

**EFFECTO DEL RIEGO SUPLEMENTARIO SOBRE LAS PROPIEDADES QUÍMICAS
Y FÍSICAS EDÁFICAS EN EL SUDOESTE BONAERENSE**

**EFFECT OF SUPPLEMENTARY IRRIGATION ON THE SOIL CHEMICAL AND
PHYSICAL PROPERTIES IN THE SOUTHWESTERN BUENOS AIRES PROVINCE**

Efecto del riego suplementario

Carina Rosa Alvarez 1, Haydée Sara Steinbach 1, Helena Rimski-Korsakov 1 *,
Esteban Ariel Ciarlo 1

1 Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires. Argentina

* Autor de contacto: rimski@agro.uba.ar

RESUMEN

El riego suplementario con agua de dudosa calidad puede tener efectos negativos sobre las propiedades edáficas. El objetivo del trabajo fue evaluar el impacto del riego suplementario sobre las propiedades químicas y físicas del suelo en lotes en el Sudoeste Bonaerense que en general incluyen la producción de semillas. La textura superficial del suelo es franco-arenosa, franca y franco-areno-arcillosa. Los tratamientos fueron: Secano (córner) y Riego (círculo de riego). En 41 situaciones se tomaron muestras de suelo de 0 a 10 y 10 a 20 cm de profundidad y se determinó:

carbono orgánico (CO), pH, conductividad eléctrica (CE) y porcentaje de sodio intercambiable (PSI) y en 12 de las situaciones también se midió la infiltración, la densidad aparente (0-5 cm y 10-15 cm, Dap), la resistencia mecánica (0-5 y 10-15 cm, RM), y humedad gravimétrica (0 a 5 y 10 a 15 cm, HG). Los datos se analizaron con Prueba de t apareada. El contenido de CO fue similar entre Secano y Riego en ambas profundidades. El pH edáfico, la CE y el PSI de 0-10 cm y de 10-20 cm presentaron un incremento estadísticamente significativo por el riego ($p < 0,05$), siendo el orden del incremento $PSI > CE > pH$. La tasa de infiltración básica no presentó diferencias significativas ($p = 0,683$) para Secano y Riego, con una alta variabilidad en las situaciones bajo riego, sin embargo, las situaciones regadas presentaron una Dap un 6% superior a las de secano ($p = 0,0005$) de 10 a 15 cm. Los valores de RM presentaron una importante variabilidad. Las evaluaciones de la calidad física edáfica realizadas en este trabajo no muestran tendencias claras ni marcada degradación, sin embargo, es necesario continuar el monitoreo en el tiempo de la calidad edáfica y aplicar prácticas preventivas en pos del manejo sustentable de estos sistemas productivos.

Palabras clave: materia orgánica, conductividad eléctrica, porcentaje sodio intercambiable, densidad aparente

ABSTRACT

Supplementary irrigation with water of dubious quality can have adverse effects on soil properties. The aim of this study was to assess the impact of supplementary irrigation on soil chemical and physical properties in fields of the Southwestern Buenos Aires province, which generally involve seed production. The surface texture of the soil ranges from sandy loam to loam and clay loamy. The treatments were: Rainfed

(corner) and Irrigated (center pivot). Soil samples were collected from 41 field situations at 0-10 cm and 10-20 cm depth, and organic carbon (CO), pH, electrical conductivity (CE), and exchangeable sodium percentage (PSI) were determined. In 12 of the fields, additional measurements were made for infiltration rate, bulk density (0-5 cm and 10-15 cm, Dap), mechanical resistance (0-5 cm and 10-15 cm, RM), and gravimetric moisture content (0-5 cm and 10-15 cm, HG). Data were analyzed using Paired t-tests. Organic carbon content was similar under Rainfed and Irrigated situations at both depths. Soil pH, CE, and PSI at 0-10 cm and 10-20 cm showed a statistically significant increase due to irrigation ($p < 0.05$), with the order of increase being $PSI > CE > pH$. The infiltration rate showed no significant differences ($p=0.683$) between Rainfed and Irrigated, with high variability in situations under irrigation. However, irrigated situations had a 6% higher Dap compared to Rainfed ones ($p=0.0005$) at 10-15 cm. RM values displayed significant variability. The assessments of soil physical quality conducted in this study did not reveal clear trends or pronounced soil degradation. Nevertheless, it is necessary to continue monitoring the long-term soil quality and implement preventive practices to promote sustainable management of these productive systems.

Keywords: organic matter, electrical conductivity, exchangeable sodium percentage, bulk density

INTRODUCCIÓN

La disponibilidad hídrica es la principal limitante del rendimiento de los cultivos en seco (Bohnert y Bressan, 2001; Lobell et al., 2009; Van Ittersum et al., 2013), la cual puede ser controlada por el uso de la práctica de riego. El riego suplementario en las

regiones húmedas y subhúmedas es una práctica que permite evitar los riesgos de déficit hídrico en los momentos críticos de los cultivos, incrementando y estabilizando los rendimientos (Salinas et al., 2016). En la Región Pampeana la práctica de riego suplementario se encuentra en expansión (Sánchez et al., 2016), especialmente luego de las fuertes deficiencias hídricas que sufrieron los cultivos agrícolas en la región durante los últimos años.

Además de valorar los beneficios productivos y económicos del riego, resulta importante considerar posibles impactos ambientales que la práctica de riego pueda provocar. Por ejemplo, cuando el agua de riego es de mala calidad, puede producirse la salinización y/o sodificación del suelo, alterando la calidad físico-química del mismo. La salinización es el incremento de la concentración de sales en la zona radical en niveles que pueden afectar el crecimiento y rendimiento de los cultivos. Esto se produce por efecto osmótico, toxicidad de iones y/o deficiencias nutricionales derivadas del desbalance entre los diferentes iones. Generalmente, el proceso de salinización es frecuente en regiones áridas y semiáridas, en donde el riego es de tipo integral y la dinámica hídrica y salina está regulada por la calidad del agua aplicada (Lavado, 2009; Qadir & Schubert, 2002).

