and Soil Sci.*, 60, 49-66.
- Martellotto, E., Salas, P., Lovera E., Salinas, A., Giubergia, J. P. y Lingua, S. (2004). Balance hídrico para riego. Manfredi, Córdoba. INTA. Estación Experimental Agropecuaria.
- McIntyre, D. S. (1979). Exchangeable sodium, subplasticity and hydraulic conductivity of some Australian soils. *Aust. J. SoilRes.*, 17, 115-120.
- Morla, F. D. y Giayetto, O. (2012). Calibración y validación del modelo AquaCrop de FAO en cultivos representativos del centro sur de Córdoba. Actas XXIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Mar del Plata. Argentina.
- Nasseri, A., Fallahi, H. A., Siadat, A. y Tappeh, K. E. G. (2009). Protein and N-use efficiency of rainfed wheat responses to supplemental irrigation and nitrogen fertilization. *Archives of Agron. and Soil Sci.*, 55, 315-325.
- Nunes, J.M., López-Piñeiro, A., Albarrán, A., Muñoz, A. y Coelho, J. (2007). Changes in selected soil properties caused by 30 years of continuous irrigation under Mediterranean conditions. *Geoderma*, 139, 321-328.
- Otegui, M. E., Andrade, F. H. y Suero, E. E. (1995). Growth, water use, and kernel abortion of maize subjected to drought at silking. *Field Crops Res.*, 40, 87-94.
- Otegui, M. E., Ruíz, R.A. y Petruzzzi, D. (1996). Modeling hybrid and sowing date effects on potential grain yield of maize in a humid temperate region. *Field Crops Res.*, 47, 167-174.
- Peinemann, N., Díaz Zorita, M., Villamil, M. B., Lussarreta, H. y Grunewald, D. (1998). Consecuencias del riego complementario sobre propiedades edáficas en la llanura pampeana. *Ciencia del suelo*, 16, 39-42.
- Pilatti, M. A. (2017). Riego suplementario con aguas de mediana a baja calidad en la ecorregión pampeana y del espinal (Argentina). Efectos sobre suelos y cultivos. En: Taleisnik, E. y Lavado, R. S. (eds.). *Ambientes salinos y alcalinos de la Argentina: recursos y aprovechamiento productivo* (pp. 181-226). Buenos Aires: FCA-UCC y OGE.
- Pilatti, M. A., Giaveno, C.D. y Marano, R. P. (2003). Riego suplementario en el centro de Santa Fe: maíz para silaje. *Revista FAVE*, 2, 95-104.
- Pilatti, M., Marano, R. y de Orellana, J. (2004). Supplementary irrigation with sodium bicarbonate water in Molisols of Santa Fe. Sodification and alkalization. *Agrochimica*, 48, 233-248.
- Pilatti, M., Imhoff, S., Ghiberto, P. y Marano, R. (2006). Changes in some physical properties of Mollisols induced by supplemental irrigation. *Geoderma*, 133, 431-443.
- Rampoldi, A., Boccoardo, M., Álvarez, C., Martellotto, E., Salinas, A., Lovera, E., Giubergia, J. P. y Bustos, V. (2010). Calidad de las aguas subterráneas para riego suplementario en la provincia de Córdoba. *Boletín de divulgación técnica. EEA INTA Manfredi*, 10, 18 pp. Córdoba. Argentina.
- Rubio, G., Lavado, R. S. y Pereyra, F. X. (2018). Soils of Argentina. En: A. E. Hartemink (ed.). *World Soils Book Series* (pp. 268). Nueva York: Springer International Publishing AG.
- Salas, P., Lovera, E., Martellotto, E., Salinas, A. y Manzini, P. (2000). Impacto ambiental del riego suplementario en la provincia de Córdoba. Manual del 4º curso para profesionales en planificación y operación del riego suplementario en cultivos extensivos. *Boletín de divulgación técnica. EEA INTA Manfredi*. Córdoba. Argentina.
- Salinas, A., Bustos, V., Giubergia, J., Boccoardo, M., Severina, I. y Aimar, F. (2019). Actualización del área bajo riego suplementario en la provincia de Córdoba. *Revista Riegos & Drenajes*, 104, 56-57.
- Salviaggiotti, F. (2009). Rendimientos potenciales en maíz. Brechas de producción y prácticas de manejo para reducirlas. Maíz, para mejorar la producción. *Boletín de divulgación técnica. INTA EEA Oliveros*, 41, 61-66.
- Slafer, G. A., Satorre, E. H. y Andrade, F. H. (1994). Increases in grain yield in bread wheat from breeding and associated physiological changes. En: *Genetic Improvement of Field Crops* (pp. 1-68). Nueva York: Marcel Dekker, Inc.
- Sparks, D. L., Page, A. L., Helmke, P. A., Loeppert, R. A., Soltanpour, P. N., Tabatabai, M. A., Johnston, C. T. y Sumner, M. E. (1996). *Methods of Soil Analysis*, Part 3, Chemical Methods, 3ª ed. Madison, Wisconsin: Estados Unidos.

- Tedeschi, A. y Dell'Aquila, R. (2005). Effects of irrigation with saline waters, at different concentrations, on soil physical and chemical characteristics. *Agric. Water Manage.*, 77, 308-322.
- Torres Duggan, M., Álvarez, C. R., Taboada, M.A., Celesti, T., Vignarolli, F. y D'ambrosio, F. (2012). Riego complementario en un Argiudol típico de la Pampa Ondulada Argentina bajo siembra directa: efectos sobre algunas propiedades químicas y físicas del suelo. *Ciencia del suelo*, 30, 201-207.
- United States Department of Agriculture (USDA). (1999). *Soil quality test kit guide*. NRCS Soil Quality Inst., Auburn, AL.
- U.S. Salinity Laboratory Staff. (1954). Diagnosis and Improvement of Saline and Alkali Soils. *USDA Agric. Handbook*, 60. Washington DC: US Government Printing Office.
- Vázquez, M., Millán, G. y Gelati, P. (2008). Simulación del efecto del riego complementario en un suelo Udipsament típico. *Ciencia del Suelo*, 26, 195-203.
- Wienhold, B. J. y Trooien, T. P. (1995). Salinity and sodicity changes under irrigated alfalfa in the Northern Great Plains. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 59, 1709-1714.