# “EVALUACIÓN DE ENMIENDAS UTILIZADAS EN SUELOS BAJO RIEGO COMPLEMENTARIO DEL SUDESTE DE CÓRDOBA”

Tesina

del alumno

LUIS ANTONIO MILESI DELAYE

LN: 2273/1

Este trabajo ha sido presentado como requisito para la obtención del título de INGENIERO AGRÓNOMO

Carrera: Ingeniería Agronómica

Escuela de Ciencias Agrarias, Naturales y Ambientales.

Universidad Nacional del Noroeste de la Provincia de Buenos Aires.

2012

Pergamino, 15 de Octubre de 2012.

# “EVALUACIÓN DE ENMIENDAS UTILIZADAS EN SUELOS BAJO RIEGO COMPLEMENTARIO DEL SUDESTE DE CÓRDOBA”

Tesina

del alumno

LUIS ANTONIO MILESI DELAYE

LN: 2273/1

Aprobada por el Tribunal Evaluador de Tesina

…….. …….. ……..

…… ……

Ing. Agr. Carlos Senigagliesi Ing. Agr. Alicia B. Irizar

Carrera: Ingeniería Agronómica

Escuela de Ciencias Agrarias, Naturales y Ambientales.

Universidad Nacional del Noroeste de la Provincia de Buenos Aires.

2012

## AGRADECIMIENTOS

Agradezco este trabajo a mi familia que me formó como persona y siempre confió y apoyó en todas las decisiones.

Además, quiero agradecer a todas aquellas personas que de alguna u otra forma realizaron su aporte para poder llevar a cabo este trabajo.

…primero quiero recordar a Carlos Pecorari quien confió en mi persona y accedió a ser mi director.

…a Catalina Améndola que aconsejó y revisó la estadística del trabajo.

…a Leticia García, Lila Darder, Jimena Dalpiaz, Juliana Torti y Leandro Hanuch que me enseñaron las técnicas de laboratorio y ayudaron a realizar las determinaciones.

…a Fabio Villalba, Diego Colombini, Fernando Rimatori que siempre estuvieron al momento de requerir su ayuda.

...a Adrián Andriulo quien continuamente realizó sugerencias, estuvo predispuesto a consultas y puso a disposición toda su experiencia en el tema.

…finalmente un especial agradecimiento a Alicia Irizar que, sin conocerme, se sumó al proyecto, tomó el desafío como propio y me acompañó de forma incondicional en cada una de las etapas, empujando, aconsejando, aportando ideas e insistencia para que realice el trabajo en tiempo y forma.

# ÍNDICE

**RESUMEN** ..... **5**

**1 INTRODUCCIÓN** ..... **6**

**1.1 Calidad de agua para riego** ..... **7**

**1.2 Efecto del agua de riego en el suelo** ..... **12**

**1.3 Recuperación** ..... **17**

**2 HIPÓTESIS** ..... **24**

**3 OBJETIVOS** ..... **24**

**3.1 Objetivo General** ..... **24**

3.1.1 Objetivos específicos ..... 24

**4 MATERIALES Y MÉTODOS** ..... **25**

**4.1 Caracterización edafoclimática del sitio de estudio** ..... **25**

**4.2 Diseño y desarrollo del ensayo** ..... **27**

**4.3 Análisis estadístico** ..... **34**

**5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN** ..... **35**

**5.1 Efecto del riego complementario** ..... **35**

**5.2 Efecto de las enmiendas sobre algunas propiedades químicas, físico-químicas y físicas del suelo 36**

5.2.1 Propiedades químicas y físico-químicas ..... 38

5.2.2 Propiedades físicas ..... 46

**6 CONCLUSIONES** ..... **50**

**7 BIBLIOGRAFÍA** ..... **51**

**8 ANEXOS** ..... **56**

**8.1 Series de suelos** ..... **56**

8.1.1 Serie Santa Ana ..... 56

8.1.2 Serie El Abolengo ..... 57

**8.2 Distribución de las macetas** ..... **59**

**8.3 Ilustraciones** ..... **59**

## RESUMEN

El riego complementario con aguas de baja calidad trae aparejado problemas de salinización y sodificación de los horizontes superficiales del suelo. La recuperación de estos mediante enmiendas químicas permite mantener la productividad de los mismos. El objetivo de este trabajo fue evaluar el comportamiento de tres enmiendas azufradas (yeso, ácido sulfúrico y su combinación) en dosis equivalentes sobre el espesor de 0-10 cm de suelo de un Hapludol éntico del sudeste de Córdoba con diferente historial de riego (5 y 15 años). Se realizó un ensayo en macetas con suelo disturbado bajo lluvia simulada. Se aplicaron dosis de enmiendas para alcanzar un PSI final de 5%. Se analizó el efecto de las mismas sobre algunas propiedades químicas y físicas del suelo: acidez del suelo (pH), conductividad eléctrica (CE), calcio (Ca), magnesio (Mg), sodio (Na), potasio (K), PSI, capacidad de intercambio catiónico (T), materia orgánica (MO) y el índice de estabilidad de los agregados (IEA). Se concluyó que las enmiendas azufradas son un método eficiente para recuperar suelos sodificados. Las enmiendas con ácido sulfúrico resultaron ser más eficientes debido a una mayor velocidad de reacción y mayor eficiencia de los primeros lavados, alcanzando un PSI menor al deseado. El pH fue la variable más sensible y disminuyó con el aumento de la dosis de ácido sulfúrico. El modelo utilizado para la determinación de la dosis sobreestima la misma cuando se parten de valores de PSI inicial y final cercanos (5 años de riego). El agua demostró tener una importante capacidad de movilización de sodio pero siempre tuvo la misma capacidad de lavado (sodio lixiviado).


*Palabras claves: riego, sodificación, recuperación, enmiendas azufradas.*

# 1 INTRODUCCIÓN

En la actualidad es de fundamental importancia incorporar el concepto de sustentabilidad de los sistemas agropecuarios. La idea central de este, es la producción a largo plazo de las explotaciones agropecuarias (Ferreyra, 1999). El concepto sustentabilidad debe ser amplio e interdisciplinario. Por esto mismo, se tienen en cuenta tanto variables ambientales como socioeconómicas y está asentado sobre tres pilares:

- Mantener o mejorar la calidad ambiental.
- Satisfacer las demandas actuales y futuras de alimento, fibra y combustible.
- Asegurar el bienestar económico y social de los productores.

En la búsqueda de aumentar la producción y rentabilidad se ha incrementado la incorporación de tecnologías, con el fin de hacer un uso más eficiente de los recursos. Debida a la creciente intensificación de los sistemas productivos, es importante determinar previamente el impacto ambiental potencial de la incorporación de estas tecnologías. El impacto ambiental es la diferencia que hay entre un ambiente sin disturbar y un ambiente en donde se incorpora una tecnología. Estos pueden ser tanto positivos como negativos (Ferreyra, 1999).

Dentro de estas tecnologías se destaca el riego. La cuota de mayor incertidumbre en la producción de cereales y oleaginosas de la Pampa Húmeda radica en la aleatoriedad de las lluvias, las que por ser el principal determinante de los rendimientos, hace que el objetivo de la modernización e intensificación agrícola se convierta en una empresa altamente riesgosa. Por esto mismo, el riego complementario, fundamentalmente, minimiza el riesgo climático, procurando estabilizar los rendimientos en niveles superiores a los correspondientes a cultivos de secano (Biondolillo, 1999).

Según Siebert *et al.* (2006) en el mundo hay 301 millones de hectáreas sistematizadas con riego. El 38% de esa superficie es regada con agua subterránea. India, China y Estados Unidos son los 3 países con mayor superficie bajo riego, alcanzando valores de

39, 19 y 17 millones de hectáreas respectivamente. América del sur (Argentina, Chile, Paraguay y Uruguay) posee 4,4 millones de hectáreas equipadas con riego, las cuales representan el 9,9% de la superficie cultivada y un 11,7% de esa superficie se riega con agua proveniente de fuente subterránea. De las 32 millones de hectáreas cultivadas en Argentina, 1,36 millones de hectáreas se desarrollan bajo riego. Las provincias con mayor área equipada con riego son Mendoza (267.888 hectáreas), Buenos Aires (166.482 hectáreas), Salta (118.898 hectáreas), Córdoba (93.834 hectáreas).

El riego complementario es una herramienta que resulta imprescindible en planteos productivos tales como la producción de semilla de maíz e intensivas como la frutihortícola. Debido al elevado costo de inversión, al momento de incorporar riego en un planteo productivo, es preferible realizar cambios en el manejo del cultivo para hacer un uso eficiente del mismo (Biondolillo, 1999). En la Región Pampeana permite sortear momentos de déficits hídricos, y por otro lado, hacer un uso eficiente de los recursos producto de la interacción de los factores genético, fertilizantes y agroquímicos. La incorporación de agua al perfil que no sea la de lluvia trae aparejado consecuencias que dependen principalmente de la composición química del agua disponible, de la cantidad de agua a dosificar y de la composición del suelo que se va a regar (Arens, 1969).

## 1.1 Calidad de agua para riego

El riego conlleva la incorporación de sales al perfil, ya que las aguas naturales poseen concentraciones variables de sales, principalmente cloruros y sulfatos de sodio, calcio, magnesio y potasio de alta solubilidad (Manavella, 1996; Mon *et al.*, 2002). La piedra fundamental para la incorporación de riego en sistemas productivos es el estudio de la calidad de agua que se dispone, ya que define los efectos potenciales posibles sobre el sistema suelo. La determinación de la aptitud del agua de riego establece si la misma cumple con los requisitos necesarios para tal fin.

Las dos fuentes de agua más utilizadas para regar son los acuíferos subterráneos y las reservas de agua superficiales. A pesar de que las aguas subterráneas presentan mayor estabilidad química que las superficiales, bajo ninguna forma, superan en calidad al agua de lluvia. Sin embargo, la estabilidad química del agua subterránea sufre variaciones por la presencia de fenómenos modificantes como disolución, reducción, precipitación, intercambio de bases y concentración.

En la Pampa Húmeda, se utiliza para regar, principalmente, agua subterránea, mediante la realización de perforaciones que alcanzan los acuíferos Puelches y Pampeano, siendo el primero el más importante en la región. La formación Puelches, como así también el Pampeano, tienen la característica de aumentar su salinidad en profundidad. En los acuíferos la separación de agua salada y dulce se produce debido a la diferencia de densidad entre ambas. Esto provoca que se forme tres zonas definidas de acuerdo al gradiente de salinidad del agua (Manavella, 1999):

- Zona agua salada: zona más profunda del acuífero.
- Zona de transición: mezcla de agua salada y dulce, formando gradiente de salinidad.
- Zona de agua dulce: extracción de agua con destino a riego.

El principal factor determinante del enriquecimiento salino de las aguas subterráneas es la disolución de las sales presentes en los sedimentos que dieron origen al suelo. A medida que el sedimento es más fino, mayor es la transferencia de sales debido a la mayor superficie de contacto. En la Región Pampeana, el agua, en su recorrido a través de los limos y arcillas, se va cargando de sales. Sin embargo, no siempre la baja calidad del agua de riego está asociada al origen de los sedimentos del suelo, hay casos en donde una mala calidad de la perforación y/o un mal aislamiento, hace que se arrastren a la superficie excesiva cantidad de material, llevándose consigo elevadas cantidades de sales perjudiciales. En otros casos, la ubicación de la bomba a excesiva profundidad

provoca la extracción de agua de la zona de transición o de agua salada. Además, la sobreexplotación del acuífero produce por efecto de succión, el arrastre de agua de las zonas de interfase y de agua salada hacia la superficie (Manavella, 1996).

El agua subterránea es una solución de compuestos inorgánicos solubles, que reaccionan en forma iónica con los componentes del suelo. Es importante conocer las concentraciones de los cationes y aniones presentes en ella. Los cationes de importancia son sodio, calcio, magnesio y potasio. Respecto a los aniones tenemos cloruros, nitratos, sulfatos, carbonatos, bicarbonatos, fluoruros (Mon *et al.* 2002). De este modo, son tres aspectos que se deben tener en cuenta al momento de determinar la aptitud de las aguas subterráneas para riego:

- Peligro de salinización.
- Peligro de sodificación.
- Toxicidades específicas.

En base a los parámetros conductividad eléctrica (CE) y solutos totales disueltos (STD) del agua de riego, se puede determinar el peligro de salinización de esta, para tal fin el Laboratorio de Salinidad del USDA (Richards Ed., 1970) propuso una clasificación la cual divide a las aguas en cuatro clases:

- Baja salinidad o C1: CE hasta 0,250 dS $m^{-1}$ y STD hasta 0,15 g $l^{-1}$. Con esta calidad es difícil que se desarrollen problemas de salinidad.
- Salinidad media o C2: CE entre 0,250 y 0,750 dS $m^{-1}$ y STD entre 0,15-0,50 g $l^{-1}$. Se debe evitar regar cultivos altamente sensibles a la salinidad.
- Alta salinidad o C3: CE entre 0,750 y 2,250 dS $m^{-1}$ y STD entre 0,50 y 1,5 g $l^{-1}$. No puede usarse en suelos con drenaje deficiente. Solo recomendable para cultivos altamente tolerantes a la salinidad.

- Muy alta salinidad o C4: CE entre 2,250 y 4,000 dS $m^{-1}$ y STD entre 1,5 y 2,5 g $l^{-1}$. Sólo se deben usar en suelos altamente permeables, regar con exceso de agua y utilizar cultivos altamente tolerantes a las sales.

La capacidad de sodificación del agua se estima mediante el cálculo de la relación de adsorción de sodio (RAS (I)). Esta variable no está determinada por el contenido de sodio per se, sino por su concentración relativa respecto a los cationes calcio y magnesio.

$$RAS = \frac{sodio}{\sqrt{\frac{(calcio + magnesio)}{2}}} \qquad (I)$$

En dónde sodio, calcio y magnesio en meq $l^{-1}$.

La importancia de la RAS radica en que deriva de la ecuación de Gapon, la cual explica los mecanismos de adsorción del calcio, magnesio, sodio y potasio en el complejo de intercambio. La capacidad de intercambio de un catión depende de las propiedades del mismo (carga electroestática, radio atómico, esfera de hidratación y polaridad del ión) y de los intercambiadores del suelo (arcillas, materia orgánica). El sodio es poco retenido por estos últimos ya que posee baja carga, elevada esfera de hidratación y baja polaridad. Esto provoca que con el aumento del sodio en el complejo de intercambio el sistema suelo tienda al estado de dispersión, aumentando la sensibilidad a la erosión y adquiera una arquitectura porosa inestable, lo que dificulta la circulación del agua y del aire (Vázquez, 2001). Mientras que el calcio y el magnesio actúan, especialmente por su carga, tratando de mantener la floculación del sistema. Es debido a estas características de los cationes que no se puede tener en cuenta solo el contenido de sodio de las aguas, sino su concentración relativa respecto a los cationes divalentes calcio y magnesio.

A pesar de que el sodio es el principal problema, la RAS no establece una buena herramienta para conocer el aporte de sodio al suelo porque no asegura que ese sodio pase al complejo de intercambio. Debido a que el intercambio está regido por reacciones de equilibrio, la concentración de sodio en el complejo estará también regulada por el

calcio, magnesio y potasio presente. Pero cuando las aguas destinadas a riego contienen carbonatos y bicarbonatos es mayor el cuidado que hay que tener ya que en el suelo tienden a formar carbonato de calcio y de magnesio, los cuales son de baja solubilidad y por lo tanto de fácil precipitación. Por esto es importante conocer el carbonato de sodio residual (CSR (II)), el cual nos permite conocer la existencia de condiciones para la precipitación de sales de calcio. Las aguas con elevadas concentraciones de carbonatos y bicarbonatos al evaporarse se concentran y los compuestos de calcio y magnesio precipitan en parte, quedando en solución los compuestos perjudiciales de sodio. En este momento el sistema tenderá a equilibrar la concentración de los diversos cationes en solución intercambiando calcio y magnesio del complejo por sodio de la solución. En base a esto podemos concluir que aguas con un mismo valor de RAS mayor será el efecto del sodio cuanto mayor sea su valor de CSR.

$$CSR = (carbonatos + bicarbonatos) - (calcio + magnesio) \qquad (II)$$

El Laboratorio de Salinidad del USDA (Richards Ed., 1970) clasifica en tres niveles la calidad del agua de riego en base al contenido de carbonato de sodio residual:

- Buena: menor a 1,25 meq $l^{-1}$ CSR.
- Dudosa: 1,25 – 2,5 meq $l^{-1}$ CSR.
- Mala: mayor a 2,5 meq $l^{-1}$ CSR.

