Evaluación de propiedades físicas y químicas en suelos regados y relaciones con la conductividad eléctrica aparente en un establecimiento agrícola del noreste bonaerense

Tesis presentada para optar al título de Magister de la Universidad de Buenos Aires, Área Ciencias del Suelo

Mariano Santiago Iseas
Lic. en Ciencias Ambientales - Universidad de Buenos Aires - 2017

Lugar de trabajo: Catedra de Fisica- Facultad de Agronomia (UBA)

Escuela para Graduados Ing. Agr. Alberto Soriano
Facultad de Agronomía – Universidad de Buenos Aires

COMITÉ CONSEJERO

Director de Tesis

CLAUDIA MABEL, SAINATO
Lic. en Ciencias Físicas (Universidad de Buenos Aires)
Doctora en Ciencias Físicas (Universidad de Buenos Aires)

Co-director

CATALINA, ROMAY
Ingeniera Agrónoma (Universidad Nacional de Cuyo)
Magister Scientiae en Riego y Dreanje (Universidad Nacional de Cuyo)
Máster en Ingeniería de Regadíos (Ministerio de Fomento de España)

JURADO DE TESIS

JURADO

CASTIGLIONI, MARIO GUILLERMO
Ingeniero Agrónomo (Universidad de Buenos Aires)
Doctor en Ingeniería (Universidad Nacional de Rosario)

JURADO

MARANO, ROBERTO PAULO
Ingeniero en Recursos Hídricos (Universidad Nacional del Litoral)
Magister Scientiae en Riego y Dreanje (Universidad Nacional de Cuyo)
Doctor en Ciencias (Universidad de San Pablo)

JURADO

MARTINELLI, PATRICIA HILDA
Lic. en Ciencias Físicas (Universidad de Buenos Aires)
Doctora en Ciencias Físicas (Universidad de Buenos Aires)

Dedicatoria

Para Ailu y Maru, son mi vida.

Agradecimientos

A mis directoras, Cata y Claudia por acompañarme en este proceso académico, por el valor humano, por la confianza y libertad para el desarrollo de este trabajo

A Leti, técnica del laboratorio, por toda la ayuda en el procesamiento de las muestras y su compañerismo.

A la familia Lawler por abrirnos las puertas del establecimiento, la buena disposición y sencillez.

A mis compañeros de campañas: Seba, Agustín, Andy, Fabi, John y personal de campo de FAUBA

A mis compañeres de la catedra de Física por el día día, con las charlas de vida y trabajo, en especial a Fabi, Seba y John.

Por supuesto a mi familia, a mis viejos, a Maru mi compañera de vida, y muy especialmente, a mi peque, Ailu.

Declaración

Declaro que el material incluido en esta tesis es, a mi mejor saber y entender, original producto de mi propio trabajo, y que este material no lo he presentado, en forma parcial o total, como una tesis en ésta u otra institución.

ÍNDICE

Índice ……..v

Índice de tablas ix

Indice de figuras …..……...vii

Lista de abreviaturas xiii

Resumen/Abstract xiv

Capítulo 1 1

INTRODUCCIÓN, OBJETIVOS Y 1

METODOLOGÍA GENERAL 1

1.1INTRODUCCIÓN 2

1.2 JUSTIFICACIÓN: SUSTENTABILIDAD Y SENSORES PROXIMALES 4

1.3 OBJETIVOS GENERALES Y ESPECIFICOS 6

1.3.1 Objetivo general 6

1.3.2 Objetivos específicos 6

1.4 CARACTERIZACIÓN DEL SITIO DE ESTUDIO 7

1.5 DISEÑO EXPERIMENTAL GENERAL 11

1.6 BIBLOGRAFÍA 14

CAPITULO 2. 16

COMPORTAMIENTO DE LA CEap DEL SUELO Y SU RELACION CON LAS PROPIEDADES EDAFICAS BAJO RIEGO COMPLEMENTARIO 16

2.1 INTRODUCCION 17

2.1.1 Definición de la CEap y descripción de los métodos geofísicos de exploración 17

2.1.2 Geofísica aplicada al estudio del suelo 18

2.1.3 Antecedes de estudios geofísicos en ciencias agropecuarias en la región Pampeana 20

2.2 METODOLOGÍA Y DISEÑO EXPERIMENTAL 22

2.2.1 Características del instrumental geofísico utilizado 22

2.2.1.1 Sensor Electromagnético EMP-400 22

2.2.1.2 Sensor de Humedad (TDR) 23

2.2.1.3 Resistivimetro Landviser 23

2.2.2 Relevamiento de CEap con sensor EMP400 y propiedades edaficas 25

2.2.3 Medición de humedad volumetrica con TDR y medición de CEap mediante método geoelectrico (resistivimetro) 26

2.2.4 Procesamiento de datos y mapeo 27

2.2.5 Análisis estadísticos 28

2.3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN 29

2.3.1 Resumen estadístico de las exploraciones con sensor EMP400 29
2.3.2 Semivariogramas en parcelas con distribución normar: R17, S18, J19 y N19 30
2.3.3 Mapas y rangos de CEap..... 31
2.3.4 Relaciones entre categorías de CEap con las propiedades del suelo..... 34
2.3.4.1 Parcelas medidas con diseño EMI_{CV} 34
2.3.4.2 Parcelas medidas con diseño EMI_{EH} 35
2.3.5 Regresiones entre las propiedades edáficas y la CEap por parcela..... 38
2.3.5.1 Parcelas medidas con diseño EMI_{CV} 38
2.3.5.2 Parcelas medidas con diseño EMI_{EH} 39
2.3.6 Humedad Volumétrica medida con TDR y resistividad eléctrica con método geoeléctrico 41
2.3.7 Relaciones entre CEap y propiedades del suelo para todas las parcelas estudiadas 46
2.4 CONCLUSIONES 48
2.5 BIBLIOGRAFIA 50
Capítulo 3..... 56
EVALUACIÓN DE PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS DE SUELOS REGADOS EN FORMA COMPLEMENTARIA 56
3.1 INTRODUCCIÓN 57
3.1.1 Calidad del agua subterránea 57
3.1.2 Efecto del contenido de sodio intercambiable y la salinidad en la solución del suelo... 58
3.1.3 Las propiedades químicas de suelos regados en la Región Pampeana. 62
3.1.4 Las propiedades físicas de suelos regados en la Región Pampeana..... 64
3.2 METODOLOGÍA Y DISEÑO EXPERIMENTAL 66
3.2.1 Diseño experimental 66
3.2.2 Caracterización del perfil del suelo en estudio 67
3.2.3 Determinación de calidad de agua de riego 67
3.2.4 Muestreo y determinaciones de las propiedades químicas 67
3.2.5 Muestreo y determinaciones de las propiedades físicas..... 68
3.2.6 Metodología de análisis de relaciones entre propiedades físicas y químicas..... 69
3.2.7 Análisis estadístico..... 70
3.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN 71
3.3.1 Caracterización de suelo de la zona de estudio..... 71
3.3.2 Calidad del agua subterránea de la zona de estudio 73
3.3.3 Propiedades químicas de los suelos estudiados 74
3.3.3.1 Conductividad eléctrica del suelo (CEs) 74
3.3.3.2 pH..... 75
3.3.3.3 Contenido de Na^{+}, capacidad de intercambio catiónico (CIC) y porcentaje de sodio intercambiable (PSI) 76

3.3.3.4 Nitratos y fosfatos de los suelos evaluados 78
3.3.4 Análisis apareado de las variables químicas estudiadas 79
3.3.4.1 CEs 79
3.3.4.2 pH 79
3.3.4.3 PSI, Na^+ y CIC 80
3.3.4.4 Concentración de NO_3^- y PO_4^{3-} 81
3.3.5 Relaciones entre las propiedades químicas evaluadas 82
3.3.6 Discusión propiedades químicas 84
3.3.6 Propiedades Físicas de los suelos estudiados 85
3.3.6.1 Humedad gravimétrica y volumétrica 85
3.3.6.2 Composición textural 87
3.3.6.3 Densidad aparente y porosidad 89
3.3.6.4 Resistencia a la penetración (Rp) 91
3.3.6.5 Estabilidad de agregados 95
3.3.6.6 Conductividad hidráulica saturada 97
3.3.6.7 Infiltración 98
3.3.6.8 Relaciones entre las propiedades físicas evaluadas 100
3.3.7 Relaciones entre las propiedades físicas y químicas 102
3.3.7.1 Conductividad Hidráulica Saturada 102
3.3.7.2 Estabilidad de los agregados del suelo 103
3.3.7.3 Resistencia a la penetración 105
3.4 CONCLUSIONES 106
3.5 BIBLIOGRAFÍA 109
CAPITULO 4. 115
CONCLUSIONES GENERALES 115

Índice de tablas

Tabla 1. Superficie total, superficie regada y serie de suelo por lote. 8
Tabla 2. Descripción de los acuíferos del ambiente hidrogeológico Noreste en la Provincia de Buenos Aires. Extraído de Auge, 2002. 11
Tabla 3. Descripción y ubicación dentro del lote de las parcelas estudiadas. 12
Tabla 4. Descripción de los diseños de exploración geofísica con EMI y selección de sitios de muestreo de suelo. 26
Tabla 5. Estadisticos descriptivos de la CEap por parcela. 29
Tabla 6. Rangos de CEap y numero de muestras por parcela para las categorías alta, media y baja. 32
Tabla 7. Resultados de ANOVA para las propiedades edáficas estudiadas por categoría de CEap en las parcelas exploradas con EMICV. (letras distintas indican diferencias estadísticas entre las medias con pvalor=0.05) 35
Tabla 8. Resultados de ANOVA para las propiedades edáficas estudiadas por categoría de CEap en las parcelas exploradas con EMI_{EH}. (letras distintas indican diferencias estadísticas entre las medias con pvalor=0.05) 38
Tabla 9. Coeficientes de correlación lineal de Pearson por variable y parcela con la CEap. 41
Tabla 10. Estadisticos descriptivos de la Humedad Volumétrica medida con sensor TDR (HV_{TDR}) 42
Tabla 11. Coeficientes de correlación lineal Pearson particionado de manera “Parcial” (parcelas E19/M19/J19/N19) y “General” (todas las parcelas). 47
Tabla 12. Tabla con directrices para determinar aptitud de agua de riego desarrollado por INTA (1999) 60
Tabla 13. Numero de muestras de suelo en cada tratamiento por parcela y profundidad para análisis de las variables químicas. 68
Tabla 14. Numero de muestras de suelo en cada tratamiento por parcela para análisis de las variables físicas en la profundidad de 0-20 cm 69
Tabla 15. Caracterización de un perfil de suelo bajo riego de la zona de estudio 72
Tabla 16. Caracterización de un perfil de suelo bajo secano de la zona de estudio 72
Tabla 17. Resultados del análisis químico del agua subterránea utilizada para riego 73
Tabla 18. Resultados de CEs (µS/cm) por parcela y profundidad. 75
Tabla 19. Resultados de pH por parcela y profundidad 76
Tabla 20. Resultados de PSI, CIC y Na por parcela para la profundidad de 0-20 cm. 77
Tabla 21. Resultados de PSI, CIC y Na por parcela para la profundidad de 20-40 cm. 78
Tabla 22. Resultados de PO_4 y NO_3 por parcela para la profundidad de 0-20 cm. 78
Tabla 23. Resultados de PO4 y NO3 para pseudoréplicas por parcela para la profundidad de 20-40 cm. 79
Tabla 24. Valores promedio de HV (%) por parcela. 86
Tabla 25. Resultados de Hg y Hv por parcela para la profundidad de 0-20 cm) 86

Tabla 26. Valores promedios (%) de arenas, limos y arcillas con su clasificación textural para la profundidad de 0-20 cm por parcela y a nivel general. 87
Tabla 27. Resultados en la composición textural por parcela para la profundidad de 0-20 cm 88
Tabla 28. Valores promedio y CV (%) de la Dap (g/cm3) y Pt (%) por parcela y general. 89
Tabla 29. Resultados en la Dap (g/cm3) y Pt (%) por parcela para la profundidad de 0-20 cm 89
Tabla 30. Valores promedios del DMP (mm) por parcela de los agregados del suelo sometido a pretratamiento de humedecimiento rápido. 95
Tabla 31. Resultados promedio de la Tib (mm/h) por tratamiento y parcela con CV(%). 100
Tabla 32. Correlaciones entre valores promedios por tratamiento y parcela entre las variables físicas estudiadas. 101

Indice de Figuras

Figura 1. Imágenes del sistema de riego de aspersión con pivote central. Derecha: lateral de riego.. 3
Figura 2 Evolución temporal de la superficie bajo riego con pivote central en la Provincia de Buenos Aires entre el 1995 y 2015.. 3
Figura 3 Imágenes del sitio experimental. Izquierda: lote en barbecho con lateral de riego..... 8
Figura 4. Precipitación acumulada mensual de los años 2017, 2018 y 2019 y precipitación acumulada mensual promedio histórico (1983-2020) del establecimiento agricola.. 10
Figura 5. Ubicación de las parcelas bajo estudio en diseño apareado dentro del establecimiento agrícola en Suipacha, Provincia de Buenos Aires..... 13
Figura 6. Representación sistemática y modelo de la conducción eléctrica en el suelo.. 19
Figura 7. Imágenes de los sensores geofiscos utilizados. 24
Figura 8. Esquema de configuración de electrodos de corriente y medición de potencial eléctrico para obtener la CEapsup con resistimetro Land Mapper ERM 01..... 25
Figura 9. Semivariogramas experimentales de las parcelas..... 31
Figura 10. Mapas de CEap exploradas con los diseños EMI_{CV} (17 y 18) y EMI_{EH} (19) con frecuencia de 16 kHz.. 33
Figura 11. Mapas de HV_{TDR}(%) de las parcelas exploradas con sensor de humedad TDR.. 43
Figura 12. Gráficos de regresión lineal entre la CEap y HV_{TDR} de las parcelas E19, M19, J19 y N19.. 44
Figura 13. Mapas de $CEap_{sup}$ (mS/m) medido con sensor resistivimetro Landviser en las parcelas J19 y N19.. 45
Figura 14. Gráfico de regresión lineal entre la $CEap_{sup}$ con la CEap medida con EMI y la HV_{TDR}..... 45
Figura 15. Nomograma de Riverside 59
Figura 16. Límites de RAS y CE del agua para agua riego propuesto por la FAO 60
Figura 17. Esquema de oclusión de los poros del suelo por dispersión de arcillas.. 61
Figura 18. Perdida relativa de Kh ante cambios en salinidad con distintos niveles de RAS. 61
Figura 19. Esquema de las parcelas estudiadas, diseño experimental y sitios de muestreo de suelo.. 66
Figura 20. Resultados de los análisis apareados de las propiedades químicas estudiadas en ambas profundidades.. 81
Figura 21. Correlaciones entre las propiedades químicas evaluadas a la profundidad de 0-20 cm. 83
Figura 22. Correlaciones entre las propiedades químicas evaluadas a la profundidad de 20-40 cm. 83
Figura 23. Resultados análisis apareados en la composición textural. 89

Figura 24. Resultados de la Rp (MPa) entre R y S por parcela en las profundidades estudiadas 93
Figura 25. Resultados análisis apareados en la Resistencia a la penetración (Mpa).... 94
Figura 26. Resultados ANOVA para la DMP (mm) entre R y S por parcela 96
Figura 27. Valores promedio y CV (%) de la Ks (mm/h) por tratamiento y parcela..... 98
Figura 28. Gráfico de regresión lineal entre la Ks (mm/h) y el contenido de Na+ (meq/100g) para valores promedio por parcela y tratamiento. 103
Figura 29. Gráfico de regresión lineal entre la EA (mm) y el CEs (µS/cm) para valores promedio por parcela y tratamiento. 104
Figura 30. Gráfico de regresión lineal entre la EA (mm) y el CIC (meq/100g) para valores promedio por parcela y tratamiento. 105
Figura 31. Gráfico de regresión lineal entre la Rp (Mpa) con el pH y el contenido de Na+ (meq/100g) para valores promedio por parcela y tratamiento 106

Lista de abreviaturas

Arc: contenido de arcillas

Are: contenido de arenas

ΔV: Diferencial de potencia eléctrica

CEa: Conductividad eléctrica del agua de riego

CEap: Conductividad eléctrica aparente del suelo

$CEap_{Sup}$: Conductividad eléctrica aparente del suelo superficial(resistivimetroLandviser).