A su vez, determinados cambios en la composición química del suelo por la aplicación del riego pueden generar consecuencias indeseables en la calidad física del suelo, de difícil corrección. El caso más común de este efecto es la sodificación del suelo, que se genera por el incremento en el contenido de sodio intercambiable del mismo, usualmente asociado al uso de aguas con alta relación de adsorción de sodio (RAS). La sodicidad resultante es una problemática frecuente en sistemas de producción bajo riego suplementario de zonas húmedas y sub-húmedas, donde los niveles de salinidad

del suelo se mantienen bajos debido a la lixiviación generada por las lluvias (Sumner, 1993). La sodicidad provoca la degradación física del suelo debido al hinchamiento y dispersión de los coloides del mismo (Crescimanno et al., 1995), que pueden moverse libremente y obturar la porosidad natural.

La literatura internacional adopta como valores críticos de PSI a valores mayores a 15%, valor a partir del cual se observa deterioro en las propiedades físicas. Sin embargo, existen evidencias que con PSI menores al umbral mencionado puede producirse deterioro físico del suelo (Costa & Aparicio, 2015), por lo que estos valores no deberían ser considerados fijos para todo tipo de suelos y cultivos. Esto se explicaría por un efecto combinado del sodio en el complejo de cambio y las sales en solución. Dado que las sales en solución tienen un efecto floculante, pueden existir suelos con altos PSI pero que no presentan problemas en su dinámica del agua por estar sus coloides floculados por la alta concentración de sales (Rengasamy, 2018). Es escasa la información que existe en nuestro país sobre el efecto que ejerce dicha combinación de variables sobre las propiedades físicas edáficas y muchos trabajos muestran que la misma varía para los distintos suelos (Rengasamy, 2018). Los escasos trabajos realizados en la Región Pampeana indican disminuciones de la conductividad hidráulica a partir de valores entre 3 y 5 % de PSI dependiendo de la región (Costa & Aparicio, 2015; Ghiberto et al., 2007). También se han registrado aumentos en los valores de resistencia mecánica, debido a la presencia de estructuras más desfavorables en suelos sodificados (Torres Duggan et al., 2012). El conocimiento de los valores críticos a partir de los cuales las propiedades físicas se ven afectadas es de suma importancia para la toma de decisiones de manejo sustentables en planteos bajo riego.

El impacto de los efectos sobre el suelo depende de la cantidad y calidad del agua de riego y de las precipitaciones que recibe el sistema de producción. Es de esperarse que cuanto mayor sea la proporción del agua de riego en relación con el agua total que recibe un suelo, mayores serán los posibles efectos sobre la calidad del suelo. No obstante, la calidad del agua utilizada es uno de los parámetros más importantes que definen el resultado en términos de la conservación del recurso suelo. En la Región Pampeana las aguas subterráneas no suelen presentar problemas de salinidad (expresada en conductividad eléctrica, CE, o contenido de sales totales), pero contienen en general valores elevados de indicadores de sodicidad tales como la RAS, contenidos totales de carbonatos y bicarbonatos sódicos y contenido de carbonato de sodio residual (CSR) (Alvarez et al., 2020). El agua de riego en la Región Pampeana implica una proporción del 10 al 30 % del agua total que reciben los sistemas de producción de granos bajo riego, y suele producir incrementos del PSI, mientras que el aumento de la conductividad eléctrica de los suelos parece ser mínimo (Torres Duggan et al., 2016).

En el Sudoeste Bonaerense la adopción del riego suplementario es reciente, reportándose 24.900 ha bajo riego, en su mayoría en el partido de Coronel Suárez (Sánchez et al., 2016). Se han indicado en el área centro sur de la provincia de Buenos Aires aguas salinas y con elevados contenidos de sodio, más de la mitad de ellas con valores de CE entre 0,75 a 2,25 dS m⁻¹ y de RAS entre 11 y 18 (Báez, 1999). Otro factor por considerar es la composición granulométrica del suelo. Peinemann et al. (1998) y Giubergia et al. (2021) observaron que el efecto del riego sobre la conductividad hidráulica dependía de la textura del suelo. Existen muy pocos reportes de como el riego suplementario en esta zona puede afectar las condiciones químicas

y físicas de estos suelos con altos porcentajes de arena en su composición (Aguirre et al., 2011). El objetivo del presente trabajo fue determinar el impacto del riego suplementario en condiciones de producción agrícola sobre la calidad química y física edáfica en suelos del Sudoeste Bonaerense.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para determinar el impacto del riego sobre propiedades físicas y químicas de los suelos se evaluaron 33 lotes pertenecientes a 14 establecimientos que forman parte del Grupo de Riego del Sudoeste Bonaerense donde se realiza riego suplementario. Los mismos se encuentran en los partidos de Coronel Suárez, Coronel Pringles, Laprida, Guaminí y Tornquist ubicados en el Sudoeste de la provincia de Buenos Aires. La zona se caracteriza por tener precipitaciones anuales promedio históricas de 897 mm año⁻¹. En los primeros 20 cm del perfil, los suelos poseen textura franco-arenosa, franca y franco-areno-arcillosa. Los principales suelos muestreados corresponden a Argiudoles típicos y petrocálcicos, Haplustoles típicos y éntico y Hapludoles típicos y énticos.

Todas las situaciones correspondieron a suelos de lotes agrícolas. Los principales cultivos que integran la rotación en las situaciones estudiadas son soja, maíz, girasol y trigo. Los lotes de riego, en general, incluyen cultivos destinados a la producción de semilla. La historia de riego de los lotes estudiados comprende entre 2 a 20 años al momento del muestreo, dependiendo del establecimiento, mientras que la lámina promedio aplicada es de 200 mm año⁻¹. En la Tabla 1 se detallan las principales características del agua de riego utilizada en los establecimientos estudiados.

Tabla 1. Características del agua utilizada para riego. CE: conductividad eléctrica; RAS: relación de adsorción de sodio; CSR: carbonato de sodio residual; n: número de muestras de agua.