Se han desarrollado diversas clasificaciones para determinar la capacidad de salinización y sodificación del agua de riego en base a las determinaciones de pH, CE, concentración de cationes, carbonatos y bicarbonatos, sulfatos, RAS, CSR y STD. Vázquez *et al.* (2006) analizaron muestras de aguas y las clasificaron en base a criterios existentes de distintos autores (Ayers & Wescot, 1978, Richards, 1980, Ayers & Wescot, 1987, Minhas & Gupta, 1992) para la determinación de la calidad del agua de riego, llegando a resultados dispares. Por lo tanto, dependiendo de la clasificación utilizada, una misma muestra de agua puede ser clasificada desde no salina hasta

medianamente/altamente salina. Siendo la clasificación de Ayers & Wescot (1987) la única que señala problemas debido a la sodicidad del agua. Esto se debe a que las mayorías de las clasificaciones se han desarrollado para zonas áridas y semiáridas de los EEUU y al aplicarlas en otros sitios puede suceder que los efectos que pronostica determinada clasificación no sean los mismos. Esto no quiere decir que no sirva la clasificación, sino que su implementación debe ser criteriosa.

A diferencia de la salinización y la sodificación, en donde el efecto es en la matriz del suelo, la toxicidad se produce a nivel planta. El efecto se debe a la acumulación de iones, principalmente cloro, sodio y boro, en las hojas en niveles que resultan fitotóxicos, produciendo daño.

## 1.2 Efecto del agua de riego en el suelo

El riego complementario puede tener efectos importantes sobre la fertilidad química del suelo como la salinización, sodificación y toxicidades específicas (Marano *et al.*, 1996; Génova, 2005; Vázquez *et al.* 2006; Mon *et al.* 2007; Marano, 2008) y problemas sobre la fertilidad física, como la pérdida de la permeabilidad, estructura y reducción de la conductividad hidráulica (Andriulo *et al.*, 1998; Abrego *et al.*, 1999; Andriulo, 1999; Mon *et al.*, 2007).

La salinización es el incremento de la concentración de sales en la solución del suelo. Esto se produce por la acumulación de sales en la rizósfera. A medida que la planta consume agua, la concentración de sales aumenta. Con el posterior aporte de agua de baja calidad este proceso se hace acumulativo hasta que el potencial osmótico de la solución del suelo aumenta hasta un punto que impide a la planta extraer agua del suelo, limitando su normal crecimiento y desarrollo. La evolución normal de estos suelos es que se sodifiquen debido a la alta solubilidad de las sales de sodio. A este tipo de salinización se la llama secundaria ya que el origen de las sales no es el material originario (salinización primaria), sino que provienen de una fuente externa. A pesar de que los

agregados sufren una pequeña expansión, tienen la capacidad de mantenerse floculados logrando una permeabilidad similar a la de los suelos normales. Las sales determinan las propiedades de los suelos alcalinos. La naturaleza de los compuestos de sodio determina el efecto del mismo sobre las propiedades del suelo. Los suelos denominados de álcali blanco, debido a que contienen sodio en el complejo de intercambio y sales de sodio en exceso (cloruro de sodio y sulfato de sodio) en la solución, se mantienen friables y no se dispersan, debido a que las sales impiden la ionización de los iones de sodio adsorbidos de forma importante. Con esto disminuyen el potencial, la hidratación, el hinchamiento, la tendencia a la dispersión e imposibilita la migración de estos, por lo tanto, el suelo se encuentra permeable e impide la formación de horizontes enriquecidos en arcillas, humus o sesquióxidos. Por otro lado, en los suelos de álcali negro, las precipitaciones anuales lavan los excesos de sales solubles. Los coloides saturados con sodio se hidrolizan formando hidróxido de sodio y carbonato de sodio, transformando el sistema en un medio altamente dispersivo, con malas propiedades físicas. Estos, toman una coloración oscura debido a la disolución de pequeñas cantidades de materia orgánica por el carbonato de sodio (Baver *et al.,* 1972). La salinización no es un problema presente únicamente en lotes con riego. En suelos que poseen napas freáticas cerca de la superficie se observa el mismo problema debido al ascenso capilar durante los periodos con balance hídrico negativo.

La sodificación del suelo es el aumento del sodio intercambiable en el complejo de intercambio, lo cual produce el detrimento de la permeabilidad y estructura de este. La participación del sodio en el complejo de intercambio se obtiene a partir del porcentaje de sodio intercambiable (PSI (III)). Este valor surge de la relación entre el sodio de intercambio y la capacidad de intercambio catiónico (T), que se expresa en la siguiente ecuación:

$$PSI = \frac{sodio_{intercambiable}}{T} * 100 \qquad (III)$$

En donde PSI se expresa en porcentaje (%), $sodio_{intercambiable}$ y T se expresan en meq $100g^{-1}$.

Con la aplicación de agua salina el PSI del estrato superior del suelo tiende a equilibrarse con la RAS del agua de riego. Si el agua utilizada es carbonatada y bicarbonatada sódica, cuando se alcanzan elevadas concentraciones de calcio, carbonatos, bicarbonatos y sulfatos, se produce la precipitación de calcio debido a que exceden la solubilidad del carbonato de calcio (caliza) y del sulfato de calcio (yeso). Luego por evapotranspiración, la solución del suelo se concentra, aumentando la CE del extracto de saturación y el PSI. Con la aplicación de agua de lluvia o agua no salina, la CE tiende a reducirse, mientras que el PSI no lo hace debido a la falta de iones intercambiables en la solución, ya que la concentración de los iones calcio y magnesio es significativamente menor a la necesaria para reemplazar al sodio intercambiable (Andriulo, 1999). En este momento tienen lugar la expansión y dispersión de arcillas, lo que conlleva a la reducción de la velocidad de infiltración y de la conductividad hidráulica. Con el posterior secado del suelo las arcillas se asientan, produciendo capas densas y duras que impiden el movimiento del agua y el normal crecimiento de las raíces. Cuando estos suelos se hinchan debido a un proceso de humedecimiento, se reduce el volumen de los poros, reduciéndose la conductividad hidráulica del suelo, de continuar la aplicación de agua, esta se comienza a acumular encima de este horizonte provocando encharcamiento en superficie. El horizonte superficial al perder arcillas se transforma en un horizonte más suelto, rico en arena y limo.

Es necesario remarcar la diferencia entre dispersión, floculación y estabilidad de los agregados. La dispersión sucede cuando en un líquido polar o apolar las partículas coloidales están en suspensión formando una sola fase. Estos pueden volver a precipitar floculándose o coagulándose. La floculación tiene lugar si el coloide precipitado puede nuevamente ser dispersado, en cambio la coagulación ocurre cuando no es posible volver

a formar suspensiones. La floculación está regida por cargas electroestáticas, mientras que en la agregación la floculación es una condición necesaria pero no suficiente, además de este factor intervienen otros como la humedad, materia orgánica, sesquióxidos, efecto de cationes (Baver *et al.*1972).

El Laboratorio de Salinidad del USDA (Richards Ed., 1970) desarrolló una clasificación que permite clasificar los suelos, de acuerdo a su CE, pH y PSI. Esta clasificación divide a los suelos en cuatro grupos:

- Suelo normal: CE menor a 4 dS $m^{-1}$, pH menor a 8,5 y PSI menor a 15%. Presentan estado coloidal floculado.
- Suelos salinos (Solonchacks, nomenclatura rusa): CE mayor a 4 dS $m^{-1}$, pH menor a 8,5 y PSI menor a 15%. Son suelos que se reconocen por la presencia de costras blancas en su superficie. Estado coloidal floculado.
- Suelos salino sódicos (Solonchack sodio, nominación rusa): CE mayor a 4 dS $m^{-1}$, pH menor a 8,5 y un PSI mayor a 15%. Debido a que existe un exceso de sales, el suelo presenta un pH por debajo de 8,5 y su estado coloidal es floculado.
- Suelos sódicos (Solonetz, nomenclatura rusa): CE menor a 4 dS $m^{-1}$, pH mayor a 8,5 y PSI mayor a 15%. Estado coloidal disperso.

Como rápido método de diagnóstico, Richards Ed. (1970) proponen que valores de pH superiores a 8,3 indican problemas con sodio debido a que este elemento es la base más fuerte que se encuentra en el suelo. Pero existen excepciones de suelos con elevados valores de PSI y bajo pH, seguramente debido a elevados contenidos de sulfatos o nitratos, ácidos fuertes, que podrían disminuir el efecto del sodio.

Cerana (1980), encontró que la alta presión osmótica en la solución del suelo limita la entrada de agua al espacio intralaminar, pero a baja salinidad las arcillas se expanden en más y más láminas. Cuando el PSI alcanza el 15-20% y la concentración de la solución externa es demasiado baja, ocurre la fragmentación de los cristales de arcilla,

desarrollándose horizontes impermeables. Además, encontró que la tasa de infiltración se redujo de 85% a 46%, con una importante dispersión coloidal (situación reflejada en la coloración de los drenajes), después de 8 años de riego suplementario en suelos Haplustoles énticos del norte de la región pampeana. En estos suelos, los valores del PSI cambiaron de 1,3-2,0 a 4,5-7,4%.

Por otra parte, Andriulo *et al.* (1998) encontraron un aumento en los valores del contenido de sodio intercambiable de 0,4 a 2,3 meq 100 $g^{-1}$ y una sextuplicación del PSI pasando de 2,1 a 12,2% para un Argiudol típico de la Serie Pergamino tras once años de riego complementario. Para el mismo sitio, Abrego *et al.* (1998) encontraron reducción del 50% respecto a la condición de secano para la infiltración media e índices de estabilidad de los agregados (IEA) cercanos al límite de una estructura inestable (menor a 20%).

Génova (2005) organizó y analizó datos de salinidad y sodicidad de suelos Argiudoles y Hapludoles pampeanos, regados complementariamente entre los años 1986 y 2005, tomados previa y posteriormente a la temporada de riego. No encontró evidencia en los indicadores salinos y sódicos que indiquen degradaciones irreversibles en los suelos, cuya calidad se mantuvo, lo cual permite asumir que el riego complementario en la Pampa Húmeda no compromete la sustentabilidad de los agroecosistemas productores de cultivos extensivos. Por otro lado, Vázquez *et al.* (2006) encontraron que para tres años de muestreo (1997, 1998, 1999), en suelos del noroeste y centro-este de la provincia de Buenos Aires, el riego tuvo efecto significativo desde el punto de vista estadístico sobre la CE en lotes, con un historial de riego de entre 2 y 4 años. A su vez, Mon *et al.* (2007) estudiaron el efecto del riego complementario sobre las propiedades químicas y físicas del suelo para 21 localidades del norte de la región pampeana, encontrando aumento de 2,56 a 5,52% para el PSI y en el caso del pH a pesar de que se evidenciaron incrementos de 6,13 a 6,45, estos valores todavía siguen siendo bajos. Además, encontraron una reducción del 15% en la capacidad de almacenamiento de agua de los suelos regados

debido a la destrucción de los agregados superficiales que impiden el ingreso de agua y aumentan el escurrimiento y pérdida de suelo (duplican la situación no regada). Mientras que los valores de materia orgánica y conductividad eléctrica se mantuvieron constantes.

Nombrado por Mon *et al.* (2007), Costa (2000) encontró que en el sur de la Pampa Húmeda los cambios en la sodicidad son persistentes, pero los valores de RAS tienden a estabilizarse entre valores de 5 y 7, pero cuando se discontinua el riego y ocurren precipitaciones del orden de los 1129 mm, la RAS descendió de 5,3 a 1,8.

## 1.3 Recuperación

En los suelos salinos la recuperación se basa en el lavado de los excesos de sales de la solución del suelo (Fassbender *et al.,* 1987). El lavado puede suceder naturalmente, por un exceso de lluvias en la estación húmeda, o artificialmente mediante el riego. Para que sea eficiente son necesarias dos condiciones; primero, contar con agua de buena calidad; segundo, que el suelo posea un drenaje adecuado para facilitar la lixiviación de las sales. Caso contrario, es preferible realizar obras para mejorarlo con el fin de obtener una buena respuesta al lavado. Un concepto importante para realizar el lavado mediante riego es el requerimiento de lixiviación. Este concepto hace referencia a la fracción de agua que es necesario que atraviese la zona radicular para mantener la salinidad en determinado nivel.

Mientras que la salinización puede ser controlada por el sistema suelo-atmósfera, la sodificación no, debido a que el problema no se encuentra en la solución del suelo sino en el complejo de intercambio. En este caso, es necesario combinar prácticas de corrección, con enmiendas, y de lavado. La finalidad de la enmienda es generar el ambiente propicio que permita desplazar la reacción para que se produzca el intercambio del sodio adsorbido por calcio presente en el suelo o incorporado con la enmienda. Las enmiendas químicas a utilizar se pueden clasificar en tres grupos (Laboratorio de Salinidad del USDA, Richards Ed., 1970):

1. Sales solubles de calcio: cloruro de calcio y sulfato de calcio.

2. Ácidos o formadores de ácido: azufre, ácido sulfúrico, sulfato de hierro, sulfato de aluminio y cal-azufre.
3. Sales de calcio de baja solubilidad: roca caliza molida, subproductos de la cal.

La elección del tipo de enmienda a utilizar, se determina por la característica del suelo a corregir, la velocidad de sustitución deseada y las limitaciones económicas. En suelos con presencia de carbonatos de metales alcalinotérreos se pueden utilizar cualquiera de las sales solubles de calcio y/o ácidos o formadores de ácidos. Las enmiendas del segundo grupo, aplicadas en suelos libres o prácticamente libres de carbonatos de metales alcalinotérreos con pH mayor o menor a 7,5, tienden a acidificar el suelo.

Las enmiendas normalmente utilizadas son el sulfato de calcio dihidratado ($SO_4Ca{\cdot}2H_2O$) o yeso agrícola, azufre (S) o flor de azufre y sulfato férrico ($(SO_4)_3\ Fe_2$). Estos materiales tienen en común, en su constitución, la presencia de azufre. El modo activo del azufre para mejorar el suelo es bajo la forma de sulfato ($SO4^{=}$). Es necesario que la flor de azufre sufra una oxidación en el suelo, mediante la intervención de microorganismos específicos, hasta formar ácido sulfúrico para alcanzar la forma activa. El sulfato férrico necesita ser hidrolizado a ácido sulfúrico, y el hidróxido férrico, subproducto de la reacción, favorece la agregación del suelo. En ambos casos, el ácido sulfúrico formado reemplaza al sodio por hidrógeno, provocando la reducción del pH. Pero es necesaria la presencia de calcio, bajo la forma de carbonato de calcio del suelo o mediante la aplicación de enmiendas, para incorporarlo al complejo de intercambio con el fin de lograr la floculación del suelo.

El factor en común de estos tres correctivos es la formación de sulfato de sodio como producto final, el cual tiene la ventaja de ser de fácil lavado. Durante las estaciones cálidas esta sal asciende por capilaridad a capas superficiales debido a que su solubilidad aumenta con la temperatura, con el descenso de la temperatura se produce el precipitado,

lo cual impide su lavado. Es por esto mismo que el lavado es más eficiente durante la estación cálida.

