



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE RÍO CUARTO
FACULTAD DE AGRONOMÍA Y VETERINARIA**

“Trabajo Final presentado para
optar al Grado de Ingeniero Agrónomo”

*Efecto del agregado de sulfato de calcio sobre las propiedades físicas
de un suelo salino-sódico*

BARANDA Andrés Norberto

D.N.I. 30.771.114

Directora BONADEO Elena

Co- Directora MORENO Inés

Río Cuarto – Córdoba
Diciembre 2010

UNIVERSIDAD NACIONAL DE RÍO CUARTO

FACULTAD DE AGRONOMÍA Y VETERINARIA

CERTIFICADO DE APROBACIÓN

Título del Trabajo Final

*Efecto del agregado de sulfato de calcio sobre las propiedades físicas
de un suelo salino-sódico*

Autor: Andrés Norberto Baranda

DNI: 30.771.114

Director: Elena Bonadeo

Co-Director: Inés Moreno

Aprobado y corregido de acuerdo con las sugerencias del Jurado

Evaluator:

Fecha de Presentación: ____/____/____.

Aprobado por Secretaría Académica: ____/____/____.

Secretario Académico

AGRADECIMIENTOS

A mis padres, María de los Ángeles y Norberto, a mis hermanas María Carolina y María Celina y a mi novia Evelin, por su ayuda, comprensión y compañía, para que ésto haya sido posible.

A mi directora, Elena, por su amistad, consejos, dedicación, tiempo, compromiso y colaboración.

A Inés por su amistad y colaboración.

Y a todos aquellos que compartieron su tiempo e ideas para la realización de este trabajo, Emi, Poliya y Kelo.

GRACIAS.

INDICE

AGRADECIMIENTOS.....	II
INDICE.....	III
RESUMEN.....	VI
SUMMARY.....	VII
INTRODUCCIÓN.....	8
A-Planteo del problema.....	8
B- Características del ambiente donde ocurre la problemática.....	9
Geomorfología.....	9
Drenaje.....	10
D-Importancia areal del problema en la provincia de Córdoba.....	11
E-Reducción de rendimiento.....	11
F-Causas que provocan el problema.....	11
G-Mejoramiento de suelos sódicos.....	12
H-Antecedentes.....	12
Salinidad.....	13
Sodicidad.....	13
Hipótesis.....	15
Objetivos:.....	15
MATERIALES Y METODOLOGÍA.....	16
Caracterización del área en estudio.....	16
Especificaciones del ensayo.....	19
Diseño estadístico.....	20
Muestreos.....	20
Determinaciones para caracterizar el suelo.....	21
Determinaciones a campo para evaluar el efecto de la enmienda.....	22
1) Permeabilidad:.....	22
2) Densidad Aparente (Dap):.....	23
3) Resistencia Mecánica:.....	25
Determinaciones en laboratorio para evaluar el efecto de la enmienda.....	26
4) Curvas de capacidad hídrica:.....	26
Procesamiento de datos.....	27
Procesamientos matemáticos.....	27
Procesamiento estadístico.....	29
Criterios para la interpretación de indicadores.....	29
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	30
• Permeabilidad.....	30
• Densidad Aparente.....	31
• Porosidad Total.....	32
• Resistencia Mecánica.....	33
• Curvas de capacidad hídrica y agua útil almacenada para la situación Normal y para el Testigo.....	34
• Efecto del agregado de la enmienda sobre las curvas de capacidad hídrica.....	37
CONCLUSIONES.....	39
CONSIDERACIONES FINALES.....	40
BIBLIOGRAFÍA.....	41
ANEXOS.....	45

INDICE DE FIGURAS

Figura 1: Visualización de un “manchón” en una pastura de alfalfa	8
Figura 2: Ambientes geomorfológicos de la Provincia de Córdoba. El paisaje Pampa Loéssica Plana corresponde a la letra E.	9
Figura 3: Imagen satelital donde se aprecia el drenaje tipo “araña”	10
Figura 4: Distribución de precipitaciones en la localidad de Villa María durante el periodo 2005- 2010. (Fuente: Agencia de Extensión Rural, INTA V. María, 2010).....	16
Figura 5: Coloraciones en seco del horizonte A, situación “normal” a la izquierda y manchón a la derecha.....	18
Figura 6: Vista del desarrollo del cultivo de avena dentro del “manchón” seleccionado.....	20
Figura 7: Vista del desarrollo del cultivo de avena en la situación “normal”.....	20
Figura 8: Vista del permeámetro ubicado en el horizonte subsuperficial.....	22
Figura 9: Vista de la pesa en su posición más alta.....	23
Figura 10: Vista del borde del cilindro externo coincidente con la superficie del suelo ..	23
Figura 11: Vista del nivelado al ras del borde del cilindro interno, con la ayuda de un cuchillo.....	24
Figura 12: Vista del penetrómetro con la pesa en el lugar más bajo.	25
Figura 13: Vista en detalle de la punta cónica y los surcos acanalados cada 5 cm.	25
Figura 14: Detalle del plato de cerámica, vista de la olla y de los manómetros.	26
Figura 15: Vista en detalle de la olla de presión, con su tapa y sus respectivas tuercas mariposas.	27
Figura 16: Curvas características de humedad del Testigo y de la situación Normal en el horizonte superficial.....	34
Figura 17: Curvas características de humedad del Testigo y de la situación Normal en el horizonte subsuperficial.	35
Figura 18: Curvas de potencial medido para los 3 tratamientos y para la situación “normal” del horizonte superficial.....	37
Figura 19: Curvas de potencial medido para los 3 tratamientos y para la situación “normal” del horizonte subsuperficial.	38

INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Características del suelo del ensayo en “Manchón”	17
Tabla 2: Características del suelo del ensayo en “Normal”	17
Tabla 3: Tratamientos realizados y dosis aplicadas en el año 2005.....	19
Tabla 4: Horizonte 1. Parámetros físico-químicos del horizonte A de la situación “manchón” y “normal”.	21
Tabla 5: Horizonte 2. Parámetros físico-químicos del horizonte Bw de la situación “manchón” y “normal”.	21
Tabla 6: Permeabilidad del horizonte Bw para cada uno de los tratamientos	30
Tabla 7: Densidad aparente de cada tratamiento, en los dos primeros horizontes.....	31
Tabla 8: Porcentaje de porosidad total de cada tratamiento, en los dos primeros horizontes	32
Tabla 9: Resistencia Mecánica de cada tratamiento para ambos horizontes.	33
Tabla 10: Horizonte 2. Cálculo de agua útil o energéticamente disponible para T y N.	37

RESUMEN

Una importante superficie de suelos ubicados al sudoeste y al este de Villa María, presenta sectores que no permiten el desarrollo normal de la alfalfa, visualizándose “manchones” con menor altura y número de plantas, que alternan con sectores de mayor desarrollo denominados “normal”. La manifestación del fenómeno es más intensa en sectores de relieve subnormal, donde los suelos poseen un mayor contenido de sales y/o sodio intercambiable a diferentes profundidades. Se hipotetiza que el agregado de sulfato de calcio a los suelos salinos-sódicos del área aumentaría la concentración salina y reemplazaría el sodio de intercambio por el calcio de la enmienda mejorando las condiciones físicas de éstos. El objetivo fue evaluar el efecto del agregado de yeso sobre la permeabilidad, capacidad de almacenaje de agua útil, resistencia mecánica, densidad aparente y porosidad total de un Haplustol típico, con fases por alcalinidad y salinidad a distintas profundidades. Sobre el manchón se implantó un ensayo experimental con diseño simple al azar, con arreglo factorial, con los siguientes tratamientos: T (0 kg ha^{-1}), DA (4000 kg ha^{-1}) y DM (6000 kg ha^{-1}). Para caracterizar el suelo se determinó CE, pH, CIC, bases y MO y para ver el efecto de la enmienda: permeabilidad, densidad aparente, resistencia mecánica y curvas de capacidad hídrica. Se analizó también el área normal (N). El agregado de la enmienda provocó un aumento de la permeabilidad en DM, una disminución de la resistencia mecánica en DM y DA y un notorio efecto sobre las curvas de capacidad hídrica de DM. No se modificó la densidad aparente ni la porosidad total. La aplicación de la enmienda es una alternativa válida para la recuperación de estos suelos, pero debe entenderse como un proceso lento y a largo plazo.

Palabras claves: manchones, suelos salinos-sódicos y yeso.

SUMMARY

An important area of soils located on the southwest and east of Villa Maria, presents sectors that do not allow the normal development of alfalfa, visualizing “patches” with less height and number of plants which alternate with sectors of mayor development denominated/called “normal”. The phenomenon’s manifestation is more intense in sectors of subnormal relief where the soils have a mayor content of salt and /or interchangeable sodium at different depths. It is hypothesized that the adding of calcium sulfate to salty-sodic soils of this area would increase the salty concentration and replace the interchangeable sodium for the calcium of the amendment improving the physical condition of these soils. The Objective is to evaluate the effect of adding of gypsum on the permeability, the storage capacity of useful water, the penetrometer resistance, the bulk density and the aeration porosity of a typical Haplustoll, with alkalinity and salinity phases at different depths. An experimental test was implanted on one of the “spots” with a simple design at random, using a factorial fix, and with the following treatments: T (0 kg ha⁻¹), DA (4000 kg ha⁻¹) y DM (6000 kg ha⁻¹). The characteristic of the soil was determined by EC, pH, CEC, bases and OM and the effect of the amendment was observed via permeability, bulk density, penetrometer resistance, and soil characteristics curves. It was also analyzed the normal area (N). The adding of the amendment increased the permeability in DM, decreased the penetrometer resistance in DM and DA and made a notorious effect over the soil characteristics curves of DM. Neither the bulk density nor the aeration porosity was modified. The amendment application is a valid alternative to these soils recuperation but it must be understood as a slow process and a long term.

Key words: patches, salty-sodic soils and gypsum.

Efecto del agregado de sulfato de calcio, sobre las propiedades físicas de un suelo salino-sódico

INTRODUCCIÓN

A-Planteo del problema

La cuenca lechera de Villa María está basada en sistemas de pastoreo con alfalfa (*Medicago sativa* L.). Esta pastura presenta una problemática común: disminución de la producción debido a la existencia de sectores que no permiten el desarrollo normal y homogéneo, denominado “manchones”. En éstos, es menor el número y la altura de las plantas, lo que provoca un menor rendimiento y afecta la persistencia de la pastura, además de facilitar el avance de malezas, principalmente gramíneas.

Estos “manchones” se presentan en porciones definidas del terreno, son de forma irregular, de límites abruptos, de tamaño variable y alternan con áreas denominadas normales, donde la vegetación presenta mayor desarrollo (Bonadeo *et al.*, 2001). El cambio de una situación sin limitaciones a otra manchoneada es abrupto y del orden de metros (Hampp *et al.*, 2004) (Figura 1).



Figura 1: Visualización de un “manchón” en una pastura de alfalfa.

La sintomatología de las plantas afectadas son: achaparramiento, hojas más pequeñas y a menudo presencia de una coloración verde más oscura. Los “manchones” se empiezan a

manifestar al año de implantada la pastura, con porcentajes que oscilan alrededor del 10%, para llegar a ocupar el 50% o más de la superficie del lote a los tres años de edad.

B- Características del ambiente donde ocurre la problemática

Esta problemática tiene intensa manifestación en el ambiente geomorfológico denominado Pampa Loéssica Plana (Figura 2).

Geomorfología

Este paisaje geomorfológico denominado Pampa Loéssica Plana (Figura 2, letra E), es el de mayor extensión dentro de la provincia, presenta sectores suavemente deprimidos y vías de escurrimiento intercalados, siendo el relieve subnormal (INTA, 1993 a).

Dentro de esta área, la manifestación del manchoneo es más intensa en sectores planos o ligeramente deprimidos de relieve subnormal, donde los suelos poseen un mayor contenido de sales y/o sodio intercambiable a diferentes profundidades (Bonadeo *et al.*, 2001, 2002), en comparación a los sectores más elevados.

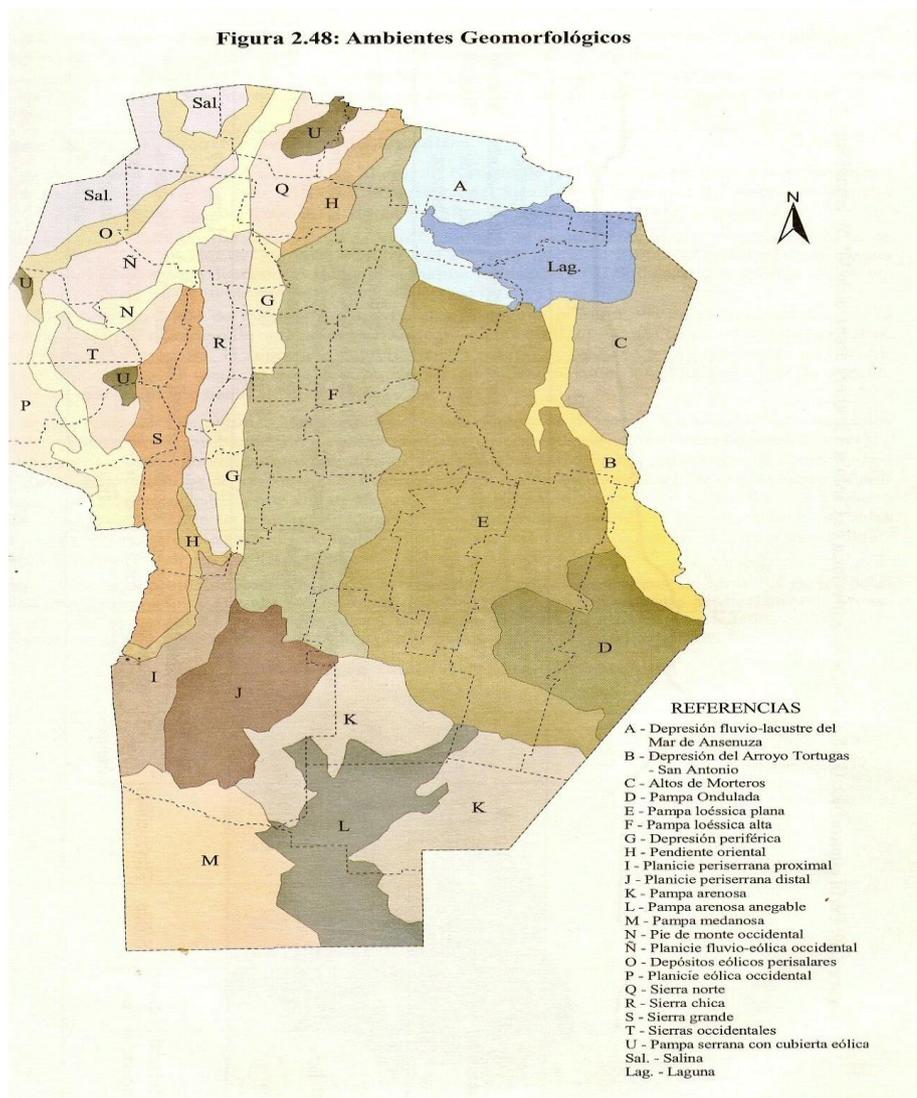


Figura 2: Ambientes geomorfológicos de la Provincia de Córdoba. El paisaje Pampa Loéssica Plana corresponde a la letra E. (Fuente: Atlas de Suelos de la República Argentina)

Drenaje

Una característica de los suelos del área es su deficiente drenaje, debido a un relieve muy suave con gradientes regionales menores al 0,3%, de orientación O-E.

Es común encontrar áreas donde las vías se organizan en forma radial, siendo los puntos de convergencia charcas permanentes o semipermanentes, conformando un tipo de drenaje denominado “araña” (Figura 3), que funcionan como aportantes hídricos a la napa freática (INTA, 1993 a).