CEs: Conductividad eléctrica del suelo

CO: Carbono orgánico

CT: composición textural

Dap: Densidad aparente

DMP: Diámetro medio ponderado de los agregados del suelo

E: constante dieléctrica

EA: Estabilidad de los Agregados

EE: Estabilidad estructural

EMI: Sensor Profiler EMP400 de inducción electromagnética

EMI_{CV} : Diseño exploratorio con sensor de inducción electromagnético EMP 400 con medición continua y orientación vertical del momento dipolar.

EMI_{EH}: Diseño exploratorio con sensor de inducción electromagnético EMP 400 con medición puntual y orientación horizontal del momento dipolar

Hg: Humedad gravimétrica

Hp: Campo magnético primario

Hs: Campo magnético secundario

HV: Humedad Volumétrica del suelo

HV_{TDR} : Humedad Volumétrica del suelo medida con sensor TDR

I: intensidad de corriente eléctrica

IE: inestabilidad estructural

Kh: Conductividad Hidráulica

Ks: ConductividadHidráulica saturada

Lim: contenido de limos

MO: Materia Orgánica

pH: potencial de hidrogeno

PI: Parcelas integradas bajo riego y secano

PS: Parcelas separadas en riego o en secano

PSI: Porcentaje de Sodio intercambiable

Pt: Porosidad total

R: Riego

RAS: Relación absorción de sodio

Rp: Resistencia a la penetración

Rp_{cor} : Resistencia a la penetración corregida por contenido hídrico (HV)

ρ: resistividad eléctrica

S: Secano

TDR: Sensor de humedad Time DomainReflectometry

Tib: Tasa de infiltración básica

TRE: Tomografías de resistividad eléctrica

Resumen

Durante las últimas décadas, en la región pampeana, la superficie bajo riego complementario con sistema de pivote central aplicado en cultivos extensivos en siembra directa se ha incrementado. Potencialmente, en determinadas condiciones, la implementación de esta práctica conlleva riesgo de salinización de los suelos receptores. Para la gestión sustentable del recuro sera fundamental evaluar la calidad del agua utilizada, las láminas de riego aplicadas y monitoreo de las propiedades edáficas. En ocasiones, el seguimiento de estas propiedades es limitado debido a la gran cantidad de muestras necesarias y el costo económico asociado. De esta manera, los sensores proximales son una alternativa eficiente, rápida y de bajo costo para estudiar el suelo. En un establecimiento agrícola bajo riego complementario en la localidad de Suipacha (Bs As) se estudiaron los cambios en las propiedades físicas y químicas del suelo bajo riego complementario con aguas bicarbonatadas sodicas, y se evaluo la eficiencia de sensores geofísicos proximales para la detección de la variabilidad espacial en las propiedades intrinsecas del suelo a través de la conductividad eléctrica aparente (CEap) relevada con un sensor electromagnetico**.** En 7 parcelas con un diseño apareado (riego y secano), se exploró: la CEap y otras variables geofísicas como la conductividad eléctrica aparente superficial medida con resistivimetro de contacto ($CEap_{sup}$) y humedad volumétrica medida con sensor eléctrico (HV_{TDR}), junto con las siguientes propiedades edaficas: conductividad eléctrica del suelo (CEs), pH, porcentaje de sodio intercambiables (PSI), capacidad de intercambio catiónico (CIC), contenido de sodio, nitratos y fosfatos (Na^+, NO_3 y PO_4), densidad aparente (Dap), porosidad total (Pt), humedad volumétrica (HV), conductividad hidráulica saturada (Ks), resistencia a la penetración (Rp), composición textural (CT), estabilidad de los agregados (EA) y la tasa de infiltración basica (Tib). Se reportaron cambios en algunas propiedades química; el pH, PSI, contenido Na+ y CEs aumentó bajo riego complementario. A su vez, la CEap obtuvo buenas relaciones con estas propiedades y con las otras variables geofísicas monitoreadas (HV_{TDR} y $CEap_{sup}$). Sin embargo, las propiedades físicas e hídricas no manifestaron cambios importantes y no se hallaron relaciones robustas con la CEap. En conclusión, los suelos estudiados mostraron aumentos en las propiedades químicas relacionadas con la salinización y sodificación, y el estudio de estas propiedades mediante un sensor electromagnetico demostró ser apropiado, efectivo y de facil aplicación.

Palabras claves: riego complementario, conductividad eléctrica aparente, propiedades físicas, propiedades químicas, sensor electromagnético.

Abstract

In recent decades, the area under supplemental irrigation with center pivot system in extensive no-tillage has increased in the Pampean region. Under certain conditions, the implementation of this practice may entail a risk of salinization of the receiving soils. In order to manage it in a sustainable way, it will be essential to evaluate the quality of the water used, the irrigation rates applied and the monitoring of soil properties. The monitoring of these properties is sometimes limited by the large number of samples required and the associated economic costs. Proximal sensors are therefore an efficient, fast and cost-effective alternative for soil monitoring. In an agricultural farm under supplemental irrigation in the locality of Suipacha (Buenos Aires), the changes in the physical and chemical properties of the soil under supplemental irrigation with sodium bicarbonate water were evaluated and the feasibility of monitoring them using the apparent electrical conductivity of the soil (ECap) measured with an electromagnetic sensor. The following soil properties were measured in 7 plots of a paired design (irrigated and rainfed): ECap and other geophysical variables such as surface apparent electrical conductivity measured with a contact resistivity meter ($ECap_{sup}$) and volumetric moisture measured with an electrical sensor (VW_{TDR}): Soil electrical conductivity (ECs), pH, percentage of exchangeable sodium (ESP), cation exchange capacity (CEC), sodium, nitrate and phosphate content ($Na+$, NO_3 and PO_4), bulk density (BD), total porosity (Tp), volumetric humidity (VW), saturated hydraulic conductivity (Ks), penetration resistance (Pr), textural composition (CT), aggregate stability (AE) and basal infiltration rate (Tib). Changes in some chemical properties were reported; pH, ESP, Na+ content and ECs relationships with these properties and with the other geophysical variables monitored (VW_{TDR} and $ECap_{sup}$). However, the physical and hydric properties did not show significant changes and no robust relationships were found with ECap. In conclusion, the soils studied showed an increase in chemical properties related to salinization and sodification, and the study of these properties using an electromagnetic sensor proved to be appropriate, effective and easy to apply.

Key words: supplementary irrigation, apparent electrical conductivity, physical properties, chemical properties, electromagnetic sensor.

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN, OBJETIVOS Y METODOLOGÍA GENERAL

1.1 INTRODUCCIÓN

La creciente demanda mundial de productos de origen agropecuario favoreció la implementación de nuevas tecnologías y prácticas al sistema productivo agrícola, las cuales tuvieron como objeto aumentar el rendimiento por hectárea. El riego es una herramienta estratégica para aumentar la producción de alimentos y contribuir a la seguridad alimentaria, generar nuevas oportunidades de trabajo, dinamizar zonas que se han visto marginadas de las fuerzas del mercado global y, además, promover el arraigo de las nuevas generaciones en su tierra de origen (FAO, 2015).

El riego complementario o suplementario es una práctica agrícola que consiste en aplicar láminas de agua al cultivo cuando la humedad del suelo se aleja del rango considerado óptimo, especialmente en etapas fenológicas que presentan sensibilidad al déficit hídrico. Se diferencia del riego integral o convencional, practicado en las zonas áridas, porque el número de riegos y volumen total de agua utilizada es sensiblemente menor (Génova 2006). A su vez, Grassi (1988) distingue al riego "complementario" cuando la lluvia aporta entre el 30 y el 60 % de la evapotranspiración siendo necesario la aplicación adicional de agua para completar los requisitos hídricos del cultivo, mientras que el "suplementario" ocurre cuando la lluvia cubre totalmente la evaportranspiracion, aunque durante algunas semanas, con escasa o nula precipitación, entonces sera necesario regar para evitar disminución en la productividad.

La región Pampeana, con un clima templado húmedo y que se extiende en provincias del centro este del país (Santa Fe, Buenos Aires, Entre Ríos, Córdoba y La Pampa), se destaca en la actividad agrícola en producción de cultivos extensivos, tradicionalmente a secano. Sin embargo, en las últimas décadas la implementación del riego complementario se ha incrementado en esta región, en particular bajo el sistema de riego por aspersión con pivote central (Figura 1). Según un relevamiento realizado con imágenes satelitales del Instituto Nacional del Agua (Barrionuevo et al., 2016), la superficie regada con este sistema solo en Buenos Aires paso 500 ha en 1995 a 147.000 ha (Figura 2). La distribución se concentra en 3 núcleos principales; al norte (Pergamino, Salto, Rojas), al sudeste (Balcarce y Lobería) y sudoeste (Coronel Suarez) de la Provincia. Es importante tener en cuenta esta distribución ya que cada una tiene diversas características edafoclimáticas que van a condicionar el manejo de la práctica. En general, las láminas

aplicadas no suelen superar los 300 mm por campaña agrícola y suelen aplicarse durante el verano cuando la demana hídrica es mayor (Génova, 2011). Por eso, adquiere mayor relevancia en años secos donde las precipitaciones se presentan por debajo de la media. Ello permite alcanzar respuestas productivas máximas, cercanas al potencial genético de las plantas. En determinados escenarios, permite duplicar y hasta triplicar los rendimientos de grano respecto a la situación en secano (Rivetti, A., 2006). Sin embargo, el valor económico y productivo más importante de esta tecnología es estabilizar los rendimientos, reduciendo la variabilidad entre campañas (Núñez y Fiorentino, 2017).

Figura 1. Imágenes del sistema de riego de aspersión con pivote central. Derecha: lateral de riego. Izquierda: punto fijo del Pivote en el centro del lote.

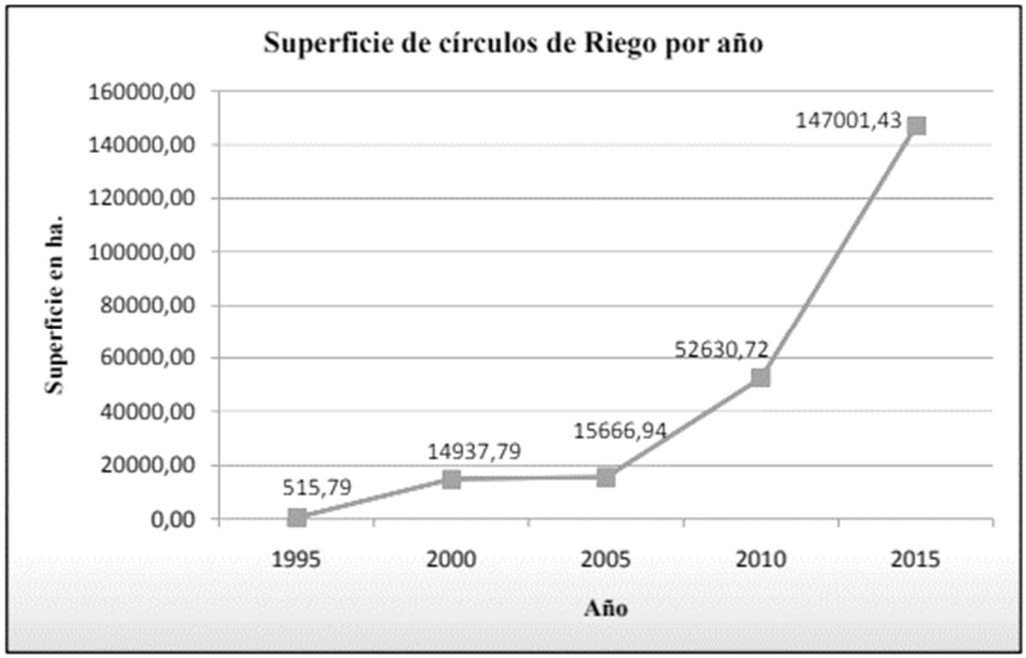


Figura 2 Evolución temporal de la superficie bajo riego con pivote central en la Provincia de Buenos Aires entre el 1995 y 2015. Extraído de Barrionuevo et al., 2016.

Esta práctica que, mayoritariamente utiliza el recurso hídrico subterráneo, compite con otros usos del agua como domésticos, industrial y/o recreativos. En un estudio reciente, Márquez Molina et al. (2021) evaluaron el impacto del riego complementario en la zona rural de Coronel Suarez mediante un modelo conceptual hidrogeológico basado en información geofísica, hidrogeológica y con mediciones de parámetros hidráulicos y niveles piezométricos. Los autores determinaron un agotamiento significativo de los niveles freáticos y cambios en la calidad del agua durante la temporada de riego asociado a la explotación del agua subterránea. Por lo tanto, el aprovechamiento del recurso para riego debe planificarse con adecuadas metodologías de estimación de la oferta y demanda hídricas, además de programar la operación del riego en base a las características de los suelos, aguas, plantas y equipamiento, de manera de asegurar tanto el mantenimiento de la sustentabilidad de los agroecosistemas productivos como de los recursos hídricos (FAO, 2015).

1.2 JUSTIFICACIÓN: SUSTENTABILIDAD Y SENSORES PROXIMALES

Por un lado, la incorporación de esta práctica representa importantes beneficios en la productividad y rendimiento en cultivo de granos (Salinas et al., 2008; Giaveno et al., 2002). Sin embargo, la sustentabilidad del sistema depende de la calidad de agua utilizada y su gestión. Un manejo inadecuado del riego puede generar acumulación de sales en el suelo por encima del umbral crítico, causando problemas en el desarrollo de los cultivos por efecto osmótico y/ toxicidad iónica. Además, la naturaleza química de las aguas utilizadas para el riego puede modificar los cationes de intercambio del suelo y aumentar sustancialmente el pH de la solución de éste. El uso de agua subterránea alcalina/sódica debido a la absorción de este catión en el suelo aumenta el porcentaje de sodio intercambiable (PSI) ocasionando problemas en la agregación de las partículas y estructura del suelo pudiendo manifestarse con menor infiltración, aireación inadecuada y condiciones de anoxia (anegamiento) (Rengasamy, 2018). Por ello, será crucial en esta actividad realizar monitoreos frecuentes para evaluar la evolución de la calidad edáfica

de los suelos regados para lograr gestionar de manera sustentable los recursos naturales (suelo y agua).

Sin embargo, uno de los factores limitantes para estudiar la calidad del suelo es la importante variabilidad espacial y temporal de las propiedades edáficas en las distintas escalas de estudio (Jury, 1986). Para obtener resultados representativos se requiere un gran número de muestras, dificultad que se suma a la complejidad experimental de monitorear propiedades físicas e hidráulicas afectadas por el riego (Castiglioni et al, 2018). Entonces, una alternativa superadora para el manejo de la variabilidad espacial, de forma de reducir el número de muestras, es la adopción de herramientas y tecnología de agricultura de precisión, tales como los instrumentos geofísicos de exploración de los primeros metros de profundidad ("Near surface geophysics" en inglés) o también denominados "sensores proximales" (EAGE, 2015). Específicamente los sensores eléctricos y electromagnéticos miden la conductividad eléctrica aparente del volumen de suelo (CEap) comprendido por la matriz sólida, poros y fluidos que se encuentran en el mismo (Allred et al., 2008). El mapeo de la CEap y la hipótesis que los valores de la mayoría de las propiedades del suelo están espacialmente correlacionados, es decir, poseen dependencia espacial, son las bases para el estudio de la mayor parte de dichas propiedades. De esta manera, si conocemos el comportamiento espacial de una variable edáfica de fácil medición mediante "sensores proximales" (CEap) es posible predecir la distribución espacial de otras variables de interés, pero difícil medición que estén correlacionadas con la primera (Webster, 1990). Se ha demostrado que la CEap presenta correlaciones con algunas propiedades como la capacidad de almacenamiento de agua, la presencia de capas litológicas contrastantes, el contenido de carbono orgánico, la salinidad y el drenaje, la topografía, los manejos previos y las texturas (Doolittle y Brevik, 2014).

Por todo lo expuesto, es necesario evaluar propiedades edaficas que potencialmente son afectadas por el riego complementario con aguas bicarbonatadas sodicas y hallar relaciones entre estas y la CEap obtenida con sensores con el fin de lograr representar su distribución espacial.