La selección de un mejorador químico puede estar determinada por el tiempo que requiere su reacción en el suelo. El cloruro de calcio, posee una gran solubilidad en agua, pero su elevado costo hace que su uso se vea reducido. El ácido sulfúrico y los sulfatos de hierro y aluminio se hidrolizan fácilmente en el suelo. Por cuestiones económicas el yeso y el azufre son los mejoradores normalmente utilizados para la recuperación de suelos con problemas de sodio. Luque *et al.* (1995) observaron mayor velocidad de recuperación de suelos sódicos y salino-sódicos de los tratamientos con ácido sulfúrico a los tratamientos con dosis equivalentes de yeso.

El yeso se encuentra bajo la forma sulfato de calcio dihidratado ($SO_4Ca.H_2O$). El cual proviene de canteras a cielo abierto, de donde se extrae en estado sólido, para ser luego procesado. De acuerdo a su granulometría los productos son agrupados en sólidos granulados, peleteados y polvo.

La determinación del requerimiento de yeso (RY) a utilizar para producir la sustitución del sodio intercambiable se estima a partir de los valores de sodio intercambiable y de la capacidad de intercambio catiónico. El RY (IV) se determina con la siguiente ecuación:

$$RY = \frac{0{,}86*(PSIi - PSIf)*F*T*Dap*P}{Pureza} \qquad (IV)$$

En dónde RY (kg $ha^{-1}$); PSIi y PSIf representan el porcentaje de sodio intercambiable inicial (diagnóstico químico) y final (deseado) respectivamente; F es un factor (adimensional) de eficiencia del intercambio entre calcio y sodio, el cuál varía de 1,1 para un PSIf de 15 a 1,3 para un PSIf de 5% (Oster *et al.*, 1980); T es la capacidad de intercambio catiónico (meq 100 $g^{-1}$ ó cmol $kg^{-1}$); Dap es la densidad aparente (en g $cm^{-3}$ ó tn $m^{-3}$ ó Mg $m^{-3}$); P es la profundidad del suelo (en cm) y Pureza es la pureza del yeso comercial (promedio 65%).

La Tabla 1.3.1 muestra la equivalencias entre enmiendas, en base al azufre que aportan (Richards Ed., 1970).

**Tabla 1.3.1 Equivalencias entre enmiendas (Adaptado de Richards (Ed), 1970)**

| Mejorador | Toneladas equivalentes a 1 tonelada de azufre |
|---|---|
| Azufre | 1,00 |
| Ácido sulfúrico | 3,06 |
| Yeso | 5,38 |
| Sulfato ferroso | 8,69 |
| Sulfato de aluminio | 6,94 |
| Caliza | 3,13 |

La velocidad de reacción para sustituir al sodio del complejo de intercambio por el calcio del yeso está determinada por su solubilidad (0,25%). El Laboratorio de Salinidad de los EEUU (Richards Ed., 1970) ha determinado en base a experiencias que para disolver 11 toneladas de yeso por hectárea es necesaria la aplicación de una lámina 1000 mm de agua (yeso con 85% por tamiz de 100 mallas).

La solubilidad del yeso es una variable dependiente del tamaño de la partícula. A medida que aumenta el tamaño de partícula requiere mayor tiempo para alcanzar su máxima solubilidad (Figura 1.3.1).

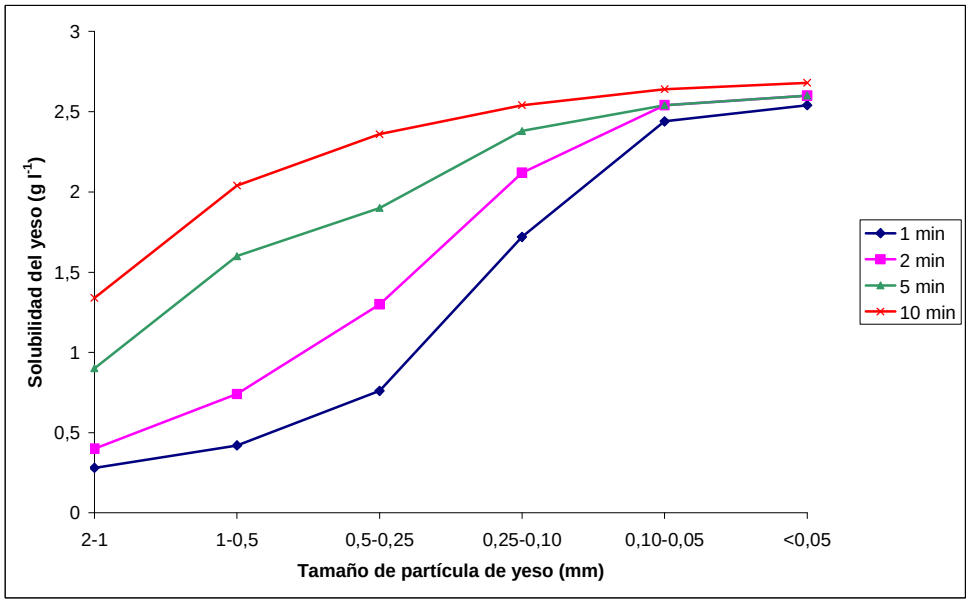



**Figura 1.3.1 Solubilidad del yeso agrícola en base al tiempo y al tamaño de partícula (Adaptado de FAO, 1990).**

Luque *et al*. (1995) encontraron respuesta a la aplicación de enmiendas en base a yeso, ácido sulfúrico y su combinación en dos suelos vérticos chubutenses con PSI inicial de 4,1 y 22,4%. Encontraron mayor velocidad de reacción en los tratamientos que poseían ácido sulfúrico. Además, observaron mejoras en la conductividad hidráulica de los suelos cuando utilizaron elevadas dosis de yeso, en cambio en los testigos, el lavado temprano de electrolitos de la solución redujo fuertemente la misma.

Sasal *et al.* (2000) estudiaron en el efecto de diferentes niveles de cobertura de rastrojos de trigo y su combinación con tres dosis de yeso en suelos con problemas físico-químicos debido a 11 años de riego complementario. La combinación entre 7,4 tn $ha^{-1}$ materia seca de rastrojo y 1,5 tn $ha^{-1}$ yeso fue el tratamiento significativamente diferente, encontrándose mejoras en las propiedades edáficas tales como contenido de materia orgánica, estructura, infiltración y movilización de sodio. Además, remarcaron la importancia de la materia orgánica como reservorio de elevadas concentraciones de calcio.

Martínez *et al.* (2001) tras medir el efecto de los cationes calcio, magnesio, potasio y sodio sobre diferentes tipos de arcillas saturadas con los mismos elementos, encontraron que cada mineral de arcilla presenta selectividad por diferentes cationes. Para suelos con predominancia de illita, cuando se lo saturaba con magnesio, este era desplazado con mayor facilidad por el calcio. Mientras que cuando la muestra era saturada por calcio el desplazamiento siguió el orden descendente magnesio, potasio, sodio. Además llegaron a la conclusión que independientemente del mineral de arcilla predominante, el poder de desplazamiento es calcio, potasio, magnesio, sodio. Los tratamientos con magnesio favorecieron una mayor adsorción de sodio y potasio, además, produjeron un deterioro de las propiedades físicas del suelo. El sodio es desplazado con la misma intensidad tanto por calcio que como con magnesio. Concluyendo que en presencia de elevadas

proporciones de cationes monovalentes, el empleo de aguas con predominio de magnesio afecta en mayor grado la conductividad hidráulica de los suelos illíticos.

Génova (2005) distingue a los períodos con balance hídrico positivo como el principal factor de reversibilidad de suelos con contenidos de sodio elevados debido al riego complementario con agua de baja calidad. En correlación con esto, Marano (2004) luego de estudiar la reversibilidad por lluvias en Argiudoles ácuico en equilibrio con aguas RAS 6, 12, 18, 24, llegaron a la conclusión que este proceso es factible para niveles de hasta RAS 6, pero este lavado no revierte la disminución de la conductividad hidráulica saturada. Sasal *et al.* (2000) y Marano *et al.* (2008) también confirman reducciones en los valores del PSI debido a la ocurrencia de lluvias excepcionales.

Después de estudiar la lixiviación de iones en suelos tratados con enmiendas, Vázquez *et al.* (2008) llegaron a la conclusión que el uso de estas aumentan la lixiviación de los mismos en cantidades no relacionadas al aporte realizado por las enmiendas. Además, corrobora la importancia de las precipitaciones en el lixiviado de iones.

Quintero *et al.* (2006), encontraron mejoras en las condiciones físicas (estabilidad estructural) y químicas (reducción del PSI) del suelo tras utilizar combinaciones de yeso y enmienda orgánica.

Respecto a la utilización de ácido sulfúrico como enmienda, Camilión *et al.* (1983) determinaron que el ataque producido por el ácido a los minerales de arcilla de un Natracualf, son de baja significancia y poseen selectividad, siendo la illita en donde se observa un leve cambio en su red cristalina, mientras que no encontraron cambios en esmectita y caolinita. Por otro lado, Grillo *et al.* (1983) no encontraron efectos significativos del ácido sulfúrico sobre microorganismos celulolíticos, glucidolíticos y amonificadores después de tratar el suelo con 5 y 10 tn $ha^{-1}$ de ácido sulfúrico.

Los conceptos y antecedentes presentados en este capítulo demuestran y corroboran el efecto del riego complementario sobre las propiedades físicas y químicas del suelo. Esto

hace que controlar y/o revertir estos efectos tomen relevancia y fundamenten la necesidad de conocer los efectos de algunas enmiendas utilizadas para revertir los efectos producidos por el riego complementario con aguas de baja calidad en suelos del sudeste de Córdoba sobre algunas propiedades químicas y físicas de los mismos. Este conocimiento nos permitirá tener una herramienta más para alcanzar sistemas de producción sustentables.

# 2 HIPÓTESIS

- El valor de PSI final alcanzado en los hapludoles del sudeste de Córdoba bajo riego complementario tratados con enmiendas azufradas difiere del PSI final deseado en función del tipo de enmienda utilizada a dosis equivalentes y del PSI inicial.

# 3 OBJETIVOS

## 3.1 Objetivo General

- Evaluar el efecto de tres enmiendas a base de azufre sobre algunas propiedades físicas y químicas de un Hapludol serie San Ana del sudeste de la provincia de Córdoba con diferente historial de riego complementario.

### 3.1.1 Objetivos específicos

- Verificar el efecto del riego complementario sobre algunas características físico-químicas (pH y CE) y químicas (bases de intercambio y T) de un Hapludol serie Santa Ana del sudeste de Córdoba.
- Estudiar bajo lluvia simulada el efecto de la aplicación de yeso agrícola, ácido sulfúrico y su combinación en dosis equivalentes sobre el pH, la CE, las bases intercambiables, el valor de Hissink (T), el PSI, la MO y el IEA del espesor 0-10 cm de un Hapludol serie Santa Ana del sudeste de Córdoba con diferente historia de riego complementario.

# 4 MATERIALES Y MÉTODOS

## 4.1 Caracterización edafoclimática del sitio de estudio

El trabajo se desarrolló en base a suelo extraído de lotes bajo riego complementario del establecimiento La Querencia (Figura 4.1.1), ubicado en la localidad de Arias, sudeste de la Provincia de Córdoba. La localidad de Arias se encuentra ubicada (33°39 ′S-62°24 ′O) en el sur del departamento Marco Juárez a 121 msnm.

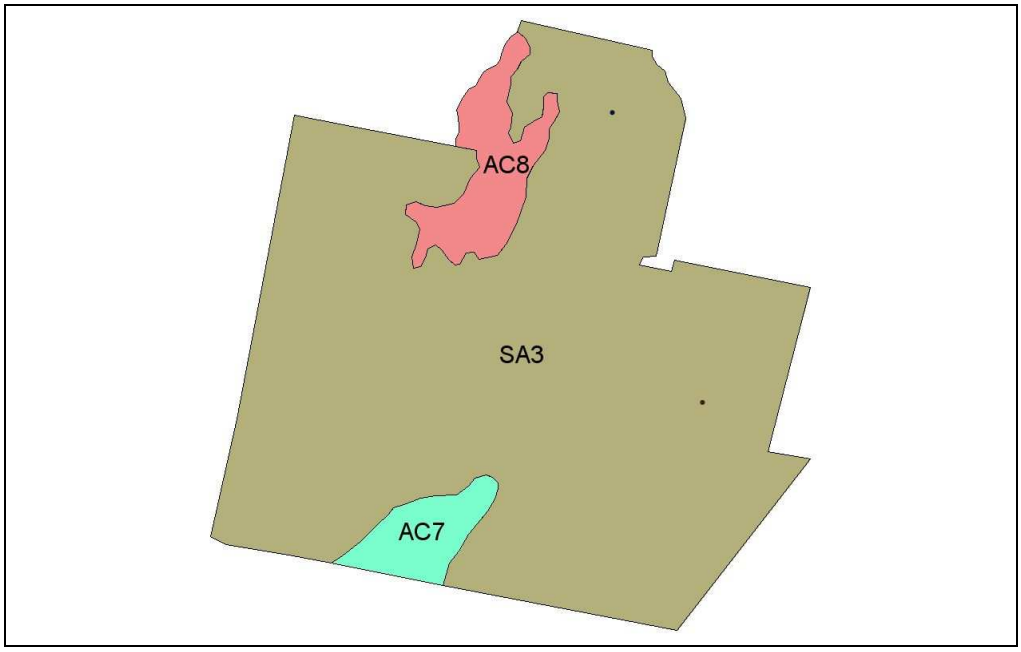
**Figura 4.1.1. Establecimiento La Querencia ubicado en la localidad de Arias, Provincia de Córdoba.**

El régimen pluviométrico histórico es de 876 mm (Tabla 4.1.1), distribuidos en dos semestres, uno lluvioso (octubre a marzo) en donde se concentra el 74% de las precipitaciones y uno seco (abril a septiembre) con el 26% de las precipitaciones restantes (Tabla 4.1.1). Su clima presenta oscilaciones interanuales, entre las condiciones húmedas y semiáridas, que caracterizan al sector occidental de la pradera pampeana.

**Tabla 4.1.1 Precipitación promedio histórico de Arias**

| | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Sep | Oct | Nov | Dic | Total |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Promedio Histórico mm | 108 | 96 | 126 | 75 | 41 | 25 | 25 | 24 | 47 | 92 | 102 | 114 | 876 |

La actividad principal del establecimiento La Querencia es la producción de semilla de maíz. Los lotes de producción se encuentran con sistemas de riego por aspersión de pivot central. Estos están emplazados casi en su totalidad en la unidad de suelos Santa Ana 3 (SA3) (Figura 4.1.2).




SA3: Asociación de series de suelo Santa Ana (80%), El Abolengo (20%). AC8: complejo de series de suelo Aarón Castellanos (50%), Santa Ana (30%), El Abolengo (20%). AC7: complejo de series de suelo Aarón Castellanos (30%), Santa Ana (40%), El Abolengo (30%).

**Figura 4.1.2 Series de suelo de los lotes bajo riego del establecimiento La Querencia en Arias, Provincia de Córdoba.**

El uso de la tierra en la unidad cartográfica Santa Ana es predominantemente agrícola ganadero. Predominan los suelos Hapludoles énticos. El relieve es ondulado con pendientes menores a 1%. El contenido promedio de materia orgánica es medio de 2,72% y la disminución relativa respecto a la situación prístina es media, del orden del 30%. La unidad Santa Ana 3 se encuentra compuesta por un 80% de la Serie Santa Ana y 20% El

Abolengo. Los perfiles de Santa Ana ocupan las situaciones de loma y media loma, mientras que en los sitios cóncavos o con ligera pendiente se encuentra la serie El Abolengo. El suelo de la serie Santa Ana es un Hapludol éntico y la serie El Abolengo está representado por un Hapludol típico. Estos, se desarrollaron a partir de sedimentos eólicos de textura franco arenosos. Son suelos productivos con algunas limitaciones de retención de humedad, bajo contenido de materia orgánica y baja fertilidad química. En el Anexo 8.1.1 y 8.1.2 se encuentra la caracterización físico-química de los perfiles en cuestión.