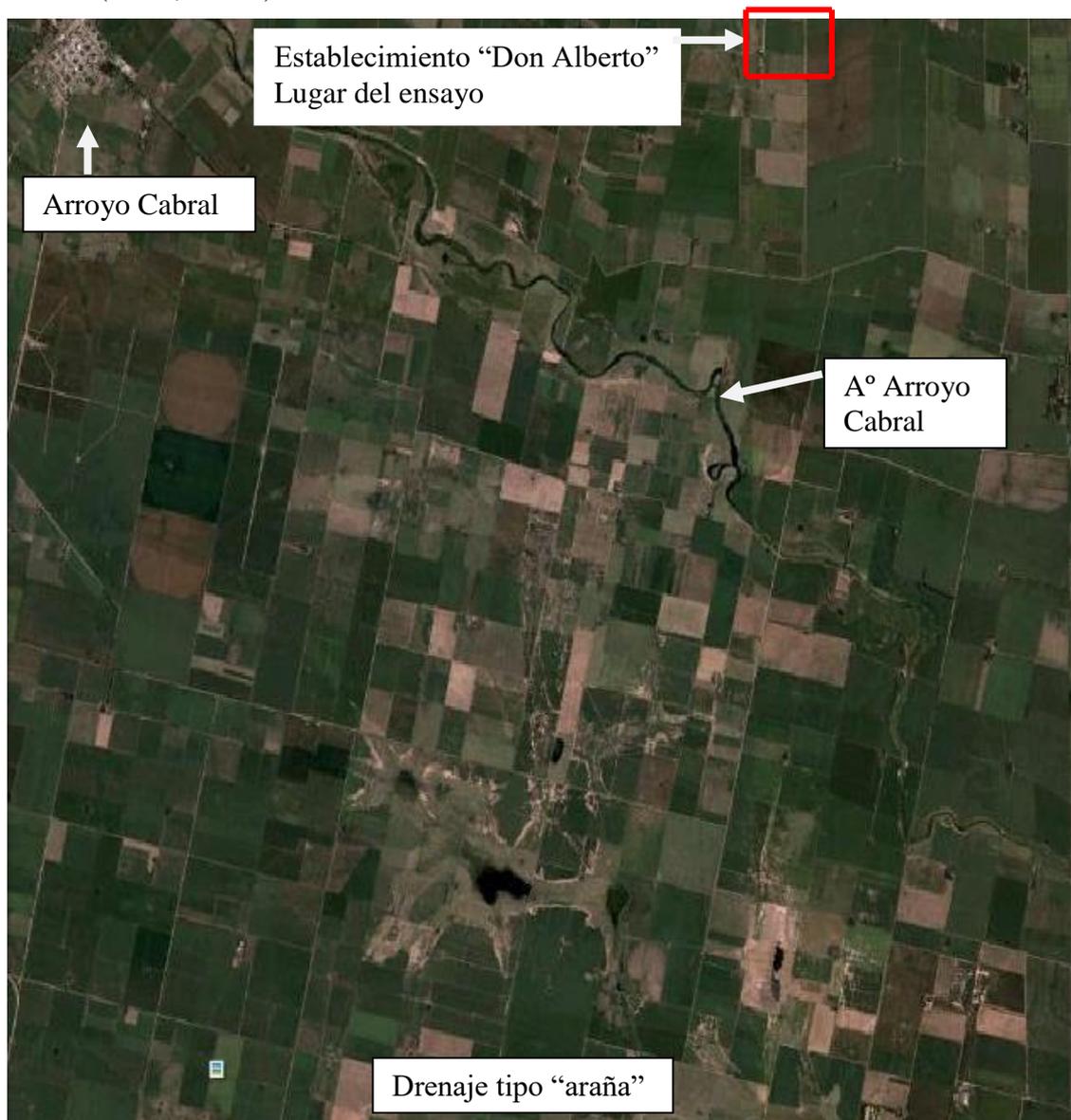


Figura 3: Imagen satelital donde se aprecia el drenaje tipo “araña”.

C-Suelos

En la región geomorfológica llamada Pampa Loésica Plana el material originario de los suelos es predominantemente eólico, de textura franco limosa (INTA, 1993 a). Si bien existen diferentes tipos de suelos, es frecuente la existencia de suelos que poseen contenidos elevados de sodio a distintas profundidades. El crecimiento desigual y en parches de la

pastura de alfalfa, visibles en numerosos puntos de un potrero, es propio de este tipo de suelos y se debe a la heterogeneidad en la acumulación de sodio, según menciona Rengasamy, 1998.

Si se circunscribe al área cubierta por la hoja Villa María de la Carta de suelos del INTA, se observa que los suelos sódicos están clasificados como: Natracualf, Natracuol, Natrustalf, Natrustol y Natralbol.

Diversas investigaciones llevadas a cabo por Hampp *et al.*, (2004, 2006), Bonadeo *et al.*, (2006), concluyen en la existencia de suelos con acumulación de sodio en profundidad que producen “manchoneo” en el área abordada.

D-Importancia areal del problema en la provincia de Córdoba

Existen en la provincia de Córdoba 2.803.000 ha de suelos con afectación sódica, manifestándose esta limitante a distintas profundidades. INTA (1993 b) informa sobre el área ocupada por estos suelos sódicos según la profundidad, así menciona que entre 50 y 125 cm de profundidad hay 269.000 ha, entre 25 y 50 cm 1.525.000 ha y a menos de 25 cm 1.009.000 ha, indicando además que en el departamento San Martín, donde se encuentra el ensayo experimental, existen 93.000 ha de suelos con afectación sódica, siendo el 59% con acumulación de sodio entre 25 y 50 cm.

En el área donde se realiza el presente trabajo, que corresponde a la hoja Villa María (INTA, 1987), es frecuente encontrar suelos con porcentajes de sodio intercambiable mayores al 40% en el segundo o tercer horizonte, valores que superan ampliamente el 15% establecido como crítico (Richards, 1973).

E-Reducción de rendimiento

Si bien la disminución de la producción de alfalfa por este fenómeno estudiado no esta medida con precisión, experiencias realizadas en áreas circundantes a Villa María, tales como las realizadas por Irastorza (2008), cita reducciones de producción de una alfalfa de 1 año y medio de implantada del orden del 50%. De todos modos, debe notarse que la disminución del rendimiento comienza a aumentar gradualmente a medida que la alfalfa avanza en edad hasta llegar al cuarto año de implantación, en que las plantas se pierden y el suelo se cubre de malezas gramíneas (Barrenechea, comunicación personal).

F-Causas que provocan el problema

El origen de esta problemática está relacionado a procesos halomórficos, vinculados a la fluctuación de la capa freática, pasada o presente, que oscila actualmente entre los 2 y 3 m de profundidad y su CE es de alrededor de 2 dS m⁻¹ con predominancia de sulfato de sodio (Hampp *et al.*, 2004).

Estudios previos han demostrado que el principal factor determinante del “manchoneo” está relacionado a la presencia de sales y sodio en horizontes subsuperficiales (Bonadeo *et al.*, 2001). Ello afecta, entre otras, las principales características del sistema de raíces (Bonadeo *et al.*, 2002).

G-Mejoramiento de suelos sódicos

Existen técnicas variadas para lograr el mejoramiento de estos suelos generalmente basadas en el agregado de ácidos o de enmiendas cálcicas (Garavito Neira, 1980; Yágodin *et al.*, 1986; Cisneros, 2000).

* Sustancias ácidas, tales como el ácido sulfúrico. Este es el más indicado de usar en suelos con presencia de carbonato de calcio, sales que ante el agregado de este ácido se solubilizan, liberándose calcio que se combina con el ión sulfato generándose así sulfato de calcio. Esta técnica tiene inconvenientes de tipo prácticos relacionados a la aplicación del ácido.

* En cuanto a las enmiendas cálcicas, la más usada en el área es el yeso (sulfato de calcio) por su fácil disponibilidad y por su precio accesible de mercado, aunque la aplicación de la misma se realiza sin un conocimiento adecuado de la dosis correcta para lograr el mejoramiento de estos suelos. Tradicionalmente, se debe incorporar antes de sembrar, ya sea por la lluvia o con alguna maquinaria. La aplicación debe ser uniforme, y es ventajoso que el yeso sea lo más fino posible, para favorecer su disolución. La recuperación del suelo depende de la cantidad de yeso que se aplique, su pureza y su grado de finura, pero en todos los casos el proceso es lento (Bonadeo, comunicación personal).

Yágodin, *et al.*, (1986) mencionan dos aspectos interesantes y complementarios: el primero es que la alfalfa almacena calcio en sus raíces y lo libera al descomponerse. De esta manera, actuaría como una fuente importante y localizada de ese ión. Y el segundo, que las raíces de alfalfa son lo suficientemente fuertes como para generar un reacomodamiento de las partículas, lo que contribuiría al incremento de la dinámica hídrica.

Ilyas *et al.*, (1997) concluyeron que la combinación más efectiva en el mejoramiento de horizontes subsuperficiales salino-sódicos fue la aplicación de yeso sobre cultivo de alfalfa.

H-Antecedentes

Problemáticas causadas por exceso de sales y sodio

En la hoja Villa María, si bien la problemática es predominantemente sódica, suelen encontrarse suelos con contenidos elevados de sales en profundidad, por ello se discuten a

continuación, algunos aspectos básicos de la influencia del exceso de sales y sodio sobre el funcionamiento de suelos y plantas.

Salinidad

Se han adelantado tres teorías para explicar diversos aspectos de los efectos nocivos de la salinidad del suelo: la de la disponibilidad de agua, la de la inhibición osmótica y la de la toxicidad específica (Black, 1975).

- Teoría de la disponibilidad de agua: las sales solubles en los suelos salinos aumentan la succión de los solutos del agua del suelo. Por tanto, disminuyen el agua disponible para las plantas y éstas, por ende, sufren una deficiencia.
- Teoría de la inhibición osmótica: el exceso de solutos absorbidos del medio salino es el responsable de la inhibición en el crecimiento vegetal. Se postula además que las sales actúan en el interior de las plantas, aunque sin especificar la forma en que se inhibe el crecimiento. La inhibición hasta podría originarse, en parte, en una deficiencia de agua, pero en un sentido distinto al supuesto en la teoría de la disponibilidad de agua. El exceso de solutos en la planta disminuye la energía libre por unidad de masa de agua, aun cuando la masa absoluta de agua puede no verse reducida después que la planta se haya adaptado al exceso de sales que hay en el exterior.
- Teoría de la toxicidad específica: el efecto perjudicial de la salinidad del suelo sobre las plantas se debe a la toxicidad de uno o más iones específicos de las sales que se hallan en exceso. El caso más claro que corrobora la toxicidad específica se da cuando un microelemento de alta toxicidad se halla presente como tal y no en forma de sal.

La salinidad produce efectos diferentes sobre las distintas especies vegetales, pero como norma general, provoca una disminución del tamaño de la planta, que adopta formas achaparradas, una disminución en la producción de frutos y semillas e incluso la muerte de ésta, cuando se supera su límite de tolerancia.

Sodicidad

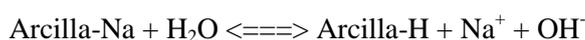
Un elevado contenido de Na^+ en la solución del suelo, en relación con el Ca^{++} y Mg^{++} , da lugar al incremento de este ión en el complejo de cambio, lo que provoca, dada su baja densidad de carga (elevado radio de hidratación y baja carga), el aumento del espesor de la doble capa difusa, los efectos de repulsión entre los coloides y, con ellos, la dispersión de la arcilla y la solubilización de la materia orgánica. Según varios autores, la concentración de Na^+ frente al Ca^{++} y Mg^{++} en la solución del suelo tiene que ser superior al valor límite del 70%, para que el Na^+ pueda desplazar al Ca^{++} y Mg^{++} en el complejo de cambio, dada la menor energía de adsorción del Na^+ . Es generalmente admitido, que para que el Na^+ juegue un importante papel en la evolución del suelo, es decir, para que se produzca la

alcalinización, la concentración de Na^+ adsorbido frente a los otros cationes ha de superar el valor crítico del 15% (Dorronsoro, s/F).

Cuando el Na^+ de intercambio se encuentra en exceso, puede afectar a las plantas en forma indirecta al influir negativamente sobre el estado físico del suelo. Cuando éste ocupa altos porcentajes de la saturación con bases, deteriora la normal estructuración y porosidad del suelo, disminuyendo la infiltración y la difusión del aire, generando también, compactaciones y elevadas resistencias mecánicas por el efecto dispersante que tiene sobre el coloide. Otro efecto perjudicial, es la elevación del pH, que impide la normal absorción de nutrientes como P, Cu, Fe, Zn, Bo y Mo, y a la vez provoca una deficiencia inducida de Ca y Mg (Echeverría y García, 2005).

Rengasamy y Sumner (1997) han dado una excelente descripción de cómo las partículas de arcilla sufren expansión, desintegración y dispersión en un medio acuoso y como cada uno de estos fenómenos afectan los procesos de compactación y cementación de los suelos, aumentando la resistencia mecánica.

Las arcillas saturadas con Na tienen propiedades particulares, en presencia de agua de lluvia se hidrolizan, liberando Na^+ y OH^- según la siguiente ecuación:



Como consecuencia el medio se alcaliniza rápidamente, alcanzándose valores de pH progresivamente cada vez más altos: 9, 10 o incluso más.

La alcalinización del perfil produce una serie de consecuencias desfavorables para las propiedades fisicoquímicas del suelo. Así, tanto las arcillas sódicas como el humus se dispersan, los agregados estructurales se destruyen. Las arcillas y los ácidos húmicos se iluvian, acumulándose en el horizonte B, formándose un horizonte de acumulación de arcillas sódicas, es decir, que se origina un horizonte nátrico (si la intensidad de la iluviación es suficiente). Los cambios estacionales producen el hinchamiento y contracción de las arcillas sódicas formándose una estructura prismática fuertemente desarrollada. Finalmente, como el medio se ha vuelto fuertemente alcalino, la cristalinidad de las arcillas disminuye, se vuelven inestables, parte de ellas se descomponen, se destruyen los vértices y aristas superiores de los prismas, originándose una estructura muy peculiar llamada columnar, que presenta la cara superior de los prismas redondeada. En ocasiones, los humatos sódicos iluviados se acumulan en estas superficies revistiéndolas de colores muy oscuros. (Dorronsoro, s/F).

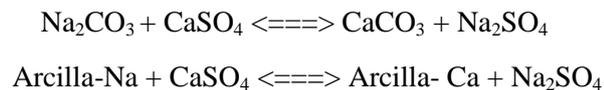
Uno de los efectos más nocivos del exceso de sodio en el área a considerar, son las malas condiciones hidrofísicas de muchos de estos suelos (Bonadeo *et al.*, 2004), sujetos con frecuencia a condiciones temporarias de excesos de agua. Cuando el ión sodio produce deterioro físico del suelo, puede reducir la entrada de agua al mismo y afectar el almacenamiento. Diversos estudios han demostrado que un alto PSI en el complejo de

cambio del suelo puede provocar dispersión y expansión de las partículas de éste. La dispersión y el consecuente reordenamiento de las partículas del suelo, obstruirían los espacios porosos, disminuyendo así la conductividad hidráulica (Várallyay, 1981).

McNeal y Coleman (1966) indican que la conductividad hidráulica podría ser adecuada bajo altos valores de PSI, siempre que la concentración de sales se mantenga encima de un determinado valor, sobre el cual las partículas flocularían. Pupisky y Shainberg (1979) indican que bajo estas condiciones aún habría una disminución de la conductividad hidráulica, provocada ahora por la expansión de las arcillas.

El sulfato de calcio constituye la principal enmienda de suelo para la corrección de suelos alcalinos, tanto en lotes agrícolas alcalinizados por anegamiento y/o riego, como en suelos genéticamente sódicos que se pretende mejorar, tanto para implantación de pasturas como para la implantación de cultivos de grano (Lavado y Taboada, 2009).

El procedimiento usual para revertir esta situación es añadir yeso sobre la superficie, con lo cual se forma sulfato sódico, que es una sal casi neutra y por tanto ya si lavable:



Hipótesis

El agregado de sulfato de calcio a los suelos salinos-sódicos del área de Villa María, aumentaría en primer lugar, la concentración salina y con posterioridad el reemplazo del sodio de intercambio por el calcio de la enmienda, mejorando las condiciones físicas de estos suelos, evidenciado a través de la floculación del coloide, mejora de la permeabilidad, modificación de la capacidad de almacenaje de agua y disminución de la resistencia mecánica a la penetración.

Objetivos:

General

- Evaluar el efecto del agregado de yeso a un suelo salino-sódico en profundidad del área de Villa María, sobre las propiedades físicas e hidrofísicas.

Específicos

- Evaluar el efecto del agregado de yeso sobre la permeabilidad de un suelo salino-sódico del área de Villa María.
- Determinar el efecto del agregado de yeso sobre la capacidad de almacenaje de agua útil.
- Evaluar el efecto del agregado de yeso sobre la resistencia mecánica.
- Determinar el efecto del agregado de yeso sobre la densidad aparente y sobre la porosidad total.

MATERIALES Y METODOLOGÍA

Caracterización del área en estudio

El **área experimental** se encuentra ubicada entre 32° 29' LS y 63° 17' LO, al este de la localidad de Arroyo Cabral, la misma se puede ubicar en la hoja Villa María, donde es intensa la manifestación de la problemática mencionada (INTA, 1987). El ensayo está ubicado en el Establecimiento “Don Alberto”, administrado por el Ing. Agr. Ángel Barrenechea.