1.3 OBJETIVOS GENERALES Y ESPECIFICOS

1.3.1 Objetivo general:

Analizar la eficiencia de sensores geofísicos proximales para la detección de la variabilidad espacial en las propiedades intrinsecas del suelo y evaluar los cambios producidos por el riego complementario en algunas propiedades edáficas en un establecimiento agrícola en la localidad de Suipacha, Provincia de Buenos Aires

Hipótesis asociadas

- Las variables relevadas a campo mediante los sensores geofísicos proximales son apropiadas para estimar la variabilidad espacial intrinseca de las propiedades edáficas en suelos regados.

- Las propiedades edáficas evaluadas presentarán cambios bajo riego complementario

1.3.2 Objetivos específicos:

A. Establecer una metodología y configuracion experimental de exploracion geofisica que refleje de manera más precisa la variabilidad de propiedades edaficas en suelos regados.

   Hipótesis: La eficiencia de los métodos geofísicos en reflejar la variabilidad de propiedades edaficas dependerá de un correcto método de medición y configuración experimental de exploracion que contemple contrastes en las mismas.

B. Elaborar mapas de las propiedades geofísicas relevadas para determinar contrastes en su distribución espacial bajo riego

   Hipótesis: Las parcelas estudiadas presentan contrastes en la distribución espacial de las propiedades geofísicas que responden al uso del riego

C. Establecer relaciones entre la CEap y las propiedades edáficas estudiadas.

Hipótesis: La CEap presenta fuertes relaciones positivas con las propiedades químicas del suelo y débiles con las físicas.

D. Evaluar cambios en propiedades químicas y físicas en suelos bajo riego complementario, a partir de análisis de laboratorio.

Hipótesis: Las propiedades químicas y físicas de los suelos cambian por efecto del riego complementario

E. Establecer interacciones entre las propiedades físicas y las químicas evaluadas.

Hipótesis: Los cambios en las propiedades químicas por efecto del riego complementario provocaran cambios en las propiedades físicas de los suelos estudiados.

1.4 CARACTERIZACIÓN DEL SITIO DE ESTUDIO

La zona de estudio es un establecimiento privado, Estancia "La Alicia" ubicado en el partido de Suipacha, Provincia de Buenos Aires, a 10 Km S – SE lindante a camino municipal (34° 86' S , 59° 57' O). El sitio es un establecimiento agrícola dedicado a la producción de cultivos de granos (maíz, trigo, soja) bajo siembra directa. La rotación de cultivos tiene dos secuencias: maíz-soja-maíz (3 años) o maíz-trigo-soja de segunda-maíz (2 años) (Figura 3). En general, al incio de cada cultivo se realiza fertilicación de base con urea (nitrógeno) y luego en floración otra con fosfato diamonico. En la campaña 2010 – 2011 se adquirieron dos equipos de riego por aspersión por pivote central. El riego complementario se incorporó al manejo productivo del maíz comercial, y con menor frecuencia a la producción de soja de primera. Los pivotes quedan fijos durante toda la campaña en el círculo de riego destinado a la producción de maíz, no obstante, pueden moverse para completar las necesidades de agua de algún otro cultivo. El establecimiento cuenta con 7 lotes con una superficie total de 352,1 ha, agrupados en 5 círculos (C) de riego, dando una superficie regada de 290,2 ha (Tabla 1). Las láminas de riego se aplican en verano cuando el lote se encuentra cultivado con maíz y no superan los 300 mm por

campaña agrícola. En este sentido, y de acuerdo con la rotación mencionada, la aplicación complementaria del riego se realiza una vez cada dos años. Y de esta manera, acumulan un historial de riego de al menos 4 campañas desde la instalación del sistema. Sin embargo, en aquellos años húmedos, cuando no se presenta déficit hídrico es posible que no se utilice.

Tabla 1. Superficie total, superficie regada y serie de suelo por lote.

Lote	Sup Total (ha)	Circulo	Sup, Riego (ha)	Serie Suelo
1-2	69,27	1	52,45	Chacabuco
3	97,16	2	54,85	Chacabuco
4-5	67,90	4	60,94	Villa Moll
6	73,80	5	60,94	Henry Bell
7	75,06	3	60,94	Chacabuco

Figura 3 Imágenes del sitio experimental. Izquierda: lote en barbecho con lateral de riego. Derecha superior: lote con maíz etapa de floración bajo riego. Derecha inferior: corner en secano con maíz (esquina del lote donde no llega el riego del círculo del Pivote)

El sitio se encuentra en el borde sureste de la Pampa Ondulada, en el área de transición con la Pampa Deprimida del Río Salado, cuenta con un paisaje caracterizado por suaves pendientes y con un clima templado húmedo con precipitaciones medias de 1000 mm anuales. La estación con mayor precipitación, en términos generales, es el verano y los menores registros se producen en invierno (el mes más seco es julio) como se muestra en la Figura 4. Según Tauber (2009) la época con mayor volumen de agua almacenada en el suelo y presencia de freática superficial es el invierno, en el verano se registran deficiencias críticas pues, a pesar de ser la época más lluviosa, también es la de mayor demanda por evapotranspiración, con unos 800 mm anuales en la zona. En la mayoría del establecimiento los suelos presentes son argiudoles típicos de la serie Chacabuco (Cha) y en menor medida, hacia el sur encontramos argiudoles abrupticos de la serie Henry Bell (HB) y natralbol típico serie Villa Moll (VM) (tabla 1). La serie Chacabuco se presenta en las partes más altas del establecimiento (media loma), con buen drenaje, bien provisto de materia orgánica (con alrededor de 5 % de MO en los primeros cm), no alcalino ni sódico y con textura franco-limosa (25% arcillas y 60% limos) hasta los 50 cm, luego aparece un horizonte Bt. La serie Henry Bell se extiende en el pie de loma de textura franco-limosa, pero con un horizonte E a los 25 cm antes del Bt, menor drenaje, no alcalino ni sódico. Finalmente, la serie Villa Moll ubicado en la zona baja del establecimiento, de textura franco-limosa (menor %arcillas que los anteriores) con mal drenaje presenta signos de hidromorfismo, en algunas zonas se encuentran canalizados para facilitar el escurrimiento del agua, alcalino y sódico a partir de los 20 cm (INTA, 1966).

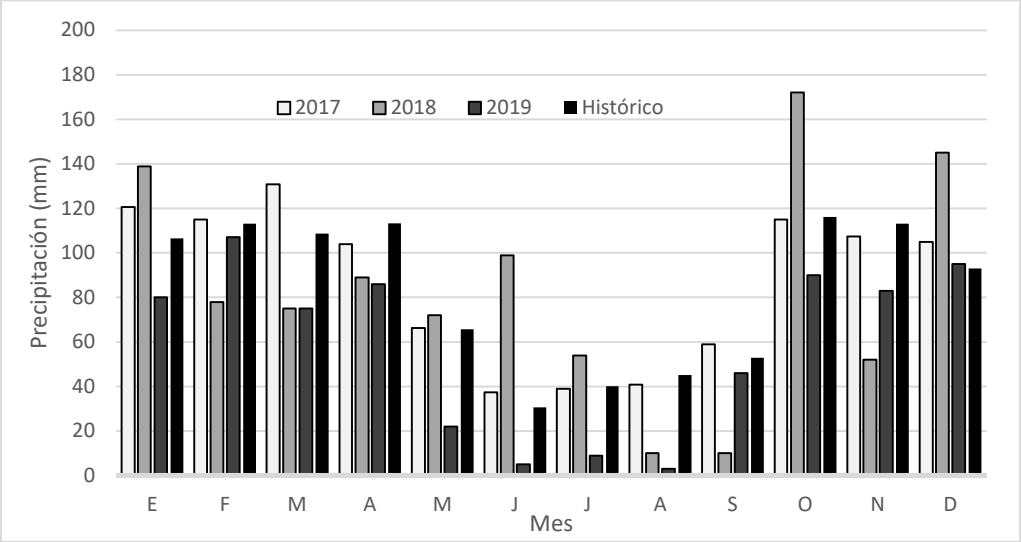


Figura 4. Precipitación acumulada mensual de los años 2017, 2018 y 2019 y precipitación acumulada mensual promedio histórico (1983-2020) del establecimiento agricola. Datos pluviometro brindados por el productor.

El agua subterránea es la principal fuente utilizada en el riego complementario dentro de esta región. Auge (2002) determinó 8 ambientes hidrogeológicos dentro de la Provincia de Buenos Aires. El sitio se enmarca en el ambiente hidrogeológico denominado "Noreste". Este se caracteriza por tener un escurrimiento con predominio en dirección NE (hacia la Cuenca del Plata), clima húmedo en donde la precipitación es mayor a la evapotranspiración, lo cual, acompañado por un paisaje de poca pendiente con suelos de buen drenaje permiten una buena recarga de sus acuíferos permitiendo también alta disponibilidad hídrica de los mismos. Sin embargo, la hidroquímica de las aguas subterráneas son mayormente de baja salinidad, pero con elevado contenido de bicarbonatos de sodio (Galindo et al, 2007). En esta región, los acuíferos explotados para esta actividad son principalmente; el Pampeano en estado semiconfinado, compuesto de limos arenosos y arcillosos y con espesor de 0 a 120 m, y en menor medida, el Puelche de carácter semiconfinado, compuesto de arenas sueltas de origen fluvial que le otorgan alta transmisividad, y con espesor entre 10 y 50 m (Tabla 2).

Tabla 2. Descripción de los acuíferos del ambiente hidrogeológico Noreste en la Provincia de Buenos Aires. Extraído de Auge, 2002.

Espesor (m)	Formación	Edad	Litología	Comportamiento Hidrogeológico	Usos
0 - 10	La Plata	Holocena	Conchillas formando cordones	Acuífero libre discontinuo Salinidad (1- 5 g/l)	Rural y ganadero
0 – 25	Querandí	Holocena	Arcillas y arenas muy finas, marinas	Acuitardo a probrem. acuífero. Salinidad (5-10 g/l)	
0 – 5	Luján	Holocena	Limos arcillo-arenosos, fluviales	Acuitardo a pobrem. acuífero. Salin. (2-10 g/l)	
0 – 120	Pampeano	Pleistocena	Limos arenosos y arcillosos c/ tosca, eolo - fluviales	Acuíf libre; en prof. pasa a semiconf. Moderada prod. Salin. (0,5-2 g/l)	Urbano, rural, riego complem. ganadero e industrial
10 – 50	Arenas Puelches	Plio-Pleistocena	Arenas sueltas, finas y medianas, fluviales	Acuíf. semiconfinado de media a alta prod. (30-150 m3/h). Salin. (< 2 g/l)	Urbano, rural, riego intensivo y complem. ganadero e industrial
50 – 200	Paraná	Miocena superior	Arcillas y arenas c/fósiles marinos	Acuícludo en la secc sup. Salin. > 5 g/l. Excepc. 3 g/l. Acuífero de alta prod. en la secc. inf.	Industrial restringido
100 - 300	Olivos	Miocena inferior	Areniscas y arcilitas c/yeso y anhidrita, eolo - fluviales	Acuíf. confinado de baja productividad. Salin. > 10 g/l	
	Basamento Cristalino	Proterozoica	Genises, milonitas, granitos	Acuífugo, medio discont. Base imperm. sección hidrogeológica	

Según informe técnico presentado en la Autoridad del Agua de la Provincia de Buenos Aires (ADA 2012), el agua utilizada para el riego en el establecimiento proviene de 3 pozos de captación con una profundidad promedio de 45 m y su explotación corresponde al acuífero Puelche (Epipuelche). La naturaleza de las aguas es de origen bicarbonatadas sódicas con pH ligeramente alcalino, con una relación de absorción de sodio (RAS) de 5.3 y una conductividad eléctrica (CEa) de 1.3 dS/m, con lo cual resulta en una calidad apropiada para riego complementario según Sainato et al. (2006).

1.5 DISEÑO EXPERIMENTAL GENERAL

El diseño experimental general consta de 7 parcelas en las cuales, aproximadamente la mitad de su superficie se encuentra bajo riego complementario. Las mismas se encuentran distribuidas en distintos lotes del establecimiento agrícola y fueron estudiadas en 8 campañas (momentos) diferentes durante los años 2017, 2018 y 2019.

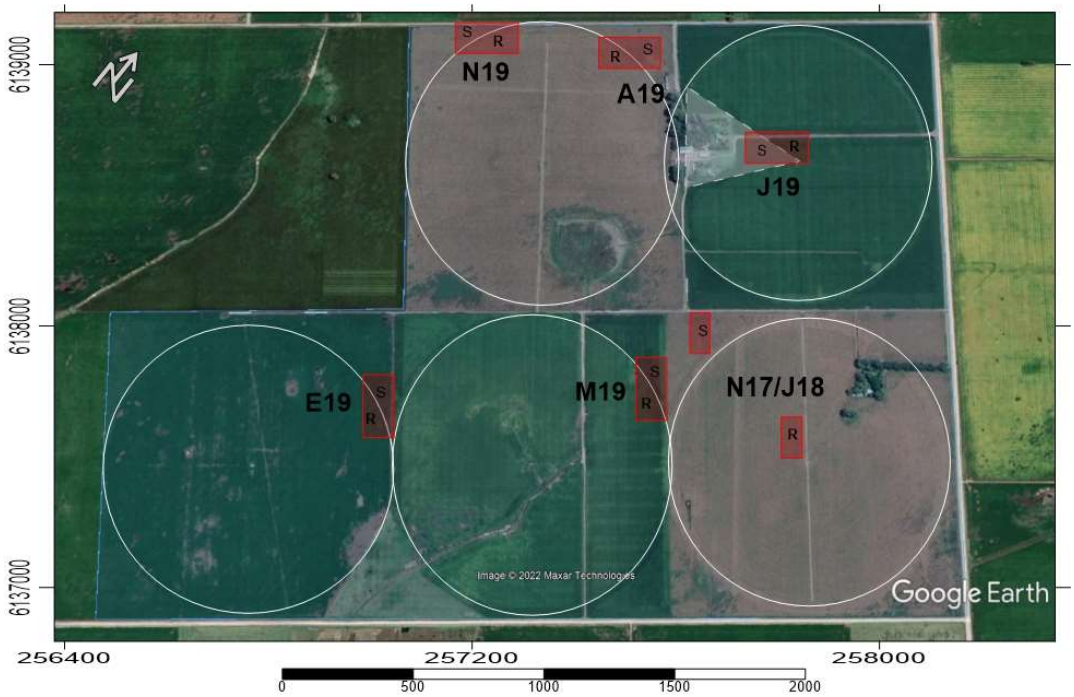
Se implementaron dos diseños para determinar las parcelas de estudio. El primero se compone de dos subparcelas separadas dentro del mismo lote (PS), en donde una se ubicada en el centro del lote bajo riego y la otra, en uno de los corners fuera del pivote sin riego. En este diseño, ambas subparcelas forman la parcela de estudio. El segundo,

con parcelas integradas (PI), se encuentran ubicadas en un corner del lote, en el limite del circulo de riego, de manera que la mitad se encuentra bajo riego y el resto sin riego. Este limite se estableció a campo mediante la huella de la ultima rueda del brazo de riego, la zona de riego se determinó a una distancia de 15/20 m más allá de esta huella. Todas las parcelas o subparcelas son rectangulares, las dimensiones fueron de 100 x 50 m en PS y de 150 x 75 m en PI. Las parcelas se identificaron con el mes y año de muestreo. En el caso particular del diseño PS, tienen la misma ubicación dentro del lote, pero han sido estudiadas en dos momentos distintos, antes (noviembre 2017) y después (junio 2018) de la campaña de riego, las cuales denominaremos N17 y J18 compuestas (cada una) de las respectivas subparcelas bajo riego y sin riego (R17/S17 y R18/S18). En la Tabla 3 se muestra la identificación de cada parcela (síntesis de la ubicación y fecha de muestreo), el diseño correspondiente, la superficie, fecha, el lote, cobertura en cada campaña/parcela y periodo de últma aplicación de riego. En la Figura 5 se muestra la ubicación de las parcelas dentro del establecimiento.

Tabla 3. Descripción y ubicación dentro del establecimiento de las parcelas estudiadas.