**Tabla 4.1.2 Propiedades físicas y químicas de la unidad Santa Ana y estimación de las pérdidas por erosión hídrica según el uso de las tierras (Michelena *et al.,* 1980).**

| Manejo | Propiedades físicas y químicas | | | | | | Pérdida de suelo ($tn.ha^{-1}.año$) | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | pH | | MO (%) | | IE | | Potencial | Actual |
| | Contenido | CV% | Contenido | Pérdida | Contenido | Pérdida | | |
| Prístino | 6,25 | 4,8 | 3,89 | - | 1,13 | - | 54,00 | - |
| Rotación Agrícola Ganadera | 5,87 | 7,7 | 2,72 | 30,00 | 2,62 | 51,90 | 39,60 | 26,60 |
| Agricultura Continua | 5,48 | 6,5 | 2,17 | 44,30 | 3,28 | 74,80 | 28,50 | 47,20 |

MO: materia orgánica. IE: índice de estabilidad (método De Boodt y De Leenheer). Escala clasificatoria: <2,0 mm bien estructurado, 2,0-2,5 mm medianamente estructurado, >2,5 mm pobremente estructurado.

La rotación que se realiza en los lotes de producción es maíz semilla-doble cultivo trigo/soja (M-T/S). La alta demanda hídrica del cultivo maíz, sumado al bajo potencial de rendimiento de las líneas hembras de maíz fueron las condiciones prioritarias que hicieron al establecimiento sistematizar su producción con sistemas de riego, con el fin de evitar los períodos de déficit hídricos durante floración y llenado de grano, ya que repercuten fuertemente sobre el rendimiento.

## 4.2 Diseño y desarrollo del ensayo

El ensayo se llevó a cabo en macetas bajo lluvia simulada en las instalaciones de la EEA Pergamino de INTA. Para cumplir con el interés del trabajo se seleccionaron dos

lotes, uno con 15 y otro con 5 años de riego complementario. En la Tabla 4.2.1 se observa las características físico-químicas de las aguas utilizadas para regar ambos lotes y su clasificación según Richard Ed. (1970).

**Tabla 4.2.1. Características físico-químicas de las aguas utilizadas para regar.**

| | Lote | |
|---|---|---|
| | 5A | 15A |
| pH | 8,29 | 7,32 |
| CE (dS $m^{-1}$) | 2,12 | 3,54 |
| TSD (g $l^{-1}$) | 1,68 | 2,98 |
| Ca (meq $l^{-1}$) | 0,28 | 0,60 |
| Mg (meq $l^{-1}$) | 0,22 | 0,45 |
| K (meq $l^{-1}$) | 0,18 | 0,18 |
| Na (meq $l^{-1}$) | 12,27 | 21,32 |
| Bicarbonatos (meq $l^{-1}$) | 3,23 | 3,28 |
| Carbonatos (meq $l^{-1}$) | 0,00 | 0,00 |
| RAS | 24,54 | 29,42 |
| CSR | 2,73* | 2,23** |
| Aptitud | C3S3 | C4S4 |

5A: suelo con 5 años de riego complementario. 15A: suelo con 15 años de riego complementario. pH: potencial hidrógeno. CE: conductividad eléctrica. TSD: total de sólidos disueltos. Ca: calcio. Mg: magnesio. K: potasio. Na: Sodio. RAS: relación de adsorción de sodio. CSR: carbonato de sodio residual. Aptitud: clasificación según Richard Ed. 1970.
*No recomendable. **Poco recomendable.

En mayo de 2011 se realizó el muestreo de suelo que se utilizó para el armado de las macetas. El mismo consistió en la toma de muestras compuestas de 0-10 cm de profundidad: cuatro muestras compuestas de la situación bajo riego de cada lote y cuatro muestras compuestas de la situación sin riego de cada lote. El muestreo se realizó solo en las lomas y medias lomas con el fin de trabajar sobre la serie de suelo Santa Ana. Las muestras extraídas se secaron en estufa y se tamizaron con un tamiz de 2 mm de diámetro de malla. A su vez, a las mismas se les realizó un diagnóstico físico-químico, para determinar el efecto del riego complementario (esquina vs bajo riego) y determinar la situación inicial del ensayo (situación bajo riego). Se realizaron las siguientes determinaciones:

- Químicas:
    - Acidez del suelo (pH): pH actual, Método potenciométrico, relación Suelo/Agua 1:2,5 (SSSI, 1930).
    - Conductividad eléctrica (CE): relación Suelo/Agua 1:2,5 (Schofield y Taylor, 1955).
    - Carbono total (C): Combustión húmeda (Walkley y Black, 1934).
    - Bases de cambio: Saturación de amonio (Schollenberger y Simon, 1945).
    - Capacidad de intercambio catiónico (T): Saturación de amonio (Schollenberger y Simon, 1945).
- Físicas:
    - Capacidad de campo (CC): olla extractora de presión 0,33 atm (ISO/FDIS 11274, 1998).
    - Punto de marchitez permanente (PMP): placa extractora de presión 15 atm (ISO/FDIS 11274, 1998).
    - Índice de Estabilidad de los Agregados (IEA): Agitación en agua de los agregados de 1 a 2 mm (Douglas y Goss, 1982 modificado). La valoración del IEA fue: IEA < 20%: inestable; IEA entre 20 y 40%: moderadamente estable y IEA > 40%: estable.
    - Textura: Determinación del tamaño de partícula por sedimentación, Método de la pipeta (AFNOR 83248, 1983).

La densidad aparente (Dap) se determinó utilizando las ecuaciones propuestas por Chen *et al.* (1998). Del mismo modo, y teniendo el valor de densidad aparente calculado y el valor de densidad real que presenta un suelo franco arenoso, se calculó la porosidad total.

En base a la caracterización físico-química de los suelos se realizó el diseño del ensayo. El experimento constó de cuatro enmiendas con cuatro repeticiones de la situación bajo riego de ambos lotes. Los tratamientos probados fueron los siguientes:

- Situación del suelo:
    - 15 años de riego complementario (15A).
    - 5 años de riego complementario (5A).
- Enmiendas:
    - Testigo: sin enmienda (Te).
    - Tratamiento 1: Yeso (Y).
    - Tratamiento 2: Yeso + Ácido sulfúrico (Y+AS).
    - Tratamiento 3: Ácido sulfúrico (AS).

El ensayo se preparó en macetas de polietileno negro (macetas para almácigos) de un litro de capacidad, con perforaciones en el fondo que facilitaron el drenaje. Para el llenado de las macetas se pesó la cantidad de suelo seco necesario para alcanzar en 10 cm de altura la densidad aparente estimada (1,37 g $cm^{-1}$). La compactación se realizó con una prensa manual y un disco de madera 10 cm de diámetro para lograr una distribución pareja de la presión y un caño de PVC de 10 cm de diámetro como soporte periférico para evitar la rotura de las macetas durante el proceso. Se simuló la situación real de campo, rotación M-T/S bajo SD, cubriendo la superficie del suelo con una masa de rastrojo equivalente a una cobertura de 11,5 tn $ha^{-1}$ de rastrojo. Para esto, se extrajo una muestra de rastrojo de un lote con rotación M-T/S, el cual fue cortado en residuos de un centímetro de largo y homogeneizado.

El diseño experimental seleccionado para el ensayo fue un arreglo factorial de los tratamientos (situación de suelo y enmienda) en un Diseño Completamente Aleatorizado (DCA), descrito por el siguiente modelo:

$$y_{ijk} = \mu + \tau_i + \alpha_j + (\tau\alpha)_{ij} + \varepsilon_{ijk}$$

En donde i = 1 a 2; j = 1 a 4; k = 1 a 4.

$y_{ijk}$ : Variable respuesta correspondiente a la i-ésima situación con la j-ésima enmienda en la k-ésima repetición.

$\mu$: media general.

$\tau_i$: Efecto de la i-ésima situación.

$\alpha_j$: Efecto de la j-ésima enmienda.

$(\tau\alpha)_{ij}$: Efecto conjunto de la i-ésima situación en la j-ésima enmienda.

$\varepsilon_{ijk}$: Error aleatorio de la i-ésima situación en la j-ésima enmienda de la k-ésima repetición.

Las macetas se acomodaron al azar en una cuadrilla de ocho por cuatro (Anexo 8.2). El ensayo se desarrolló bajo techo en un ambiente homogéneo. Debajo de las macetas se colocaron recipientes que permitieron recuperar los drenajes para monitorear la evolución del experimento.

Antes de aplicar los tratamientos, se llevaron las macetas a 70% de CC y se las mantuvo en esa condición durante una semana para que se restablezcan los procesos químicos y biológicos del suelo.

La determinación de las dosis de las enmiendas a utilizar, se hicieron en base a un PSI final (PSIf) deseado. Se propuso un PSIf de 5% para ambos suelos y se partió de un PSI inicial de 15,19 y de 9,05% para los suelos con 15 y 5 años de riego complementario, respectivamente. Se calculó que para alcanzar el PSI objetivo era necesario desplazar 1,51 meq 100 $g^{-1}$ y 0,58 meq 100 $g^{-1}$ de sodio del complejo de intercambio de los suelos con 15 y 5 años de riego complementario, respectivamente. Esto se calculó según la siguiente ecuación:

$$Na_{a\,movilizar} = Na_{inicial} - \frac{PSI_{final}}{PSI_{inicial}} * Na_{inicial} \qquad (V)$$

Mediante el cálculo del RY (IV) se determinó la dosis de yeso para el tratamiento Y (con F = 1,3, profundidad: 10 cm y pureza: 65%). En base a este cálculo se determinaron el resto de los tratamientos. En el tratamiento Y+AS se reemplazó un 50% de la dosis de yeso por ácido sulfúrico y en el tratamiento AS, se reemplazó la totalidad de la dosis de yeso del tratamiento por su equivalente en ácido sulfúrico (según Tabla 1.3.1). En la Tabla 4.2.2 se muestran las dosis resultantes por suelo y tratamiento.

**Tabla 4.2.2 Dosis de enmiendas aplicadas por tratamiento y suelo.**

| Tratamiento | Y | Y+AS | | AS |
|---|---|---|---|---|
| Suelo | Yeso (kg ha$^{-1}$) | Yeso (kg ha$^{-1}$) | Ácido sulfúrico (kg ha$^{-1}$) | Ácido sulfúrico (kg ha$^{-1}$) |
| 15A | 3555 | 1777 | 659 | 1317 |
| 5A | 1369 | 684 | 254 | 507 |

15A: Suelo con 15 años de riego complementario y 15,19% de PSI. 5A: suelo con 5 años de riego complementario y 9,05% de PSI. Y: tratamiento con yeso. Y+AS: tratamiento con yeso y ácido sulfúrico. AS: tratamiento con ácido sulfúrico.

Para cubrir el requerimiento de yeso se utilizó yeso agrícola sólido granulado. Se realizaron pruebas de solubilidad, las cuales manifestaron elevado tiempo para que se produzca la disolución y se incorpore al suelo. Para mejorar la velocidad de incorporación al suelo, el yeso fue molido en mortero y tamizado con un tamiz de 210 µm de diámetro de malla. La aplicación se hizo al voleo sobre el rastrojo.

Debido a la condición líquida del ácido sulfúrico, fue necesario transformar la dosis de unidad peso (kg) a unidad de volumen (litros). Se utilizó una solución comercial para laboratorio con una densidad de 1,84 g cm$^{-3}$ y una pureza de 96,5%. El cálculo de los litros requeridos se realizó mediante la siguiente fórmula:

$$Litros\,de\,Ácido\,Sulfúrico = \frac{AS}{\delta * P} \qquad (VI)$$

En donde AS es el requerimiento de ácido sulfúrico en kg ha$^{-1}$; $\delta$ es la densidad del ácido sulfúrico (g cm$^{-3}$ o kg l$^{-1}$); P es la pureza del ácido sulfúrico comercial.

En la Tabla 4.2.3 se observan las dosis de ácido sulfúrico en litros ha$^{-1}$.

**Tabla 4.2.3. Dosis de ácido sulfúrico utilizadas en los tratamientos Y+AS y AS (l ha$^{-1}$).**

| Suelo | Y+AS | AS |
|---|---|---|
| 15A | 371 | 742 |
| 5A | 143 | 286 |

15A: Suelo con 15 años de riego complementario y 15% de PSI. 5A: suelo con 5 años de riego complementario y 9% de PSI. Y+AS: tratamiento con yeso y ácido sulfúrico. AS: tratamiento con ácido sulfúrico.

Con las dosis determinadas se calcularon las dosis equivalentes para las macetas (Tabla 4.2.4).

**Tabla 4.2.4. Dosis equivalentes utilizadas en las macetas.**

| Tratamiento | Y | Y+AS | | AS |
|---|---|---|---|---|
| Suelo | g maceta$^{-1}$ | Y<br>g maceta$^{-1}$ | AS<br>ml maceta$^{-1}$ | Ácido sulfúrico<br>ml maceta$^{-1}$ |
| 15A | 2,66 | 1,33 | 0,28 | 0,55 |
| 5A | 1,07 | 0,54 | 0,11 | 0,22 |

15A: Suelo con 15 años de riego complementario y 15,19% de PSI. 5A: suelo con 5 años de riego complementario y 9,05% de PSI. Y: tratamiento con yeso. Y+AS: tratamiento con yeso y ácido sulfúrico. AS: tratamiento con ácido sulfúrico.

Para evitar hidrofobicidad del rastrojo hacia los tratamientos, el mismo fue humedecido con agua destilada mediante un aspersor manual. El yeso se aplicó antes del riego y el ácido sulfúrico junto al mismo.

Las lluvias simuladas se realizaron con agua destilada. Una vez aplicados los tratamientos, las macetas se mantuvieron durante dos semanas a 90% de CC mediante riegos periódicos. Luego de este periodo, se inició el proceso de lavado, aplicando un total de 237 mm (equivalente a las precipitaciones del otoño para la localidad de Arias). A las veinticuatro horas de aplicada la lluvia se recuperaba y juntaban los drenajes según suelo y tratamiento para analizar en el laboratorio la evolución del ensayo, determinando el volumen drenado, pH, CE, contenido de sodio. En total se realizaron diez lavados distribuidos en forma semanal por suelo y tratamiento.

Una vez realizados los diez lavados, en donde se logró desplazar aproximadamente cinco veces la solución del suelo, se analizó en el laboratorio la situación final de las

variables químicas (pH, CE, MO, Bases de cambio, Capacidad de intercambio catiónico) y físicas (IEA) del suelo.

## 4.3 Análisis estadístico

La comparación de los valores medios de las situaciones con riego *vs.* sin riego se realizó mediante la Prueba t ($p<0,05$) (Infostat v. 2011).

Cumplidos los supuestos de normalidad (Shapiro-Wilks modificado) y homogeneidad de varianza (Prueba F) de las variables de interés, para evaluar el efecto de los tratamientos se realizó un análisis de la varianza (InfoStat v. 2011) según el modelo planteado (arreglo factorial en un DCA). La comparación de medias se realizó mediante el test de Tukey ($p<0,05$).

# 5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

## 5.1 Efecto del riego complementario

La Tabla 5.1.1 muestra el efecto del riego complementario (situación con riego *vs.* sin riego) sobre algunas propiedades químicas y físico-químicas del suelo.