Table 1. Characteristics of the irrigation water. CE: electrical conductivity; RAS: sodium adsorption ratio; CSR: residual sodium carbonate. Promedio: mean. Mínimo: minimum, Máximo: maximum, n: number of water samples.

	n	Promedio	Mínimo	Máximo
pH	18	7,84	6,80	8,50
CE (dS m ⁻¹)	18	0,83	0,60	1,17
RAS	18	5,9	1,7	13,9
Carbonatos (ppm)	18	10,9	0,0	42,0
Bicarbonatos (ppm)	18	428	297	635
Cloruros (ppm)	18	35,83	19,90	65,30
Sulfatos (ppm)	18	26,21	0,00	108,00
Calcio (ppm)	18	33,02	8,40	67,20
Magnesio (ppm)	18	15,86	5,47	33,10
Potasio (ppm)	15	8,93	4,30	16,60
Sodio (ppm)	18	137,8	52,9	253,4
Dureza Total (ppm)	18	148,2	44,3	302,0
CSR	16	4,50	1,10	7,80

A lo largo de los años 2016, 2018, 2020 y 2021 se tomaron 41 muestras de suelo en los 33 lotes de producción para la determinación de propiedades químicas en i) el círculo de riego y ii) en su respectivo córner (esquina no regada), determinando los

tratamientos Riego y Secano. Las mediciones químicas se realizaron sobre muestras de suelo compuestas de 15 submuestras para las profundidades de 0 a 10 cm y 10 a 20 cm, en cada círculo y respectivo córner. En dichas muestras se determinó carbono orgánico (CO) (Walkley & Black, Nelson & Sommers, 1996), pH (potenciometría, relación suelo/agua: 1:2,5, Thomas, 1996), conductividad eléctrica (CE) (Rhoades, 1996), capacidad de intercambio catiónico (CIC) y cationes intercambiables: Ca, Mg, K y Na (Richter et al., 1982). Para 24 de las situaciones analizadas se contaba con el número preciso de años de riego y los milímetros de riego aplicados durante los años de riego.

En 12 de los lotes de producción muestreados para la determinación de variables químicas, también se evaluaron las propiedades físicas edáficas entre los años 2018 y 2020. En cada lote se realizaron determinaciones *in situ* de variables físicas en el círculo de riego y en su respectivo córner. Se midió la tasa de infiltración con un permeámetro de disco (Perroux & White, 1988), realizando de 4 a 6 mediciones en cada situación. La resistencia mecánica (RM) se determinó con penetrómetro de golpes de punta cónica de 30° de ataque en las profundidades de 0-5, 5 a 10, 10 a 15 y 15 a 20 cm (Burke et al., 1986); se realizaron 10 determinaciones en cada profundidad de cada círculo y córner. Se tomaron además 10 muestras para determinar la densidad aparente (Dap, método del cilindro, Burke et al., 1986) y humedad gravimétrica (Hg) de 0 a 5 cm y de 10 a 15 cm; de cada círculo y respectivo córner. Las muestras de Hg se compusieron a partir de 10 submuestras.

Los datos fueron analizados a través de una Prueba t para un diseño apareado. Cuando la variable fue evaluada en distintas profundidades la comparación se realizó

dentro de cada estrato. Se realizaron regresiones lineales entre las variables evaluadas o informadas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El contenido de CO no presentó diferencias significativas entre la situación de Secano y Riego tanto de 0-10 cm como de 10-20 cm (Tabla 2). La mayor disponibilidad hídrica producto del riego, si bien puede aumentar los aportes de residuos al suelo, también puede incrementar la tasa de mineralización de la materia orgánica; se han registrado aumentos de la mineralización en molisoles con altos contenidos de humedad como consecuencia de la disolución del óxido férrico cuando éste se reduce (Huang & Hall, 2017). A su vez, en los planteos de riego que incorporan en la rotación producción de maíz para semilla, la producción de residuos de cosecha y aporte al suelo suele ser menor que en cultivos para producción de granos (comunicación personal). En una revisión realizada por Trost et al. (2013), se encontró que el riego en regiones semiáridas incrementa el contenido de CO del suelo entre un 11 % y 35 %, mientras que se observa un efecto errático del riego en las regiones húmedas, con un incremento promedio del 2%. Por otra parte, son necesarios ensayos o sistemas de producción con aplicación de riego de largo plazo (Trost et al., 2013), para detectar cambios significativos en el contenido de CO.

El pH edáfico a 0-10 cm y 10-20 cm presentó un incremento estadísticamente significativo del 9,0 y 6,5 %, respectivamente, por efecto del riego (Tabla 2). Estos aumentos son similares a los hallados por Peralta et al. (2019) en el norte de la provincia de Buenos Aires, por Torres Duggan et al. (2012) en la Pampa Ondulada y por Álvarez et al. (2020) en un estudio que incluía suelos de diferentes zonas de la

Región. Según lo referido anteriormente y, en base a estos resultados y las características del agua de riego de la zona, se podría decir que los incrementos ligeros del pH del suelo están ligados a la aptitud del agua de riego utilizada (Brady & Weil, 2002; Qadir & Schubert, 2002), donde los carbonatos y bicarbonatos pueden reaccionar con el agua y formar iones oxidrilo (OH^-), que consecuentemente elevan el pH del suelo (Brady & Weil, 2002).

La salinidad del suelo también se vio afectada por la práctica de riego suplementario. La CE se incrementó significativamente por efecto del riego tanto en el estrato de suelo de 0-10 cm como en 10 - 20 cm (Tabla 2). Se hallaron aumentos del 25 y 35% en las profundidades de 0 a 10 cm y 10 a 20 cm, respectivamente. El aumento de la salinidad es una de las consecuencias indeseables más comunes resultantes de la práctica de riego (Almeida Machado & Serralheiro, 2017; Pla Sentís, 2020), y ha sido reportado, incluso con más intensidad que la del presente trabajo, en suelos regados de la región (Aguirre et al., 2011), y en suelos de otras zonas con características edafoclimáticas muy diferentes (Alvarez et al., 2020; Giubergia et al., 2021). Sin embargo, los valores de CE alcanzados en los sistemas regados en este trabajo no son perjudiciales para los cultivos (Almeida Machado & Serralheiro, 2017), en coincidencia con lo hallado por Alvarez et al. (2020) en otros sitios de la región pampeana.