El **clima** es templado subhúmedo, las precipitaciones anuales promedio son de 799 mm (1956-2010) y la distribución es de tipo monzónica. El balance hidrológico histórico presenta un déficit marcado en los meses de enero y febrero; siendo equilibrado el resto del año. La temperatura media anual es de 16,05 °C (INTA, 1987).

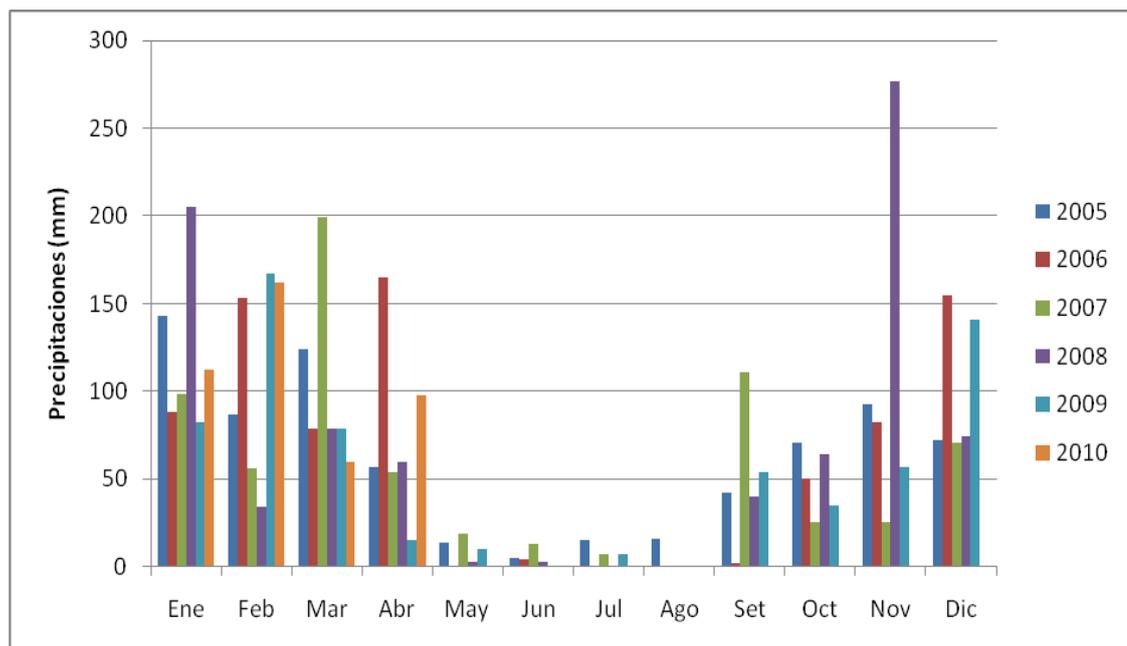


Figura 4: Distribución de precipitaciones en la localidad de Villa María durante el periodo 2005- 2010. (Fuente: Agencia de Extensión Rural, INTA V. María, 2010).

Las precipitaciones totales, desde la primera aplicación de yeso hasta la última medición, es decir entre enero de 2005 y julio de 2010, fueron de 4113 mm.

El **relieve** es subnormal, en un paisaje muy plano, con pendiente regional menor al 0,3%, de dirección O-E (INTA, 1993 a).

Los **suelos** del área en estudio, están clasificados como *Haplustoles énticos* (Consociación Oncativo), según la Carta de Suelos de INTA (1987). Sin embargo, en el sector en estudio se encontró un desajuste entre lo citado en la cartografía y lo observado: el suelo por el grado de evolución puede clasificarse como *Haplustol típico*, con fases por alcalinidad y salinidad a distintas profundidades (Bonadeo *et al.*, 2006). Es importante mencionar que este suelo forma parte de la Consociación Oncativo, pero series con características sódicas típicas (Natracualf), como son Cayuqueo y Ticino (INTA, 1987), se encuentran en cercanía de la zona en estudio (Bonadeo *et al.*, 2002), siendo la distancia del lugar del ensayo a la unidad cartográfica Tc2 de 560 m (INTA, 1987).

La secuencia de horizontes y características de “Manchón” y “Normal” se indican en las Tablas 1 y 2 respectivamente.

Tabla 1: Características del suelo del ensayo en “Manchón”

<i>Hor.</i>	<i>Prof.</i> (<i>cm</i>)	<i>Textura</i>	<i>Estructura</i>	<i>MO</i> (%)	<i>CIC</i> (<i>cmol</i> <i>kg⁻¹</i>)	<i>Na⁺</i> (<i>cmol</i> <i>kg⁻¹</i>)	<i>K⁺</i> (<i>cmol</i> <i>kg⁻¹</i>)	<i>Mg⁺²</i> (<i>cmol</i> <i>kg⁻¹</i>)	<i>Ca⁺²</i> (<i>cmol</i> <i>kg⁻¹</i>)	<i>PSI</i> (%)
<i>A</i>	<i>0-24</i>	<i>Fco limoso</i>	<i>Bloq. subang.</i>	<i>2.37</i>	<i>15.22</i>	<i>0.98</i>	<i>3.14</i>	<i>0.20</i>	<i>0.70</i>	<i>6.43</i>
<i>Bwk1</i>	<i>24-43</i>	<i>Fco limoso</i>	<i>Bloq. subang.</i>	<i>0.99</i>	<i>20.00</i>	<i>4.51</i>	<i>3.43</i>	<i>0.34</i>	<i>0.69</i>	<i>22.55</i>
<i>Bw2k</i>	<i>43-66</i>	<i>Fco limoso</i>	<i>Bloq. subang.</i>	<i>0.93</i>	-	-	-	-	-	-
<i>Ck1</i>	<i>66-96</i>	<i>Fco limoso</i>	<i>Masivo</i>	<i>0.66</i>	-	-	-	-	-	-
<i>Ck2</i>	<i>>96</i>	<i>Fco limoso</i>	<i>Masivo</i>	-	-	-	-	-	-	-

Tabla 2: Características del suelo del ensayo en “Normal”

<i>Hor.</i>	<i>Prof.</i> (<i>cm</i>)	<i>Textura</i>	<i>Estructura</i>	<i>MO</i> (%)	<i>CIC</i> (<i>cmol</i> <i>kg⁻¹</i>)	<i>Na⁺</i> (<i>cmol</i> <i>kg⁻¹</i>)	<i>K⁺</i> (<i>cmol</i> <i>kg⁻¹</i>)	<i>Mg⁺²</i> (<i>cmol</i> <i>kg⁻¹</i>)	<i>Ca⁺²</i> (<i>cmol</i> <i>kg⁻¹</i>)	<i>PSI</i> (%)
<i>A</i>	<i>0-26</i>	<i>Fco limoso</i>	<i>Bloq. subang.</i>	<i>2.64</i>	<i>18.55</i>	<i>0.43</i>	<i>3.40</i>	<i>0.27</i>	<i>0.91</i>	<i>2.32</i>
<i>Bw</i>	<i>26-37</i>	<i>Fco limoso</i>	<i>Bloq. subang.</i>	<i>1.32</i>	<i>17.97</i>	<i>1.15</i>	<i>2.81</i>	<i>2.08</i>	<i>1.21</i>	<i>6.39</i>
<i>Bwk</i>	<i>37-55</i>	<i>Fco limoso</i>	<i>Bloq. subang.</i>	<i>1.16</i>	-	-	-	-	-	-
<i>BCK</i>	<i>55-90</i>	<i>Fco limoso</i>	<i>Bloq. subang.</i>	<i>0.95</i>	-	-	-	-	-	-
<i>Ck</i>	<i>>90</i>	<i>Fco limoso</i>	<i>Masivo</i>	<i>0.84</i>	-	-	-	-	-	-

Comparando la coloración de los horizontes A del manchón y del área normal, Bonadeo *et al.* (2006) notaron que, a pesar de su similar contenido de materia orgánica, el manchón era más claro que el normal. El origen de estas diferencias puede atribuirse a que

los procesos de formación de los compuestos húmicos en el manchón, ocurrieron bajo condiciones desfavorables que limitaron la polimerización, resultando en colores más claros.



Figura 5: Coloraciones en seco del horizonte A, situación “normal” a la izquierda y manchón a la derecha.

La **capa freática** oscila en los 2,5 m de profundidad, tanto para las zonas manchoneadas como para las normales (Bonadeo *et al.*, 2006). Los mismos autores, analizaron la salinidad y composición de la freática en noviembre de 2001, siendo la CE de la napa de 1,51 dS/m y 2,24 dS/m para el normal y el manchón, respectivamente. La sal predominante es bicarbonato de sodio en las zonas normales y sulfato de sodio en los manchones.

Durante el proceso de lavado, las sales son desplazadas del suelo a la napa y eliminadas del sistema mediante el flujo horizontal de la capa freática. La poca pendiente del sustrato donde fluye la napa (que es muy similar a la del terreno) limita la velocidad de eliminación de las sales. La lentitud con que el agua del freático se elimina en el sentido de la pendiente, haría que parte de las sales que posee el suelo, especialmente en la situación “manchón” enriquezcan el contenido salino del freático, lo que también ocurriría en la situación normal, pero con menor intensidad. Esto explicaría las diferencias de CE en la napa freática del “manchón” y “normal” mencionadas en el párrafo anterior (Hampp, comunicación personal).

Cultivo: durante la realización de dicho trabajo, en el lote enyesado donde se tomaron todas las muestras y se llevaron a cabo las distintas mediciones, se desarrollaba un cultivo de avena (*Avena sativa*) (Figura 6). En los años anteriores, el potrero tuvo una alfalfa desde el otoño del 2004 hasta la primavera del 2009, luego un maíz para silo (campana 2009-10) y por último la avena.

Especificaciones del ensayo

Para la implantación del ensayo en el año 2005, se seleccionó un “manchón” a través de su aspecto visual, es decir, con menor desarrollo de la alfalfa, que en ese momento había implantada. En el mencionado año se agregó yeso de 67% de pureza, según consta en la Tabla 3, definiéndose tres tratamientos.

Tabla 3: Tratamientos realizados y dosis aplicadas en el año 2005.

Tratamiento	Dosis de yeso	Dosis de yeso puro	Calcio aplicado*
Testigo (T)	0 kg ha ⁻¹	0 kg ha ⁻¹	0 kg ha ⁻¹
Dosis Agronómica (DA)	2000 kg ha ⁻¹	1340 kg ha ⁻¹	247.9 kg ha ⁻¹
Dosis Máxima (DM)	6000 kg ha ⁻¹	4020 kg ha ⁻¹	743.7 kg ha ⁻¹

* El yeso contiene 18,5% de Calcio, en los 67% de yeso puro.

En esta primera instancia de aplicación, año 2005, **DM** se calculó utilizando el método propuesto por Yágodin *et al.*, (1986). En tanto, para **DA** se tuvieron en cuenta aspectos prácticos, relativos a la facilidad de aplicación y aspectos económicos.

Dicha aplicación se realizó el día 8 de enero de 2005, en forma manual, superficial y al voleo.

La superficie de cada unidad experimental fue de 2.5 m * 7 m, medidas que se ajustaban al tamaño del manchón y a las tres repeticiones que se pretendían realizar.

El día 7 de Abril de 2008 se realizó el reenyesado de las unidades experimentales que contenían la **DA**, aplicando nuevamente 2000 kg ha⁻¹. Al igual que la vez anterior, la enmienda se aplicó en superficie y al voleo. De esta manera estas unidades recibieron dos dosis de yeso en el transcurso de tres años.

Junto al ensayo, se muestreó el área sin afección o “normal” (N), a los fines de tener un patrón de referencia. Los puntos de muestreo en esta situación, también fueron tres y se seleccionaron al azar, dentro de sectores próximos a los ensayos donde el cultivo se expresaba en su máximo potencial de crecimiento y sanidad (Figura 7).



Figura 6: Vista del desarrollo del cultivo de avena dentro del “manchón” seleccionado.



Figura 7: Vista del desarrollo del cultivo de avena en la situación “normal”.

Diseño estadístico

Para este trabajo el diseño estadístico elegido fue un Diseño Simple al Azar (DSA) con arreglo factorial.

Muestreos

Los muestreos y las determinaciones a campo fueron realizados en Marzo y Julio del año 2010, es decir a los 5 años aproximadamente de aplicado el yeso y a los 2 años del reenyesado.

Dentro del manchón seleccionado y para cada uno de los tratamientos, el suelo se muestreó a dos profundidades: de 0-20 cm y de 26-40 cm. En la situación normal se muestreó de 0-20 cm y de 28-40 cm, porque el horizonte subsuperficial en esta situación se encuentra levemente más profundo comparado con el manchón. Las profundidades mencionadas no incluyen los límites entre horizontes.

Los muestreos realizados no tuvieron un patrón temporal fijo o predeterminado, solo se tuvo en cuenta el momento de ocurrencia de precipitaciones, para facilitar la extracción de muestras, debido a la extrema dureza de estos suelos cuando su contenido hídrico es bajo.

Determinaciones para caracterizar el suelo

Tal como se observa en las Tablas 1 y 2 para caracterizar el suelo en estudio se determinó: Conductividad Eléctrica (CE), pH, Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC), Bases Intercambiables y Materia Orgánica (MO), según la siguiente metodología:

- **Conductividad Eléctrica:** relación suelo agua 1:1 (Klute, 1986).
- **Carbono Orgánico total:** método de Mebius (Page, 1982).
- **pH:** potenciométrico, relación suelo agua 1:2.5 (Klute, 1986).
- **Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC):** por saturación del complejo de intercambio con sodio y determinación de éste por espectrofotometría de absorción atómica (EAA) (Page, 1982).
- **Bases Intercambiables:** por desplazamiento con acetato de amonio y determinación por EAA, (Page, 1982).

La caracterización se completa con datos de Relación de Absorción de Sodio (RAS) obtenidos por González (2010) en el mismo ensayo experimental.

Tabla 4: Horizonte 1. Parámetros físico-químicos del horizonte A de la situación “manchón” y “normal”.

	Testigo	Dosis Agronómica	Dosis Máxima	Normal
C.E. 1:1(dS/m)	0.46	0.16	0.40	0.40
pH	6.63	7.33	6.69	6.82
RAS (1)	4.6	1.0	0.8	s/d

(1) Extraído de González (2010).

Tabla 5: Horizonte 2. Parámetros físico-químicos del horizonte Bw de la situación “manchón” y “normal”.

	Testigo	Dosis Agronómica	Dosis Máxima	Normal
C.E. 1:1(dS/m)	1.18	2.18	2.35	0.39
pH	8.21	8.95	7.40	7.80
RAS (1)	14.19	10.98	10.60	s/d

(1) Extraído de González (2010).

Determinaciones a campo para evaluar el efecto de la enmienda

En las unidades experimentales a campo, se realizaron las siguientes determinaciones para ver el efecto de la enmienda:

1) **Permeabilidad:** por método del permeámetro de disco (Gil, 1999), a flujo saturado (0 kPa de tensión), en el horizonte subsuperficial.

Como la medición se realizó en el horizonte subsuperficial, en ambas situaciones se cavó hasta alcanzar tal profundidad (28-30 cm en la situación normal y de 25-28 cm en el manchón).

Luego de ello se alisó la base y para establecer una buena superficie de contacto, entre el disco y el suelo, se colocó arena fina dentro de un anillo enrasador de 14 cm de diámetro y de 0.5 cm de espesor.

En estas condiciones se ubicó el dispositivo y se comenzó a medir luego de permitir que la arena se mojase (Figura 8). Los intervalos de lectura fueron: de 30 segundos los 2 primeros, luego minuto a minuto hasta los 5 y posteriormente cada 5 minutos hasta los 30 y de 10 en 10 hasta lograr 3 lecturas similares.



Figura 8: Vista del permeámetro ubicado en el horizonte subsuperficial.

Al cabo de 90-100 minutos aproximadamente se alcanzó un régimen estable de permeabilidad.

Luego con los datos de la planilla de registro, la cual contenía las lecturas obtenidas en los tiempos antes mencionados, se calculó la lámina infiltrada y con esta la acumulada y la permeabilidad (Ver Anexo I).

Los valores que figuran en la Tabla 6 de resultados, surgen del promedio de las últimas tres mediciones.

2) Densidad Aparente (Dap): por el método del cilindro (Klute, 1986) del horizonte superficial y subsuperficial, tanto en la situación “manchón” como en la “normal”.