**Tabla 5.1.1. Propiedades físico-químicas de la situación con riego y sin riego de los lotes con 5 y 15 años de riego complementario al momento de muestreo.**

| | 15A | | 5A | |
|---|---|---|---|---|
| | Con Riego | Sin riego | Con Riego | Sin Riego |
| MO (%) | 2,72 | - | 2,66 | - |
| pH* | 6,96 | 5,80 | 6,59 | 5,68 |
| CE (dS $m^{-1}$)* | 1,025 | 0,44 | 0,857 | 0,48 |
| Ca (meq $100g^{-1}$) | 8,80 | 8,85 | 9,32 | 8,80 |
| Mg (meq $100g^{-1}$) | 0,92 | 1,33 | 1,78 | 2,40 |
| Na (meq $100g^{-1}$)* | 2,25 | 0,10 | 1,30 | 0,10 |
| K (meq $100g^{-1}$) | 2,20 | 1,60 | 2,00 | 1,90 |
| S (meq $100g^{-1}$) | 14,17 | 11,89 | 14,40 | 13,2 |
| T (meq $100g^{-1}$) | 14,80 | 13,03 | 14,38 | 14,6 |
| PSI (%)* | 15,19 | 0,77 | 9,05 | 0,69 |

15A: suelo con 15 años de riego complementario. 5A: suelo con 5 años de riego complementario. pH: acidez del suelo. Esquina: situación sin riego. CE: conductividad eléctrica. Ca: calcio. Mg: Magnesio. Na: sodio. K: potasio. S: suma de bases intercambiables. T: Capacidad de intercambio catiónico. PSI: porcentaje de sodio intercambiable. *Variables que presentan diferencia significativa entre los valores medios de las situaciones bajo riego y esquina.

En ambas situaciones bajo riego, se encontraron aumentos significativos en los valores medios de las variables pH, CE, contenido de sodio y PSI, lo cual comprueba el efecto del riego complementario sobre dichas propiedades (Cerana (1980), Andriulo *et al.* (1998), Marano (2008), Mon *et al.* (2007)). El complejo de cambio asimiló 677,5 y 378 kg sodio $ha^{-1}$ del sodio aplicado durante los 15 y 5 años de riego complementario que recibió cada lote, respectivamente. El aumento de pH se debe explícitamente a la incorporación de este elemento al complejo coloidal a cambio de la reducción de la acidez de cambio y aumento de la suma de bases intercambiables (S). Al igual que lo encontrado por Martínez *et al*. (2001), el magnesio fue desplazado por sodio con mayor facilidad que el

calcio, ya que los valores del segundo no presentaron diferencias significativas entre ambas situaciones.

En las situaciones sin riego se encuentran suelos de acidez moderada, baja CE, T y saturación cálcica moderada. En cambio en las situaciones con riego, los suelos resultaron levemente ácidos, de escasa a moderada salinidad, moderadamente provistos de MO y con una T moderada. La diferencia entre estas dos situaciones es el PSI, en el lote con 15 años de riego es de 15,19% y en el de 5 años es 9,05% (Tabla 5.1.1), y aplicando la clasificación del Laboratorio de Salinidad de los EEUU (Richards Ed., 1970), se clasificó al lote 15A como sódico y el 5A como salino. Por otro lado, en las variables físicas (Tabla 5.1.2) no se encuentran diferencias significativas en los contenido de arcilla, limo y arena entre las situaciones bajo riego, lo que indica que se trata de suelos con la misma clasificación textural (franco arenosos).

**Tabla 5.1.2. Propiedades físicas de los suelos bajo situación de riego con 5 y 15 años de riego complementario al muestreo.**

| | Suelo | |
|---|---|---|
| | 15A | 5A |
| CC (%) | 19,54 | 19,86 |
| PMP (%) | 9,09 | 8,93 |
| Arcilla (%) | 16,61 | 17,03 |
| Arena (%) | 48,87 | 48,42 |
| Limo (%) | 34,52 | 34,55 |
| *Dap (g $cm^{-3}$) | 1,37 | 1,37 |
| IEA (%) | 61,0 | 50,5 |
| Porosidad (%) | 48,3 | 48,3 |

15A años: suelo con 15 años de riego complementario. 5A: suelo con 5 años de riego complementario. CC: capacidad de campo. PMP: punto de marchitez permanente. *Dap: densidad aparente (calculada por modelo Chen et al., 1998). IEA: índice de estabilidad de los agregados.

## 5.2 Efecto de las enmiendas sobre algunas propiedades químicas, físico-químicas y físicas del suelo

La Tabla 5.2.1 muestra los valores promedios de las propiedades edáficas evaluadas al final del ensayo por suelo y por enmienda. La interacción suelo x enmienda fue

significativa para las variables pH, calcio, magnesio, sodio, potasio, PSI, sodio removido por tratamiento e IEA, mientras que para la MO no hubo interacción.

**Tabla 5.2.1. Efecto de diferentes enmiendas sobre algunas propiedades físico-químicas, químicas y físicas del suelo en dos situaciones con diferente historial de riego (n=32).**

| SUELO | Te | Y | Y+AS | AS |
|---|---|---|---|---|
| | | ***pH*** | | |
| **15A** | 7,27 a* | 6,63 b | 6,24 c | 5,97 d |
| **5A** | 7,04 a | 6,66 b | 6,54 bc | 6,42 c |
| | | ***CE (dS $m^{-1}$)*** | | |
| **15A** | 0,623 b | 1,393 a | 0,749 b | 0,665 b |
| **5A** | 0,467 a | 0,467 a | 0,467 a | 0,438 a |
| | | ***Ca (meq 100 $g^{-1}$)*** | | |
| **15A** | 7,82 b | 8,86 a | 7,48 b | 7,20 b |
| **5A** | 7,06 c | 8,68 ab | 9,34 a | 8,28 b |
| | | ***Mg (meq 100 $g^{-1}$)*** | | |
| **15A** | 2,56 a | 2,42 a | 2,88 a | 3,32 a |
| **5A** | 2,12 ab | 2,40 a | 1,24 b | 1,08 b |
| | | ***Na (meq 100 $g^{-1}$)*** | | |
| **15A** | 1,35 a | 0,74 b | 0,40 c | 0,42 c |
| **5A** | 0,71 a | 0,43 b | 0,39 b | 0,39 b |
| | | ***K (meq 100 $g^{-1}$)*** | | |
| **15A** | 2,24 a | 1,90 b | 1,77 b | 1,85 b |
| **5A** | 1,76 a | 1,93 a | 1,88 a | 1,91 a |
| | | ***PSI (%)*** | | |
| **15A** | 9,70 a | 5,43 b | 2,95 c | 3,00 c |
| **5A** | 5,41 a | 2,97 b | 2,83 b | 2,73 b |
| | | ***Na removido por enmienda (meq 100 $g^{-1}$)*** | | |
| **15A** | 0,91 a | 0,60 b | 0,94 a | 0,93 a |
| **5A** | 0,59 a | 0,29 b | 0,32 b | 0,32 b |
| | | ***MO (%)*** | | |
| **15A**<br>**5A** | 2,74 **a**** | 2,67 **a** | 2,67 **a** | 2,66 **a** |
| | | ***IEA (%)*** | | |
| **15A** | 49 a | 25 b | 27 b | 24 b |
| **5A** | 20 a | 18 a | 16 a | 16 a |

15A: suelo con 15 años de riego complementario y 15% de PSI. 5A: suelo con 5 años de riego complementario y 9% de PSI. Te: testigo, sin tratamiento. Y: tratamiento con yeso. Y+AS: tratamiento con yeso y ácido sulfúrico. AS: tratamiento con ácido sulfúrico. pH: acidez del suelo. CE: conductividad eléctrica. Ca: calcio. Mg: Magnesio. Na: sodio. K: potasio. PSI: porcentaje de sodio intercambiable. Na removido por tratamiento: sodio removido por tratamiento menos sodio removido por el testigo. MO: materia orgánica. IEA: índice de estabilidad de los agregados.

* Interacción significativa: letras diferentes expresan diferencias significativas entre tratamientos dentro de una misma situación de suelo.

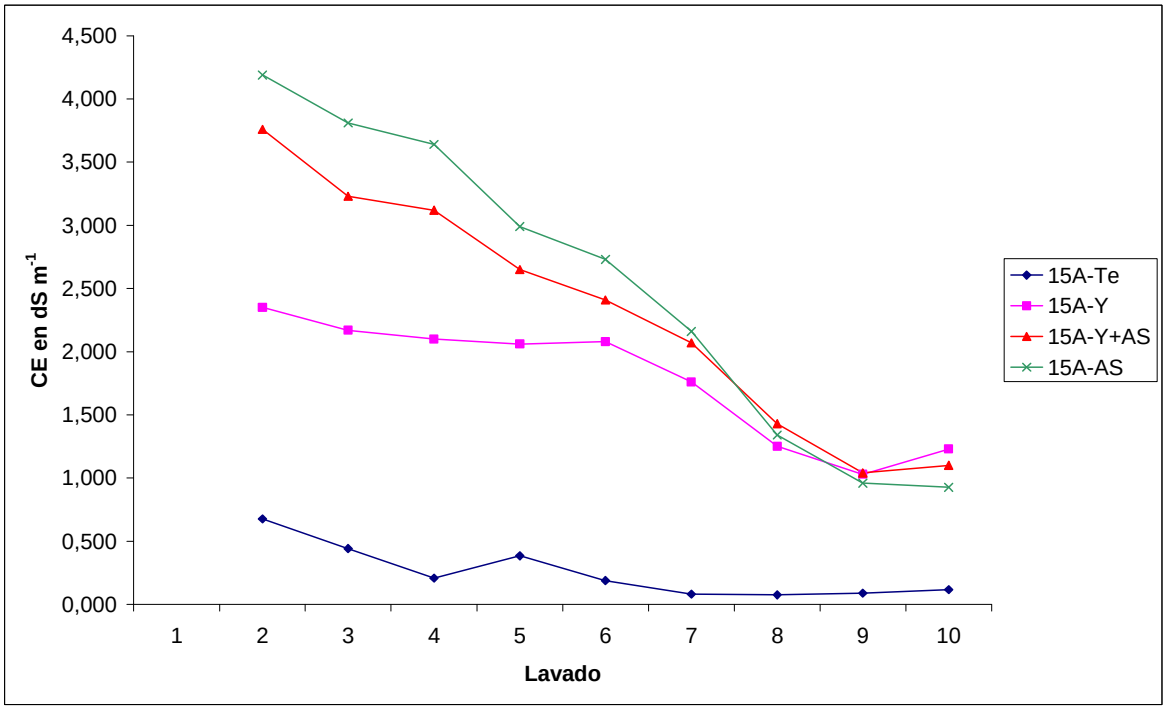
** Interacción no significativa: letras diferentes expresan diferencias significativas entre tratamientos.

### 5.2.1 Propiedades químicas y físico-químicas

#### 5.2.1.1 Acidez de cambio y conductividad eléctrica

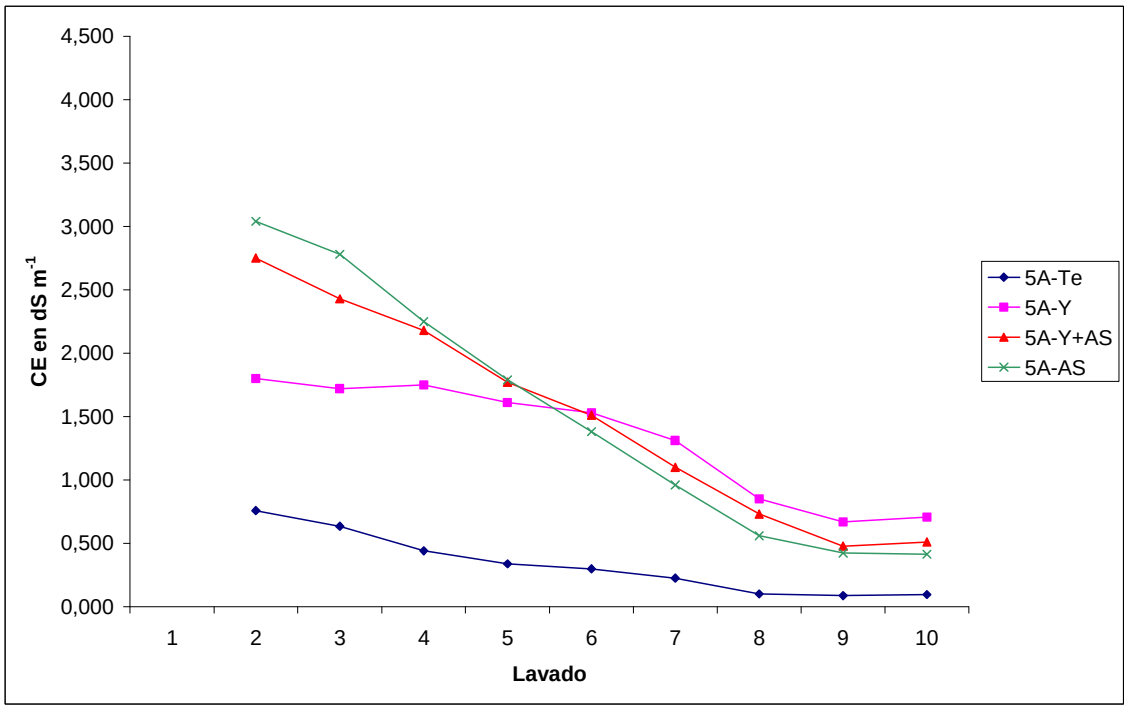
El pH fue la variable que mostró claramente el efecto de los tratamientos, respondiendo de la forma esperada. En el suelo 15A todos los tratamientos se diferenciaron entre sí, resultando clasificados de levemente ácidos (Y) a moderadamente ácidos (Y+AS y AS) con el aumento de la dosis de ácido sulfúrico. Respecto al suelo 5A el tratamiento Te se diferenció de los restantes y AS se diferenció de Y. En este suelo, a pesar de que se observó una tendencia en la reducción del pH con el aumento de la dosis de ácido sulfúrico, estas diferencias no fueron tan marcadas como las del suelo 15A debido a que la dosis de ácido usada fue un 60% menor. En los testigos se observó un incremento de 0,45 y 0,31 en el valor de pH para los suelos 15A y 5A, respectivamente, variación que coincide con la variación estacional del pH debido a la dilución de protones en la solución del suelo durante la época húmeda (Andriulo *et al*., 2000). A pesar de que el ácido sulfúrico redujo el pH, los valores finales obtenidos pueden considerarse aptos para la actividad agrícola.

Para la variable CE, solo el tratamiento Y del suelo 15A se diferenció del resto, debido, posiblemente, a que el yeso no haya completado su reacción y/o no se terminó de proceso de lavado, lo cual mantuvo elevada la concentración de sales y electrolitos en la solución del suelo. En el resto de los tratamientos se observaron reducciones promedio del 66 y de 54% para el suelo 15A y 5A, respectivamente. Dentro del mismo suelo los valores de CE tendieron a equilibrarse y no existieron diferencias entre el testigo y los tratamientos. La Figura 5.2.1 y la Figura 5.2.2 muestran como todos los tratamientos movilizaron mayor cantidad de sales en los primeros lavados. Los tratamientos con ácido sulfúrico mostraron una tendencia a presentar mayor CE desde el inicio de los lavados, como consecuencia de una mayor velocidad de reacción.




Lavado: número de lavado. CE: conductividad eléctrica del drenaje. 15A: suelo con 15 años de riego complementario y PSI igual a 15,19%. Te: testigo, sin tratamiento. Y: tratamiento con yeso. Y+AS: tratamiento con yeso y ácido sulfúrico. AS: tratamiento con ácido sulfúrico. El dato del primer lavado se eliminó debido a un error en su determinación.