La proporción de sodio en el complejo de intercambio (PSI) del suelo, indicadora de la salud física del suelo, fue muy afectada por la práctica de riego. El PSI fue la propiedad que mostró mayor variabilidad entre los lotes tanto en Secano como en Riego, siendo significativamente superior en la situación de Riego respecto de la de Secano (Tabla 2). Bajo Riego el PSI fue 133 % y 129% mayor de 0 a 10 cm y de 10 a

20 cm, respectivamente. Resultados similares obtuvieron Álvarez et al. (2020) y Giubergia et al. (2021) en suelos de otras zonas de la Región Pampeana. Nuevamente, la calidad del agua de riego puede explicar estos resultados dado que el agua de la zona es rica en bicarbonatos (Tabla 1), el cual puede precipitar los iones calcio y magnesio, y aumentar de este modo el efecto dispersante del catión sodio en el complejo de intercambio (Pla Sentís, 2015).

Para los 24 casos donde se disponía de la información de años de riego y los mm de riego aplicados durante esos años, se probó la correlación de los mismos con la variación del pH, CE y PSI del suelo de 0-10 cm y de 10-20 cm entre Riego y Secano. Solo se encontró una regresión lineal, estadísticamente significativa, entre los mm aplicados durante todo el período bajo riego con la variación entre el pH del suelo entre el tratamiento de Riego y Secano, tanto de 0-10 cm como de 10-20 cm, según:

$$\Delta \text{ pH suelo de 0-10 cm} = 0,0002 \text{ mm aplicados} + 0,1903 \quad R^2=0,3752 \quad p=0,0015$$

$$\Delta \text{ pH suelo de 10-20 cm} = 0,0002 \text{ mm aplicados} + 0,1869 \quad R^2=0,1899 \quad p=0,0333$$

La falta de correlación entre los mm de riego aplicados y la variación de la CE y el PSI, muestran que el impacto final del riego depende no solo de la cantidad aportada sino de la calidad de la misma y de la variabilidad de las propiedades del suelo y del manejo de los distintos lotes. Cuando la proporción de sodio en las superficies de los coloides excede determinado valor crítico, puede haber consecuencias sobre la estabilidad de los agregados del suelo (Pla Sentís, 2020). En este trabajo, en ninguno de los lotes evaluados el PSI presentó valores superiores al definido usualmente como crítico (PSI 15 %). Los límites críticos de PSI considerados para definir a un suelo como "sódico" (PSI > 15%) fueron propuestos para regiones áridas y/o semiáridas donde los suelos presentaban altos valores de CE. En regiones húmedas o subhúmedas, donde se

utiliza el riego suplementario, los límites críticos pueden ser significativamente más bajos, como los reportados por Costa & Aparicio (2015), ya que no hay presencia de sales suficientes para que el suelo se encuentre floculado (Álvarez et al., 2020). Por lo tanto, en estas zonas hay un menor margen para aportar sodio sin generar efectos estructurales desfavorables.

Cuando se analiza la dinámica temporal de la salinidad y sodicidad de suelos regados en forma complementaria se evidencia un patrón de ascenso de los niveles de PSI durante la temporada de riego y un subsiguiente descenso provocado por las lluvias y la capacidad de recuperación del suelo asociadas con su capacidad de intercambio de cationes (Génova, 2011).

Tabla 2. Propiedades químicas en los tratamientos Secano y Riego de 0 a 10 cm de profundidad. Valores promedio, mínimos y máximos, Error estándar, coeficiente de variación (%) y n= número de muestras. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0,05$). CO: carbono orgánico; CE: conductividad eléctrica; PSI: porcentaje de sodio intercambiable.

Table 2. Chemical properties in the Rainfed and Irrigated treatments from 0 to 10 cm deep. Average (promedio), minimum (mínimo) and maximum (máximo) values, standard error (error estandar), coefficient of variation (Coef. Var.; %) and number of samples (n). Different letters indicate significant differences between treatments ($p < 0.05$). CO: organic carbon; EC: electrical conductivity; PSI: percentage of exchangeable sodium.

0 -10 cm				
	CO (%)	pH	CE (dSm ⁻¹)	PSI (%)

	Secan o	Riego	Secan o	Riego	Secan o	Riego	Secan o	Riego
Promedio	2,43 a	2,42 a	6,32 b	6,89 a	0,33 b	0,42 a	1,90 b	4,42 a
Mínimo	1,39	1,80	5,50	6,10	0,14	0,23	0,30	0,50
Máximo	3,83	3,60	8,00	8,10	1,00	0,80	7,60	8,80
Error estándar	0,084	0,068	0,087	0,078	0,027	0,024	0,232	0,333
Coef. Var. (%)	20,37	16,53	8,76	7,24	51,36	36,45	78,25	48,21
N	35	35	41	41	41	41	41	41
10 - 20 cm								
Promedio	1,85 a	1,82 a	6,57 b	7,00 a	0,29 b	0,39 a	2,04 b	4,67 a
Mínimo	1,04	1,31	5,90	6,10	0,12	0,20	0,30	0,40
Máximo	3,42	2,76	8,30	8,30	0,90	0,90	7,10	13,00
Error estándar	0,076	0,058	0,086	0,081	0,021	0,023	0,253	0,355
Coef. Var (%)	24,10	18,99	8,36	7,39	45,58	38,09	79,30	48,71
N	35	35	41	41	41	41	41	41

La tasa de infiltración básica en promedio fue de 80 mm h⁻¹, sin diferir significativamente entre Secano y Riego (p=0,976) (Figura 1). La tasa de infiltración presentó mayor variabilidad en las situaciones de Riego. No se encontraron relaciones significativas entre la Δ Infiltración (Riego -Secano) vs. Δ PSI (Riego -Secano) (p= 0,2122); todas las infiltraciones (tanto las de secano como riego; n=24) vs. el correspondiente PSI de 0-10 cm (p= 0,4019) o vs. CE de 0-10 cm (p=0,0964) o vs. pH de 0-10 cm (p= 0,1692) y, finalmente, la infiltración relativa calculada como la Δ infiltración (Riego -Secano)/infiltración secano vs. PSI 0-10 cm en Riego (p= 0,1705).

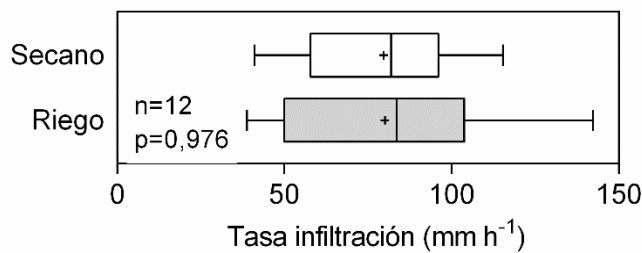


Figura 1. Boxplot de la tasa de infiltración (mm h^{-1}) para las situaciones de Secano y Riego. Las líneas externas de las cajas representan los cuartiles 0,25 y 0,75, y la interna la mediana (0,50). Los extremos de las líneas horizontales representan los valores mínimos y máximos. Los signos + indican las medias de los tratamientos.