Previo a la extracción de las muestras, se limpió la superficie del lugar elegido, luego en dicho lugar se colocaron los cilindros sobre la superficie y se dejó caer la pesa (Figura 9) hasta que el borde superior del cilindro externo coincidía con la superficie del suelo (Figura 10).



Figura 9: Vista de la pesa en su posición más alta

Figura 10: Vista del borde del cilindro externo coincidente con la superficie del suelo

Posteriormente con la ayuda de una pala, se extrajo el juego de cilindros y con un cuchillo se emparejaron los bordes del cilindro interno, para que todo el volumen capaz de albergar dicho cilindro este ocupado por la muestra (Figura 11).



Figura 11: Vista del nivelado al ras del borde del cilindro interno, con la ayuda de un cuchillo.

El contenido del cilindro, la muestra, se la introdujo en una bolsa de nylon para evitar pérdida de peso y cambios de humedad. Posterior a esto se rotularon las bolsas.

Es importante aclarar que la extracción de las muestras subsuperficiales o sea las del segundo horizonte se hicieron a posteriori del ensayo de permeabilidad; el suelo en dicho momento tenía un elevado contenido de humedad.

Una vez llevadas las muestras al laboratorio, se pesó el volumen total extraído y luego se determinó el contenido de humedad a una alicuota según la siguiente fórmula:

$$H\% = \frac{(PSH + T) - (PSS + T)}{(PSS + T) - T} \times 100$$

PSH: Peso suelo húmedo

T: Tara

PSS: Peso suelo seco

Por último, ya con el porcentaje de humedad, se corrigió el peso del suelo húmedo contenido en el cilindro.

El cilindro utilizado tenía las siguientes dimensiones: 7.8 cm de diámetro y 5 cm de alto. Con estos datos se calculó el volumen de dicho cilindro de la siguiente forma: $\pi * \text{radio}^2 * \text{altura}$.

Para finalizar con la determinación se relacionó el peso del suelo seco con el volumen total del cilindro (sólido+agua+aire) y así se obtuvo el valor de Dap.

3) Resistencia Mecánica: Para dicho trabajo se seleccionó, dentro de los métodos cuantitativos, el del penetrómetro de impacto (penetrómetro Villegas) con sonda de punta cónica, con un ángulo de 60° , medido en su vértice y una sección de 2 cm^2 (Figura 12). En este instrumento hay que registrar el número de caídas de la pesa, de cierto peso conocido, desde una distancia también conocida, para introducir el pistón hasta una determinada profundidad, con lo que se puede calcular la energía gastada en esa operación.

El eje del penetrómetro viene graduado cada 5 cm por un surco radial acanalado (Figura 13), que sirve para ir contando la cantidad de veces que se tuvo que largar la pesa para alcanzar la profundidad deseada.



Figura 12: Vista del penetrómetro con la pesa en el lugar más bajo.



Figura 13: Vista en detalle de la punta cónica y los surcos acanalados cada 5 cm.

Cada golpe corresponde a 2.5 Kg cm^{-2}

Cálculo de los resultados: $R = k \times n^\circ$

Donde R: resistencia a la penetración cada 5 cm de espesor de suelo.

k: constante del penetrómetro (propia de cada equipo). En este caso es $2,5 \text{ kg cm}^{-2}$.

n° : número de impactos.

Por ejemplo si el n° de impactos para introducir 5 cm el penetrómetro fue de 10, la R sería de 25 Kg cm^{-2} , o lo que es igual a $2,5 \text{ MPa}$.

Luego para interpretar los datos obtenidos a campo se construyeron tablas y gráficos para visualizar mejor la resistencia mecánica y su distribución en el perfil (Ver ejemplo en Anexo II).

Al momento de hacer las mediciones de Resistencia Mecánica el suelo estaba en una condición intermedia de humedad, ésta rondaba los 13% de humedad.

Determinaciones en laboratorio para evaluar el efecto de la enmienda

4) Curvas de capacidad hídrica: por el método de las ollas de presión (Richards, 1973). La determinación se realizó para los 2 primeros horizontes, en las siguientes succiones: 0.3; 1; 2; 5; 10 y 15 Bares.

Las muestras obtenidas en el campo se sacaron a temperatura ambiente durante aproximadamente una semana. Luego, pasado ese tiempo, se tamizaron por un tamiz de malla de 2 mm.

Posterior a esto se colocó una alícuota del suelo tamizado dentro de anillos circulares de PVC de 5.5 cm de diámetro y 1 cm de altura, sobre el plato de cerámica de presión (Figura 14), que consiste en una placa porosa de cerámica, cubierta de un lado por un diafragma delgado de hule, sellado en el borde de la placa. La separación entre placa y diafragma proporciona un paso libre de agua, resultando un sistema de salida a través del plato por un tubo flexible para desalojar el flujo de agua. Luego se agregó agua destilada en suficiente cantidad como para saturar las muestras de suelo.



Figura 14: Detalle del plato de cerámica, vista de la olla y de los manómetros.

Transcurrido este tiempo se cerró la olla de presión con su correspondiente tapa, colocando los pernos por pares y en forma alternada, procurando ejercer una presión uniforme en todas las tuercas mariposas (Figura 15).



Figura 15: Vista en detalle de la olla de presión, con su tapa y sus respectivas tuercas mariposas.

Las muestras de suelo alcanzaron el equilibrio, indicado por el cese del goteo por los tubos de drenaje. Luego se determinó el contenido de humedad a las muestras.

Procesamiento de datos:

Procesamientos matemáticos:

- **Porosidad total:** es la proporción volumétrica de espacios vacíos que tiene un suelo en su estructura natural o dicho de otra manera es la fracción del volumen del suelo no ocupada por las partículas del mismo.

Con los datos de la D_{ap} y la siguiente fórmula se obtuvieron los valores de porosidad total:

$$\% \text{ Porosidad} = (1 - (D_{ap}/D_r)) * 100 \text{ (Baver } et \text{ al., 1973)}$$

$$D_r = \text{Densidad real} = 2.65 \text{ Mg m}^{-3}$$

- **Estimación de la CE en el extracto de saturación**

A los fines de poder comparar los valores de conductividad eléctrica obtenidos en una relación suelo-agua 1:1 a valores del extracto a saturación, se utilizó la ecuación:

$$CE_e = CE_{1:1} / 0,59 \quad (1)$$

Donde CE_e es la conductividad eléctrica de extracto de solución de suelo y $CE_{1:1}$, la de una mezcla de partes iguales de suelo y agua destilada. La ecuación (1) propuesta por Doran y Jones (1996) se ajusta para suelos franco limosos. De esta manera, el límite de 2 dS m^{-1} de CE_e para la alfalfa (Bressler *et al.*, 1982), se convierte en 1,18 dS m^{-1} de $CE_{1:1}$.

- **Estimación del potencial osmótico a saturación**

Garavito Neira (1980) estima el potencial osmótico a partir de la salinidad del extracto de saturación, expresada en dS m^{-1} . La ecuación está ajustada para las sales más comunes y su expresión general es:

$$\psi_o(\text{bar}) = CE * 0,36 \quad (2)$$

Para un suelo saturado de agua, la CE en (2) corresponderá al valor de conductividad del extracto de saturación.

- **Estimación del potencial osmótico a distintos contenidos hídricos del suelo**

Es sabido que la CE (y por ende el ψ_o) de un suelo varía con el contenido hídrico del mismo de manera inversamente proporcional. De esta forma, para conocer el potencial osmótico a diferentes contenidos hídricos se estima de la siguiente manera:

$$\psi_{ox} = \psi_o * \frac{Pw_s}{Pw_x} \quad (3)$$

Donde ψ_{ox} es el potencial osmótico a un determinado contenido hídrico determinado (Pw_x). Pw_s es el contenido hídrico a saturación (Garavito Neira, 1980). Las estimaciones de ψ_o se realizaron para contenidos hídricos equivalentes a las presiones de las membranas a los fines de poder sumarlos y compararlos.

Cabe aclarar que solo se estimó el ψ_o para el Testigo y para la situación Normal ya que en Dosis Máxima y Dosis Agronómica la elevada CE que ocasiona el yeso, no refleja los valores reales de potencial osmótico.

- **Cálculo de la lámina de agua (mm)**

De las curvas de retención hídrica o curvas características de humedad del suelo (Figura 16), se tomaron los contenidos en porcentaje de agua a los 0.3 y 15 bares de

potencial agua total (potencial mátrico + potencial osmótico). Se calculó la diferencia entre ambos porcentajes de agua, lo que corresponde a “agua útil”. A ese valor se lo multiplicó por la Dap, para convertir expresiones gravimétricas del contenido de agua a expresiones volumétricas. Luego se lo convirtió en mm de agua / cm de suelo y se lo afectó por el espesor del horizonte para obtener los mm de agua útil del mismo (Ver Anexo III).

Procesamiento estadístico

Todas las variables medidas en forma directa en el campo o en laboratorio y las medidas indirectamente a través de otras variables, fueron sometidas a un análisis estadístico. Para este trabajo final de grado se usó el software estadístico InfoStat, versión 2008. La prueba estadística que se realizó a cada una de las variables fue un análisis de la varianza (ANOVA), con sus correspondientes pruebas de normalidad y homogeneidad.

El test de comparación usado fue el LSD Fisher, con un nivel de significación del 0.05 (Ver Anexo IV).

Criterios para la interpretación de indicadores

La conductividad eléctrica expresa de manera indirecta la concentración salina que tiene la solución del suelo. Así, como el agua destilada no conduce la electricidad, cuanto mayor sea la cantidad de iones disueltos, mayor será su conductividad. De esta manera, puede entenderse a la conductividad como la inversa de la resistencia del suelo al paso de la electricidad.

La CE será indicador del nivel de sales y de la disolución del yeso.

El pH es una medida de la concentración de protones en una solución y permite someramente inferir, en este caso, que tipo de sales se encuentran en la solución, porque el yeso al incorporarse al suelo, lo acidifica por liberación del ión sulfato, que predomina sobre el ion bicarbonato, proveniente de la respiración de raíces y microorganismos.

De esta manera la interpretación de los resultados podría ser la siguiente: aumento de CE indica disolución de yeso si el pH desciende, ya que de no ser así la misma se podría deber a una redistribución de sales producto de la evaporación del agua del suelo, o bien, si la CE y el pH ascienden, indicaría que se produjo el intercambio Na-Ca y la presencia de Na en la solución determina un aumento de pH, disminución de la CE demuestra un lavado de sales.

La permeabilidad será el indicador del estado del material coloidal. Este parámetro se entiende como la capacidad de permitir el flujo de agua a través de la masa del suelo. Para la situación en estudio, la dispersión del coloide ejerce una reducción importante de la penetración en profundidad del agua, por lo que, un aumento en la permeabilidad del suelo, estará indicando que el intercambio de Na^+ por Ca^{2+} fue efectivo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

- **Permeabilidad**

En la Tabla 6 se indican los valores de permeabilidad de cada uno de los tratamientos para el horizonte Bw. Analizando los datos de la misma se puede ver que DM presenta el mayor valor y DA el menor, mostrando T y N valores intermedios, aunque las diferencias estadísticamente significativas solo ocurren entre DA y DM.

Tabla 6: Permeabilidad del horizonte Bw para cada uno de los tratamientos

Horizonte	Testigo (mm h ⁻¹)	Dosis Agronómica (mm h ⁻¹)	Dosis Máxima (mm h ⁻¹)	Normal (mm h ⁻¹)
Bw	26.91 ab	12.78 a	36.23 b	21.70 ab

Letras distintas indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos (P>0.05).

Lo anterior descrito puede deberse a que la aplicación del yeso ha producido cambios, los cuales son mucho más manifiestos en el tratamiento DM, donde se ha aumentado la permeabilidad con respecto a T en un 34.6%. Este aumento se atribuye a que la cantidad de yeso agregado en DM ha logrado desplazar parte del sodio del complejo de intercambio y reemplazarlo por el calcio de la enmienda, lo que estaría indicado por el menor pH de este tratamiento (Tabla 5), con todos los beneficios que esto trae aparejado, con una menor dispersión coloidal y consecuente aumento de la porosidad. Puede que el sodio en solución haya formado sulfato de sodio, con el ión sulfato proveniente de la enmienda, y que esta sal soluble esté comenzando a lixiviarse. Además DM es la que presenta mayores valores de Conductividad Eléctrica (Tabla 5), esto trae aparejado una disminución del espesor de la doble capa difusa de las partículas de arcilla y pasa a ser un elemento estructurador del suelo (disminuye la dispersión e incrementa la floculación del coloide) y por lo tanto mejorador de propiedades físicas como en este caso la permeabilidad (Ruiz, 2006). Los microagregados, conformados por coloides con alto contenido de sodio, dejan en su ordenamiento poros muy pequeños, cuando en el coloide disminuye el sodio y aumenta el calcio se ordenan los microagregados, de manera de dejar poros más grandes entre ellos, este cambio de porosidad produce un aumento de la permeabilidad. También en este tratamiento debe considerarse que si bien el exceso de sodio ha producido dispersión, la traslocación de arcillas fue mínima o no ocurrió, ya que hubiera producido un efecto de obturación de poros irreversible, tal lo mencionan Iruña y Mon (1998), entre otros autores, quienes afirman que la disminución de la permeabilidad por traslocación de arcillas es de reversibilidad limitada.

Que ello no haya ocurrido en este suelo se deba posiblemente al bajo contenido de arcilla, que es de alrededor del 12%.

En el suelo con el tratamiento de DA, que es la que menor permeabilidad presenta, puede estar sucediendo lo siguiente, como posiblemente el PSI del coloide siga siendo alto, corroborado por el elevado pH (Tabla 5), al agregarle agua destilada durante la determinación de la permeabilidad se produce una dispersión importante del coloide y se reduce la permeabilidad, aún más que en T debido a que tiene más sodio, ya que, al que originalmente tenía se le suma el que se desplazó del primer horizonte, ello se corrobora con el mayor pH de DA con respecto a T. Las arcillas sódicas se hinchan y desarrollan grandes presiones dentro de los agregados. Esto debilita los lazos entre las partículas y se dispersan. (Lavado y Taboada, 2009). Existe una relación inversa entre PSI y la conductividad hidráulica saturada, que es el parámetro que caracteriza a la permeabilidad (Lavado y Taboada, 2009). En situaciones de enriquecimiento de Na^+ y con salinidad baja, la arquitectura mencionada se deteriora comprometiendo el espacio poroso, especialmente en detrimento de los poros de mayor tamaño y por ende de conducción del agua.

T presenta mayor permeabilidad que el normal, aunque estadísticamente no hay diferencias significativas, esto puede deberse a la elevada variabilidad de la permeabilidad en estos suelos, lo que hace que los resultados obtenidos deban ser analizados con precaución. A ello debe sumarse que T tiene una mayor CE, que puede estar actuando de mejorador de la estructura como se mencionó antes.

- **Densidad Aparente**

En la Tabla 7 se pueden apreciar los valores de densidad aparente de cada uno de los tratamientos, en ambos horizontes estudiados.

Tabla 7: Densidad aparente de cada tratamiento, en los dos primeros horizontes

	Testigo	Dosis Agronómica	Dosis Máxima	Normal
Horizonte 1	1.36 a	1.35 a	1.35 a	1.34 a
Horizonte 2	1.35 b	1.28 a	1.34 ab	1.31 ab

Letras distintas en la misma fila indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos ($P > 0.05$)

Analizando los datos de la Tabla 7, se puede afirmar que en el horizonte 1 no hay diferencias estadísticamente significativas entre los distintos tratamientos. En el horizonte subsuperficial la diferencia entre el testigo y la situación “normal” es superior a la del horizonte superficial, ésta es del 3%, justamente el doble de la existente en superficie, lo que evidencia aún más el efecto perjudicial del sodio subsuperficial que presenta el manchón.

Los bajos valores de Dap de DA en el segundo horizonte se atribuyen no a un efecto mejorador de la enmienda, sino a que al tomar la medición, el suelo poseía un elevado contenido de humedad (por tomar la muestra a posteriori del ensayo de permeabilidad) y como ya se mencionó antes, el alto valor de PSI del coloide en DA con respecto a los otros tratamientos, corroborado por el alto valor de pH (Tabla 5), hace que al agregarle agua produzca el hinchamiento de las arcillas sódicas; por lo tanto al estar hinchado el coloide está ocupando mayor volumen, que el que ocuparía si estuviera seco, por lo tanto entró menor cantidad de suelo en el cilindro y por consiguiente el resultado de dividir el peso sobre el volumen fue menor, dando ese valor bajo de Dap.

Del análisis surge que no hubo un efecto definido del agregado de yeso sobre la Dap, solo se detectan tendencia entre T y N.