**Figura 5.2.1. Evolución de la CE los drenajes del suelo 15A.**




Lavado: número de lavado. CE: conductividad eléctrica del drenaje. 5A: suelo con 5 años de riego complementario y PSI igual a 9,05%. Te: testigo, sin tratamiento. Y: tratamiento con yeso. Y+AS: tratamiento con yeso y ácido sulfúrico. AS: tratamiento con ácido sulfúrico. El dato del primer lavado se eliminó debido a un error en su determinación.

**Figura 5.2.2. Evolución de la CE en los drenajes del suelo 5A.**

#### 5.2.1.2 Calcio, magnesio y potasio

Al analizar los valores de los cationes, es necesario tener en cuenta que el único aporte extra de cationes que tuvieron los suelos fue en los tratamientos que contenían yeso, ya que el agua destilada no realiza ningún aporte.

Al igual que lo descripto por Vázquez *et al.* (2008), se encontró un aumento en la lixiviación de cationes, tanto en testigos como en suelos tratados con enmiendas. Respecto al magnesio, se encontraron valores que, en algunos casos, triplicaron a los valores iniciales, cuando era de esperar que este catión posea un comportamiento similar a los anteriores. Una de las principales causas que podría estar afectando el valor obtenido de este catión es su técnica de determinación en laboratorio, debido a que se realiza en forma indirecta por diferencia entre la determinación de calcio más magnesio y la determinación de calcio, lo cual hace que aumenten las fuentes de error (com. pers. Laboratorio Regional de Calidad de Suelos del INTA Pergamino).

#### 5.2.1.3 Sodio y porcentaje de sodio intercambiable (PSI)

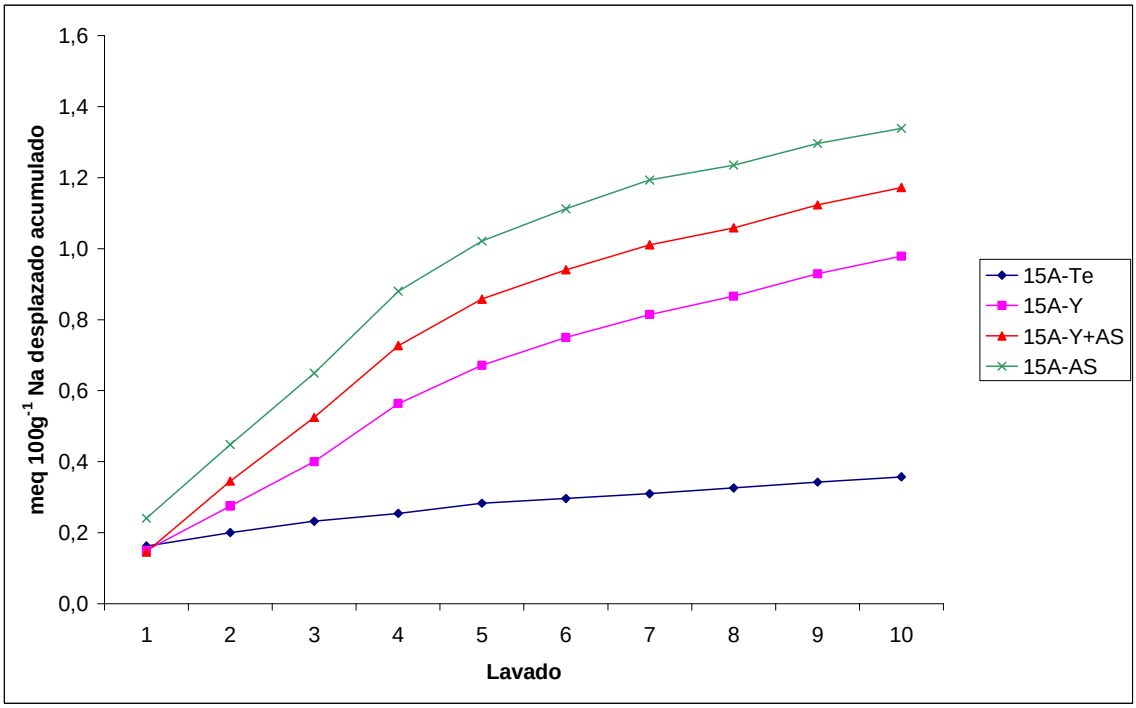
Respecto al catión sodio, al comparar los testigos de ambos suelos, se observó que el agua lo desplazó del complejo de intercambio. Esta removió 0,91 y 0,59 meq 100 $g^{-1}$ sodio en los testigos de los suelos 15A y 5A, respectivamente. Estos resultados indican que durante períodos con balance hídrico positivo, la lluvia movilizaría y lixiviaría sodio del complejo. Resultados similares fueron obtenidos por Cerana (1980), Sasal *et al.* (2000), Marano *et al.* (2004), Marano (2008), Vázquez *et al.* (2008). Además, se comprobó que, a medida que aumenta la concentración de sodio en el complejo de intercambio, este desplazamiento es mayor. En el suelo con 5A, el agua removió el total del sodio que era necesario desplazar para alcanzar la situación propuesta. El resto de los tratamientos de la misma situación de suelo se diferencian del testigo, pero no presentan diferencias significativas entre ellos lo cual no nos otorga una herramienta para seleccionar el tipo de enmienda. Pero en el suelo 15A, en donde la cantidad de sodio por movilizar era mayor,

el tratamiento Y se diferencia de Y+AS y AS. Esto podría deberse a una mayor velocidad de reacción del ácido sulfúrico en el suelo. Para mejorar la interpretación de estos resultados fue necesario analizarlos en conjunto utilizando la variable sodio removido por tratamiento que surge de la siguiente ecuación:

$$Sodio_{RxT} = ([sodio]_i - [sodio]_f) - sodio_{RxTe} \qquad (VII)$$

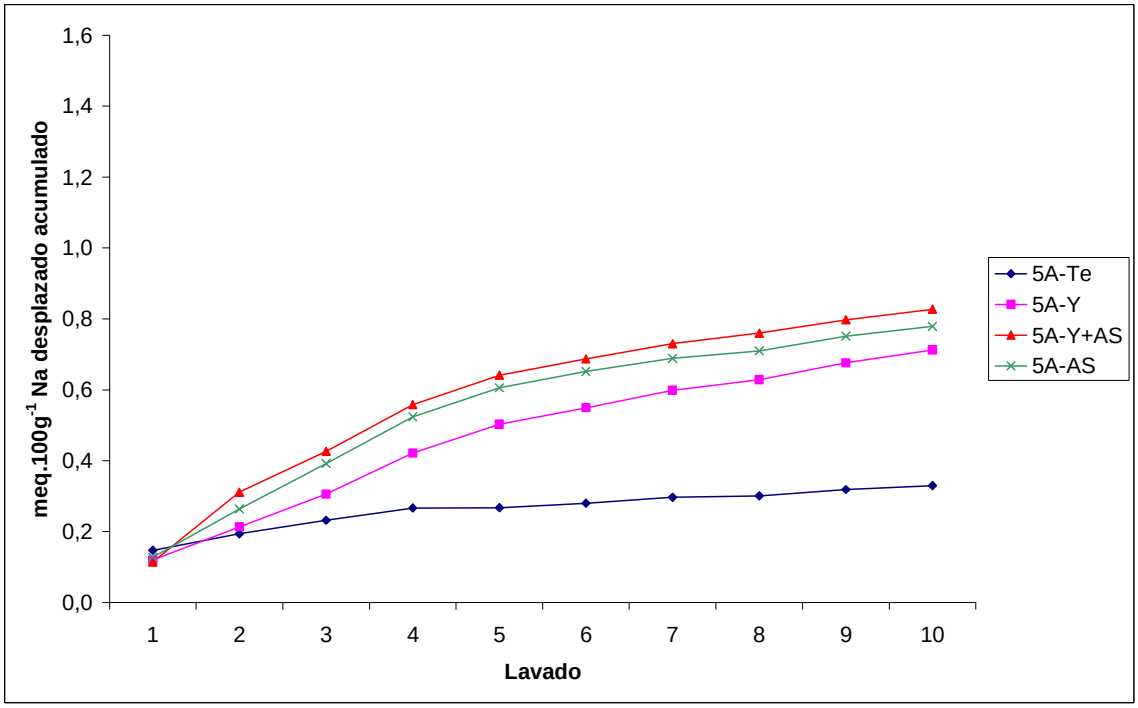
En donde, $sodio_{RxT}$ es el sodio desplazado por la enmienda (en meq 100 $g^{-1}$); $[sodio]_i$ y $[sodio]_f$ son la concentración de sodio inicial y final respectivamente (en meq 100 $g^{-1}$); $sodio_{RxTe}$ es el sodio removido por el testigo (en meq 100 $g^{-1}$).

Teniendo en cuenta esta variable, en todos los tratamientos las enmiendas movilizaron menos sodio que para lo que fueron calculadas. En el suelo 5A el sodio movilizado por el agua tuvo mayor peso que las enmiendas, mientras que en el 15A movilizó lo mismo que los tratamientos Y+AS y AS, diferenciándose solo del tratamiento Y. Esto permitió inferir que podría existir interacción entre el agua y la enmienda, y en caso de que el agua no haya lavado enmienda en los lavados, tendríamos un efecto residual de las mismas en el largo plazo. Otro factor a tener en cuenta es la cobertura de rastrojo, que podrían estar actuando como reservorio de enmiendas reteniéndolas y liberándolas en los lavados continuos. Las Figura 5.2.3 y Figura 5.2.4 muestran la evolución del lavado de sodio de los tratamientos. En los testigos de ambos suelos el lixiviado de sodio se incrementó en forma marcada hasta el cuarto y quinto lavado para el suelo 5A y 15A, respectivamente, y luego se alcanzó el plateau. Los tratamientos con enmiendas continuaron lixiviando sodio (a menor tasa) en los sucesivos lavados y no alcanzaron el plateau en el lavado diez.




Lavado: número de lavado. Lixiviado acumulado: sodio lixiviado acumulado a través de los lavados. Na: sodio. 15A: suelo con 15 años de riego complementario y PSI igual a 15,19%. Te: testigo, sin tratamiento. Y: tratamiento con yeso. Y+AS: tratamiento con yeso y ácido sulfúrico. AS: tratamiento con ácido sulfúrico.

**Figura 5.2.3. Sodio lixiviado acumulado (suelo 15A).**




Lavado: número de lavado. Lixiviado acumulado: sodio lixiviado acumulado a través de los lavados. Na: sodio. 5A: suelo con 5 años de riego complementario y PSI igual a 9,05%. Te: testigo, sin tratamiento. Y: tratamiento con yeso. Y+AS: tratamiento con yeso y ácido sulfúrico. AS: tratamiento con ácido sulfúrico.

**Figura 5.2.4. Sodio lixiviado acumulado (suelo 5A).**

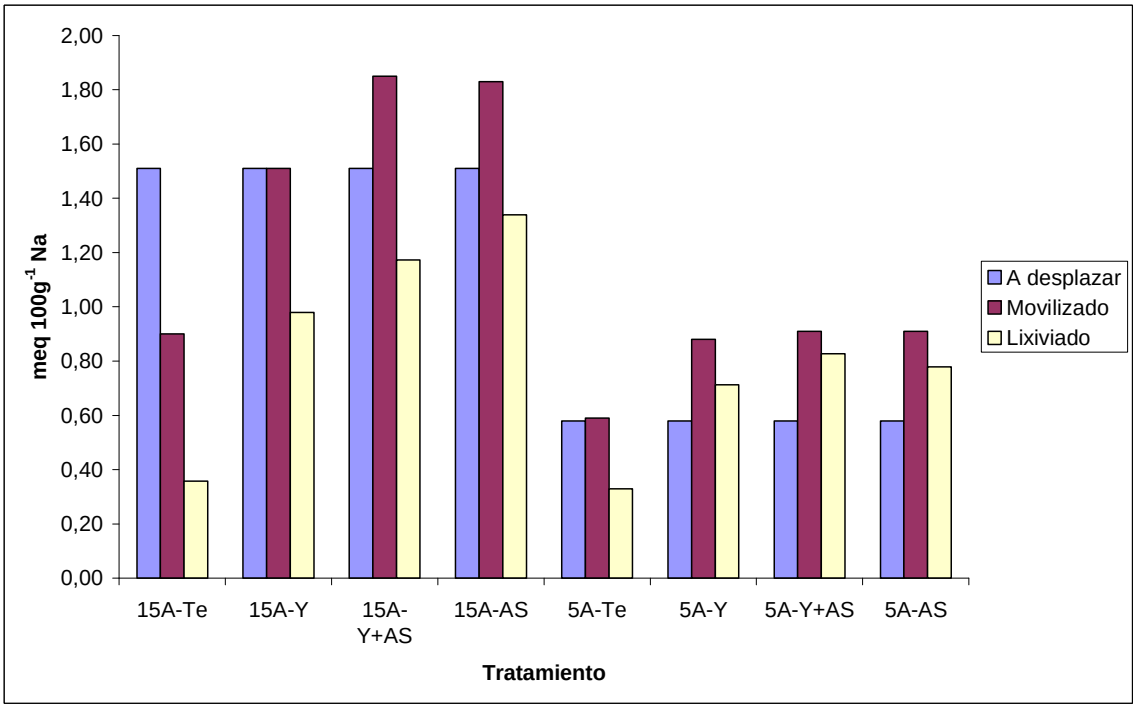
Los valores de cantidad de sodio lixiviado en el último lavado, presentados en la Tabla 5.2.2 muestran que los drenajes de los tratamientos con enmiendas triplican al de los testigos, esto daría la pauta que aún no finalizó el proceso de lavado.

**Tabla 5.2.2. Sodio lixiviado en el décimo lavado (meq 100g$^{-1}$ suelo)**

| | 15A | | | | 5A | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Te | Y | Y+AS | AS | Te | Y | Y+AS | AS |
| Na (meq 100g$^{-1}$) | 0,02 | 0,05 | 0,05 | 0,04 | 0,01 | 0,04 | 0,03 | 0,03 |

15A: Suelo con 15 años de riego complementario y 15% de PSI. 10° lavado: contenido de sodio del último lavado. 5A: suelo con 5 años de riego complementario y 9% de PSI. Y: Tratamiento con yeso. Y+AS: tratamiento con yeso y ácido sulfúrico. AS: tratamiento con ácido sulfúrico.

Al contrastar el sodio desplazado y lixiviado contra el sodio que era necesario movilizar para alcanzar el PSI final deseado (5%) se extraen tres resultados (Figura 5.2.5). Primero, como se remarcó anteriormente, salvo para el tratamiento Y del suelo 15A, en el resto de los tratamientos con enmiendas se observa que se desplazó más sodio que para lo que fueron calculadas las enmiendas. Segundo, al comparar el sodio desplazado contra el lixiviado en los testigos de las dos situaciones se observa que el agua lavó la misma cantidad de sodio y que en el suelo 5A el proceso de lavado fue más eficiente, debido a que había menos sodio para desplazar, en oposición al suelo 15A en donde todavía queda sodio por lixiviar, lo cual muestra un desacople entre el desplazamiento y la lixiviación. Esto tiene correlación con lo desarrollado por Génova (2005) quien propone a las precipitaciones que ocurren luego de la temporada de riego (otoño) como uno de los factores más importante para controlar el aumento del PSI. Tercero, cuanto menor es el número de años de riego hay mayor eficiencia de movilización y lavado. A diferencia de estados avanzados en donde se pierde efectividad, sobre todo de lavado, y la cantidad de enmienda a aplicar puede ser inviable debido a los costos.




15A: suelo con 15 años de riego complementario y PSI igual a 15,19%. 5A: suelo con 5 años de riego complementario y PSI igual a 9,05%. Te: testigo, sin tratamiento. Y: tratamiento con yeso. Y+AS: tratamiento con yeso y ácido sulfúrico. AS: tratamiento con ácido sulfúrico. A desplazar: sodio a remover para alcanzar PSI igual a 5% en ambos suelos. Movilizado: sodio desplazado del complejo de intercambio. Lixiviado: sodio acumulado total en los diez drenajes.