Parcela	Diseño Parcela	Sup. (ha)	Campaña	Lote	Cobertura	Riego reciente (*)	Serie Suelo
N17 R17/S17	PS	1,00	Noviembre 2017	3	Cultivo Maíz (20 cm)	2015/2016	Cha
J18 R18/S18	PS	1,00	Junio 2018	3	Barbecho/Rastrojo Maíz	2017/2018	Cha
E19	PI	1,12	Enero 2019	6	Cultivo Maíz tardío (20 cm)	2016/2017	HB-VM
M19	PI	1,12	Mayo 2019	4-5	Barbecho/Rastrojo Maíz	2018/2019	VM
J19	PI	1,12	Julio 2019	1-2	Barbecho/Rastrojo Maíz	2018/2019	Cha
A19	PI	1,12	Agosto 2019	7	Barbecho/Rastrojo Soja	2017/2018	Cha
N19	PI	1,12	Noviembre 2019	7	Cultivo Maíz (20 cm)	2017/2018	Cha

PS= tratamientos en parcelas separadas, PI= tratamientos integrados en única parcela, N17=noviembre 2017, J18= junio 2018, E19= enero 2019, M19=mayo 2019, J19= julio 2019, A19=agosto 2019, N19= noviembre 2019, (*) aplicación reciente de riego complementario por campaña agricola



R= riego, S= Secano, Parcelas: N17=noviembre 2017, J18= junio 2018, E19= enero 2019, M19=mayo 2019, J19= julio 2019, N19= noviembre 2019

Figura 5. Ubicación de las parcelas bajo estudio en diseño apareado dentro del establecimiento agrícola en Suipacha, Provincia de Buenos Aires.

Aunque los enfoques de estudio para lograr responder los objetivos planteados sean distintos, las parcelas aquí descriptas son las mismas. En el capitulo II se detallará la configuración experimental, metodologia y relevamiento de propiedades geofísicas con el fin de mapear la CEap y establecer relaciones empíricas con las propiedades edaficas para dar cumplimiento a los objetivos específicos A, B y C (apartado 1.2.2). A su vez, en el Capítulo III se describirá el correspondiente al muestreo de suelo y el analisis de laboratorio para evaluar el efecto del riego y dar cumplimiento a los objetivos específicos D y E (apartado 1.2.2). El tratamiento estadístico se desarrollará en cada caso en el correspondiente capítulo.

1.6 BIBLOGRAFÍA

Allred B. J., J.J. Daniels and M. R. Ehsani. (2008). Handbook of Agricultural Geophysics, CRC Press.

Auge, M. (2002). Regiones Hidrogeológicas. República Argentina y Provincias de Buenos Aires, Mendoza y Santa Fe. E-book: 1-138. www.gl.fcen.uba.ar/ Hidrogeologia/auge/libros.htm Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires

Autoridad del Agua (2012). Informe técnico agronómico de la Estancia La Alicia presentado en la Autoridad del Agua de la Provincia de Buenos Aires.

Barrionuevo, N., L. German, y C. Waldman (2016). Análisis espacio temporal del riego por pivote central en la provincia de Buenos Aires en el período 1995-2015, 3er encuentro de investigadores en formación en recursos hídricos, Instituto Nacional del agua (IFRH-INA)

Castiglioni, M. G., Behrends Kraemer, F., & Marquez Molina, J. J. (2018). Conductividad hidráulica saturada determinada por distintos procedimientos en suelos con alta humedad inicial. Ciencia del suelo, 36(2), 158-169.

Doolittle, J. A., & Brevik, E. C. (2014). The use of electromagnetic induction techniques in soils studies. Geoderma, 223, 33-45.

European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics (2015), 21st. Near Surface Geoscience, 6-10 September, Turin, Italia.

Galindo, G., Sainato, C., Dapeña, C., Fernández-Turiel, J. L., Gimeno, D., Pomposiello, M. C., & Panarello, H. O. (2007). Surface and groundwaterquality in thenortheasternregionof Buenos Aires Province, Argentina. Journalof South American EarthSciences, 23(4), 336-345.

Génova, L.J. (2011). Calidad del agua subterránea para riego complementario en la Pampa Húmeda Argentina. Revista de la Facultad de Agronomía, La Plata. 119:63-81

Giaveno, C. D., Pilatti, M. A., & Marano, R. P. (2002). Riego suplementario en elcentro de Santa Fe: Maíz para silaje I-Respuesta productiva en diferentes épocas de siembra. FAVE: Sección Ciencias Agrarias, 1(2), 15-23.

INTA (1966). Cartas de suelo de la República Argentina, hoja nro. 3560-16-2 Partido de Suipacha, Provincia de Buenos Aires. ISSN 0327-781X

Jury, W. A. (1986). Spatial variability of soil properties. Vadose Zone Modeling of Organic Pollutants. Lewis Publishers, Inc., Chelsea Michigan. 1986. p 245-269, 7 tab, 60 ref.

Márquez Molina J. J., Sainato, C. M., Urricariet, A. S., Losinno, B. N., & Heredia, O. S. (2014). Bulk electrical conductivity as an indicator of spatial distribution of nitrogen and phosphorous at feedlots. Journal of Applied Geophysics, 111, 156-172.

Márquez Molina J. J., Lemeillet A F., Sainato C.M. (2021). Hydrogeological conceptual model of an irrigated agricultural area, Buenos Aires Province, Argentina. Groundwater for sustainable development (Elsevier), Volume 12, 100486.

Nuñez, A. L., & Fiorentino, R. (2017). Impacto del riego complementario en granos para la zona norte de Buenos Aires considerando el riesgo climático. Revista Argentina de Economía Agraria, 18(1), 23-48.

FAO (2015). Estudio del Potencial de ampliación del riego en Argentina. UTF/ARG/017/ARG Desarrollo Institucional para la Inversión. FAO, MAGyP. ISBN 978-92-5-308995-6

Rengasamy, P. (2018). Irrigation water quality and soil structural stability: A perspective with some new insights. Agronomy, 8(5), 72.

Rivetti, A. R. (2006). Producción de maíz bajo diferentes regímenes de riego complementario en Río Cuarto, Córdoba, Argentina. I. Rendimiento en grano de maíz y sus componentes. Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias, 38(2), 25-36.

Sainato, C. M., Galindo, G., & Heredia, O. Agua Subterránea: Exploración y utilización agropecuaria. 2006. Editorial Facultad de Agronomía. Universidad de Buenos Aires.

Salinas, A. I., Martellotto, E., Alvarez, C., Lovera, E. F., & Giubergia, J. P. (2008). Comportamiento de diferentes cultivares bajo riego suplementario a diferentes densidades de siembra en INTA Manfredi, campaña 2007. Jornada Técnica Manejo del Cultivo de Trigo. 2008 04 23, 23 de abril de 2008. Manfredi, Córdoba. AR.

Tauber F. (2009). Plan de ordenamiento urbano y territorialproyectos viales y de saneamiernto y estrategias de desarrollo local para el partido de suipach. Estudio 1.ee.301

Torres Duggan, M., Alvarez, C. R., & Rimski-Korsakov, H. (2017). Evaluación de la calidad del agua y del suelo regado en forma complementaria en la región pampeana argentina. Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica, 25(14), 23.

Webster, R & MA Oliver. (1990). Statistical Methods in Soil and Land Resource Survey. Oxford University Press, Oxford UK, 316p

CAPITULO 2.

COMPORTAMIENTO DE LA CEap DEL SUELO Y SU RELACION CON LAS PROPIEDADES EDAFICAS BAJO RIEGO COMPLEMENTARIO

2.1 INTRODUCCION

2.1.1 Definición de la CEap y descripción de los métodos geofísicos de exploración

La conductividad eléctrica es la capacidad de un material para transmitir o conducir una corriente eléctrica (Doerge, 2004). La conductividad eléctrica aparente del suelo (CEap) se refiere a la facilidad que tiene la matriz sólida porosa para transmitir esta corriente eléctrica y depende fundamentalmente del contenido hídrico, su porosidad y salinidad. Es importante destacar que esta propiedad, es distinta de la conductividad eléctrica del suelo (CEs) ya sea de medida en un extracto de saturación o una dilución de suelo, que es un indicador de la concentración de sales disueltas en la solución del suelo. Por otro lado, según sea el método utilizado, se puede medir la resistividad eléctrica aparente del suelo (ρ) que es la inversa de la CEap.

Existen diversos métodos geofísicos para obtener la resistividad del suelo (ρ) o su inversa (CEap), sin embargo, los más difundidos son los de inducción electromagnética que son indirectos y no invasivos y los eléctricos que son de contacto. Los eléctricos se basan en la inyección de una corriente eléctrica conocida (i), generalmente continua, a través de dos electrodos insertos en el suelo y la medición de la diferencia de potencial de voltaje (ΔV) entre otros dos electrodos también insertos en el suelo separados entre sí. El cálculo de la resistividad eléctrica (inversa de $CEap$) se realiza mediante i, ΔV y el espaciamiento entre electrodos (factor geométrico k) como se muestra en la siguiente ecuación 1:

$$\rho = \frac{\Delta V}{i} * k \qquad (1)$$

Por otro lado, los métodos electromagnéticos se fundamentan en la generación de un campo electromagnético primario variable en el tiempo (Hp) generado por una bobina emisora. El Hp produce cambios en el flujo del campo magnético del medio conductor receptor, en este caso el suelo, causando corrientes secundarias inducidas (denominadas Eddy). Estas corrientes, al pasar por el suelo, originan un campo magnético secundario (Hs), en tanto una bobina receptora capta ambos campos magnéticos resultantes (Hp y Hs). La CEap del suelo es función de la relación entre Hp y Hs, entre otras variables relacionadas con la orientación, frecuencia de las ondas electromagnéticas, distancia entre bobinas y susceptibilidad magnética (McNeill, 1980) como se muestra en la ecuación 2

$$CEap = \frac{4}{\omega \mu s^2} \frac{Hs}{Hp} \qquad (2)$$

Donde:

Hp = campo magnético primario en la bobina transmisora (A.m);
Hs = campo magnético secundario en la bobina receptora (A.m);
ω = 2πf;
f = frecuencia (Hz);
μ = permeabilidad magnética del medio poroso del suelo (T.m/A);
s = distancia de separación entre las bobinas (m);

2.1.2 Geofísica aplicada al estudio del suelo

En una de las primeras aproximaciones en este tipo de estudios, surgió la ley empírica de Archie (1942) desarrollada para suelos saturados con solución de agua y sal. El modelo se muestra a continuación en la ecuación 3:

$$\rho_0 = \varphi^{-m} \rho_w \quad (3)$$

Donde:

ρ_0 = resistividad del suelo con todos los poros llenos con la solución salina (ohm.m),

ρ_w = resistividad de la solución(ohm.m),

φ =la porosidad (%)

m= constante de ajuste

Sin embargo, normalmente el suelo se encuentra en situación no saturada, es decir cuando los poros no están completamente llenos de agua, sino que contienen cierta proporción de aire. Por ello se propuso una corrección del modelo inicial (ecuación 4), el cual se muestra a continuación:

$$\rho = \rho_o S^{-n} = \varphi^{-m} \rho_w S^{-n} \quad (4)$$

En donde:

ρ = resistividad del suelo no saturada (ohm.m),

S = fracción de poros ocupada por agua con respecto al total de poros

n = constante de ajuste

Estas ecuaciones sirven principalmente para suelos de textura gruesa con altos contenidos de arenas o areniscas, pero sentaron las bases para posteriores correcciones en suelos de granos más finos.

Rhoades et al. (1989) propusieron un modelo de conductividad eléctrica que describe tres pasajes de conducción (Figura 6): una fase líquida a través de poros grandes (2), una fase sólida-liquida a través de cationes intercambiables asociados a arcillas (1) y una fase a través de partículas sólidas que se encuentran unidas de manera continua (3). La CEap supone ser más representativa que la obtenida a partir de muestras de suelo (por ejemplo, con la técnica de extracto de pasta de saturación), dado que se está evaluando no sólo la solución del suelo, sino también la conducción a través de las partículas sólidas y la vía de cationes intercambiables que existen en la interfase sólido-líquido en los minerales arcillosos (Corwin y Lesch, 2005).

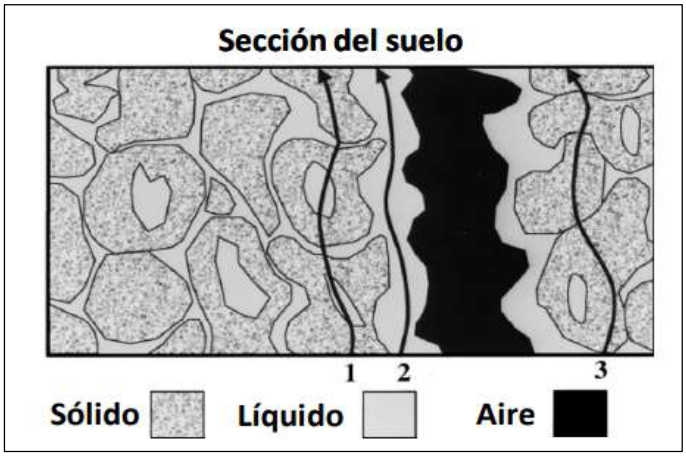


Figura 6. Representación sistemática y modelo de la conducción eléctrica en el suelo. Adaptado de Rhoades et al (1989).

Diversos autores han estudiado las relaciones entre las propiedades edáficas de interés agronómico y la CEap, tales como: salinidad (Cook y Walker, 1992; Johnston, 1997; Amezketa, 2007), textura (Sudduth, 2009; Priori, 2010; Rodríguez 2015), porosidad (Bozkurt, 2009; Moysey, 2012; Keller, 2017), contenido hídrico (Waine, 2000; Nagy, 2013; Costa, 2014) , contenido de carbono orgánico e inorgánico (Martinez 2009, Neely 2016, Huang 2017), pH (Narsimha 2013; Aini 2014; Sanches 2018) y algunas otras propiedades físicas (Al-Gaadi 2012, Wang 2017, Romero-Ruiz 2018). También se ha avanzado mucho en los últimos años en la aplicación de la geofísica a la agricultura, con especial énfasis en la aplicación a la salinización (Corwin y Scudiero, 2019) y sodificación (Heilig et al., 2011) de suelos. A partir de estas relaciones y antecedentes, los sensores próximales se constituyen como una herramienta importante para el estudio del suelo en las ciencias agropecuarias en diversas aplicaciones:

Sin embargo, establecer relaciones entre las propiedades del suelo y la CEap es un proceso complejo con alta variabilidad por ser sitio específicas (Carroll y Oliver, 2005). No es conveniente extrapolar relaciones halladas en un determinado sitio a otro distinto. Las relaciones pueden cambiar de intensidad y dirección en función de la escala de estudio, variables ambientales (temperatura, altura de canopeo, viento, humedad, entre otras), método geofísico utilizado y momento de medición. La relación entre la CEap y una propiedad edáfica adquiere un buen ajuste cuando esa propiedad tiene gran variabilidad espacial, con valores contrastantes entre los distintos sitios explorados, manteniéndose el resto de las propiedades constantes o con baja variabilidad. De lo contrario puede existir interacción con estas otras y obtenerse resultados ambiguos o contradictorios (Doolittle y Brevik, 2014)

2.1.3 Antecedes de estudios geofísicos en ciencias agropecuarias en la región Pampeana

En la Región Pampeana numerosos autores han estudiado las relaciones entre la CEap y las propiedades físico-químicas del suelo. Simon et al (2013) evaluaron la distribución espacial CEap del suelo en dos lotes agrícolas del sur de Córdoba con suelos Hapludoles, con el objeto determinar distintas zonas de manejo. Encontraron fuertes relaciones entre

la CEap y el contenido de partículas finas (limos y arcillas), arenas, el contenido de MO (ajuste r>0.6), el pH y el contenido de fosforo (r= -0.47 y -0.42 respectivamente). Peralta et al (2014) caracterizaron dos lotes agrícolas con 3 categorías de CEap; Alta, Media y Baja, uno en el sudeste cordobés y otro al sur de Buenos Aires. Encontraron que estas categorías coincidían con el nivel de rendimiento de los cultivos, lo cual se asociaba a la textura y el contenido de MO. A su vez hallaron una relación lineal negativa entre la CEap y la profundidad de la tosca (R^2= 0.83) en el lote de Córdoba. Bosch Mayol et al. (2012) analizaron la variabilidad espacial de CEap mediante este tipo de sensores y la relación con el RAS, Ca, Mg y Na, en lotes sometidos a riego en el Sudeste Bonaerense. Se encontró correlación geoestadística fuerte y positiva entre la CEap y el contenido de Na del suelo. Losinno et al. (2005) evaluaron los riesgos de salinización y sodificación del suelo por la aplicación de riego complementario, investigando la distribución de la conductividad eléctrica del suelo y subsuelo a través del método geoeléctrico, y de las propiedades físico-químicas del sueloy del agua subterránea en la zona de Pergamino, Provincia de Buenos Aires. Se encontró correlación espacial entre la CEap obtenida con los sondeos, y los contenidos de K, Mg y Na, pH y PSI. Valente et al. (2012) encontraron correlación entre la CEap y el contenido de fósforo del suelo, siendo la correlación con la materia orgánica muy baja y negativa. Peralta y Costa (2014) en molisoles del Sureste de Buenos Aires hallaron correlaciones con Na, Mg, Mn, Cu, Ca, Zn y Fe, y débilmente con K, P, NO_3^- y SO_4^{2-}. Finalmente, Márquez Molina et al. (2014) estudiaron la contaminación producida por acumulación de estiércol animal en un feedlot de la localidad de Trenque Lauquen mediante exploración con sensor electromagnético (EMI) y con tomografías de resistividad eléctrica (TRE). Los autores encontraron que la distribución espacial de la CEap medida con estos métodos estaba asociada a los patrones de distribución del contenido hídrico, la concentración de N-NO3, el PO4 biodisponible y la CEs del suelo. Además, con esta metodología se identificaron zonas de alta CEap y acumulación de estiércol cercanos a los bebederos y comederos. Por último, los autores destacan que las correlaciones entre CEap con nitratos y fósforo se dieron cuando la lámina de agua equivalente del suelo era mayor a 100 mm.