- **Porosidad Total**

El sistema poroso del suelo impacta directamente sobre el balance de agua (entradas y salidas del sistema), en el funcionamiento hídrico (relaciones agua planta), en la entrada y difusión de gases y en el desarrollo y crecimiento de las raíces (Gil, s/F).

Los poros reducen su tamaño como resultado de la expansión y dispersión de las arcillas provocadas por el exceso de sodio y la condición física resultante es caracterizada por una pérdida general de la porosidad. Los poros se encuentran colapsados por la inestabilidad de los agregados.

En la Tabla 8 se indica la porosidad total en porcentajes, para cada uno de los tratamientos, de los dos primeros horizontes.

Tabla 8: Porcentaje de porosidad total de cada tratamiento, en los dos primeros horizontes

	Testigo	Dosis Agronómica	Dosis Máxima	Normal
Horizonte 1	48.66 a	49.22 a	49.24 a	49.49 a
Horizonte 2	48.98 a	51.87 b	49.49 ab	50.41 ab

Letras distintas en la misma fila indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos (P>0.05)

Al analizar los datos de la Tabla 8, se puede afirmar, que la enmienda aplicada en el horizonte 1 no ha producido cambios estadísticamente significativos.

En el horizonte 2 es más marcada la diferencia entre el T y N, presentando la primera un 2.8% menos de porosidad que N, no llegando a ser esta diferencia estadísticamente significativa.

Con el agregado de la enmienda en su DM, la diferencia disminuyó a 1.8% o sea, la porosidad aumentó 1% con respecto a T, tampoco esta diferencia es estadísticamente significativa.

El incremento de la porosidad de DA se atribuye a las condiciones de alta humedad del suelo cuando se extrajo la muestra más que a una mejora real de la porosidad, siendo válida la misma explicación del bajo valor de Dap de DA.

Se puede concluir que no hubo efecto de la enmienda sobre la porosidad total.

- **Resistencia Mecánica**

En la Tabla 9 se visualizan las Resistencias Mecánicas de cada tratamiento, en ambos horizontes.

Tabla 9: Resistencia Mecánica de cada tratamiento para ambos horizontes.

Profundidad	Testigo	Dosis Agronómica	Dosis Máxima	Normal
	MPa	MPa	MPa	MPa
0-25 cm	2.016 b	1.600 a	1.900 ab	1.716 ab
25-40 cm	2.026 b	1.806 ab	1.386 a	1.443 a

Letras distintas en la misma fila indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos ($P > 0.05$)

Analizando los valores de la Tabla 9 se puede observar que T del horizonte superficial presenta diferencias estadísticamente significativas con DA, siendo el valor de DM y N intermedios a ambos y no llegando a presentar diferencias estadísticamente significativas. En el horizonte superficial la diferencia de Resistencia Mecánica entre el T y N es de 0.3 MPa, lo que se traduce en una diferencia del 14.9%. La DA bajó la Resistencia Mecánica a un valor inferior a la de T en un 20.6% y en un 6.7% con respecto al valor de N. Es decir, con este tratamiento se estaría revirtiendo la condición del manchón y asemejándolo a la situación “normal” presente en la mayor parte del lote. El tratamiento DM también logró disminuir la Resistencia Mecánica con respecto a T del “manchón” en un 5.7%, pero no con respecto a N, el valor alcanzado es 10.7% más alto que dicho valor, no obstante estas diferencias no son estadísticamente significativas. Se puede observar que el agregado del yeso está produciendo la disminución de la Resistencia Mecánica en el horizonte 1 con respecto a T tal cual como se había planteado en la hipótesis. También debe considerarse que a la relación causa-efecto ocasionada por la enmienda, al ser un horizonte superficial y el lote sometido a pastoreo, deben adicionarse las presiones ocasionadas por los animales y el tránsito de las maquinarias, lo que hace más compleja la interpretación de los datos.

En el horizonte subsuperficial las diferencias estadísticamente significativas se presentan entre DM y N con respecto a T. DA se presenta en una situación intermedia entre los otros tratamientos.

La diferencia entre la Resistencia Mecánica de T y de N es más marcada que en el horizonte superficial, existen 0.58 MPa (28.7%) de diferencia entre ambas situaciones, casi

el doble de la existente en el horizonte superficial. Esto se debe a la gran dispersión de la arcilla parcialmente saturada con sodio.

Con la DM se logró disminuir la Resistencia Mecánica un 31.6% con respecto a T. El valor que alcanzó es levemente inferior al de N, 3.9% menor, aunque estadísticamente no hay diferencias entre estos dos últimos tratamientos, pero si con T.

Con la DA también se logró disminuir la Resistencia Mecánica, un 10.8% con respecto a T, pero no tuvo la eficiencia de DM porque el valor que se alcanzó es 25% superior al de N, no presentando los tratamientos DA y T diferencias estadísticamente significativas.

En conclusión, en este horizonte también el agregado del yeso tuvo el efecto buscado de disminuir la Resistencia Mecánica del manchón.

- **Curvas de capacidad hídrica y agua útil almacenada para la situación Normal y para el Testigo.**

En la Figura 16 se indican las curvas de capacidad hídrica para el primer horizonte de la situación T y N donde se relaciona contenido de agua volumétrico con potencial mátrico y con potencial agua total (mátrico + osmótico). Para obtener este último potencial, a las distintas presiones aplicadas a las ollas (mátrico), se le sumó el potencial obtenido de aplicar la ecuación 3 (página 28) que estima el potencial osmótico.

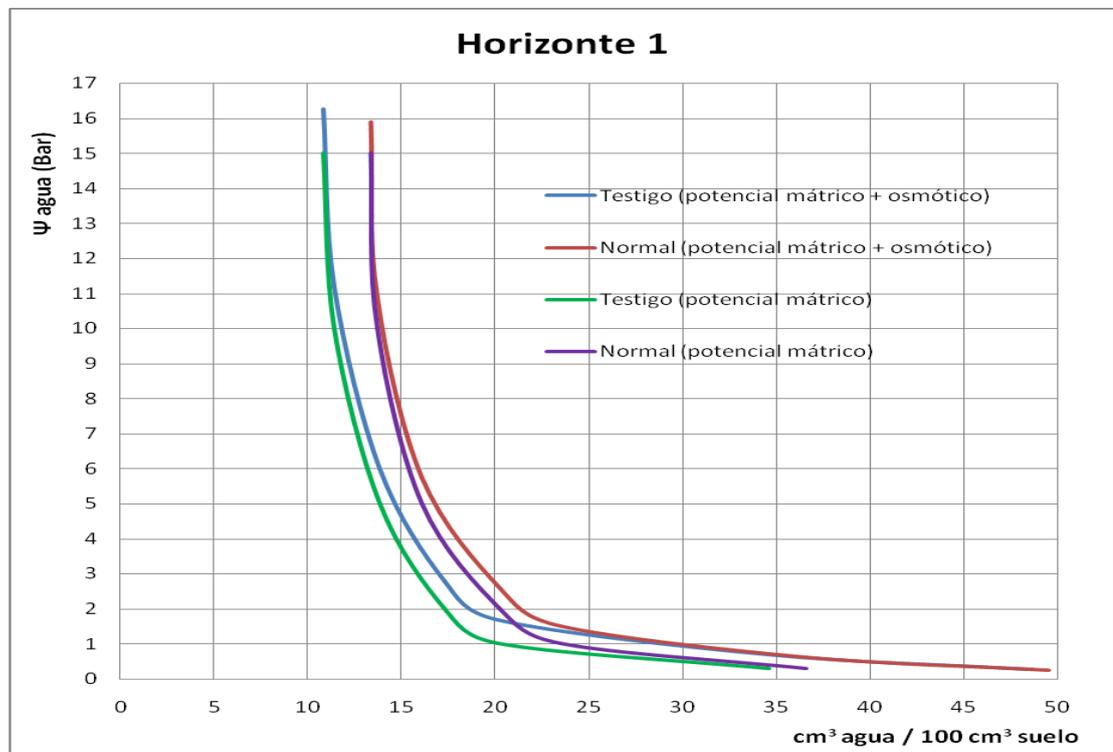


Figura 16: Curvas características de humedad del Testigo y de la situación Normal en el horizonte superficial.

Si se compara para cada situación, T y N, las diferencias entre potencial mátrico y potencial total, mátrico mas osmótico, se observa que no hay un efecto importante del potencial osmótico sobre las curvas de capacidad hídrica dada su baja CE (Tabla 1), evidenciándose solo diferencias a contenidos hídricos elevados.

Si se compara entre situaciones, es decir T respecto de N, se observa que las menores diferencias se encuentran hasta alrededor de 1.5 bares lo que se atribuye a la similitud de los poros correspondientes a esa succión. Luego el contenido de agua de T es menor al de N, estas diferencias se atribuyen al diferente tipo de materia orgánica presentada por ambas situaciones (Figura 5) que en T genera mayor cantidad de microporos que retienen agua a esas succiones, ya que las diferencias en el contenido de materia orgánica son muy pequeñas como para producir diferencias en el almacenaje de agua (Moreno, 2000). Tampoco se descarta que haya diferencias menores en la cantidad de coloides inorgánicos, dada las diferencias evolutivas a que han estado sometidos ambos suelos.

En la Figura 17 se indica la curva de capacidad hídrica para el segundo horizonte de la situación T y N.

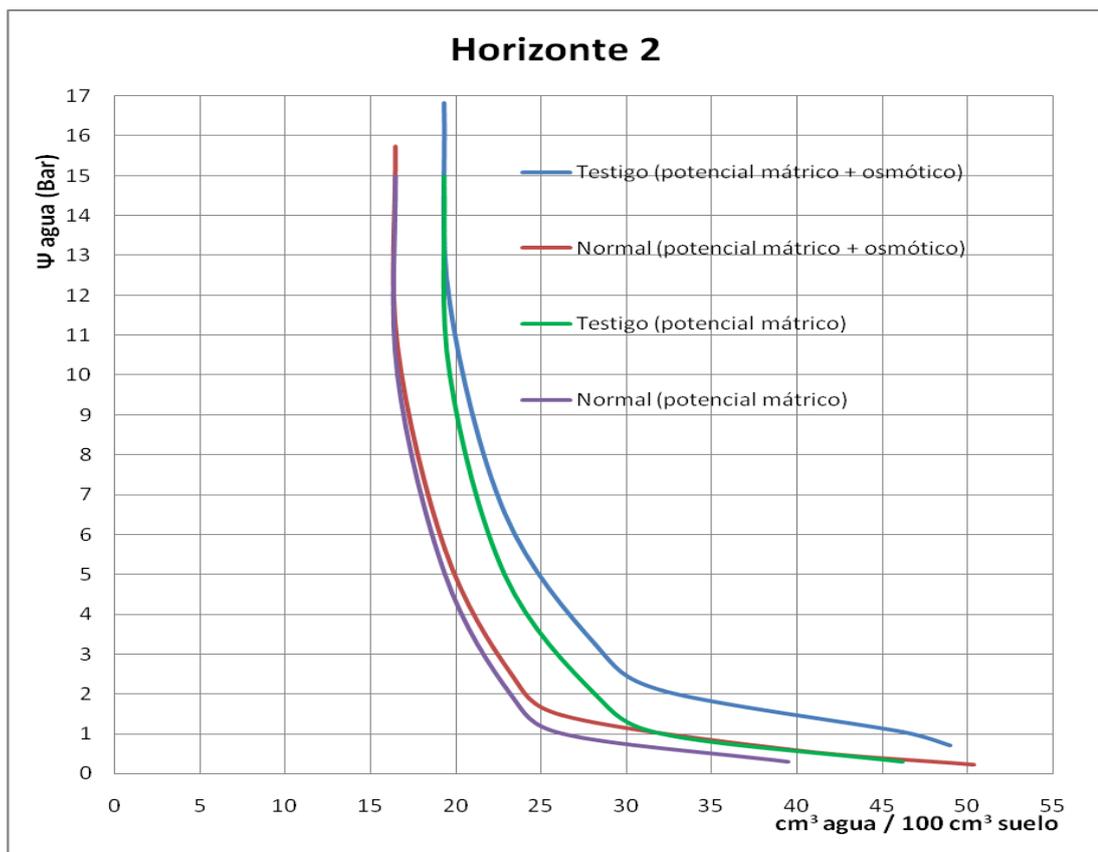


Figura 17: Curvas características de humedad del Testigo y de la situación Normal en el horizonte subsuperficial.

En este horizonte las diferencias entre T y N son notorias en todo el rango de succiones evaluadas, aunque también mayores a elevadas succiones. Posiblemente el mayor

PSI (6.39 vs. 22.51) de T provoca diferencias en la microporosidad y por ende mayor retención de agua, según lo indica Várallyay (1981). Tampoco en este horizonte se descartan diferencias granulométricas no detectadas por medio de la textura, dada que estas son iguales. Si se comparan dentro de cada situación, se observa que el efecto del potencial osmótico es más notorio en T y a elevadas succiones ello se atribuye al diferente contenido salino (0,39 $CE_{1:1}$ vs. 1,18 $CE_{1:1}$) (Ver tabla 5), al respecto Damiano (2008) menciona que el efecto del Ψ_o sobre la capacidad de agua disponible para la planta es mayor hacia potenciales agua menos negativos (es decir, a menores succiones) y que esto implica una menor disponibilidad de agua para el consumo de la planta.

Otro aspecto a analizar en la relación contenido hídrico - potencial total del agua del suelo, es que al estimar el potencial total del agua del suelo, el contenido hídrico volumétrico que corresponde a 0,3 bares es mayor a 60%, lo que no se condice con la realidad, ya que el contenido total de poros de dicho horizonte es del 49%, esto indica que en el mismo el agua nunca se encontraría a una succión de 0,3 bares, valor considerado similar a capacidad de campo y límite superior del agua disponible. Cuando todos los poros se encuentren llenos de agua, esta está a una succión de 0,6 bares y si se acepta que, para que la absorción de agua por las raíces ocurra en forma adecuada, debe existir al menos un 10% de poros de aire, se deduce que cuando el suelo posee un 39 % de agua (49 % de porosidad total – 10% de poros para el aire) ésta se encuentra a una succión de 1,5 bares, lo que implica un mayor esfuerzo por parte de la raíz para extraerla.

En la Tabla 10 se indica el contenido de agua del horizonte 2 de T, que corresponde a 1,5 bares (límite superior de agua disponible, debido al efecto del potencial osmótico y que se corresponde con un 10% de poros de aire), la diferencia con el contenido hídrico a 15 bares, que es del 14,61%, arroja el agua energéticamente disponible. Ese valor expresado en mm/horizonte es de 37.47 mm. El mismo razonamiento para el segundo horizonte de N, pero considerando solo los primeros 19 cm (para poder comparar por horizonte), arroja 45.47 mm de agua para el horizonte, lo que hace que las raíces dispongan de 8 mm menos de agua útil en T. Esta diferencia se debe al menor contenido de sales en N. Si bien, este valor no representa una diferencia importante, a ello debe sumarse el efecto del mayor pH de T con respecto a N, que genera un medio físico-químico más desfavorable para la exploración de raíces y por ende habrá menor cantidad de raíces para absorber agua, efecto que se potencia cuando el suelo está seco, dado su mayor PSI (22.51 vs 6.39) y por ende su mayor resistencia mecánica, lo que también provoca un efecto negativo reduciendo la cantidad de raíces que exploran el horizonte.

Tabla 10: Horizonte 2. Cálculo de agua útil o energéticamente disponible para T y N.

Situación	%Agua a 1.5B	%Agua a 15B	Diferencia %	Dap	Agua útil (mm/cm suelo)	Agua útil (mm/horizonte)
Testigo (19cm)	28.26	13.65	14.61	1.35	1.97	37.47
Situación	%Agua a 0.5B	%Agua a 15B	Diferencia %	Dap	(Agua útil mm/cm suelo)	Agua útil (mm/horizonte)
Normal (19cm)	29.85	11.60	18.25	1.31	2.39	45.47

- Efecto del agregado de la enmienda sobre las curvas de capacidad hídrica

En la Figura 18 se indica la relación entre contenido hídrico volumétrico y potencial agua medido con ollas de presión.