**Figura 5.2.5. Comparación del sodio a desplazar contra el movilizado y lavado.**

La importancia de las precipitaciones como agente recuperador sería más importante en los primeros años de riego complementario. Debido a que el problema del sodio es un proceso acumulativo y en los primeros años es menor la cantidad de sodio que hay que movilizar para mantener el PSI en valores aceptables (PSI menor al 5%). Además, más allá de que ocurran las precipitaciones, en el momento y cantidad necesaria para producir el lavado, el agua tendría siempre la misma capacidad de lavado (Figura 5.2.5).

El PSI posee el mismo comportamiento que el sodio debido a que se estima a partir de la relación entre sodio y capacidad de intercambio catiónico, siendo este último un valor poco variable para un suelo determinado. En general, salvo para el tratamiento Y del suelo 15A y los testigos de ambos suelos, en el resto de los tratamientos se alcanzó una condición similar a la que se describe en el perfil típico. El Te del suelo 5A se diferencia del resto de los tratamientos, siendo el único que llegó al PSI final deseado (5%), el resto de los tratamientos alcanzaron un valor más bajo. En el suelo 15A, el Te se diferencia del

resto e Y se diferencia de Y+AS y AS, esto hace llegar a la conclusión que a mayor PSI inicial las enmiendas o mezclas que poseen ácido sulfúrico inician el proceso de movilización con anticipación a la que tienen solamente yeso. El efecto del azufre, aportado por las enmiendas, sobre la movilización de sodio del complejo de intercambio coincide con los resultados obtenidos por Luque *et al.* (1992), Sasal *et al.* (2000), Quintero *et al.* (2006), Vázquez *et al.* (2008).

Para la mayoría de los tratamientos el modelo propuesto para el cálculo del requerimiento de yeso (RY (IV)) sobreestimó las dosis, salvo para el tratamiento Y del suelo 15A. Esto expresa la necesidad de ajustar la ecuación a situaciones como las analizadas en el ensayo. El factor F, de la ecuación de RY (IV), es el que mayor efecto tiene sobre la determinación de la dosis. El modelo determina que cuando el PSI final deseado es 5%, el valor de F debe ser 1,3, pero los resultados demuestran que es importante el valor de PSI del cual se parte. En el lote con PSI de 15,19% el tratamiento respondió de acuerdo a lo estimado, pero cuando se partió de un PSI igual a 9,05%, el PSI final fue menor al propuesto, por lo tanto hubo una sobreestimación de la dosis. Además, en el suelo 15A, como se explicó en los párrafos precedentes, cuando se incorporó ácido sulfúrico a los tratamientos en cantidades equivalentes a la dosis de yeso (50% de dosis yeso o 100% de la dosis), el PSI final alcanzado fue menor al estimado, debido a que este fue más eficiente y presentó mayor velocidad de respuesta, lo cual produce una doble sobreestimación de las dosis. Ajustar el valor de F a esta situación permitiría utilizar menos cantidad de enmienda, haciendo más rentable la práctica. Sería importante determinar la mínima dosis de ácido sulfúrico en combinación con yeso a partir de la cual se podría aprovechar los beneficios del primero.

#### 5.2.1.4 Materia orgánica

La MO no presenta diferencias significativas entre enmiendas y suelos, manteniéndose en los mismos valores que los iniciales. Esto muestra que los tratamientos con ácido

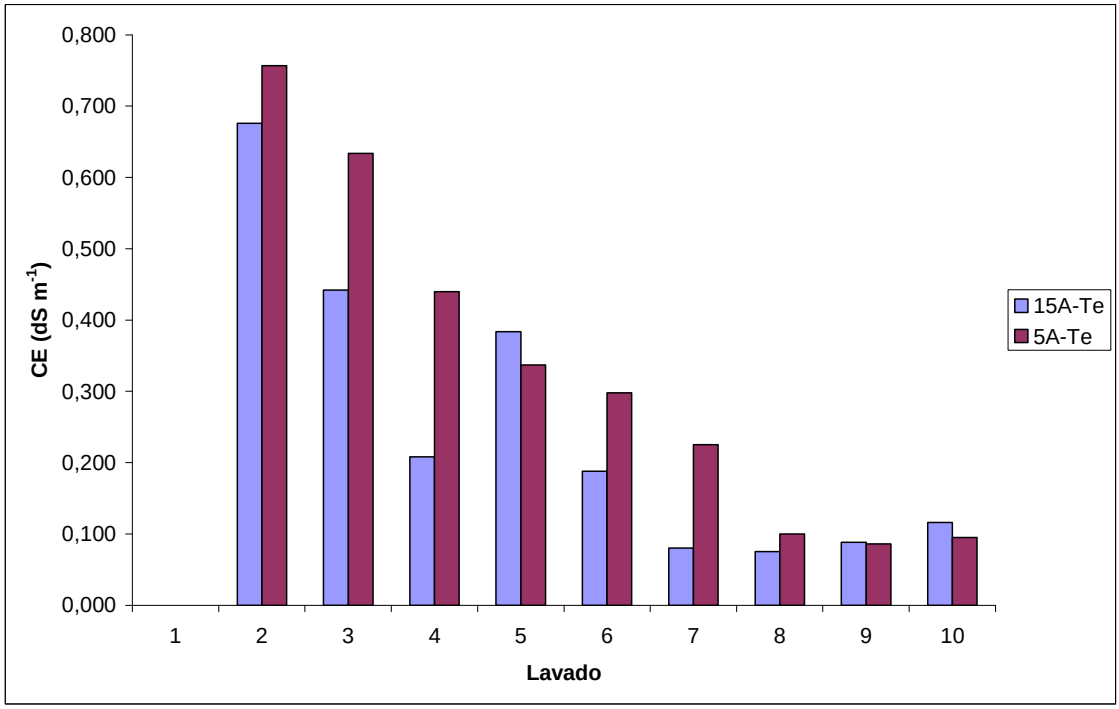
sulfúrico no degradaron la MO del suelo. A pesar de que el yeso se transforma en ácido sulfúrico, este proceso está regulado por una reacción de equilibrio. Por lo tanto, para correr la reacción hacia el producto es necesario eliminar ácido de la solución del suelo (por ejemplo, lixiviado de sulfato de sodio por lavado), lo cual hace que sea un proceso de liberación más lento, a diferencia de la aplicación directa de ácido sulfúrico que eleva rápidamente la concentración del mismo en la solución del suelo.

### 5.2.2 Propiedades físicas

#### 5.2.2.1 Índice de estabilidad de los agregados

El elevado IEA inicial es propio de los suelos de esta zona. Los udoles de textura franca arenosa tienen en su complejo de intercambio, por su origen, una elevada saturación de Ca, que sumado a una elevada relación MO-arcilla hace que presenten índices de estabilidad elevados (según relevamiento realizado por el grupo de Gestión Ambiental INTA Pergamino en campos de la zona). Al analizar la situación final del IEA se observan resultados muy disímiles a la situación inicial y a la esperada. En los testigos se observa una reducción del 20% (61 a 49,1%) para el suelo 15A y del 61% (de 50,5 a 19,6%) para 5A en los valores de IEA. La explicación de esta reducción se encuentra en el tipo de agua utilizada en el ensayo. La CE de la situación inicial (Tabla 5.1.1) indicaban presencia de sales y/o electrolitos, los cuales intervienen en el mantenimiento de la floculación del sistema a elevados valores de PSI (Baver *et al.* (1972), Suarez *et al.* (2006)). En la Figura 5.2.6 se observa como en con los sucesivos lavados el agua destilada lixivió sales y electrolitos presentes en la solución del suelo. Esto provocó la dispersión de arcillas y MO, situación que quedó en evidencia durante los lavados con el encharcamiento de las macetas testigo de ambos suelos (ver Anexo, Ilustración 8.3.1), estos resultados coinciden con los de Luque et al. (1995). Además, muestra que en el suelo 5A los valores de CE en los drenajes de los testigos fueron en su mayoría mayores a los del 15A, lo que

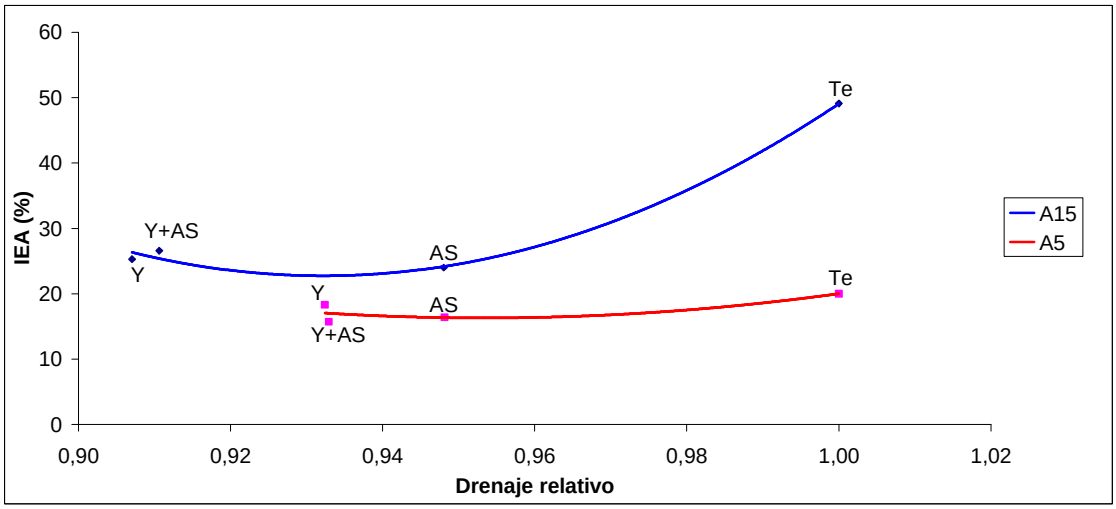
marca un mayor lavado de sales en el primero, con la consecuente pérdida de estabilidad. Debido a alta concentración de sodio en el suelo 15A, el lavado de sales produjo rápidamente la dispersión de la capa superficial con la conjunta reducción de la infiltración. Esta capa de reducida permeabilidad sirvió a modo de protección para el resto de la maceta e hizo que el agua escurra por flujo preferencial por las paredes de las macetas, arrastrando consigo arcillas asociadas a MO (Anexo, Ilustración 8.3.2). En acuerdo con lo encontrado por Cerana (1980), los tratamientos sin enmienda presentaron coloración intensa, a diferencia del resto que tuvieron drenajes más limpios, de leve coloración. Por lo tanto, cortar el riego en situaciones con elevado contenido de sodio, podría ser contraproducente debido a que las lluvias pueden lavar los excesos de sales que ayudan a mantener, en algunos casos, la floculación del sistema y la estabilidad de los agregados.




CE: conductividad eléctrica. Lavado: número de lavado. 15A: suelo con 15 años de riego complementario y PSI igual a 15,19%. 5A: suelo con 5 años de riego complementario y PSI igual a 9,05%. Te: testigo, sin tratamiento. El dato del primer lavado se eliminó debido a un error en su determinación.

**Figura 5.2.6 Comparación de la CE de los drenajes de los testigos de ambos suelos.**

El suelo 15A mostró mayor IEA en todos los tratamientos (Figura 5.2.7) debido a una mayor concentración de sales y electrolitos en la solución del suelo (CE final, Tabla 5.2.1).




IEA: índice de estabilidad de los agregados. Drenaje relativo: relación entre el volumen drenado por el tratamiento y el testigo de cada suelo. 15A: suelo con 15 años de riego complementario y PSI igual a 15,19%. 5A: suelo con 5 años de riego complementario y PSI igual a 9,05%. Te: testigo, sin tratamiento. Y: Tratamiento con yeso. Y+AS: tratamiento con yeso y ácido sulfúrico. AS: tratamiento con ácido sulfúrico.

**Figura 5.2.7 IEA en función del Volumen drenado relativo.**

La Tabla 5.2.3 muestra que los testigos de ambos suelos drenaron más que el resto de los tratamientos. En el resto de los tratamientos la incorporación de las enmiendas mantuvo elevado el nivel de sales y electrolitos de la solución manteniendo la conductividad hidráulica de las macetas. A pesar de mantener la permeabilidad, no impidieron la rotura de los agregados debido a la baja CE del agua destilada (Andriulo, 1999, Vázquez, 2001). Los valores similares de IEA entre los tratamientos con ácido sulfúrico y/o yeso indican que el ácido no tuvo efectos importantes sobre la estructura del suelo, siendo el agua destilada utilizada en el ensayo y las sales presentes en la solución del suelo las variables más influyentes sobre el mismo. A pesar de que en este ensayo no quedó demostrado la virtud del calcio en la mejora de la calidad estructural, la bibliografía demuestra lo contrario, priorizando la importancia de este catión en la estructura y permeabilidad del suelo. Estas conclusiones explican que los resultados obtenidos, para esta variable, podrían ser un artefacto del ensayo, y no presentan correlación con lo que sucedería en la situación de campo.

**Tabla 5.2.3 Drenaje acumulado por suelo y tratamiento (ml)**

| Suelo | 15A | | | | 5A | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Tratamiento | Te | Y | Y+AS | AS | Te | Y | Y+AS | AS |
| Drenaje Acumulado | 4196 | 3806 | 3821 | 3978 | 3877 | 3615 | 3617 | 3676 |

15A: suelos con 15 años de riego complementario y 15,19% PSI. 5A: suelos con 5 años de riego complementario y 9,05% PSI. Te: testigo, sin tratamiento. Y: Tratamiento con yeso. Y+AS: tratamiento con yeso y ácido sulfúrico. AS: tratamiento con ácido sulfúrico.

# 6 CONCLUSIONES

En Hapludoles del sudeste de Córdoba, el riego complementario con aguas de baja calidad produce salinización y sodificación del horizonte superficial. El uso de enmiendas azufradas para su mitigación resulta una herramienta eficiente y de rápida respuesta.

En situaciones de PSI elevado, la inclusión de ácido sulfúrico en la enmienda aumenta la velocidad de movilización y la eficiencia de los primeros lavados, reduciendo la cantidad de agua necesaria.

El modelo utilizado para la determinación del requerimiento de yeso sobrestima la dosis cuando se parte de valores de PSI cercanos al PSI final deseado mientras que muestra un mejor ajuste cuando esta diferencia es mayor.

Es esencial una mejor comprensión de los procesos que involucrados en la productividad del sistema productivo y el medio ambiente, a corto y largo plazo. Para esto, se debería profundizar el conocimiento multidisciplinariamente en el nivel regional, generar modelos para la cuantificación del impacto ambiental, y pronosticar y/o remediar los efectos perjudiciales del riego complementario.

La tendencia a la ocurrencia de eventos extremos en las precipitaciones de la región generada por el cambio climático, hace del riego una tecnología relevante como posible medida de adaptación a este proceso.

# 7 BIBLIOGRAFÍA

Abrego, F.; Andriulo, A.; Ferreyra, C; Galetto, M.L.; Galina, J.; Irurtia, C.; Mon, R.; Rimatori, F. y Sasal, C. 1998. Efecto de 11 años de riego complementario sobre algunas propiedades del suelo II. Propiedades físicas. En: Actas XVI Congreso Argentino de la Ciencia del suelo, Villa Carlos Paz.

Andriulo, A.; Galetto, M. L.; Ferreyra, C.; Cordone, G.; Sasal, C.; Abrego, F.; Galina, J. y Rimatori, F. 1998. Efecto de 11 años de riego complementario sobre algunas propiedades del suelo. Propiedades físico-químicas. En: Actas del XVI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Comisión IV, Villa Carlos Paz.

Andriulo, A.; Ferreyra, C. y Manavella, C. 1999. Impacto ambiental del riego complementario. Seminario de Capacitación. Proyecto INTA-IPG. Pergamino. Buenos Aires. 87 pp.