Entonces, los objetivos de la tesis que se desarrollaran en este capitulo son:

A- Establecer una metodología y configuracion experimental de exploracion geofisica que refleje de manera más precisa la variabilidad de propiedades edaficas en suelos regados.

B- Elaborar mapas de las propiedades geofísicas relevadas para determinar contrastes en su distribución espacial bajo riego

C- Establecer relaciones entre la CEap y las propiedades edáficas estudiadas.

2.2 METODOLOGÍA Y DISEÑO EXPERIMENTAL

2.2.1 Características del instrumental geofísico utilizado

2.2.1.1 Sensor Electromagnético EMP-400

El Profiler EMP400 (GSSI, Geophysical Survey Systems Inc.) mide la CEap del suelo mediante inducción electromagnética (EMI) de manera sencilla (Figura 7.1) y rápida ya que no requiere generar contacto con el mismo, el operador se desplaza libremente por la zona de estudio obteniendo valores de esta propiedad en cada instante. Este sensor consiste en dos espiras transmisoras, una receptora y otra emisora, con un espaciamiento de 1,22 m, con capacidad de emitir a multifrecuencia en el rango entre 1 y 16 kHz. En función de los objetivos y resolución del estudio, el operador debe definir parámetros de recolección de datos. El EMI puede recolectar datos en modo continuo o discreto, en el primero se realizan mediciones automáticamente en función de un tiempo asignado (ej. cada 0.5, 1 ó 2 segundos) y en el segundo se recolectan mediciones puntuales manualmente. Por otro lado, se debe elegir el modo de orientación del "momento dipolar magnético" de las espiras, con la opción horizontal o vertical. Este parámetro está relacionado con la sensibilidad de respuesta en profundidad y la distancia vertical de penetración del campo electromagnético. Se demostró que, en la orientación horizontal, el 70 % de la respuesta del instrumento proviene de la zona entre la superficie y una profundidad equivalente a las tres cuartas partes del espaciado entre bobinas. Mientras que, en la orientación vertical, el 70 % de la respuesta del instrumento proviene de la zona

entre la superficie y una profundidad equivalente a 1,5 veces del espaciado entre bobinas, duplicando la profundidad de exploración (Alonso, 2019). En este estudio, las exploraciones geofísicas se realizaron con las 3 frecuencias más altas (14, 15 y 16 Khz) ya que estiman la CEap más representativa del estrato superficial del suelo. Se utilizaron ambos modos de recolección de datos y orientación del dipolo a fin de comparar sus respuestas.

2.2.1.2 Sensor de Humedad (TDR)

El FieldScout (Spectrum Technologies, Inc) TDR 300 (Time Domain Reflectometry) es un sensor de humedad que consta de dos guías de ondas que se introducen en el suelo (Figura 7.2). Esta técnica se basa en la medición del tiempo que tarda un pulso de voltaje en desplazarse desde la sonda hacia el suelo y regresar, que es función de la constante dieléctrica (ε) del medio porosos que atraviesa. Con los valores de ε medidos en el suelo, el instrumento estima valores de humedad volumétrica (HV_{TDR}). En este caso se utilizaron guias de 20 cm de longitud que se insertan en su totalidad, por ende, los valores de HV_{TDR} del suelo corresponde a ese estrato (0-20 cm). Posteriormente, este valor debe ser corregido o calibrado con humedad volumétrica (HV%) con muestra a campo y procesadas en laboratorio con secado a estufa a 105°C, determinando humedad gravimétrica y afectandola por la densidad aparente. Para una mejor calibración es recomendable realizar los muestreos en sitios con HV% contrastante.

2.2.1.3 Resistivimetro Landviser

El resistivimetro LandMapper ERM 01 desarrollado por Landviser LCC es un dispositivo portátil, de bajo costo y rápido que mide la resistividad eléctrica del suelo representativa de los primeros 20 cm (Figura 7.3).

Figura 7. *Imágenes de los sensores geofiscos utilizados. (*1- sensor electromagnético EMP 400, 2- sensor de humedad TDR y 3-sensor de concataco resitiviemtro LandMapper)

El mismo funciona por inyección de una corriente eléctrica conocida mediante contacto con el suelo y consta de 4 electrodos a distancias fijas con una configuración particular que se detalla en la Figura 8. Con la corriente eléctrica entre A y B (i) y la lectura de ΔV entre M y N (V), se obtiene la resistividad electica aparente en ese punto (ρ_a). El principio de funcionamiento de este dispositivo fue desarrollado en la sección introductoria de este capítulo. En cada medición el instrumento permite visualizar resultados de ρ_a o conductividad eléctrica aparente, que denominaremos como $CEap_{sup}$ para diferenciarla de la obtenida con el EMP 400. Los valores de $CEap_{sup}$ serán expresados en dS/m. En esta tesis, la utilización de este dispositivo otorga información complementaria al sensor electromagnético y brinda mayor precisión de la salinidad en los primeros centímetros, con la desventaja de requerir mayor esfuerzo y tiempo en la recolección de datos.

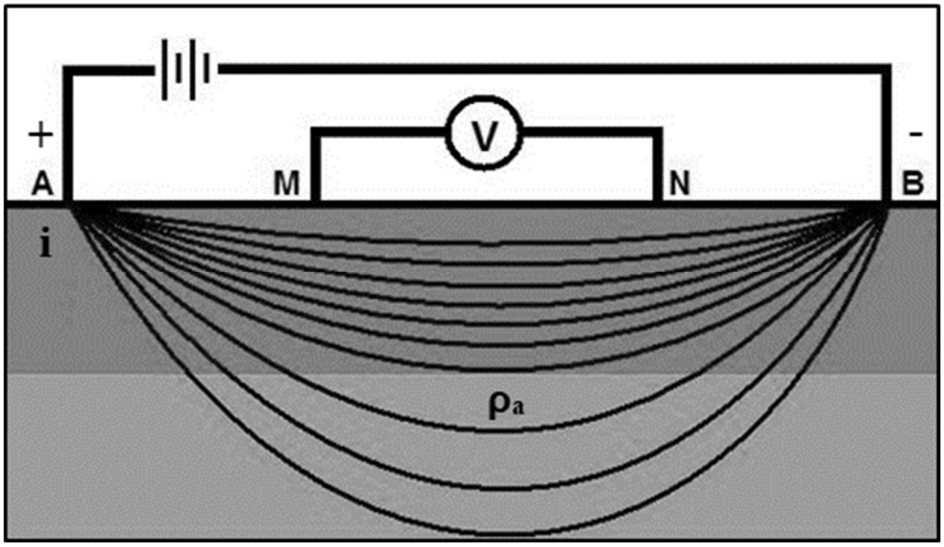


Figura 8. Esquema de configuración de electrodos de corriente y medición de potencial eléctrico para obtener la CEapsup con resistimetro Land Mapper ERM 01 (ρa=resistividad aparente, V= diferencia de voltaje, i= intensidad de corriente)

2.2.2 Relevamiento de CEap con sensor EMP400 y propiedades edaficas

Las parcelas estudiadas se encuentran descriptas en el Capítulo 1, sección "diseño experimental general" excluyendo de este análisis la de A19. Para la medición de CEap se realizaron transectas longitudinales paralelas separadas cada 5 metros. El desplazamiento dentro de las mismas se realizó a pie con medición instantánea de la CEap con el sensor EMP400. La exploración se llevó a cabo con dos metodologías (Tabla 4). La primera corresponde a mediciones "continuas" de bajo stacking, con una frecuencia de 1 seg entre cada medición y con el dipolo en orientación vertical (EMI_{CV}) y la segunda con mediciones "estacionales" o puntuales, de alto stacking, con el dipolo en orientación horizontal (EMI_{EH}). En EMI_{CV} se intentó que el desplazamiento dentro de cada transecta sea a velocidad constante para que la distribución de las mediciones en la misma sea equidistante. En el caso de EMI_{EH}, en cada transecta se realizaron mediciones puntuales cada 5 m. En las parcelas R17, S17, R18 y S18 se utilizó el muestreo EMI_{CV} y en E19, M19, J19 y N19 se usó EMI_{EH}.

En el caso de las parcelas relevadas con el método EMI_{EH} (Tabla 4) se realizó una grilla con 20 sitios de muestreo de suelo (10 sitios en la zona bajo riego y otros 10 en secano) que coincidieron espacial y temporalmente con sitios de medición de la CEap. En las

parcelas exploradas con EMI_{CV}, los sitios de muestreo de suelo se seleccionaron en base a representar gradientes contrastantes de CEap de acuerdo a su distribución espacial (una vez procesados los datos y tomando en cuenta el mapeo preliminar que brinda el sensor EMP400). Las muestras de suelo fueron extraídas al día siguiente de la exploración con el sensor, de manera que la ubicación de los sitios de muestreo se direccionó en zonas con alta y baja CEap. La densidad de muestreo en cada parcela se corresponde con el siguiente esquema: R17 y S17 con 6 sitios de extracción y R18 y S18 con 15, en esta ultimo lote se decidio aumentar el n para mejorar la representación espacial. Esta diferencia en densidad de muestreo entre las parcelas de las campañas 2017 y 2018 responde a limitantes de tiempo/trabajo y factores climáticos.

Las muestras de suelo para los dos diseños exploratorios (EMI_{EH} y EMI_{CV}) se tomaron en dos estratos 0-20 y 20-40 cm, pero los valores de las propiedades reportadas en esta sección corresponden al promedio de ambas, es decir, representativo de la profundidad 0-40 cm. Esto se debe a la mayor sensibilidad y precisión que el sensor EMP400 tiene a esta profundidad.

Tabla 4. Descripción de los diseños de exploración geofísica con EMI y selección de sitios de muestreo de suelo.

DISEÑO	MODO EXP.	ORIENTACIÓN DIPOLO	SELECCIÓN (sitio de muestreo)	PARCELA
EMI_{CV}	Continuo (bajo stacking)	Vertical (menor sensibilidad superficial)	Post exploración por categorías de CEap con coordenadas X e Y	PS= R18 S18 R17 S17
EMI_{EH}	Estacional (alto stacking)	Horizontal (mayor sensibilidad superficial)	Pre-exploración en grilla con medición punto a punto (CEap y muestreo)	PI=E19 M19 J19 N19

2.2.3 Medición de humedad volumetrica con TDR y medición de CEap mediante método geoelectrico (resistivimetro)

Para obtener los valores de humedad volumétrica con sensor TDR (HV_{TDR}) se realizó una calibración ajustando una curva de regresión en función de la HV obtenida con muestras de suelos en sitios contrastantes (saturados previamente y con baja humedad). Estas calibraciones se realizaron en cada parcela y al momento de muestreo.

Los valores de la humedad volumétrica medidos con sensor TDR fueron ajustados mediante curva de regresión para valores de TDR en función de la HV con muestras de suelos en sitios contrastantes (saturados previamente y con baja humedad) para obtener HV_{TDR}. Estas calibraciones se realizaron en cada parcela y momento de muestreo.

El relevamiento de la HV_{TDR} se realizó mediante transectas longitudinales equidistantes del largo de la parcela. En R17 y S17 fueron 3 transectas y en cada una, se realizó medición cada 2 m. Luego en R18 y S18 se realizaron 5 transectas y en cada una se tomaron mediciones cada 5m. Por ultimo, en E19, M19, J19 y N19 se realizaron 3 transectas separadas por 20 m entre ellas y con 5 m del borde. En cada una se tomaron mediciones cada 5 m. El cambio en el diseño de muestreo de esta propiedad se debió a un compromiso entre esfuerzo y representación espacial, el primer diseño (2017) resulto poco representativo, el segundo requirió demasiado esfuerzo (2018), en consiguiente el tercero (2019) fue el más conveniente en estos sentidos.

La $CEap_{sup}$ se midió en las parcelas de J19 y N19 con 20 mediciones en grilla de manera que son los mismos sitios de extracción de muestras de suelo.

2.2.4 Procesamiento de datos y mapeo

Para el procesamiento de datos se utilizó la CEap obtenida con la frecuencia de 16 kHz ya que es la más superficial y que mejor refleja las propiedades del suelo a la profundidad muestreada (Alonso, 2019). Se realizó un análisis exploratorio de los datos (estadística descriptiva) y se evaluó normalidad mediante la prueba de Kolgomorov-Smirnov (Gibbons, 1983). Posteriormente se eliminaron valores "outliers" de cada relevamiento. Se definieron los "outliers" con la siguiente ecuación 5:

$$X - DS * 2{,}5 \; < X_{out} > \; X + DS * 2{,}5 \quad (5)$$

Donde: X_{out} son los valores outliers

X es el valor medio de cada parcela

DS es el desvió estándar de cada parcela

En todas las parcelas se establecieron 3 rangos de CEap denominados "Alta", "Media" y "Baja". Los límites de estos rangos se construyeron con las siguientes medidas estadísticas de CEap para cada parcela: valor mínimo o límite inferior y percentil 33,3

para rango “Baja”, percentil 33.3 y 66.6 para “Medio” y percentil 66.6 y valor máximo o límite superior para “Alta”. Para las comparaciones con las propiedades edáficas, como los muestreos de suelo en las parcelas exploradas con EMI_{EH} fueron previos al mapeo y categorización de la CEap, las réplicas por categoría son variables entre 5 y 8 dependiendo de cada parcela. En las parcelas exploradas con EMI_{CV} los muestreos fueron direccionados por categorías, sin embargo, en R17 y S17 solo se representaron las categorías con mayor contraste. Es decir, en estas parcelas existen réplicas solo de la categoría Alta y Baja.

Para la distribución espacial y mapeo de la CEap, donde hubo normalidad, se ajustaron variogramas experimentales y en base a estos, se realizó un mapa de contorno mediante Kriging ordinario (Matheron, 1963). En los casos en los que no se encontró normalidad de los datos, la interpolación espacial se realizó con el método “natural neighbor” que consiste en, buscar el subconjunto de muestras de entrada mas cercano al punto de evauluacion y aplicar ponderaciones sobre ellas basándose en áreas proporcionales para interpolar el valor (Sibson, 1981). El análisis de los variogramas y mapeo de CEap se realizó mediante Software Golden Surfer 13 (2015). Se clasificó la estructura espacial de la CEap mediante el valor umbral o meseta (C1) y el valor de efecto pepita (C0). El cociente entre C1/C0 fue categorizado como fuerte dependencia espacial (> 0,75), moderada (0,25-0,75), y débil (< 0,25) según Cambardella et al. (1994).