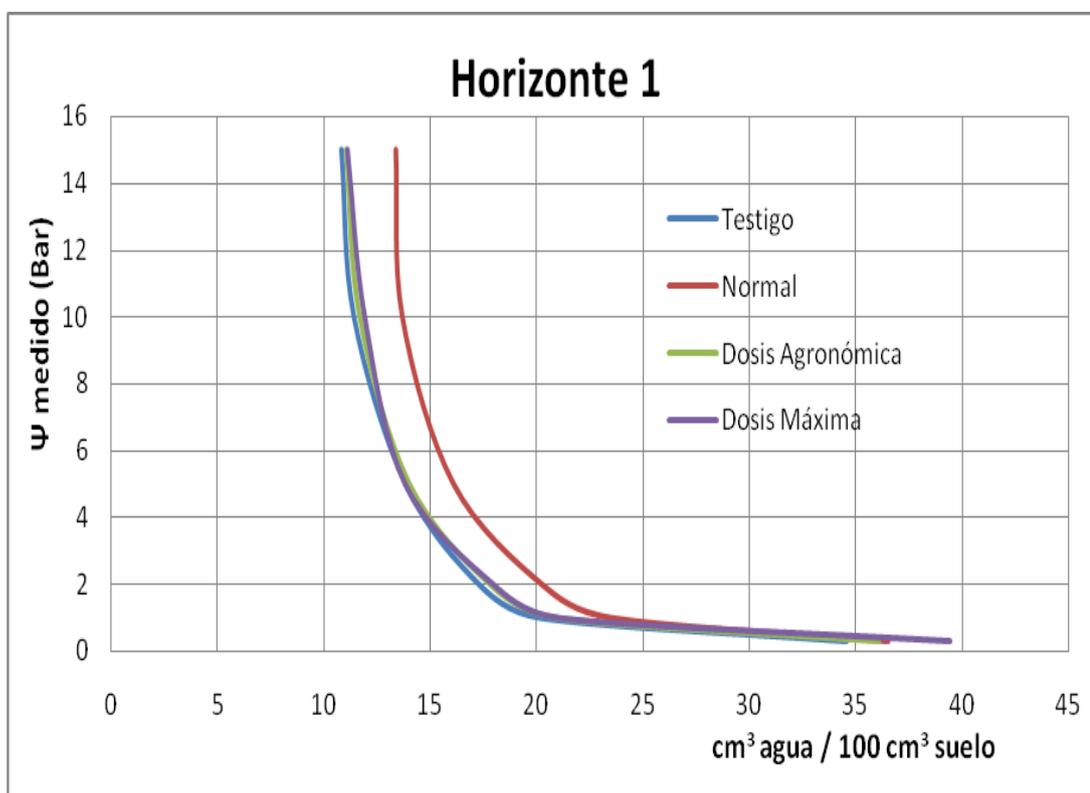


Figura 18: Curvas de potencial medido para los 3 tratamientos y para la situación “normal” del horizonte superficial.

En este horizonte la enmienda no provocó ningún efecto, atribuido principalmente al bajo contenido de sodio presente en dicha porción del perfil, tanto para el manchón como para la situación “normal”.

En la Figura 19 se indica la relación entre contenido hídrico volumétrico y potencial agua medido con ollas de presión para el segundo horizonte.

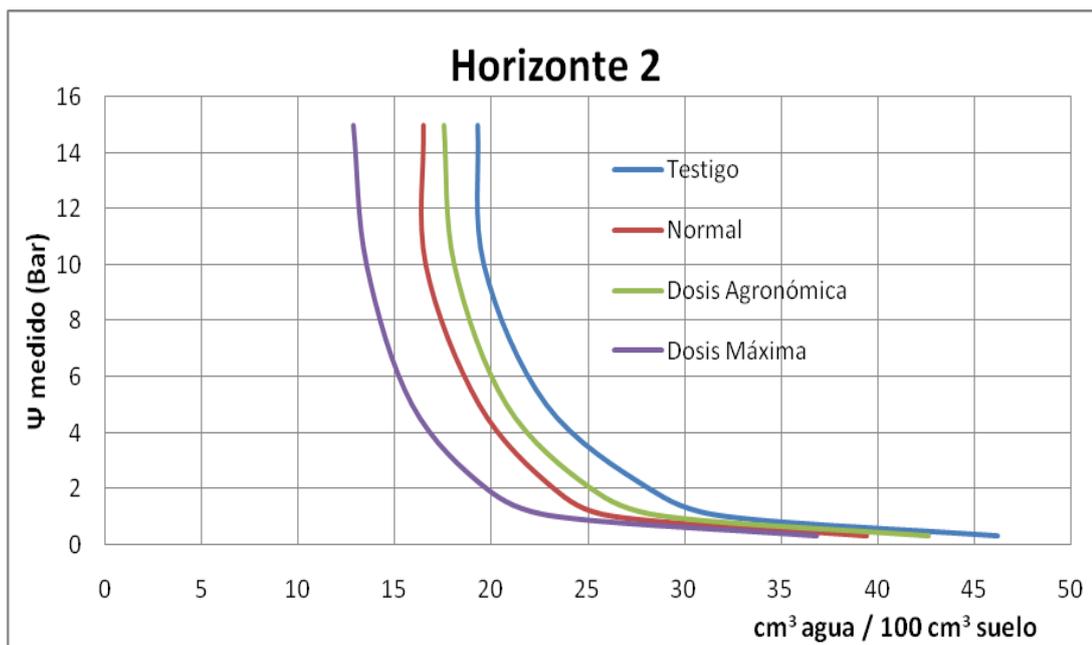


Figura 19: Curvas de potencial medido para los 3 tratamientos y para la situación “normal” del horizonte subsuperficial.

Las curvas medidas arrojan claras diferencias entre DM y N con respecto a los otros dos tratamientos. El efecto en DM se atribuye al menor PSI, (de 16.4 de T versus 12.17 de DM) (González, 2010), que determinó un aumento del porcentaje de saturación del coloide con calcio y por ende favoreció la floculación de la partículas, con lo cual se modificó el arreglo de las mismas dejando en su ordenamiento poros de mayor tamaño en todo el rango de succiones evaluadas. Esto generó una condición aún mejor que T.

El suelo con el tratamiento de DM retiene menor porcentaje de agua a Punto de Marchitez Permanente (15 B), lo cual es favorable, ya que en condiciones de estrés hídrico el suelo entregaría más agua (9% de agua para DM a PMP y alrededor de 13.5% para DA y T a PMP).

Si se observa la Figura 19 se puede afirmar que DA, que fue el tratamiento de aplicación de yeso separado en el tiempo, provocó un efecto mucho menor sobre las curvas de capacidad hídrica.

En situaciones de enriquecimiento de Na^+ y con salinidad baja, la arquitectura se deteriora comprometiendo el espacio poroso, especialmente en detrimento de los poros de mayor tamaño y por ende de conducción del agua (Pilatti *et al.*, 2002; Marano, 2004).

En el Anexo V constan las Tablas y Figuras correspondientes con la significancias estadísticas.

CONCLUSIONES

El agregado de 4000 kg ha⁻¹ de yeso puro (Dosis Máxima), provocó un importante aumento de la permeabilidad luego de 5 años de aplicada la enmienda.

No se observan efectos importantes del agregado de la enmienda sobre la densidad aparente ni tampoco sobre la porosidad total.

El agregado del yeso provocó la disminución de la resistencia mecánica en ambos horizontes y en ambos tratamientos (Dosis Máxima y Dosis Agronómica) con respecto al Testigo, siendo la Dosis Máxima la que mayores cambios logró en el horizonte subsuperficial, donde realmente se encuentra el problema.

Sobre las Curvas de Capacidad Hídrica se puede concluir que de la comparación del Testigo con el Normal –en el segundo horizonte- surge que en este último es mayor la disponibilidad de agua y mejor la condición del suelo para la exploración de las raíces, por lo tanto esta combinación evidencia un menor estrés hídrico para las plantas. Otro aspecto a destacar es que en este horizonte el agua nunca estará a 0.3 bares, sino que la raíz recién podrá absorber cuando esté a 1.5 bares.

El agregado de la enmienda provocó un notorio efecto sobre las curvas de capacidad hídrica, especialmente la correspondiente a Dosis Máxima, lo que se atribuye a un aumento del tamaño de los poros, cuyo origen está relacionado a menores contenidos de sodio. Un aspecto a resaltar es el menor contenido hídrico a punto marchitez permanente.

CONSIDERACIONES FINALES

Los resultados de esta investigación deben ser criteriosamente considerados y sería conveniente continuar durante más tiempo este tipo de experiencias para obtener resultados más exactos.

También en este tipo de investigaciones es importante ajustar la cantidad de repeticiones tanto numéricas como temporales.

BIBLIOGRAFÍA

BAVER, L. D.; W. H. GARDNER y W. R. GARDNER, 1973. Estructura del suelo. Evaluación e importancia en la agricultura. En: **Física de suelos**. Ed. Unión Tipográfica Editorial Hispano-Americana. Méjico. Pp 189-242

BLACK, C.A. 1975. **Relaciones Suelo – Planta**, Tomo I. 1ª edición. Ed. Hemisferio Sur, S.R.L. Argentina. pp. 409-416.

BONADEO, E.; I. MORENO; E. HAMPP y A. SORONDO 2001. Factores del suelo que regulan la productividad de la alfalfa en áreas con manchoneo. **XV Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo**. La Habana, Cuba.

BONADEO, E.; I. MORENO; A. ODORIZZI.; E. HAMPP; A. SORONDO y M. BONGIOVANNI 2002. Relación entre propiedades físico-químicas del suelo y raíces de alfalfa (*Medicago sativa* L.). **XVIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo**. Puerto Madryn, Chubut, Argentina.

BONADEO, E.; M. BONGIOVANNI; E. HAMPP; A. ODORIZZI e I. MORENO 2004 Comparación de propiedades de suelo que producen manchoneo en la vegetación. **XIX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo**. Paraná, Entre Ríos, Argentina.

BONADEO, E.; E. HAMPP; M. BONGIOVANNI; I. MORENO y A. ODORIZZI 2006 Relación entre propiedades físicas, químicas y raíces de alfalfa (*Medicago sativa* L.) en suelos con “manchones”. **Ci. Suelo** 24 (2) 101 – 107.

BRESSLER, E.; G. MC NEAL y D. CARTER. 1982. Saline and Sodic Soils. Modelling, principles and dynamics. Advances series in Agricultural Sciences. Springer Verlag. N°10.

CISNEROS, J. M., 2000. Manejo de la condición físico – química de los suelos. Apoyo didáctico para el Curso Uso y Manejo de Suelos. Facultad de Agronomía y Veterinaria. Universidad Nacional de Río Cuarto.

DAMIANO, F. 2008. Predicción del agua disponible en suelos pampeanos a través de funciones de pedotransferencia. En: TABOADA, M. A. y C. R. ÁLVAREZ (Ed.).

Fertilidad física de los suelos. 2º ed. Ed. Facultad de Agronomía de la UBA. Buenos Aires.

DORAN, J. W. y A. J. JONES. 1996. **Methods for Assessing Soil Quality**. SSSA Special Publication. Madison, Wisconsin, USA. N° 49.

DORRONSORO, C s/F Contaminación por sales solubles En: García, I. y C. Dorronsoro. Contaminación del suelo. Consultado el día 14 de Octubre de 2010 en: <http://edafologia.ugr.es/conta/tema12/efectos.htm>

ECHEVERRÍA E. y F. GARCÍA 2005. **Fertilidad de Suelos y Fertilización de Cultivos**. INTA. 525 pp.

GARAVITO NEIRA, F. 1980. **Propiedades químicas de los suelos**. Instituto geográfico “Agustín Codazzi”. Bogotá Colombia. Pp: 168-169.

GIL, R. 1999. Permeámetro de disco. Publicación Instituto de suelo del Centro Nacional de Investigaciones Agropecuarias (CNIA). I.N.T.A. Castelar. 11 pp.

GIL, R. El Comportamiento Físico-Funcional de los Suelos.
<http://www.agriculturadeprecision.org/mansit/Comportamiento%20Fisico-Funcional%20de%20Suelos.htm> Consultada 4/10/10.

GONZALEZ, J. 2010. **Efecto del agregado de una segunda dosis de yeso a suelos con horizontes salinos sódicos subsuperficiales**. Trabajo Final de Grado. Universidad Nacional de Río Cuarto, Córdoba, Argentina.

HAMPP, E.; E. BONADEO; M. BONGIOVANNI e I. MORENO 2004 Aspectos genéticos de suelos con manchoneo. **XVI Congreso Latinoamericano y XII Congreso Colombiano de la Ciencia del Suelo**. Bogotá, Colombia.

HAMPP, E.; E. BONADEO; M. BONGIOVANNI; I. MORENO Y R. MARZARI. 2006. Salt dynamic in “patched” soil of crops in argentina. **XVIII Congreso Mundial de la Ciencia del Suelo**. Actas en C.D. Filadelfia. USA.

ILYAS, M.; R. QURESHI y M. QADIR. 1997. Chemical changes in a saline-sodic soil after gypsum application and cropping. **Soil Technology**. Vol. 10, Issue 3. March 1997. pp. 247-260.

INFOSTAT 2008. *Infostat versión 2008*. Grupo Infostat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.

INTA, 1987. **Carta de suelos de la República Argentina**. Hoja 3363-9 Villa María. Plan Mapa de Suelos Córdoba-Argentina.

INTA, 1993 (a). **Atlas de Suelos de la República Argentina**. 2 tomos. 677 p.

INTA, 1993 (b). **Panorama Edafológico de Córdoba**. Inventario de los Suelos y de Algunos Caracteres Edáficos de la Provincia por Departamentos y Pedanías. Plan Mapa de Suelos Córdoba. 1993.

IRASTORZA, M. 2008. **Dinámica de sales ante el agregado de yeso en suelos con horizontes salinos subsuperficiales**. Trabajo Final de Grado. Universidad Nacional de Villa María, Córdoba, Argentina.

IRURTIA, C. B. y R. MON. 1998. Cambios en las propiedades físicas y químicas de los suelos de la región pampeana después de cinco años de riego suplementario. **XVI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Carlos Paz**, pp.241-242.

KLUTE, A. (ed.) 1986. **Methods of soil analysis**. Part 1. Physical and mineralogical methods. Agron. Monograph N° 9 ASA, SSSA. Madison, Wisconsin, USA.

LAVADO, R. y M. TABOADA (Ed). 2009. **Alteraciones de la fertilidad de los suelos. El halomorfismo, la acidez, el hidromorfismo y las inundaciones**. Ed. Facultad de Agronomía (UBA).

MARANO, R. 2004. Propuesta de un nuevo indicador de peligrosidad de aguas bicarbonatadas-sódicas en suelos bajo riego suplementario. **XIX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo**, Paraná.

McNEAL, B.L. y N.T. COLEMAN 1966. Effect of solution composition on soil hydraulic conductivity. **Soil Science Society America Proceedings**, V.30, p.308-312. Madison, Wisconsin, USA.

MORENO, I. 2000. **La material orgánica y el uso del suelo. Su impacto sobre propiedades físicas**. Tesis. Universidad Nacional del Sur. Bahía Blanca, Argentina.

PAGE, A.L. (Ed.) 1982. **Methods of soil analysis**. Part 1 Number 9 American Society of Agronomy, Inc. Soil Science Society of America, Inc. Segunda edición. Madison, Wisconsin. USA. 1159 pags.

PILATTI, M.; R. MARANO; J. DE ORELLANA 2002. Riego suplementario con aguas bicarbonatadas sódicas en Molisoles de Santa Fe. Estudio de caso: Sodificación y alcalinización. **XVIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo**. Puerto Madryn, Chubut, Argentina.

PUPISKY, H. y I. SHAINBERG 1979. Salt effects on the hydraulic conductivity of a sandy soil. **Soil Science Society American Journal**. v.43, p.429-433, Madison, Wisconsin. USA.

RENGASAMY, P. 1998. Sodic soils. **In: LAL, R.; W.H. BLUM; C. VALENTINE and B.A. STEWART Methods for assessment of soil degradation**. CRC Press. Boca Raton. London. New York. Washington. Pp 269.

RENGASAMY, P. y M. E. SUMNER. 1997. Processes involved in sodic behavior. In: Sumner, M.E.; Naidu, R. (ed) **Sodic soils**. New York Oxford University Press, New York.

RICHARDS, L. 1973. **Diagnóstico y Rehabilitación de suelos salinos y sódicos**. Editorial Limusa, 172 pags.

RUIZ, R. 2006. **Manejo del suelo y nutrición en suelos con problemas de aireación**. Seminario: Manejo del riego y suelo en el cultivo del palto. 20 pages. Centro Regional de Investigación (CRI) La Platina. Chile.

VARALLYAY, G. 1981. **Extreme Moisture Regime as the Main Limiting Factor of the Fertility of Salt Affected Soils**, en *Agrokémia és Talajtan*. Húngaro-Indian Seminar on Salt affected Soils, 30(73-94). Budapest, Hungría.