Figure 1. Boxplot of the infiltration rate (mm h^{-1}) for the Rainfed and Irrigated situations. The outer lines of the boxes represent the 0.25 and 0.75 quartiles, and the inner one shows the median (0.50). The ends of the horizontal lines represent the minimum and maximum values. The + signs indicate the means of the treatments.

En general, en los ensayos de la región donde se comparó la tasa de infiltración en situaciones con y sin riego no se detectaron diferencias significativas por el uso de riego a pesar de incrementarse el PSI (Álvarez et al., 2020; Giubergia y Rampoldi, 2016; Giubergia et al., 2021; Peralta et al., 2019; Torres Duggan et al., 2012). Sin embargo, una tendencia general es que en todos los casos las tasas promedio fueron menores en riego (entre un 11 y 48% menos); pero esta disminución no fue estadísticamente significativa. En nuestro estudio, la ausencia de diferencias en la infiltración entre los tratamientos puede atribuirse a la textura franca a franco arenosa de los suelos de la región que poseen una importante macroporosidad de origen textural. Estos resultados están en acuerdo con lo reportado por Giubergia et al.

(2021). Cabe destacar que la infiltración de los suelos es una propiedad que presenta una alta variabilidad espacial (Mahapatra et al. 2020; Rienzner & Gandolfi, 2014), lo que puede generar que no se evidencien diferencias significativas. En este sentido, Torres Duggan et al. (2012) no detectaron diferencias significativas en la tasa de infiltración entre riego y secano, pero cuando se caracterizaban a estas tasas de acuerdo a los lineamientos del Soil Quality Institute (1999), la tasa bajo riego fue clasificada como moderada (145 mm h^{-1}), mientras que en situaciones de secano fue moderadamente rápida (215 mm h^{-1}). El único trabajo de la región pampeana donde se reportan disminuciones estadísticamente significativas en la tasa de infiltración generadas por el riego muestra que en la provincia de Santa Fe de 11 sitios analizados, 4 de ellos presentaron menores tasas de infiltraciones con riego, coincidente con los mayores incrementos de PSI (Pilatti et al., 2006), de hasta 370%. Otros trabajos del centro de Santa Fe (Ghiberto et al., 2007) y del SE bonaerense (Costa & Aparicio, 2015) reportan disminuciones en otra propiedad del ciclo del agua en el suelo, la conductividad hidráulica a flujo saturado, ligadas a aumentos del PSI como producto de la práctica de riego.

La Dap tampoco mostró diferencias entre Secano y Riego ($p > 0,05$) en la profundidad de 0 a 5 cm (Figura 2). Considerando la profundidad de 10 a 15 cm las situaciones regadas presentaron una densidad aparente 5,8% superior a las de secano, significativamente diferentes entre situaciones ($p = 0,0005$). Estas diferencias en profundidad no parecen estar explicadas por cambios en las propiedades químicas de los suelos, aunque puede haber cierto efecto de una mayor protección de la estructura en superficie por mayores contenidos de materia orgánica. Tampoco se observaron

valores de Dap por arriba de $1,55 \text{ g cm}^{-3}$, propuestos por la bibliografía como críticos (USDA, 1999).

Cuando se evaluó el impacto del riego sobre la densidad aparente en otros sitios de la región pampeana, también se observó que el efecto no fue importante. Varios trabajos no hallaron diferencias entre la densidad aparente de situaciones regadas y no regadas (Sur de Santa Fe: Torres Duggan et al., 2012; Norte de Buenos Aires: Peralta et al., 2019) a pesar de registrarse incrementos en el PSI. En otros trabajos donde se detectaron aumentos estadísticamente significativos en la densidad aparente en situaciones regadas con relación a las no regadas, los incrementos fueron bajos. En mediciones realizadas en el Sudeste Bonaerense la densidad aparente se incrementó 1,6% (pasó de $1,20$ a $1,22 \text{ g cm}^{-3}$) por el uso de riego (Costa & Aparicio, 2015). Guibergia et al. (2013) detectaron incrementos del 6% de la densidad aparente en los lotes regados del centro de la provincia de Córdoba, pero fue atribuido al pasaje de máquinas sobre el suelo más húmedo en las situaciones de riego.

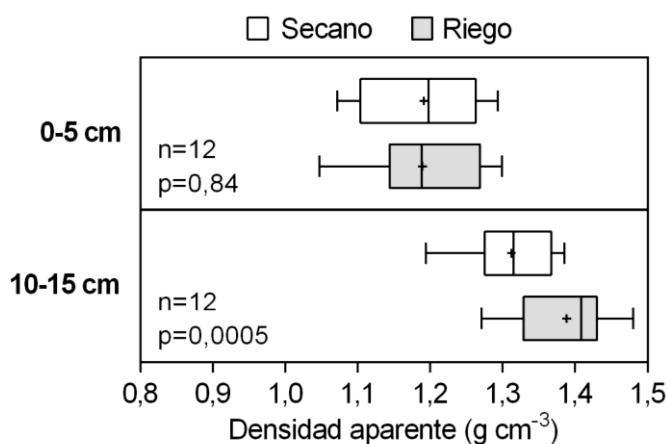


Figura 2. Boxplot de la densidad aparente (g cm^{-3}) para las situaciones de Secano y Riego de 0 a 5 cm y 10 a 15 cm de profundidad. Las líneas externas de las cajas representan los cuartiles 0,25 y 0,75, y la interna la mediana (0,50). Los extremos de

las líneas horizontales representan los valores mínimos y máximos. Los signos + indican las medias de los tratamientos.

Figure 2. Boxplot of bulk density (g cm^{-3}) for Rainfed and Irrigated situations from 0 to 5 cm and 10 to 15 cm depth. The outer lines of the boxes represent the 0.25 and 0.75 quartiles, and the inner one shows the median (0.50). The ends of the horizontal lines represent the minimum and maximum values. The + signs indicate the means of the treatments.