Esta misma metodología se utilizó para el mapeo de la HV_{TDR} y $CEap_{sup}$

2.2.5 Análisis estadísticos

Se realizaron 3 niveles de análisis, complementarios entre si, con el fin de encontrar relaciones entre las propiedades edáficas y la CEap. El primero de ellos consiste en un análisis de varianza (ANOVA) con comparación de medias LSD Fisher (1936) para todas las variables del suelo estudiadas, en donde los tratamientos son los rangos de CEap dentro de cada parcela (Bajo, Medio, Alta). Previamente se realizo la verificación de los supuestos del ANOVA, independencia y normalidad. En el segundo, se realizó un análisis de correlación lineal con coeficiente Pearson (Mead, 2017) entre las variables del suelo y la CEap en cada parcela. Y en un tercer enfoque, nuevamente análisis de correlación con Pearson entre las variables del suelo y la CEap pero con dos agrupamientos; uno denominado “general” donde se toman los valores de todas las parcelas y otro “parcial”

donde se toman los valores de las parcelas exploradas con el diseño EMI_{EH} o PI. Estos análisis se llevaron a cabo con el software Infostat versión 2011 (Di Rienzo et al., 2011)

2.3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

2.3.1 Resumen estadístico de las exploraciones con sensor EMP400

Los valores medios de la CEap se encuentran en un rango que va desde 32,9 a 55,0 mS/m. La cantidad de datos acumulados por parcela es dependiente del diseño de muestreo utilizado con el sensor EMI, por eso las mediciones en modo continuo (EMI_{CV}) siempre son mayores (Tabla 5).

Tabla 5. Estadisticos descriptivos de la CEap por parcela.

Parcela	Diseño		n	Media	DE	Max	Min	CV
	Parcela	EMI			(mS/m)			(%)
R17	PS	EMI_{CV}	2610	38,3	2,2	49,1	31,0	5, 9
S17	PS	EMI_{CV}	2604	52,0	2,1	63,4	46,9	4,1
R18	PS	EMI_{CV}	4805	38,0	3,8	49,7	26,0	9,9
S18	PS	EMI_{CV}	2071	40,2	3,5	54,2	31,2	8,7
E19	PI	EMI_{EH}	465	49,5	12,4	84,1	34,7	25,0
J19	PI	EMI_{EH}	465	32,9	2,7	43,3	26,8	8,4
M19	PI	EMI_{EH}	496	55,0	4,8	77,1	47,4	8,7
N19	PI	EMI_{EH}	462	33,9	1,7	37,9	29,4	5,1

PS= tratamientos en parcelas separadas, PI= tratamientos integrados en única parcela, R17/S17=riego/secano noviembre 2017, R18/S18= riego/secano junio 2018, E19= enero 2019, M19=mayo 2019, J19= julio 2019, N19= noviembre 2019, n=numero de muestras, DE= desvio estándar, CV= coeficinete de variación, Max= máximo, Min= mínimo

Si bien los valores de CEap son sitio-específicos, son coherentes con antecedentes en suelos similares ubicados en la región Pampeana (Alonso, 2019, Cicore et al., 2016). Las parcelas S17, M19 y E19 son las presentan mayores valores medios, mientras que, N19 y J19 se reportaron los valores medios más bajos (33,9 y 32.9 mS/m respetivamente).

Las parcelas S17 y S18 que representan dos momentos de muestreo en el mismo lote, reportan valores medios más elevados de CEap que sus pares respectivos (R17 y R18). Si bien en este capítulo no se analiza el efecto del riego y su influencia en las propiedades edaficas, se observa que los valores medios de CEap en secano son mayores que en riego. Se esperaba encontrar mayor conductividad en los suelos bajo riego respecto al secano.

La variabilidad (CV %) en la mayoría de las parcelas muestran valores bajos (CV<10%) y similares, salvo en E19 donde el CV alcanzó un 25% del resto. Otros autores (Martínez, 2009 y Machado, 2015) que trabajaron con sensores electromagnéticos en suelos agrícolas comparables, reportaron valores de CV similares a los encontrados.

El análisis de normalidad señaló que sólo las parcelas R17, S18, J19 y N19 tienen una distribución normal, en tanto, en el resto (S17, R18, E19, M19) fue rechazada la hipótesis nula que asumía normalidad. En estas últimas parcelas, la interpolación y mapeo de la CEa se realizó con método Natural Neighbor.

2.3.2 Semivariogramas en parcelas con distribución normal: R17, S18, J19 y N19

Se realizaron semivariogramas experimentales para las parcelas que tenían una distribución normal de la CEap y se ajustaron modelos matemáticos. En R17 se ajustó en forma más eficiente a un modelo exponencial, S18 y N19 con uno logarítmico mientras que en J19 (Figura 9) se utilizó un modelo lineal, el cual indica que, en la escala de trabajo, no se estabilizó la varianza (parámetro "meseta" o C_1). En R17 se alcanzó el "rango" o umbral rápidamente en los primeros metros, en cambio en S18 y N19 existe dependencia espacial para distancias entre los 40 y 70 m. Por otro lado, en todas las parcelas se observó que el error o efecto "pepita" (C_0) es pequeño comparado con C_1, esto nos indica que el ajuste del semivariograma explica mayormente la varianza total. En todos los casos se obtuvo una correlación fuerte ya que el parametro C_0/ C_1 fue mayor a 0,75. Con estos semivariogramas se realizó la interpolación con método Kriging para el mapeo de la CEap.

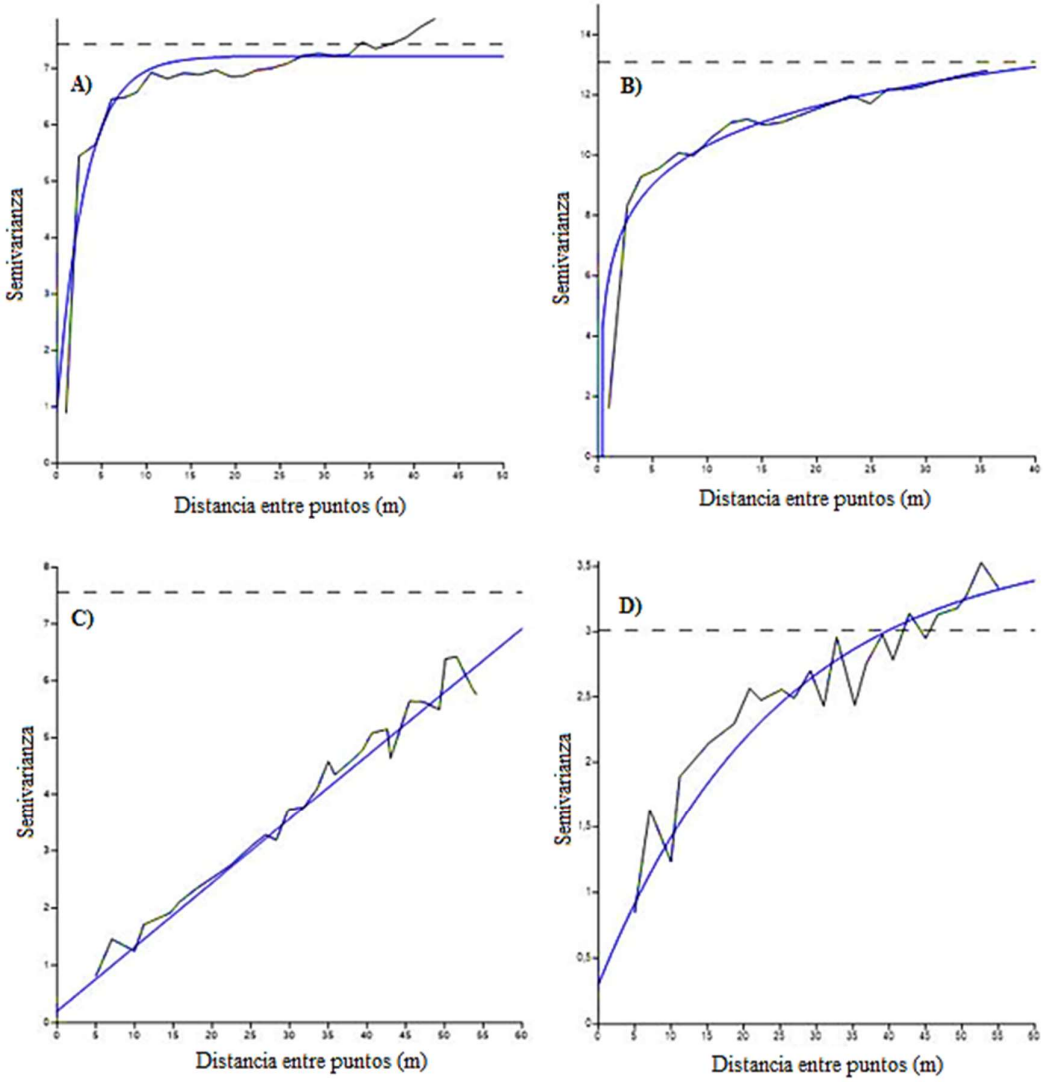


Figura 9. Semivariogramas experimentales de las parcelas (*a=R17, b=S18, c=J19 y d=N19).*

2.3.3 Mapas y rangos de CEap

En la Tabla 6 se muestran los rangos de CEap que resultaron luego de realizar la eliminación de datos outliers. En la Figura 10 se muestran los mapas de CEap realizados mediante kriging ordinario con los semivariogramas del apartado anterior o con Natural Neighbor, según corresponda. En las parcelas E19, M19, J19 y N19 se detallan las zonas bajo R y S dentro de las mismas.

Tabla 6. Rangos de CEap y numero de muestras de suelo por parcela para las categorías Alta, Media y Baja.

Parcela	Rango de CEap					
	Baja	n	Media	n	Alta	n
R17	29,2-37,3	3	37,3-39,1	NC	39,1-49,1	3
S17	35,1-50,9	3	50,9-52,6	NC	52,6-72,6	3
R18	24,0-36,2	6	36,2-40,0	4	40,0-49,7	5
S18	30,1-38,6	6	38,6-41,6	4	41,6-59,4	5
E19	34,6-41,0	6	41,0-51,6	6	51,6-84,1	8
M19	47,3-52,3	6	52,3-55,8	7	55,8-70,0	8
J19	26,8-31,3	6	31,3-33,8	7	33,8-43,3	7
N19	29,4-33,3	8	33,3-34,7	7	34,7-37,9	5

Los mapas de las parcelas exploradas con el diseño EMI_{CV} (Figura 10) muestran zonas contrastantes de CEap pero no responde al riego. En un análisis adicional se evaluó si los los valores medios de CEap bajo R eran distintos a S y no se encontraron diferencias significativas (las comparaciones fueron R17 vs S17 y R18 vs S18). Tampoco se observaron tendencias claras en la distribución espacial de esta propiedad. Pudo haber existido demasiado "ruido" (errores) en las exploraciones con este diseño debido al bajo stacking (apilamiento de datos). En R18 el comportamiento de la CEap es difuso, las zonas altas y bajas se entremezclan sin permitir definir regiones continuas de conductividad. En R17, S17 y S18 existe una leve tendencia, se observó que la CEap aumenta hacia el este de las parcelas. Por otro lado, existe un patrón de distribución espacial que se mantiene en el tiempo para las parcelas, S17 respecto a S18.

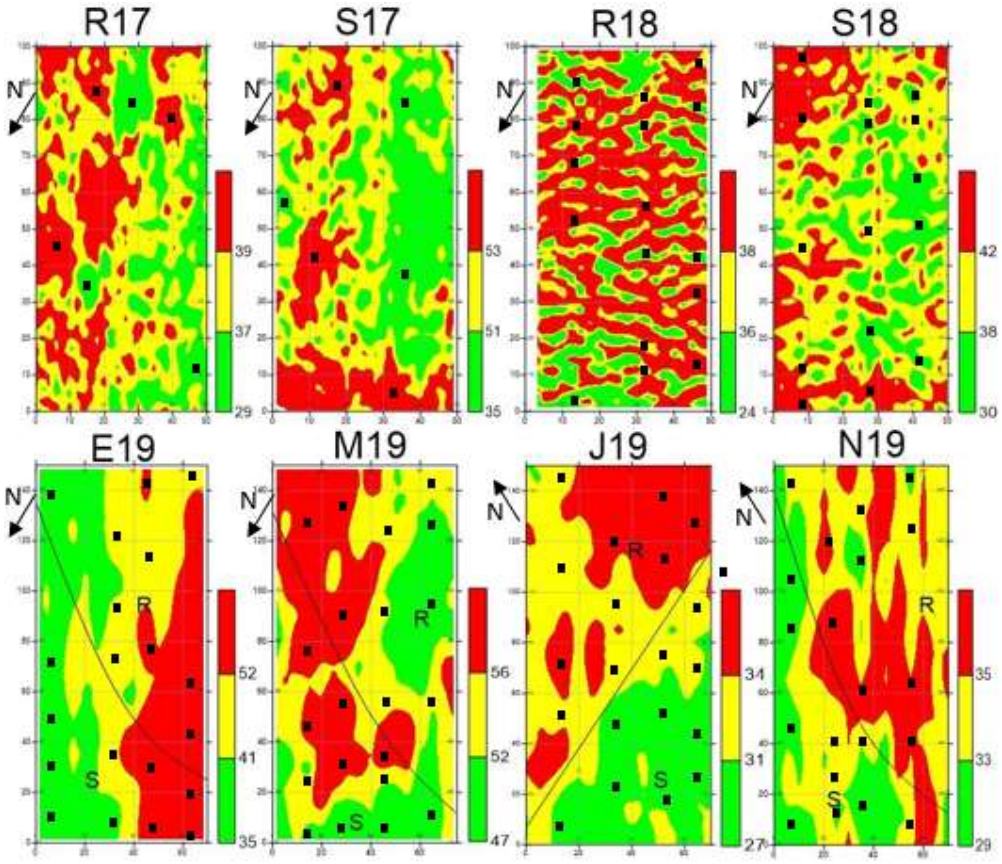


Figura 10. Mapas de CEap exploradas con los diseños EMI_{CV} (17 y 18) y EMI_{EH} (19) con frecuencia de 16 kHz. *(eje X distancia en m, eje Y distancia en m, N indica dirección del norte, R= zona bajo riego, S= zona fuera del riego, cuadrados negros= sitios de muestreo de suelo, línea sólida oscura muestra el limite R y S, escala de colores indica categorías de CEap en mS/m, verde=Baja, amarillo= Media y rojo= Alta)*

A diferencia de las anteriores, en las parcelas exploradas con el diseño EMI_{EH} se pudo evidenciar tendencias más claras en la distribución de la CEap. En E19 la zona de alta CEap al oeste, coincide con una pequeña depresión topográfica donde es probable que se acumule aguas de riego por escurrimiento. En M19 la categoria alta se distribuye de sureste al noroeste con discontinuidades y de baja se encuentra hacia el oeste. En estas dos últimas parcelas, no se observa que la distribución espacial de la CEap responda a R o S. En cambio, en J19 existe un patrón claro de alta conductividad que se distribuye en sentido NE-SO y coincide con R. Finalmente, en N19 hay un aumento de la CEap hacia el este, con máximos en el centro del lote que también responde a la zona de riego. Se observa, en términos generales, valores medios más altos de CEap en las zonas regadas.

En particular en las parcelas de J19 y N19 esta tendencia es mucho más acentuada y abrupta.

2.3.4 Relaciones entre categorías de CEap con las propiedades del suelo

2.3.4.1 Parcelas medidas con diseño EMI_{CV}

En estas parcelas no se encontraron diferencias significativas entre las categorías de CEap y ninguna de las propiedades del suelo relevadas. Estos resultados son coherentes con los mapas del apartado anterior, en donde la distribución de las zonas de conductividad en cada parcela no muestra tendencia y continuidad. En la Tabla 7 se muestran los valores medios de las propiedades edáficas analizadas para cada categoría de CEap. Se observó una ligera tendencia a encontrar valores medios mayores en el pH y PSI en categorías más altas de CEap pero sin significancia estadística.