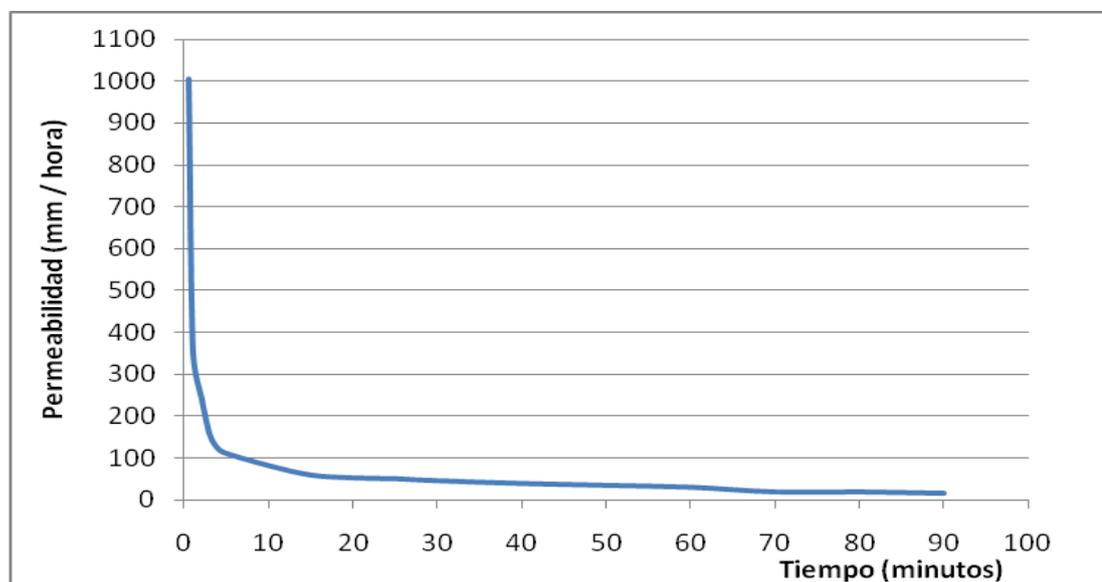
YAGODIN, B. A.; P. SMIRNOV y A. PETERBURGSKI. 1986. **Agroquímica**. Tomo I. Ed. Mir. Moscú, Rusia (1986). pp. 244-255.

ANEXOS

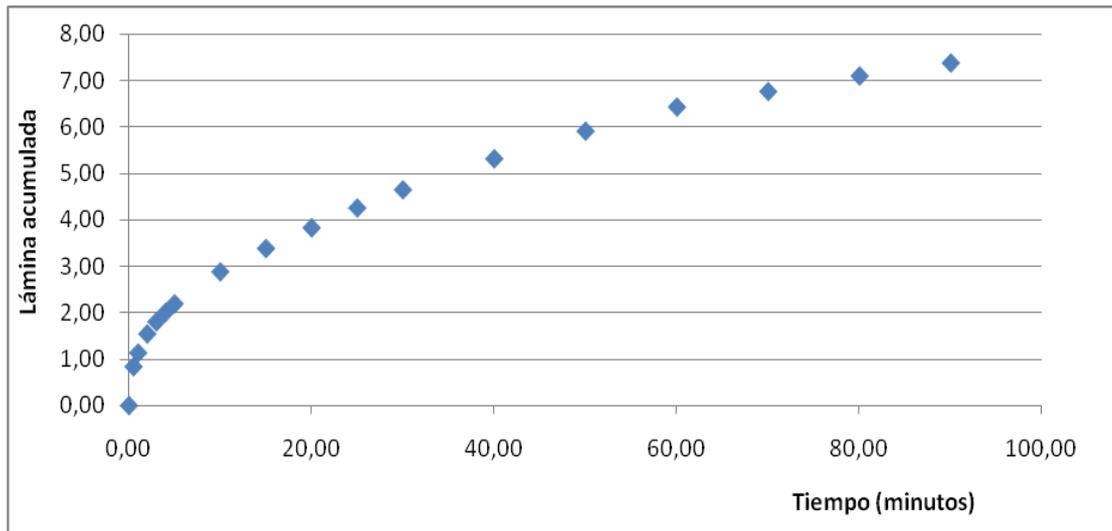
ANEXO I: Cálculo de los valores de permeabilidad.

Lect. cm	Tiempo (min)	Tiempo Total (hora)	Tiempo Parcial (hora)	Tiempo ^{1/2} h ^{1/2}	Lámina parcial (cm)	Lámina. acumulada (cm)	Vel. Infiltr. (cm/h)	Vel. Infiltr. (mm/h)
0	0,00	0,000	0,000	0,000	0,00	0,00	0,00	
4,5	0,50	0,008	0,008	0,091	0,84	0,84	100,44	1004,4
6,1	1,00	0,017	0,008	0,129	0,30	1,13	35,712	357,12
8,3	2,00	0,033	0,017	0,183	0,41	1,54	24,552	245,52
9,7	3,00	0,050	0,017	0,224	0,26	1,80	15,624	156,24
10,8	4,00	0,067	0,017	0,258	0,20	2,01	12,276	122,76
11,8	5,00	0,083	0,017	0,289	0,19	2,19	11,16	111,6
15,5	10,00	0,167	0,083	0,408	0,69	2,88	8,2584	82,584
18,2	15,00	0,250	0,083	0,500	0,50	3,39	6,0264	60,264
20,6	20,00	0,333	0,083	0,577	0,45	3,83	5,3568	53,568
22,9	25,00	0,417	0,083	0,645	0,43	4,26	5,1336	51,336
25	30,00	0,500	0,083	0,707	0,39	4,65	4,6872	46,872
28,6	40,00	0,667	0,167	0,816	0,67	5,32	4,0176	40,176
31,8	50,00	0,833	0,167	0,913	0,60	5,91	3,5712	35,712
34,6	60,00	1,000	0,167	1,000	0,52	6,44	3,1248	31,248
36,4	70,00	1,167	0,167	1,080	0,33	6,77	2,0088	20,088
38,2	80,00	1,333	0,167	1,155	0,33	7,11	2,0088	20,088
39,7	90,00	1,500	0,167	1,225	0,28	7,38	1,674	16,74

El promedio de los tres últimos valores representan la permeabilidad.



Curva de Permeabilidad en función del tiempo.



En la gráfica de lámina acumulada en función del tiempo se observan los últimos tres valores que promediados representan el valor de permeabilidad.

ANEXO II: Ejemplo del Cálculo de Resistencia Mecánica.

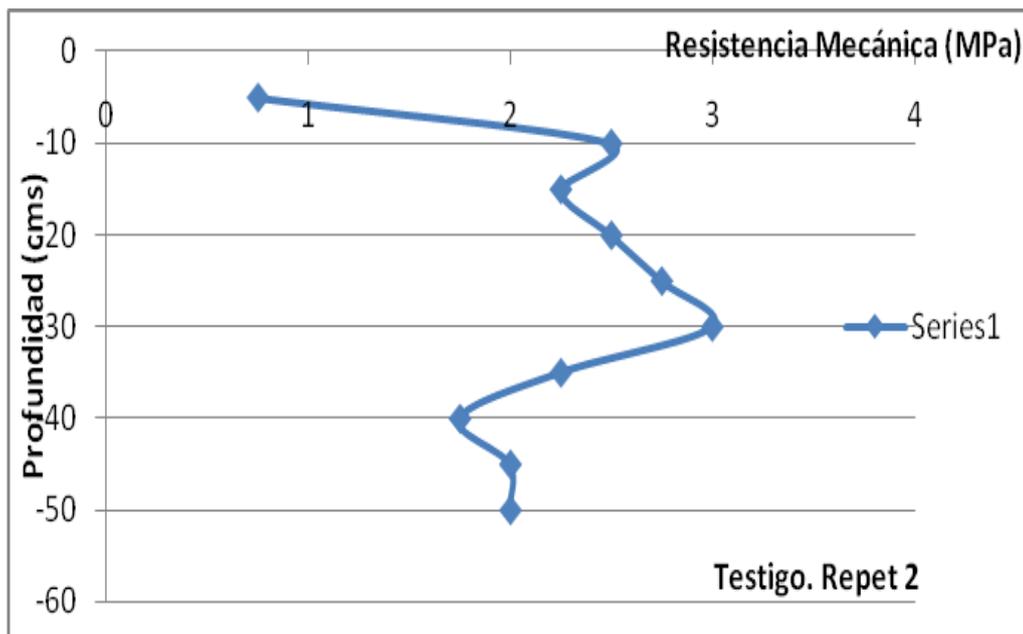
Número de golpes cada 5 cm de

Resistencia Mecánica en MPa.

profundidad.

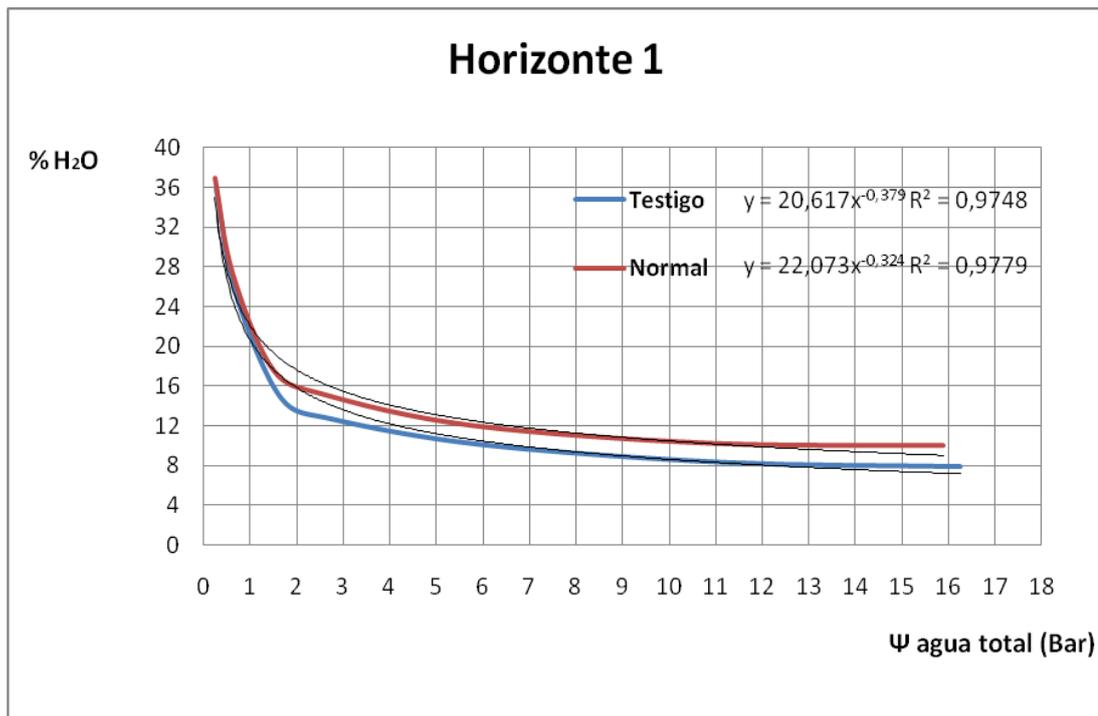
Testigo	Nº de golpes
0-5	3
5-10	10
10-15	9
15-20	10
20-25	11
25-30	12
30-35	9
35-40	7
40-45	8
45-50	8

Testigo	RM en MPa
0-5	0,75
5-10	2,50
10-15	2,25
15-20	2,50
20-25	2,75
25-30	3,00
30-35	2,25
35-40	1,75
40-45	2,00
45-50	2,00



Observación de la distribución de la Resistencia mecánica en el perfil.

ANEXO III: Ejemplo de cálculo de la lámina de agua.



Tratamiento	% Agua a 0.3B	% Agua a 15B	Diferencia	Dap
Testigo	32.54	7.38	25.16	1.36

$$25.16 * 1.36 = 34.21 \text{ gr agua} / 100 \text{ cm}^3 \text{ suelo}$$

Como la densidad del agua es 1; 1 gr de agua equivale a 1 cm³ de agua.

$$29.7 \text{ gr agua} / 100 \text{ cm}^3 \text{ suelo} = 0.342 \text{ cm}^3 \text{ agua} / \text{cm}^3 \text{ suelo}$$

$$0.342 \text{ cm}^3 \text{ agua} / \text{cm}^2 \cdot \text{cm suelo}$$

$$0.342 \text{ cm}^3 \text{ agua} / \text{cm}^2 \cdot \text{cm suelo} = 0.342 \text{ cm agua} / \text{cm suelo} = 3.42 \text{ mm agua} / \text{cm suelo}.$$

Profundidad del horizonte 1 = 24 cm

$$3.42 \text{ mm agua} / \text{cm suelo} * 24 \text{ cm} = 82.08 \text{ mm agua} / \text{horizonte}$$

ANEXO IV: Análisis de la varianza y diferencias de medias.

Análisis de la varianza Dap

horizonte	Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
1	Dap	12	0,04	0,00	3,44

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	7,3E-04	3	2,4E-04	0,11	0,9493
tratamiento	7,3E-04	3	2,4E-04	0,11	0,9493
Error	0,02	8	2,1E-03		
Total	0,02	11			

Test:LSD Fisher Alfa=0,05 DMS=0,08713

Error: 0,0021 gl: 8

tratamiento	Medias	n	
N	1,34	3	A
DA	1,34	3	A
DM	1,34	3	A
T	1,36	3	A

Letras distintas indican diferencias significativas (p<= 0,05)

horizonte	Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
2	Dap	12	0,49	0,30	2,82

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	0,01	3	3,6E-03	2,61	0,1237
tratamiento	0,01	3	3,6E-03	2,61	0,1237
Error	0,01	8	1,4E-03		
Total	0,02	11			

Test:LSD Fisher Alfa=0,05 DMS=0,07003

Error: 0,0014 gl: 8

tratamiento	Medias	n		
DA	1,27	3	A	
N	1,31	3	A	B
DM	1,34	3	A	B
T	1,35	3		B

Letras distintas indican diferencias significativas (p<= 0,05)

Análisis de la varianza %Porosidad

horizonte	Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
1	%Porosidad	12	0,04	0,00	3,53

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	1,10	3	0,37	0,12	0,9446
tratamiento	1,10	3	0,37	0,12	0,9446
Error	24,03	8	3,00		
Total	25,13	11			

Test:LSD Fisher Alfa=0,05 DMS=3,26321

Error: 3,0037 gl: 8

tratamiento	Medias	n	
T	48,66	3	A
DA	49,22	3	A
DM	49,24	3	A
N	49,49	3	A

Letras distintas indican diferencias significativas (p<= 0,05)

horizonte	Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
2	%Porosidad	12	0,49	0,30	2,72

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	14,43	3	4,81	2,58	0,1261
tratamiento	14,43	3	4,81	2,58	0,1261
Error	14,91	8	1,86		
Total	29,34	11			

Test:LSD Fisher Alfa=0,05 DMS=2,57036

Error: 1,8636 gl: 8

tratamiento	Medias	n		
T	48,98	3	A	
DM	49,49	3	A	B
N	50,41	3	A	B
DA	51,87	3		B

Letras distintas indican diferencias significativas (p<= 0,05)

Análisis de la varianza Resistencia Mecánica

horizonte	Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
1	Resist mec	12	0,45	0,25	12,03

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	0,31	3	0,10	2,19	0,1669
tratamiento	0,31	3	0,10	2,19	0,1669
Error	0,38	8	0,05		
Total	0,69	11			

Test:LSD Fisher Alfa=0,05 DMS=0,40946

Error: 0,0473 gl: 8

tratamiento	Medias	n		
DA	1,60	3	A	
N	1,72	3	A	B
DM	1,90	3	A	B
T	2,02	3		B

Letras distintas indican diferencias significativas (p<= 0,05)

horizonte	Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
2	Resist mec	12	0,61	0,47	15,45

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	0,83	3	0,28	4,19	0,0467
tratamiento	0,83	3	0,28	4,19	0,0467
Error	0,53	8	0,07		
Total	1,36	11			

Test:LSD Fisher Alfa=0,05 DMS=0,48457

Error: 0,0662 gl: 8

tratamiento	Medias	n		
DM	1,39	3	A	
N	1,44	3	A	
DA	1,81	3	A	B
T	2,03	3		B

Letras distintas indican diferencias significativas (p<= 0,05)

Análisis de la varianza Permeabilidad

horizonte	Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
2	Permeabilidad	12	0,55	0,38	38,73

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	864,66	3	288,22	3,23	0,0822
tratamiento	864,66	3	288,22	3,23	0,0822
Error	714,15	8	89,27		
Total	1578,81	11			