La Hg fue 15% mayor en Riego que en Secano de 0 a 5 cm ($p= 0,0017$), sin diferencias de 10 a 15 cm de profundidad (Figura 3). Los valores de resistencia mecánica presentaron una importante variabilidad (Figura 4). En ninguna de las profundidades medidas se encontraron diferencias entre los tratamientos. La resistencia mecánica estuvo lineal y negativamente asociada al contenido hídrico del suelo (Figura 5) presentando mejor ajuste para la profundidad de 10-15 cm. Cabe destacar que las mediciones fueron realizadas en un rango amplio de humedad y en algunos casos en la situación de Secano se suspendió la medición cuando se llegó a valores que superaron la resistencia mecánica de 9,8 MPa. Los valores de RM entre 5 cm y 15 cm de profundidad son altos superando ampliamente el umbral crítico de 2 MPa. Esto es coincidente con varios trabajos en la Región Pampeana que muestran que los suelos manejados en siembra directa presentan endurecimiento (*soil hardening*; Alvarez et al., 2018), producto del tránsito de maquinaria y la ausencia de labores. Los resultados encontrados no permiten diferenciar entre manejos, siendo esperable que en los planteos bajo riego RM fuera mayor, acorde con mayor tránsito asociado a mayores volúmenes de cosecha o producción de semilla y, generalmente,

las labores se realizan con mayor contenido hídrico y menor capacidad portante. La falta de diferencias significativas entre tratamientos en este trabajo puede deberse a una alta variabilidad y amplio rango de humedad en el momento de las determinaciones (Figura 3 y Figura 5 A y B).

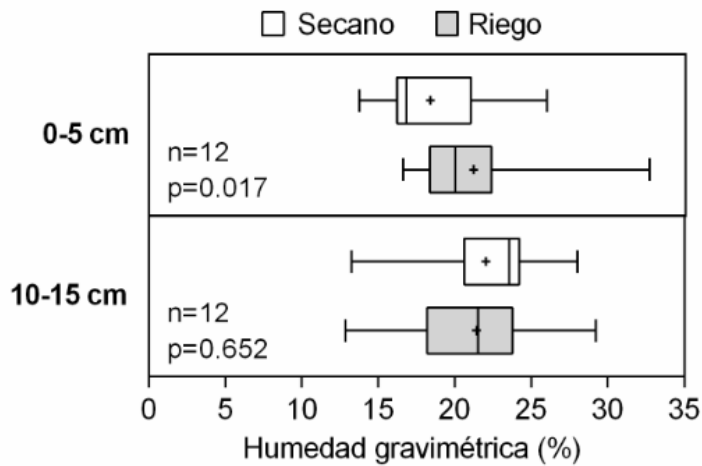


Figura 3. Boxplot de la humedad gravimétrica (%) para las situaciones de Secano y Riego de 0 a 5 cm y 10 a 15 cm de profundidad. Las líneas externas de las cajas representan los cuartiles 0,25 y 0,75, y la interna la mediana (0,50). Los extremos de las líneas horizontales representan los valores mínimos y máximos. Los signos + indican las medias de los tratamientos.

Figure 3. Boxplot of soil gravimetric water content (%) for Rainfed and Irrigated situations from 0 to 5 cm and 10 to 15 cm depth. The outer lines of the boxes represent the 0.25 and 0.75 quartiles, and the inner one shows the median (0.50). The ends of the horizontal lines represent the minimum and maximum values. The + signs indicate the means of the treatments.

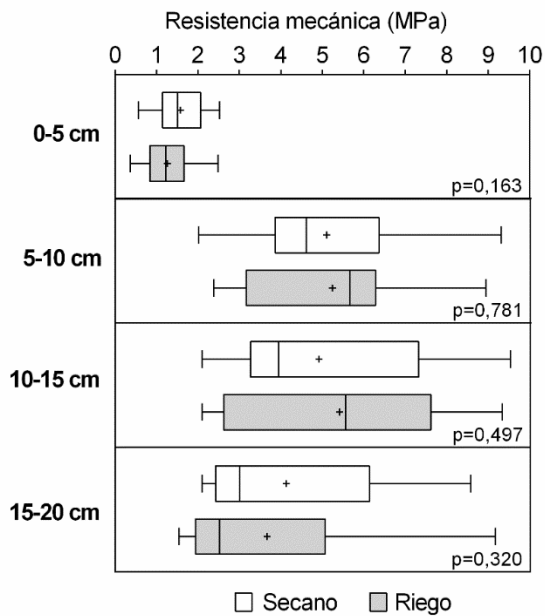


Figura 4. Boxplot de la resistencia mecánica del suelo (MPa) para las situaciones de Secano y Riego de 0 a 5 cm, 5 a 10, 10 a 15 y 15 a 20 cm de profundidad (n= 12). Las líneas externas de las cajas representan los cuartiles 0,25 y 0,75, y la interna la mediana (0,50). Los extremos de las líneas horizontales representan los valores mínimos y máximos. Los signos + indican las medias de los tratamientos.

Figure 4. Boxplot of mechanical penetration resistance (MPa) for Rainfed and Irrigated situations from 0 to 5 cm, 5 to 10, 10 to 15 and 15 to 20 cm depth (n= 12). The outer lines of the boxes represent the 0.25 and 0.75 quartiles, and the inner one shows the median (0.50). The ends of the horizontal lines represent the minimum and maximum values. The + signs indicate the means of the treatments.