La falta de relaciones entre la CEap y las propiedades edáficas bajo EMI_{CV} es contraria a lo hipotetizado y podría responder a un conjunto de posibles causas, principalmente debido a la metodología de muestreo de suelo y relevamiento de la CEap desarrollado en estas parcelas (EMIcv). En primer lugar, son parcelas más pequeñas y no tienen una fuente de variabilidad importante que pueda generar contrastes en sus propiedades edáficas. Esto dificulta establecer relaciones empíricas con la CEap ya que se obtienen mejores resultados en sitios heterogéneos (Doolittle y Brevik, 2014). En segundo lugar, Sudduth et al (2001) menciona que la deriva espacial entre las muestras de suelo para la calibración con la exploración geofísica, y las condiciones de temperatura y humedad del momento de muestreo representan posibles fuentes de error en la utilización de métodos electromagnéticos aplicados en agricultura de precisión. En estas parcelas el relevamiento de suelo se realizó al día siguiente de exploración geofísica en base a las categorías preliminares de CEap, generando desviaciones por las condiciones ambientales entre un día y el otro, y diferencias espaciales entre la ubicación de la medición geofísica y el muestreo de suelo (calibración). Por último, el método exploratorio EMI_{CV} resulta en una gran cantidad de datos por parcela, pero con bajo "stacking" o "apilamiento", es decir, poca acumulación de datos en cada medición, lo que puede significar una fuente de error en la estimación del valor representativo. Saksa y Sorsa (2017) demostraron que es necesario utilizar un "stacking" de al menos 16 en muestreos de alta frecuencia con sensor

EMP400 (en EMIcv se utilizó un stacking de 4) con el fin de obtener valores no influenciados por esta variable de operación.

Tabla 7. Resultados de ANOVA para las propiedades edáficas estudiadas por categoría de CEap en las parcelas exploradas con EMI_{CV}. (letras distintas indican diferencias estadísticas entre las medias con pvalor=0.05)

Parcela	Rango de CEap	CEs (µS/cm)		pH		PSI (%)		CIC (meq/100g)		HV (%)	
R17	Alta	156,4	A	6,18	A	3,40	A	19,15	A	30,01	A
	Baja	169,8	A	6,17	A	3,09	A	19,93	A	32,41	A
S17	Alta	150,3	A	6,05	A	2,01	A	16,57	A	28,89	A
	Baja	162,0	A	5,97	A	1,81	A	17,27	A	28,49	A
R18	Alta	99,2	A	6,68	A	4,86	A	18,47	A	32,81	A
	Media	98,0	A	6,49	A	4,15	A	19,06	A	33,88	A
	Baja	92,6	A	6,60	A	4,39	A	19,43	A	34,15	A
S18	Alta	71,5	A	6,19	A	1,71	A	17,47	A	35,73	A
	Media	66,9	A	6,12	A	1,39	A	16,51	A	35,24	A
	Baja	78,4	A	6,23	A	1,40	A	18,13	A	37,07	A

2.3.4.2 Parcelas medidas con diseño EMI_{EH}

En la Tabla 8 se presentan los resultados del ANOVA para las propiedades estudiadas por categoría de CEap. Este conjunto de parcelas comparte el modo de medición para el relevamiento de CEap, tipo y densidad de medición (EMI_{EH}). Dentro de cada una de ellas existen zonas con y sin riego. Esto representa una fuente de variabilidad en las propiedades edáficas que se refleja en un patrón de distribución de CEap (Figura 10). Es probable que, a diferencias de las anteriores, este modo de medición y diseño de muestreo contribuyó a encontrar diferencias significativas en algunas propiedades por parcela para distintas zonas de conductividad.

La CEs se diferenció estadísticamente por zonas de CEap en todas las parcelas excepto N19 (Tabla 8). En E19 y M19 se diferenciaron las categorías media y baja del alta, mientras que en J19 todas las categorías se separaron estadísticamente. En estos casos, la

progresión fue positiva, es decir, se encuentran valores medios de CEs altos en las categorías con rangos de CEap más elevados.

El pH y PSI del suelo siguieron la misma tendencia en todas las campañas, en donde se hallaron diferencias significativas entre los rangos de CEap para cada una. En este caso también las relaciones fueron positivas, encontramos aumentos en el pH y PSI en rangos más elevados de CEap. Las categorías contiguas no presentan diferencias significativas, pero sí se diferencian los extremos (Alta vs Baja). En particular, en J19 en estas dos propiedades, las zonas de conductividad se diferenciaron totalmente. El contenido de Na^+ en la solución del suelo se encuentra íntimamente relacionado al PSI, por eso los resultados de ambas variables son semejantes para las categorías de CEap (no informado en la Tabla 8)

Bosch Mayol et al (2012) obtuvieron resultados similares en su estudio de la variabilidad de CEap en suelos regados en la región Pampeana (Pieres, Provincia de Buenos Aires). Los autores reportaron diferencias significativas entre categorías extremas (alta vs baja) de CEap para las variables CEs y Contenido de Na+. Sin embargo, no se observaron diferencias entre todas las categorías para el RAS. Por otro lado, Simon M. et al (2013) encontraron diferenciar la clase "alta" de CEap del suelo del resto para las variables CEs y pH, en dos lotes productivos en la provincia de Córdoba.

Respecto a la CIC, en las parcelas E19, M19 y N19 no se reportaron diferencias significativas entre las categorías de CEap. Sin embargo, en J19 se halló una relación positiva en donde se separaron las tres zonas de conductividad. La CIC del suelo se encuentra fuertemente relacionada con el contenido de materia orgánica y el porcentaje de arcilla, las cuales influyen directamente la CEap del suelo (ver apartado Introducción). Por ello, no era esperable encontrar relaciones con esta propiedad ya que en esta escala de estudio no deberían cambiar sustancialmente los contenidos de materia orgánica y arcillas. Sin embargo, lo obtenido en esta parcela es coherente con relaciones reportadas por diversos autores entre estas dos propiedades (Jung et al, 2005, Cicore et al 2016)

Las concentraciones de los nutrientes estudiados (NO_3^- y PO_4^{3-}) no presentaron relaciones claras con las categorías de CEap en cada parcela. Los valores medios aumentan con las categorías, pero la tendencia no es significativa. En particular, en la parcela E19 se observa que los valores medios de las concentraciones de PO_4^{3-} en las zonas de alta CEap

eran superiores y distintos al resto de las categorías con un valor $p<0.05$ (Zona: Alta= 19,74 (a); Media= 8,58 (b) y Baja= 11,91 (b) en ppm). Si bien, numerosos autores han encontrado relaciones positivas y significativas con los nutrientes del suelo (Wienhold y Doran 2008, Medeiros et al 2018, Márquez Molina et al 2014), en general, se obtienen en sitios con alta variabilidad espacial en las concentraciones de estos nutrientes. Estos últimos resultados son importantes ya que se buscaba encontrar que los contrastes en la salinidad del suelo reflejen el efecto del riego complementario por los cationes que contiene el agua subterránea utilizada y no por los que provienen de la fertilización y rotación de cultivos.

Respecto a las propiedades físicas evaluadas los resultados indican que no hay relaciones sustanciales en este análisis. Se supone que las relaciones posibles con las propiedades medidas (Ks, Rp, Dap, EA, Tb) derivan de cambios en la porosidad y/o minerologia del suelo (Corwin y Lesch, 2005). Sin embargo, para hallar relaciones robustas con la CEap deben existir cambios importantes con las propiedades de interés. En esta escala reducida (parcelas de 150/100 m) es probable que los cambios en estas sean leves y por eso la CEap no resulto sensible. De todas maneras, son escasos los antecedentes que relacionan estas variables, generalmente acotados a estudios sobre compactación (Al-Gaadi, 2012; Sudduth et al., 2010) y textura (Bosch Mayol et al 2012; White et al 2012; Neely et al 2016). En este conjunto de estudios, las variables físicas o bien se manipularon o se seleccionaron sitios en un gradiente con el fin de contar zonas con distintas características físicas del suelo y así obtener correlaciones con la CEap.

Finalmente, en la Tabla 8 se pueden observar los valores medios del HV para cada categoría por parcela. En el apartado introductorio de este capítulo, se desarrolló la fuerte dependencia del contenido hídrico con la CEap. Por eso, estos resultados también son importantes ya que, se planteó detectar que los cambios de CEap estén relacionados con cambios en la salinidad y no con la humedad del suelo. Se observa que no hay diferencias estadísticas entre las categorías de CEap, lo cual nos indica que esta propiedad no es fuente de variación, permanece relativamente constante dentro de cada parcela. Sin embargo, los valores medios de HV de las parcelas exploradas con EMI_{EH} , en general, son mayores que para las parcelas exploradas con EMI_{CV}, lo cual podría haber contribuido a que los mapas de CEap reflejaran en mayor medida el patrón de distribución espacial de las propiedades del suelo de interés.

Tabla 8. Resultados de ANOVA para las propiedades edáficas estudiadas por categoría de CEap en las parcelas exploradas con EMI_{EH}. (letras distintas indican diferencias estadísticas entre las medias con pvalor=0.05)

Parcela	Rango de CEap	CEs (µS/cm)		pH		PSI (%)		CIC (meq/100g)		HV (%)	
E19	Alta	236,2	**A**	7,63	**A**	12,84	**A**	17,0	A	32,47	A
	Media	164,9	**B**	6,55	**B**	7,17	**B**	17,0	A	33,17	A
	Baja	121,3	**B**	5,91	**B**	4,87	**B**	17,0	A	34,47	A
M19	Alta	152,0	**A**	7,07	**A**	8,13	**A**	15,9	A	41,41	A
	Media	83,9	**B**	6,31	**B**	4,53	**B**	16,4	A	40,60	A
	Baja	92,6	**B**	6,29	**B**	6,2	**AB**	17,2	A	41,28	A
J19	Alta	108,5	**A**	6,94	**A**	7,26	**A**	17,9	**A**	39,95	A
	Media	87,9	**B**	6,59	**B**	4,36	**B**	17,1	**B**	42,45	A
	Baja	66,5	**C**	6,05	**C**	0,78	**C**	15,7	**C**	41,82	A
N19	Alta	106,9	A	6,35	**A**	6,74	**A**	15,6	A	30,18	A
	Media	114,3	A	6,15	**A**	6,32	**A**	15,7	A	28,39	A
	Baja	131,5	A	5,88	**B**	5,21	**B**	16,1	A	27,01	A

2.3.5 Correlaciones entre las propiedades edáficas y la CEap por parcela

En este análisis se obtuvieron relaciones numéricas entre los valores de CEap con los de las propiedades físicas y químicas evaluadas mediante análisis de correlación Pearson. Representa un análisis complementario al apartado anterior. Los resultados se presentan agrupados por parcelas que comparten el modo de exploración geofísica.

2.3.5.1 Parcelas medidas con diseño EMI_{CV}

Las relaciones entre las propiedades edáficas con la CEap del suelo fueron débiles y no significativas para todas las parcelas. Únicamente, R17 obtuvo un coeficiente positivo significativo de 0,85 con el PSI (%), coherente con los resultados anteriores. Las posibles causas de estos resultados fueron expuestas también en el apartado anterior, adjudicadas a la metodología relevamiento de la CEap, el diseño de muestreo de las propiedades edáficas y posiblemente el contenido hídrico al momento de muestreo.

2.3.5.2 Parcelas medidas con diseño EMI_{EH}

Los resultados de la Tabla 9 muestran los coeficientes de correlación lineal de Pearson y la significancia estadística entre las variables químicas y físicas del suelo con la CEap en las parcelas E19, M19, J19 y N19.

Se observó que las variables químicas relacionadas con el impacto del riego en el suelo (Génova, 2007) son las que mejor se relacionaron con la CEap presentando coeficientes de correlación altos y positivos. La CEs obtuvo correlaciones fuertes en las campañas de E19, J19 y M19 y no significativa en N19. A su vez, las relaciones son aún más fuertes con las variables que reflejan procesos de aumento de sodio en superficie (pH, PSI, Na^+). En todas las parcelas las correlaciones fueron significativas con el PSI con valores superiores a 0,5 en todos los casos. El pH resulto significativo en todas las parcelas con pvalor>0.05 con valores altos, sin embargo, en N19 el valor de correlación fue menor y con una significancia >0.1. En particular, encontramos que J19 presentó los coeficientes más altos entre las variables que responden a la salinización y sodificación del suelo y la CEap. De manera contraria, en N19 las relaciones fueron débiles, aunque significativas. Estos resultados evidencian que la variabilidad de la distribución de la CEap del suelo responde a procesos de sodificación originados por la acumulación de sales contenidas en el agua de riego.

Se ha demostrado que los sensores electromagnéticos son efectivos para monitorear la salinidad del suelo en sistemas bajo riego y los resultados aquí expuestos dan cuenta de ello, en concordancia con estos antecedentes. Ganjegunte et al (2017) encontraron correlaciones fuertes con la CEs y RAS con valores de 0,83 y 0,81 respectivamente debido a la precipitación selectiva de minerales y carbonatos provenientes del agua de riego. Mientras que Narjary et al (2019) hallaron relaciones fuertes con los principales cationes y aniones de la solución del suelo, siendo el contenido de Na el que mejor correlacionó con un valor de 0,77 y la CEs con 0,74. Otros autores también estudiaron relaciones con la salinidad en suelos regados y con la CEap relevada con el método EMI alcanzando resultados similares (Gallardo, 2003, He et al., 2015, Wang et al., 2016)

Respecto al resto de las variables químicas se evidenció diferencias significativas en la CIC del suelo en J19 donde la relación fue positiva y fuerte (0.76), resultado esperado ya que esta propiedad facilita la transmisión eléctrica a través de los cationes del suelo. Los

aumentos en la concentración de nutrientes en el suelo deberían causar mayor concentración de solutos en el suelo y por ende mayor CEap (Doolittle y Brevik, 2014).

Sin embargo, el PO_4^{3-} solo fue significativo solo en E19 donde también es positiva pero moderada (0,57) y no hubo relaciones con el contenido de NO_3^-. Las relaciones con la textura del suelo son contrarias a lo esperado. Los coeficientes de correlaciones variaron entre 0,48 y 0,75 para el contenido de arena mientras que en las arcillas los valores estuvieron entre –0,51 y -0,72. Las arcillas aumentan la conductividad eléctrica de la fase sólida por los cationes adsorbidos y en la líquida por su mayor contenido de agua en condiciones no saturadas (Friedman, 2005). Quizás la explicación de este resultado tenga que ver con la metodología de análisis textural. Mediante la técnica de Bouyoucos, las arenas, se separaron físicamente con tamiz de 0,05 mm y la materia orgánica no fue oxidada previamente. Por otro lado, en el procesamiento de las muestras se observó presencia importante de MO asociada a esta fracción gruesa (encostramientos y mancheos negros). Considerando que no debería haber cambios texturales importantes en esta escala de estudio, creemos que las variaciones en la fracción de arenas, en realidad, podrían significar cambios en MO asociada a la misma. De ser así, la presencia de MO aumentaría la conductividad del suelo (Martinez et al, 2009). Es decir, la fuente de variación de la CEap estaría dada en mayor medida por la MO que por el contenido de arcillas. También se halló una relación positiva y significativa entre la CIC y el contenido de arenas (r=0.47). Este resultado podría ser un indicio de cambios en la materia orgánica y por ende en la CEap del suelo ya que esta última propiedad, en general, aumenta también con la MO (Conti y Giuffré, 2014).

Finalmente, la HV junto con resto de las propiedades físicas evaluadas (Dap, Rp, EA, Ks Tib) no presentaron correlaciones significativas con la CEap.

Tabla 9. Coeficientes de correlación lineal de Pearson por variable y parcela con la CEap.

Variable	E19	M19	J19	N19
CEs	0,75	0,81	0,89	ns
pH	0,90	0,83	0,87	0,43 *
PSI	0,86	0,60	0,89	0,52
Na	0,85	0,56	0,89	0,39 *
CIC	ns	ns	0,76	ns
NO3	ns	ns	ns	ns
PO4	0,57	ns	ns	ns
Are	0,48	0,59	0,75	sd
Lim	sd	ns	ns	sd
Arc	-0,72	-0,51	-0,58	sd
HV	ns	ns	ns	ns

**Diferencias con pvalor de 0.1, ns= no significativo, sd= sin datos.*

2.3.6 Humedad Volumétrica medida con TDR y resistividad eléctrica con método geoeléctrico

En la Tabla 10 se detalla el resumen de los principales estadísticos descriptivos para la HV_{TDR} en cada parcela. Los resultados del ANOVA indican que las medias de todas las parcelas son distintas y se ordenan de la siguiente forma: S18>E19>J19>S17>M19>R17>R18>N19. Estos resultados coinciden, en parte, con el análisis de la Hg medida con muestras de suelo promedio para el estrato de 0 a 40 cm, donde los valores más bajos y altos también se corresponden con N19 y S18 respectivamente, aunque no se diferenciaron estadísticamente del resto de las parcelas.