Test:LSD Fisher Alfa=0,05 DMS=17,78956

Error: 89,2692 gl: 8

tratamiento	Medias	n		
DA	12,77	3	A	
N	21,70	3	A	B
T	26,91	3	A	B
DM	36,21	3		B

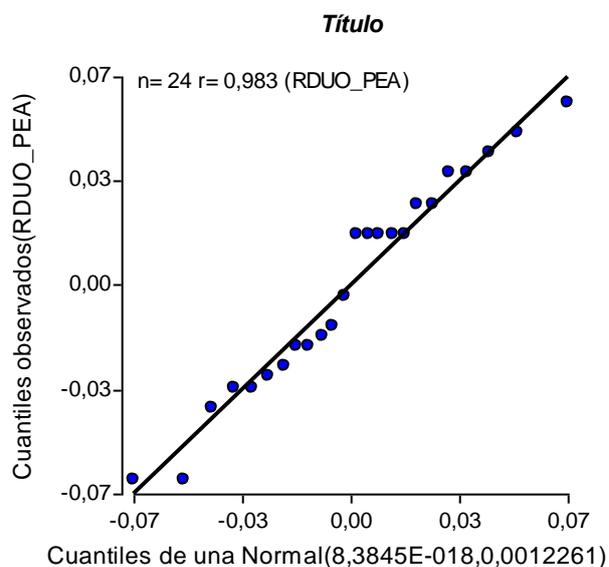
Letras distintas indican diferencias significativas (p<= 0,05)

Análisis de la varianza

Supuestos del análisis de varianza

Prueba de Normalidad: de PEA

1. Q- Q plot



2. Prueba de normalidad (shapiro-wilks modificado)

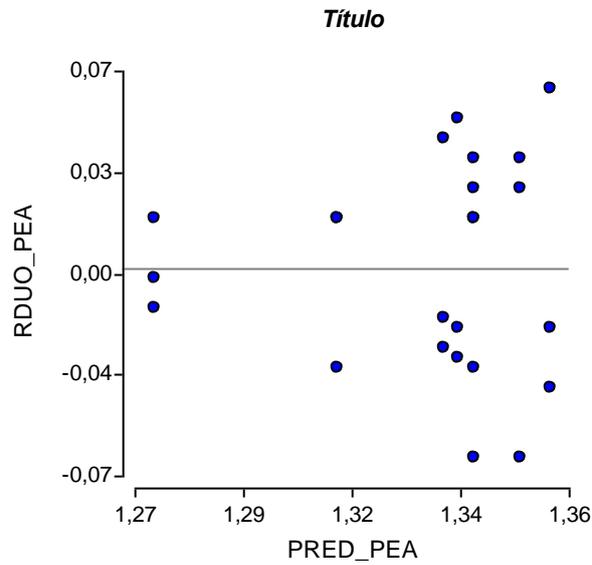
Shapiro-Wilks (modificado)

Variable	n	Media	D.E.	W*	p (una cola)
RDUO PEA	24	0,00	0,04	0,93	0,2462

No rechazo Ho, por lo tanto los residuos (eij) se distribuyen normalmente con una probabilidad de p=0.2462

Prueba de Homogeneidad de varianzas

1. Diagrama de dispersión



2. Prueba de levene

Ho: las varianzas son homogéneas

H1: las varianzas no son homogéneas

Análisis de la varianza prueba de leuene

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
RABS PEA	24	0,15	0,03	53,48

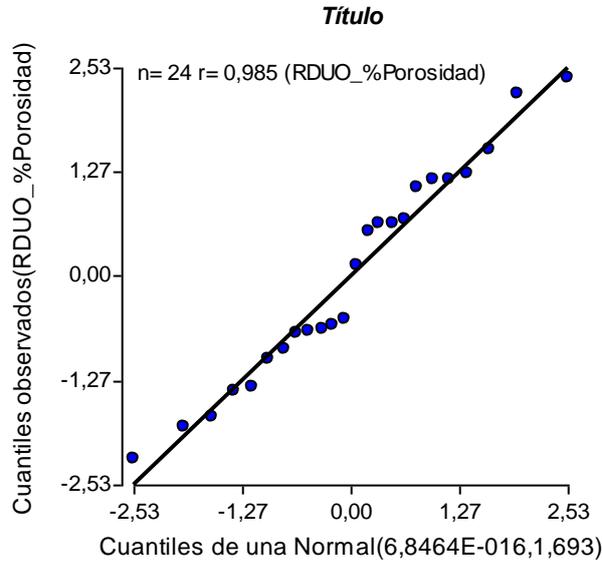
Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	9,5E-04	3	3,2E-04	1,21	0,3310
tratamiento	9,5E-04	3	3,2E-04	1,21	0,3310
Error	0,01	20	2,6E-04		
Total	0,01	23			

No rechazo Ho por lo tanto las varianzas son homogéneas con una probabilidad de $p=0.3310$

Prueba de Normalidad: de % Porosidad

1. Q- Q plot



2. Prueba de normalidad (shapiro-wilks modificado)

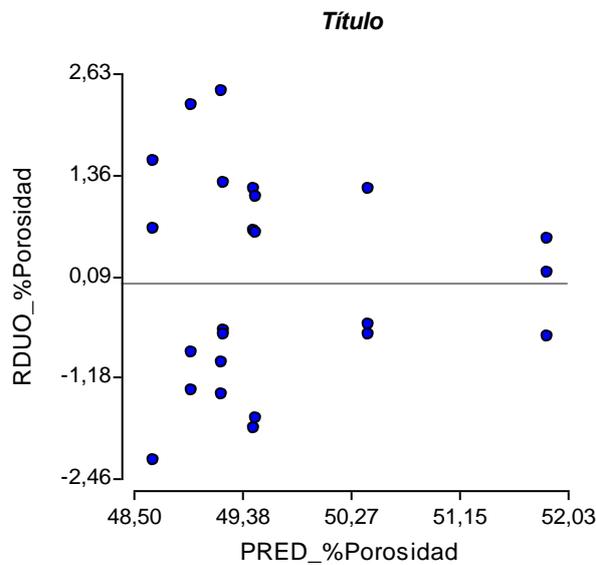
Shapiro-Wilks (modificado)

Variable	n	Media D.E.	W*	p (una cola)
RDUO %Porosidad	24	0,00	1,30	0,93

No rechazo Ho, por lo tanto los residuos (eij) se distribuyen normalmente con una probabilidad de p=0.3055

Prueba de Homogeneidad de varianzas

1. Diagrama de dispersión



2. Prueba de Levene

Ho: las varianzas son homogéneas

H1: las varianzas no son homogéneas

Análisis de la Varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
RABS %Porosidad	24	0,12	0,00	54,49

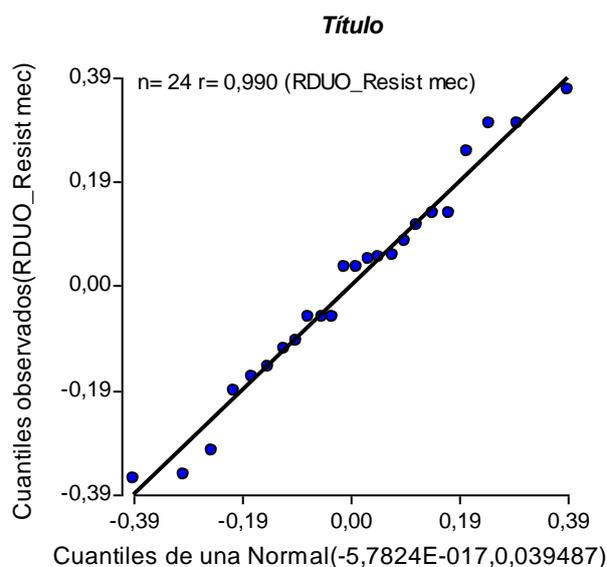
Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	1,03	3	0,34	0,91	0,4523
tratamiento	1,03	3	0,34	0,91	0,4523
Error	7,52	20	0,38		
Total	8,55	23			

No Rechazo Ho por lo tanto las varianzas son homogéneas con una probabilidad de $p=0.4523$

Prueba de Normalidad: de Resistencia Mecánica

1. Q-Q plot



2. Prueba de normalidad (shapiro-wilks modificado)

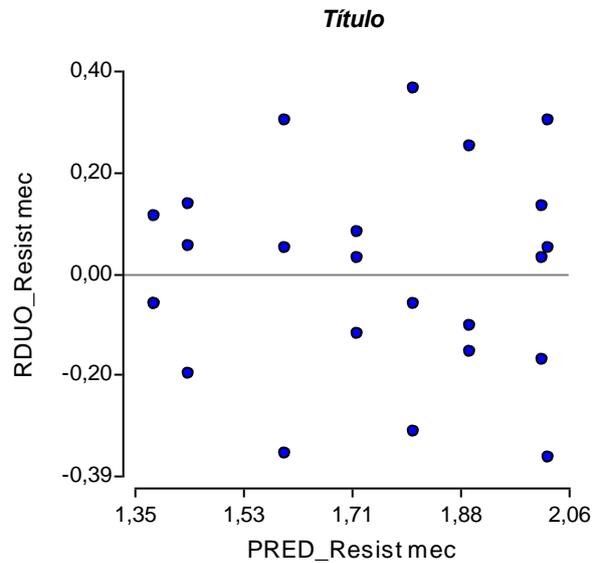
Shapiro-Wilks (modificado)

Variable	n	Media	D.E.	W*	p (una cola)
RDUO Resist mec	24	0,00	0,20	0,95	0,4753

No rechazo Ho, por lo tanto los residuos (eij) se distribuyen normalmente con una probabilidad de $p=0.4753$

Prueba de Homogeneidad de varianzas

1. Diagrama de dispersión



2. Prueba de levene

Ho: las varianzas son homogéneas

H1: las varianzas no son homogéneas

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
RABS Resist mec	24	0,22	0,10	68,00

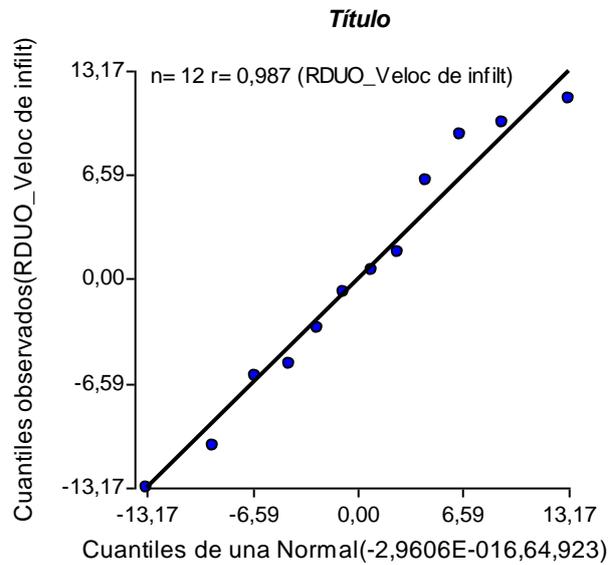
Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	0,07	3	0,02	1,87	0,1665
tratamiento	0,07	3	0,02	1,87	0,1665
Error	0,23	20	0,01		
Total	0,30	23			

No Rechazo Ho por lo tanto las varianzas son homogéneas con una probabilidad de p=0.1665

Prueba de Normalidad: de Permeabilidad

1. Q- Q plot



2. Prueba de normalidad (shapiro-wilks modificado)

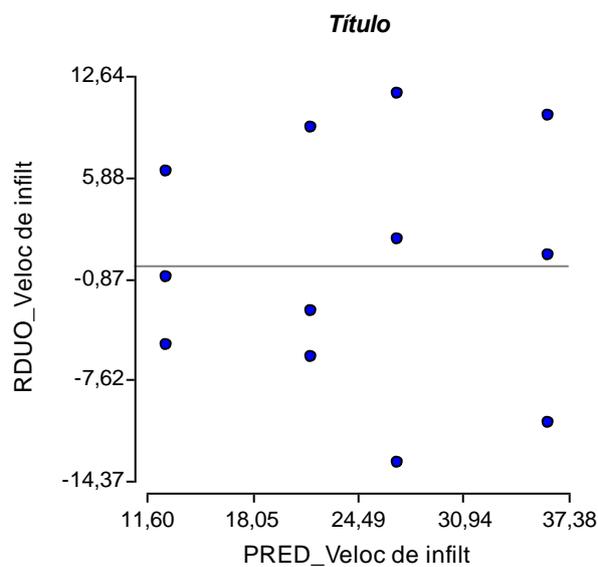
Shapiro-Wilks (modificado)

Variable	n	Media	D.E.	W*	p (una cola)
RDUO Veloc de infilt	12	0,00	8,06	0,93	0,5112

No rechaza H_0 , por lo tanto los residuos (e_{ij}) se distribuyen normalmente con una probabilidad de $p=0.5112$

Prueba de Homogeneidad de varianzas

1. Diagrama de dispersión



2. Prueba de Levene

Ho: las varianzas son homogéneas

H1: las varianzas no son homogéneas

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
RABS Veloc de infilt	12	0,16	0,00	71,26

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

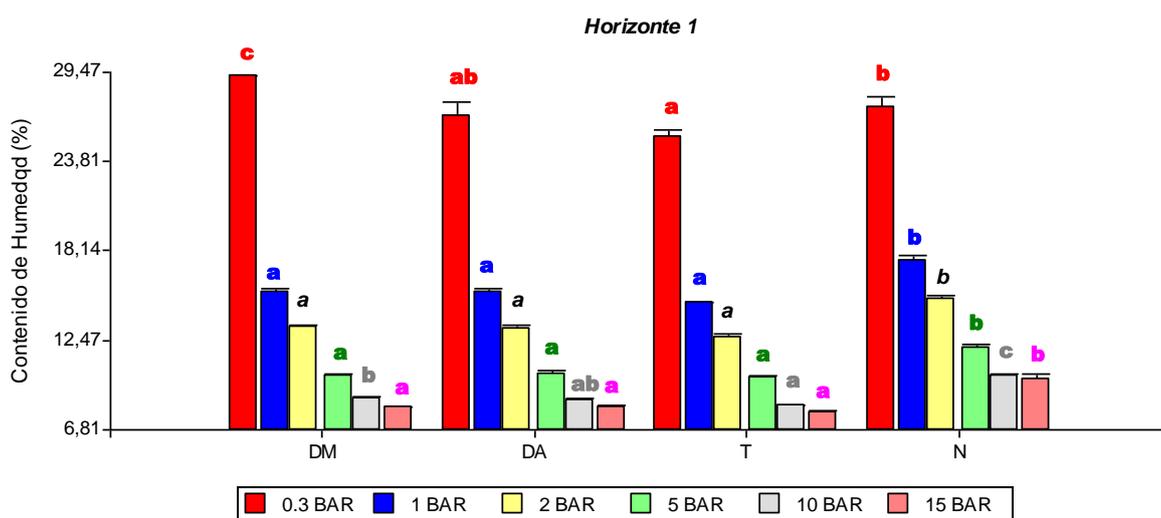
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	33,43	3	11,14	0,52	0,6816
tratamiento	33,43	3	11,14	0,52	0,6816
Error	172,16	8	21,52		
Total	205,59	11			

No Rechazo Ho por lo tanto las varianzas son homogéneas con una probabilidad de $p=0.6816$

ANEXO V: Tablas y Figuras correspondientes de los distintos tratamientos, con sus respectivas significancias estadísticas.

Tabla A: Horizonte 1 - Contenido de Humedad (%), considerando solo el potencial mátrico del suelo.

	Testigo	Dosis Agronómica	Dosis Máxima	Normal
0.3 Bar	25.41 a	26.75 ab	29.23 c	27.28 b
1 Bar	14.84 a	15.52 a	15.57 a	17.53 b
2 Bar	12.71 a	13.21 a	13.31 a	15.11 b
5 Bar	10.17 a	10.39 a	10.25 a	12.01 b
10 Bar	8.39 a	8.66 ab	8.84 b	10.21 c
15 Bar	7.96 a	8.19 a	8.24 a	9.98 b



Letras distintas indican diferencias significativas ($p < 0.05$)

Tabla B: Horizonte 2 – Contenido de Humedad (%), considerando solo el potencial mátrico del suelo.

	Testigo	Dosis	Dosis Máxima	Normal
Agronómica				
0.3 Bar	34.24 b	33.35 b	27.49 a	30.12 a
1 Bar	23.79 c	22.65 bc	17.39 a	20.08 b
2 Bar	20.86 c	19.67 bc	14.74 a	17.73 b
5 Bar	16.93 b	16.25 b	11.87 a	14.78 b
10 Bar	14.54 b	14.14 b	10.12 a	12.67 b
15 Bar	14.30 b	13.72 b	9.61 a	12.58 b