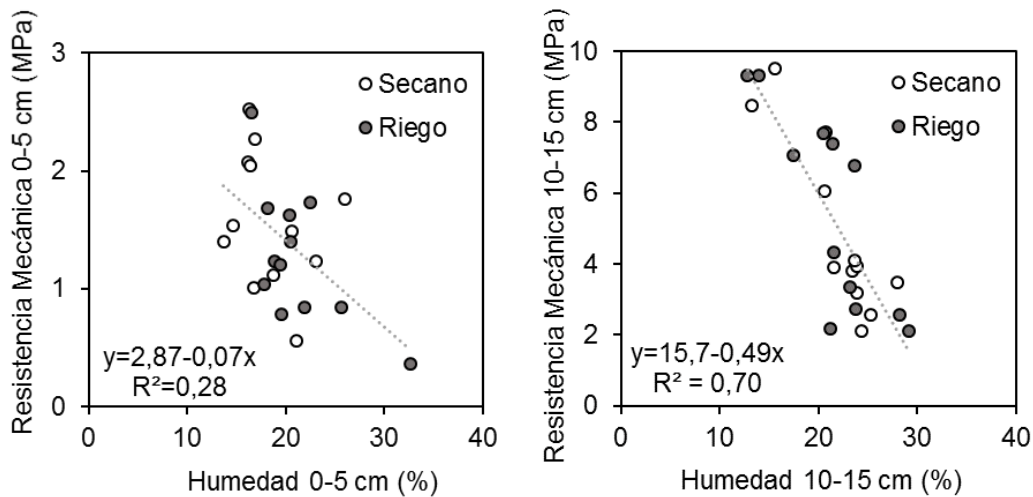


Figura 5. Relación entre Resistencia mecánica y Humedad gravimétrica. Puntos blancos: Secano; puntos grises: Riego. El ajuste es para todos los puntos.

Figure 5. Relationship between mechanical resistance and gravimetric humidity. White dots: Rainfed; gray dots: Irrigated. The adjustment is for all points.

CONCLUSIONES

Dentro de las propiedades químicas evaluadas, el riego suplementario impactó en mayor medida en el PSI del suelo, incrementándose en un 131 % en promedio de 0 a 20 cm, en el círculo de riego, probablemente ligado a la naturaleza bicarbonatada sódica del agua de riego. Teniendo en cuenta que Costa & Aparicio (2015) detectaron degradación física de los suelos con valores de 3,5 de RAS y considerando los bajos valores de salinidad es importante monitorear el estado de la calidad física en estos escenarios. Las evaluaciones de la calidad física edáfica realizadas en este trabajo no muestran tendencias claras ni de marcada degradación física de los suelos bajo riego aún con valores que sobrepasan el umbral sugerido por Costa & Aparicio (2015). Esto puede deberse a la textura franca a franco arenosa los suelos de la región que poseen una macroporosidad de origen textural. Sin embargo, es necesario el monitoreo

continuo de las principales propiedades químicas, y de ser necesario las físicas, para garantizar la sustentabilidad de los sistemas bajo riego suplementario.

AGRADECIMIENTOS

El trabajo fue financiado con el Proyecto UBACYT 20020170100233BA. Programación 2018-2022 y por el Grupo de Riego del Sudoeste Bonaerense. Se agradece a todos los productores, empleados y técnicos de los establecimientos que colaboraron con la realización de este trabajo.

REFERENCIAS

- Aguirre, M.E., Elisei, V.R., Commegna, M.E. y Santamaría, R.M. (2011). Evolución de la salinidad en un suelo irrigado del sudoeste bonaerense. *Ciencia del Suelo*, 29, 265-276.
- Almeida Machado, R.M. & Serralheiro, R.P. (2017). Soil Salinity: Effect on Vegetable Crop Growth. Management Practices to Prevent and Mitigate Soil Salinization. *Horticulturae*, 3, 30-43.
- Álvarez, C.R., Fernández, P.L., Taboada, M.A. y Cosentino, D.J. (2018). Compactación en sistemas agrícolas y mixtos en la Pampa Ondulada argentina. En: P. Imbellone y C.R. Álvarez (Eds) *Compactaciones Naturales y Antrópicas en Suelos Argentinos*, (pp. 450-477), Editorial Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo, Buenos Aires, Argentina.
- Álvarez, C.R., Rimski Korsakov, H. & Torres Duggan, M. (2020). Effects of supplementary irrigation on soils and crops in sub-humid areas in the Pampas Region of Argentina. En: E. Taleisnik, R.S. Lavado (Eds.), *Saline and Alkaline soils*

- in Latin America: Natural Resources, Management and Productive Alternatives* (pp. 285-294). Springer Nature, Cham, Suiza.
- Báez, A. (1999). Fuente, calidad y cantidad de agua para riego en el área de la CEI Barrow. En: *Efecto de la calidad del agua de riego sobre las propiedades del suelo*. Monografía presentada como requisito para optar al grado académico de Especialista en Producción Vegetal, Facultad de Ciencias Agrarias, UNMdP, 56pp.
- Bohnert, H.J., & Bressan, R.A. (2001). Abiotic stresses, plant reactions and new approaches towards understanding stress tolerance. En: J. Noesberger et al. (Eds.) *Crop Science: Progress and Prospects*, (pp. 81-100). CABI publishing, Wallingford, UK.
- Brady, N.C. & Weil, R.R. (2002). *The Nature and Properties of Soils*. 13th. Edition. Essex Pearson: Harlow. 960 p.
- Burke, W., Gabriels, D. & Bouma, J. (1986). *Soil structure assessment*. A.A. Balkema Publ. Rotterdam.
- Costa, J.L., & Aparicio, V.C. (2015). Quality assessment of irrigation water under a combination of rain and irrigation. *Agric Water Manag.*, 159, 299-306.
- Crescimanno, G., Iovino, M. & Provenzano, G. (1995). Influence of salinity and sodicity on soil structural and hydraulic characteristics. *Soil Science Society of America Journal*, 59, 1701-1708.
- Génova, L.J. (2011). Calidad del agua subterránea para riego complementario en la Pampa Húmeda argentina. *Revista Facultad de Agronomía de La Plata*, 119, 63-81.
- Ghiberto, P.J., Pilatti, M.A., Imhoff, S. & de Orellana, JA. (2007). Hydraulic conductivity of Molisolls irrigated with sodic-bicarbonated waters in Santa Fe (Argentina).

Agricultural Water Management, 88, 192-200.

Giubergia, J.P. y Rampoldi, E.A. (2016). Riego complementario en la provincial de Córdoba. Riego suplementario con aguas de mediana a baja calidad en la ecorregión pampeana y del espinal (Argentina). Efectos sobre suelos y cultivos. En: E. Taleisnik, R.S. Lavado (Eds.) *Ambientes salinos y alcalinos de la Argentina. Recursos y aprovechamiento productivo* (pp. 211-226). Orientación Gráfica Editora, Buenos Aires.