Andriulo, A.; Rivero, M. L.; Sasal, C., Abrego, F, Bueno, M., Rimatori, F., De la Cruz, M. A. 2000. Aspectos a tener en cuenta en la interpretación del valor de pH del suelo. Pp: 11:14. Revista de Tecnología Agropecuaria. INTA Pergamino. Tercer cuatrimestre. Septiembre/Diciembre.

Arens, P. L. 1969. Algunos efectos del riego suplementario sobre los suelos de la Pampa Ondulada. Pp: 98:102. Separata de las Actas de la V Reunión Anual de la Ciencia de Suelo. Editorial Castellvi, Santa Fe.

Baver, L. D.; Gardner, W. H. & Gardner, W. R. 1972. Estructura de los suelos clasificación y génesis. Pp: 138:165. En: Física de suelos. Primera Edición en Español. Unión tipográfica. Editorial Hispano-Americana. México DF.

Biondolillo, A. L.; Sobral; R. 1999. El riego complementario en las zonas húmedas. Pp: 347-351. En: Gestión Agropecuaria: De la teoría a la acción. Grupo Editor Latinoamericano, Nuevo hacer.

Camilión, M. C. y Lavado, R. 1983. Efecto del tratamiento con ácido sulfúrico sobre la fracción arcilla de un Natracualf. Ciencia del suelo 1(2): 105-108.

Cerana, J. A. 1980. Deterioro de los suelos a consecuencia de riegos con aguas poco salinas que contienen bicarbonatos. En: IX Reunión Argentina de la Ciencia del suelo. Paraná, Argentina.

Chen, Y.; Tessier, S & Rouffignat, J. 1998. Soil bulk density estimation for tillage systems and soil textures. Trans. ASAE. 41: 1601-1610.

Di Rienzo J.A.; Casanoves F.; Balzarini M.G.; Gonzalez L.; Tablada M. y Robledo C.W. InfoStat versión 2011. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. URL http://www.infostat.com.ar.

FAO. 1990. Characterics of gypsiferous soils. In: Management of gypsiferous soils. FAO Soil Bulletin 62. FAO Land and water development division. Soil resources, managment and conservation service. Italy. URL http://www.fao.org/docrep/t0323e/t0323e03.htm.

Fassbender, W. y Bornemisza, E. 1987. Suelos salinos y sódicos. Pp: 187-197. En: Química de suelos con énfasis en los suelos de América Latina. .2da Edición. Servicio Editorial IICA.

Génova, L. 2006. Salinidad y sodicidad de suelos regados complementariamente en la región pampeana. En: III Jornadas de riego y fertirriego. Mendoza, Argentina.

Grillo M. C.; Iribarne, M. I. y Ivanoff, O. R. 1983. Acción del ácido sulfúrico sobre los microorganismos del suelo. Estudio preliminar cualitativo. Revista de la Asociación Argentina de Ciencia del suelo 1(3): 95-97.

Luque, J. L. y Peinemann N. 1995. Conductividad hidráulica en suelos Vérticos del Valle Inferior del río Chubut frente a la aplicación de diferentes enmiendas. Ciencia del suelo 16: 70-75.

Marano, R. P. 2008. Riego suplementario con aguas bicarbonatadas sódicas en la región pampeana norte. Impacto después de 10 años. En: IV Jornada de riego y fertirriego. Mendoza, Argentina.

Marano, R.; Herzog, E.; Pilatti, M. e Imhoff, S. 2004. Tenor crítico de sodio intercambiable para evaluar el deterioro físico de un Argiudol y su reversibilidad con agua de lluvia. En: Actas XIX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Paraná. Entre Ríos.

Marano, R. y Pecorari, C. 1996. Efectos de la calidad del agua de riego sobre los suelos: Factores a tener en cuenta antes de iniciar la práctica del riego suplementario. Intensificación de la producción de granos. En: II Curso "Manejo del riego suplementario en los principales cultivos agrícolas". EEA INTA Rafaela. Santa Fe.

Martínez, R. S.; Zalba, P.; Villamil, M. B. y Peinemann, N. 2001. Efecto de cationes sobre propiedades hidrofísicas de suelos con diferentes minerales de arcilla. Ciencia del Suelo 19 (2): 85-91.

Michelena, R. O.; Irurtia, C. B.; Vavruska, F. A.; Mon, R. y Pittaluga, A. 1989. Degradación de suelos en el norte de la Región Pampeana. Publicación técnica N°6. INTA. Editorial Talleres Gráficos de la EEA INTA Pergamino.

Mon, R. e Irurtia, C. 2002. ¿Qué pasa con el riego complementario en los suelos de la Pampa Ondulada? Cuestión de suelos. Tranquera abierta al campo argentina. Año 5(264): 6.

Mon, R.; Irurtia, C.; Botta G. F.; Pozzolo, O.; Bellora Melcón, F.; Rivero, D. & Bomben, M. 2007. Effects of supplementary irrigation on Chemicals and fhysical soil properties in the Rolling Pampa region of Argentina. Ciencia e Investigación Agraria 34(3): 187-194.

Oster, J. D. & Frenkel H. 1980. The chemestry of the reclamation of sodic soils with gypsum and lime. Soil Sci. Soc. Am. J.44: 41-45.

Quintero, C.; Boschetti, N.; Durand Morat, A. y Fettolini, S. 2006. Capítulo II, Estudio de Casos. Recuperación de Suelos Dispersivos por medio de Enmiendas. Pp: 101- 108. En:

Bases para la Conservación de Suelos y Aguas en la Cuenca del Río Paraná. Ed: Antonio Paz González.

Richards, L. A. (Ed.). 1970. Manual Agricultura N° 60: Diagnóstico y rehabilitación de Suelos salinos y sódicos. Laboratorio de salinidad de los EEUU (USDA). Editorial Centro regional de Ayuda Técnica. Agencia para el Desarrollo Internacional. México / Buenos Aires. 172 pp.

Sasal, C.; Andriulo, A.; Rivero, M. L.; Bueno, M.; Abrego, F.; Rimatori, F. y De la Cruz, M. A. 2000. Efecto de la cobertura y de dos niveles de yeso sobre un suelo sodificado por riego complementario. En: Actas XVII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Mar del Plata. Buenos Aires.

Siebert, S.; Hoogeveen, J. & Frenken, K. 2006. Irrigation in Africa, Europe and Latin America. Update of the Digital Global Map of Irrigation Areas to Version 4. Frankfurt Hydrology Paper 05, Institute of Physical Geography, University of Frankfurt, Frankfurt am Main, Germany and Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy.

Suarez, D.; Wood, J. & Lesh, M. 2006. Effect of SAR on water infiltration under a sequential rain-irrigation managment system. Agricultural Water Management 86: 150-164.

Vázquez, M. E. 2001. Evaluación de la alteración de algunas propiedades edáficas de suelos bajo riego complementario en la provincia de Buenos Aires. Tesis Doctoral. Departamento Manejo de suelos y Aguas. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Universidad Nacional de La Plata.

Vázquez, M.; Millán, G. & Gelati, P. 2006. Efecto del riego complementario sobre la salinidad y sodicidad de diferentes suelos del NO y Centro-E de la provincia de Buenos Aires, Argentina. Revista de la Facultad de Agronomía-UNLP, La Plata 106(1): 57-67.

Vázquez, M.; Terminiello, A. y Millán, G. 2008. Lixiviación de iones en un suelo tratado con enmiendas carbonáticas y yeso. En: Actas XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Potrero de los Funes. San Luis.

# 8 ANEXOS

## 8.1 Series de suelos

### 8.1.1 Serie Santa Ana

Serie ESTANCIA SANTA ANA

Hapludol éntico, franca gruesa, mixta, térmica

**Descripción del perfil típico:**

El perfil que representa el concepto central de esta Serie fue estudiado a 13 Km al NNO de la Estación del FCGBM San Gregorio, en el departamento General López de la provincia de Santa Fe.

**A** 0-28 cm; color en húmedo pardo grisáceo muy oscuro (10YR3/2); franco; estructura en bloques subangulares medios moderados a grano simple; friable en húmedo; ligeramente plástico; ligeramente adhesivo; límite inferior claro, ondulado.

**AC** 28-61 cm; color en húmedo pardo grisáceo muy oscuro (10YR3/2); franco; estructura en bloques subangulares finos débiles; friable en húmedo; ligeramente plástico; ligeramente adhesivo; límite inferior gradual, ondulado.

**C** 61 cm. a +; color en húmedo pardo a pardo fuerte (7,5YR5/5); franco; masivo; muy friable en húmedo.

Datos analíticos de la Serie ESTANCIA SANTA ANA

Situación: Latitud: 34º13’21”S Longitud: 62º07’20”O Altitud: 121 m.s.n.m.

**Tabla 8.1.1 Serie de suelo Santa Ana.**

| SANTA ANA | | | | |
|---|---|---|---|---|
| **Horizonte** | | **A** | **AC** | **C** |
| Profundidad de la muestra (cm) | | 0-28 | 28-61 | 61 a + |
| Materia Orgánica (%) | | 2,81 | 0,36 | - |
| Carbono Orgánico (%) | | 1,63 | 0,21 | 0,04 |
| Nitrógeno total (%) | | 0,187 | 0,07 | - |
| Relación C/N | | 9 | - | - |
| Arcilla, <2 µ (%) | | 23,9 | 20,2 | 14,3 |
| Limo, 2-50 µ (%) | | 26 | 25,1 | 22 |
| Arena muy fina, 50-100 µ (%) | | 44,5 | 48,8 | 56 |
| Arena fina, 100-250 µ (%) | | 5,5 | 5,9 | 7,7 |
| Arena media, 250-500 µ (%) | | 0,1 | - | - |
| Arena gruesa, 500-1000 µ (%) | | - | - | - |
| Arena muy gruesa, 1-2 mm (%) | | - | - | - |
| Carbonatos, $CaCO_3$ (%) | | 0 | 0 | 0 |
| Equivalente de humedad (%) | | 20,3 | 16,8 | 13,3 |
| pH en pasta | | 6,2 | 6,4 | 6,9 |
| pH en agua (1:2,5) | | 6,7 | 7,2 | 7,5 |
| Cationes de intercambio, meq/100 gr: | $Ca^{++}$ | 10,5 | 7,7 | 7,3 |
| | $Mg^{++}$ | 2,3 | 3,4 | 3,5 |
| | $Na^{+}$ | 0,5 | 0,3 | 0,3 |
| | $K^{+}$ | 3,5 | 2,5 | 1,1 |
| | $H^{+}$ | 6,9 | 3,9 | 2,4 |
| Sodio de intercambio, % (PSI) | | 2,7 | 2,1 | 2,5 |
| Suma de bases, meq/100 gr (S) | | 16,8 | 13,9 | 12,2 |
| Capacidad de intercambio catiónico, meq/100 gr (T) | | 18,4 | 14,4 | 11,8 |
| Saturación con bases, % (S/T) | | 91 | 95 | 100 |

### 8.1.2 Serie El Abolengo

Serie EL ABOLENGO

Hapludol típico, franco fina, mixta, térmica

El perfil que representa el concepto central de esta serie fue estudiado a 15 km. al NW de la localidad de San Gregorio en el departamento General López, Provincia de Santa Fe y se describe a continuación:

**A1** 0-28 cm, gris muy oscuro (10YR3/1) en húmedo; estructura en bloques medios moderados; friable; límite inferior claro y suave.

**B2** 28-65 cm; pardo grisáceo muy oscuro (10YR3/2) en húmedo; franco arcillo arenoso; estructura en prismas medios débiles; firme; límite inferior claro y suave.

**B3** 65-98 cm; pardo a pardo oscuro (7,5YR4/4) en húmedo; franco arcillo arenoso a franco arenoso; estructura en bloques subangulares medios débiles; friable; límite inferior difuso.

**C** 98 cm a+: pardo (7,5YR5/4) en húmedo; franco arenoso; masivo, suelto

Tabla 8.1.2 Serie de suelo Abolengo.

| SERIE ABOLENGO | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **Horizonte** | | **A1** | **B2** | **B3** | **C** |
| Profundidad de la muestra (cm) | | 10-20 | 40-60 | 70-90 | 100-120 |
| Materia Orgánica (%) | | 2,21 | 0,86 | 0,4 | - |
| Carbono Orgánico (%) | | 1,28 | 0,5 | 0,23 | - |
| Nitrógeno total (%) | | 0,135 | 0,076 | - | - |
| Relación C/N | | 10 | 6 | - | - |
| Arcilla, <2 µ (%) | | 21,8 | 21,8 | 20,3 | 16,4 |
| Limo, 2-50 µ (%) | | 23,9 | 21,8 | 20,6 | 22,1 |
| Arena muy fina, 50-75 µ (%) | | 11,6 | 8,9 | 10,1 | 11,3 |
| Arena muy fina, 75-100 µ (%) | | 32,1 | 32,6 | 35,9 | 35,7 |
| Arena fina, 100-250 µ (%) | | 10,6 | 14,9 | 13,1 | 14,5 |
| Arena media, 250-500 µ (%) | | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Arena gruesa, 500-1000 µ (%) | | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Arena muy gruesa, 1-2 mm (%) | | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Carbonatos, $CaCO_3$ (%) | | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Equivalente de humedad (%) | | 18,2 | 16,6 | 14,2 | 13,4 |
| pH en pasta | | 5,9 | 6,6 | 6,8 | 7,2 |
| pH en agua (1:2,5) | | 6,3 | 7,1 | 7,4 | 7,6 |
| Cationes de intercambio, meq/100 gr: | $Ca^{++}$ | 8,5 | 7 | 6,3 | 4,8 |
| | $Mg^{++}$ | 1,6 | 2,9 | 3,2 | 4,5 |
| | $Na^{+}$ | 0,3 | 0,3 | 0,5 | 0,5 |
| | $K^{+}$ | 1,5 | 2,9 | 2,4 | 2,4 |
| | $H^{+}$ | - | - | - | - |
| Sodio de intercambio, % (PSI) | | 2,1 | 2,2 | 4,4 | 12,2 |
| Suma de bases, meq/100 gr (S) | | 11,9 | 13,1 | 12,4 | 12,2 |
| Capacidad de intercambio catiónico, meq/100 gr (T) | | 14,4 | 13,8 | 11,3 | 11,1 |
| Saturación con bases, % (S/T) | | 83 | 95 | 100 | 100 |

## 8.2 Distribución de las macetas

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 5A R2-Te | 15A R4-Y | 5A R4-Y | 5A R2-Y+AS | 15A R3-Te | 5A R3-Te | 5A R1-Te | 5A R3-Y |
| 15A R4-AS | 15A R2-Te | 15A R1-Y | 15A R2-AS | 15A R1-Y+AS | 15A R3-AS | 5A R4-AS | 5A R2-AS |
| 15A R3-Y+AS | 5A R1-Y+AS | 5A R3-Y+AS | 15A R1-AS | 15A R4-Te | 5A R2-Y | 15A R1-Te | 5A R1-AS |
| 5A R3-AS | 15A R4-Y+AS | 5A R4-Te | 15A R2-Y+AS | 5A R4-Y+AS | 5A R1-Y | 15A R2-Y | 15A R3-Y |

5A: Suelo con 5 años de riego complementario y 9,05% de PSI. 15A: suelo con 15 años de riego complementario y 15,19% de PSI. R1: repetición 1. R2: repetición 2. R3: repetición 3. R4: repetición 4. Te: testigo, sin tratamiento. Y: Tratamiento con yeso. Y+AS: tratamiento con yeso y ácido sulfúrico. AS: tratamiento con ácido sulfúrico.

**Ilustración 8.2.1 Distribución de las macetas en el ensayo.**

## 8.3 Ilustraciones

**Ilustración 8.3.1 Testigo encharcado.**

**Ilustración 8.3.2. Coloración de los drenajes.**