Giubergia, J.P., Salinas, A., Severina, I., Boccoardo, M., Aimar, F. y Lavado, R.S. (2021). Efecto del riego suplementario sobre el suelo y el rendimiento del maíz (*Zea mays* L.) En el centro norte de la provincia de Córdoba. *Agronomía & Ambiente*, 41, 71-82.

Huang, W. & Hall, S.J. (2017). Elevated moisture stimulates carbon loss from mineral soils by releasing protected organic matter. *Nature Communications*, 8, 1774. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-01998-z>

Lavado, R.S. (2009). Salinización y sodificación de suelos de producción agrícola extensiva por riego complementario. En: M.A. Taboada, R.S. Lavado (Eds.) *Alteraciones de la fertilidad de los suelos*. 163p. Editorial FAUBA, Buenos Aires.

Lobell, D.B., Cassman, K.G. & Field, C.B. (2009). Crop yield gap: their importance, magnitudes, and causes. *Annual Review of Environment and Resources*, 34, 179-204.

Mahapatra, S., Jha, M.K., Biswal, S. & Senapati, D. (2020). Assessing Variability of Infiltration Characteristics and Reliability of Infiltration Models in a Tropical Sub-humid Region of India. *Scientific Reports*, 10, 1515.

Peinemann, N., Díaz-Zorita, M., Villamil, M.B., Lusarreta, H. y Grunewald, D. (1998).

- Consecuencias del riego complementario sobre propiedades edáficas en la llanura pampeana. *Ciencia del Suelo*, 16, 39-42.
- Peralta, G., Agosti, B., Gil, R.C., Rimski Korsakov, H. y Alvarez, C.R. (2019). Impacto del riego complementario sobre las propiedades físico químicas del suelo en el norte de la Provincia de Buenos Aires. Actas VI Congreso de la Red Argentina de Salinidad: <https://redsalinidad.com.ar/wp-content/uploads/2021/04/Actas-RAS-2019.pdf>, Buenos Aires.
- Perroux, K.M. & White, I. (1988). Designs for Disc Permeameters 1. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 52, 1205–1215.
- Nelson, D.W. & Sommers. L.E. (1996). Total carbon, organic carbon, and organic matter. En DL Sparks et al. (Eds) *Methods of Soil Analysis. Part 3.* (pp. 961-1010). SSSA Book Series. Madison.
- Pilatti, M.A., Imhoff, S., Ghiberto, P. & Marano, R.P. (2006). Changes in some physical properties of Mollisols induced by supplemental irrigation. *Geoderma*, 133, 431-443.
- Pla Sentís, I. (2015). Advances in the prognosis of soil sodicity under dryland and irrigated conditions. *International Soil and Water Conservation Research*, 2(4), 50–63.
- Pla, Sentís I. (2020). Overview of Salt-Affected Areas in Latin America: Physical, Social and Economic Perspectives. En: E. Taleisnik, R.S. Lavado (Eds) *Saline and Alkaline soils in Latin America: Natural Resources, Management and Productive Alternatives* (pp. 3-36), Springer Nature: Cham, Suiza.
- Qadir, M. & Schubert S. (2002). Degradation Process and Nutrient Constraints in Sodic Soils. *Land Degradation & Development*, 13, 275-294. <https://doi.org/10.1002/ldr.504>

- Rengasamy, P. (2018). Irrigation Water Quality and Soil Structural Stability: A Perspective with Some New Insights. *Agronomy*, 8, 72. doi: 10.3390/agronomy8050072.
- Rhoades, J.D. (1996). Salinity: Electrical Conductivity and Total Dissolved Solids. En: D. Sparks (Ed) *Methods of Soil Analysis Part 3* (pp 417-435). Soil Science Society of America and American Society of Agronomy, Madison.
- Rienzner, M. & Gandolfi, C. (2014). Investigation of spatial and temporal variability of saturated soil hydraulic conductivity at the field-scale. *Soil & Tillage Research*, 135, 28–40.
- Richter, M., Conti, M., y Maccarini, G. (1982). Mejoras en la determinación de cationes intercambiables y capacidad de intercambio catiónico en los suelos. *Revista Facultad de Agronomía*, 3, 145-155.
- Salinas, A., Severina, I., Bocardo, M., Aimar, F. y Giubergia, J. (2016). Actualización de resultados productivos con riego suplementario: sistemas de producción en siembra directa continua, módulo demostrativo y experimental INTA Manfredi. pp 114-120. En: *5ta Reunión Internacional de Riego: Uso eficiente del agua de Riego*. Manfredi, Córdoba.
- Sánchez, R.M., Dunel Guerra, L. y Scherger, M. (2016). *Evaluación de las áreas bajo riego afectadas por salinidad y/o sodicidad en Argentina*. Ediciones INTA, Buenos Aires.
- Soil Quality Institute. (1999). *Soil Quality test kit guide*. NRCS Soil Quality Inst. Auburn, AL.
- Sumner, M.E. (1993). Sodic soils: new perspectives. *Australian Journal of Soil Research*, 31, 683-750.

- Thomas, G.W. (1996). Soil pH & Soil Acidity. En: D.L. Sparks (Ed.). *Methods of Soil Analysis. Part 3* (pp. 475-490). Soil Science Society of America, Madison, WI, USA.
- Torres Duggan, M., Alvarez, C.R. y Rimski-Korsakov, H. (2016). Evaluación y monitoreo de suelos bajo riego complementario en la Región Pampeana. En: *5º Reunión Internacional de Riego. Uso eficiente del agua para riego* (pp. 13-39). Ediciones INTA, Buenos Aires.
- Torres Duggan, M., Álvarez, C.R., Taboada, M.A., Celesti, T., Vignarolli, F. y D'ambrosio, D. (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.
- Trost, B., Prochnow, A., Drastig, K., Meyer-Aurich, A., Ellmer, F. & Baumecker, M. (2013). Irrigation, soil organic carbon and N₂O emissions. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 33, 733–749.
- 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 Research*, 143, 4-17.
- USDA. (1999). *Guía para la evaluación de la calidad y salud del suelo-USDA*. <https://www.nrcs.usda.gov/sites/default/files/2022-10/Gu%C3%ADa%20para%20la%20Evaluaci%C3%B3n%20de%20la%20Calidad%20y%20Salud%20del%20Suelo.pdf>.