Por otro lado, se encontraron bajos CV, menores al 10% en casi todas las parcelas, salvo en E19 que presentó mayores contrastes de humedad. Debido a una mayor densidad de mediciones en las campañas del 2017 y 2018, tenemos n más altos que en el resto de los relevamientos. Sin embargo, los distintos esquemas de muestreo no parecen manifestar diferencias en la variabilidad entre las parcelas. Es decir, los CV son similares y comparables entre ellas.

Tabla 10. Estadísticos descriptivos de la Humedad Volumétrica (%) medida con sensor TDR (HV_{TDR}) *(n= número de mediciones, D.E.= desvio estándar, CV= coeficiente de variación, Min= minmo, Max= máximo)*

Parcela	n	Media	D.E.	CV (%)	Mín	Máx
R17	142	24,61	1,29	5,25	21,98	27,94
S17	143	26,48	1,36	5,13	23,40	30,33
R18	125	22,95	0,59	2,59	21,41	24,47
S18	117	36,02	2,26	6,27	30,45	41,17
E19	91	34,14	3,95	11,56	24,63	44,24
M19	93	25,81	1,34	5,19	23,23	28,56
J19	92	31,19	1,50	4,82	27,48	34,27
N19	92	22,39	1,06	4,72	20,18	24,74

Los valores de HV_{TDR} de todas las parcelas tienen una distribución normal, de manera que el mapeo de esta propiedad se realizó con el método kriging ordinario como se detalló en la sección metodológica. En la figura 11 se muestran los mapas de HV_{TDR} medida con TDR de todas las parcelas.

Encontramos que en los mapas de R17, S17, R18 y S18 no se observa un patrón o tendencia clara en el contenido hídrico. Tampoco se observa similitud en los mapas de CEap y de esta propiedad, razón por la cual, no se hallaron relaciones significativas entre ambas variables geofísicas.

En cambio, en los mapas de HV_{TDR} de las parcelas E19 M19 J19 y N19, se observa cierto grado de similitud con los mapas de CEap (ver Figuras 11 y 12). Las zonas de alta CEap coinciden parcialmente con las zonas de mayor contenido hídrico, es decir hay una relación positiva entre los valores de CEap y HV_{TDR}. Estos resultados son consistentes debido a que el agua es un excelente conductor de la corriente eléctrica y por lo tanto, el método geofísico electromagnético utilizado resulta muy sensible a las variaciones de HV_{TDR}. Para reforzar estas observaciones, en la Figura 12 se muestran los gráficos de regresión entre los valores de CEap y HV_{TDR}. Si bien estas correlaciones arrojan valores de R^2(ajuste) bajos a moderados, en todos los casos son significativos (E19 =0.25, M19=0.46, J19=0.37 y N19=0.15). Es importante volver a mencionar que, en este trabajo,

se busca que las relaciones más fuertes y significativas se den con las variables relacionadas con los procesos de salinización/sodificación. De manera que, es esperable que las relaciones entre la humedad y la CEap sean leves o moderadas, menos intensas. Finalmente, se puede afirmar que este análisis de humedad con el dispositivo TDR permite una medición rápida y sencilla a diferencia del método tradicional (laboratorio) con muestras de suelo. Es por ello que permitió un número mayor de repeticiones por parcela con la posibilidad de detectar cambios leves y mejorando su representación espacial.

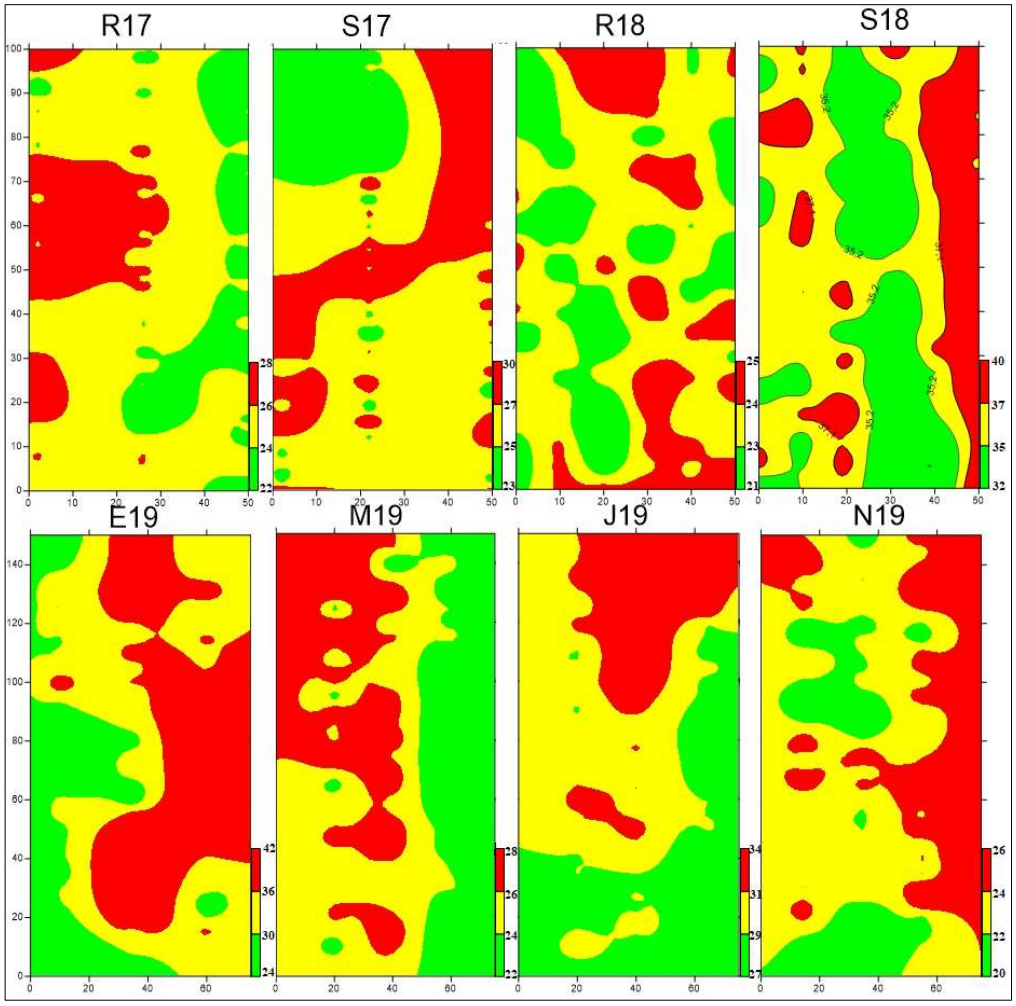


Figura 11. Mapas de HV_{TDR}(%) de las parcelas exploradas con sensor de humedad TDR.*(eje X distancia en m, eje Y distancia en m, escala de colores indica categorías de HV_{TDR} en %, verde=Baja, amarillo= Media y rojo= Alta)*

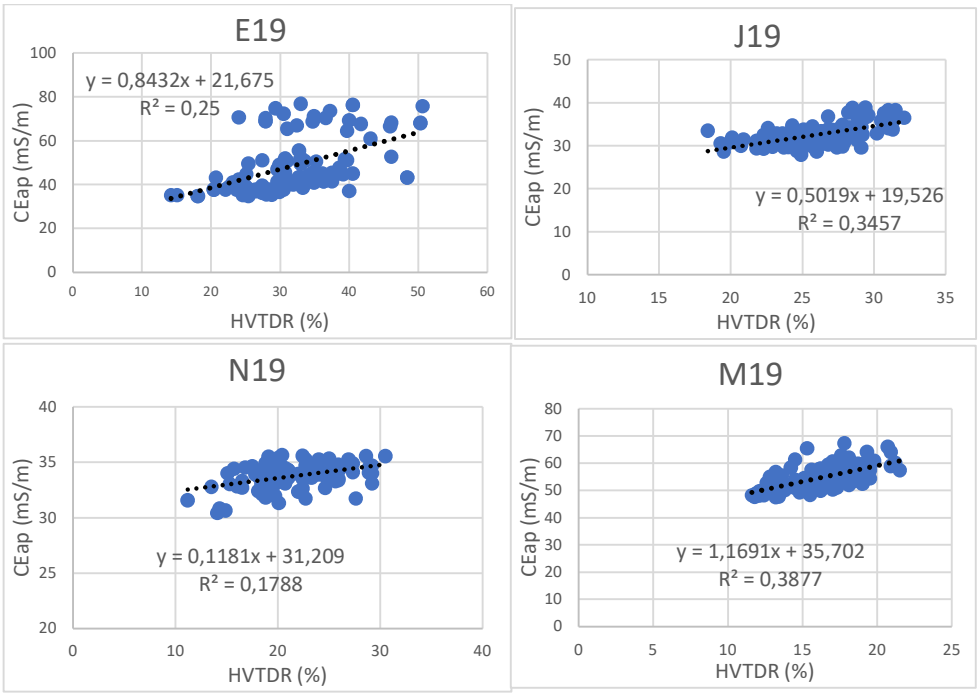


Figura 12. Gráficos de regresión lineal entre la CEap y HV_{TDR} de las parcelas E19, M19, J19 y N19.

Por último, en las últimas campañas correspondientes a la parcela J19 y N19 se tomaron mediciones de resistividad eléctrica con el resistivímetro Landviser para obtener la conductividad eléctrica aparente del estrato superficial entre 0-20 cm ($CEap_{sup}$), mapear su distribución espacial (Figura 13) y establecer relaciones con las otras propiedades estudiadas.

En la Figura 13 se puede observar que el mapa de J19 de la $CEap_{sup}$ coincide con la distribución tanto de CEap como HV_{TDR}. Se encontraron buenas correlaciones entre estas propiedades como se muestra en la Figura 14; ambas correlaciones son positivas resultando en un ajuste (R^2) de 0.57 con la HV_{TDR} y de 0.77 con la CEap medida con el EMI. También se halló una fuerte correlación positiva entre la $CEap_{sup}$ y la CEs con un ajuste de 0.68 en esta parcela. Por otro lado, en N19 no hay similitud en los patrones de distribución de las 3 propiedades estudiadas con métodos geofísicos. Seguramente esta falta de relaciones se deba a bajo contenido hídrico al momento de la exploración.

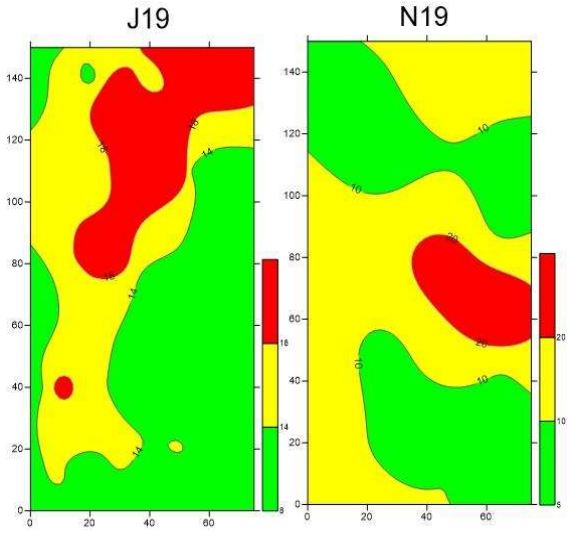


Figura 13. Mapas de $CEap_{sup}$ (mS/m) medido con sensor resistivimetro Landviser en las parcelas J19 y N19. *(eje X distancia en m, eje Y distancia en m, escala de colores indica categorías de $CEap_{sup}$ (mS/m) verde=Baja, amarillo= Media y rojo= Alta)*

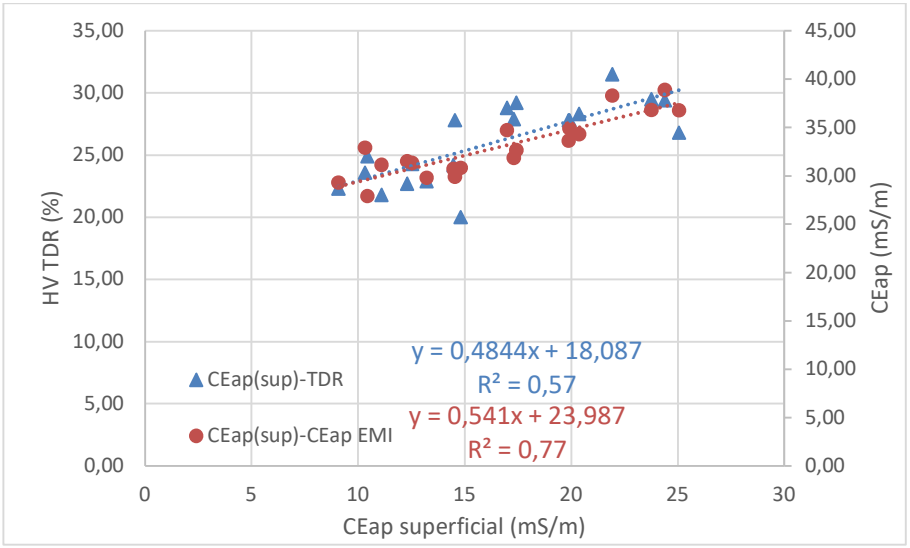


Figura 14. Gráfico de regresión lineal entre la $CEap_{sup}$ con la CEap medida con EMI y la HV_{TDR}

2.3.7 Relaciones entre CEap y propiedades del suelo para todas las parcelas estudiadas

Finalmente se realizaron análisis de correlación Pearson entre la CEap y las propiedades del suelo estudiadas con todos los datos, sin discriminar por parcela, con el fin de evaluar el desempeño de esta propiedad geofísica como descriptor de la salinidad del suelo y sus efectos. En la Tabla 11 se muestran los resultados de este análisis en donde, primero se tomaron todos los datos de las parcelas exploradas (definido como "general") y un segundo donde sólo se analizaron los datos provenientes de las parcelas muestreadas con el diseño EMI_{EH} (definido como "parcial") ya que se obtuvieron los mejores ajustes dentro de cada parcela. Los resultados muestran la misma tendencia que los análisis anteriores, hay una buena correlación con las variables relacionadas con la salinidad del suelo del suelo que incluyen a la CEs, pH, PSI, Na y NO_3. Las relaciones con estas variables son consistentes con la bibliografía ya que la CEap depende sustancialmente de los cationes disueltos en la solución del suelo (Corwin y Scudiero 2019). Sin embargo, se observa que los coeficientes de correlación lineal Pearson, de las variables relacionadas específicamente con los procesos de sodicidad, son levemente mayores (pH, Na y PSI) al resto, lo cual evidencia que el cambio en la salinidad se encuentra íntimamente relacionado con la calidad de agua utilizada para el riego en estos suelos debido a la naturaleza bicarbonatada sódica de las misma. Estos procesos fueron descriptos en suelo bajo riego del sudeste bonaerense estudiados mediante sensores proximales por Bosch Mayol (2012), en donde la CEap se relacionó principalmente con el RAS y contenido de sodio en el suelo. Finalmente, se observa una mejora en los ajustes de estos coeficientes cuando no se incluye a las parcelas del diseño EMI_{CV}.

Respecto a las propiedades físicas relevadas, se encontró una correlación positiva baja con la Dap, y negativa con la Pt que también mejora en el agrupamiento "Parcial". La Pt tiene un rol fundamental en la conducción eléctrica pero su influencia estará condicionada con el grado de saturación de estos poros (Archie, 1942). Es de esperar que, en suelos saturados, con los poros llenos de agua haya una mejor conducción eléctrica (mayor CEap) pero, por otro lado, en los no saturados, estos poros pueden contener cierta proporción de aire, y el aire es muy resistivo a la conducción. En definitiva, en estos suelos explorados que no se encuentran saturados, el aumento en la porosidad puede significar un aumento en el aire dentro de ellos y por ende una peor conducción eléctrica o menor CEap. Respecto a la textura del suelo, se halló una relación positiva (0.38) con

las arenas y negativa con las arcillas (-0.48). Como se mencionó anteriormente, este resultado es contrario a los esperable ya que la arcillas deberían aumentar la CEap del suelo (Friedman 2005). Sin embargo, estas correlaciones observadas no necesariamente comprueban que la CEap disminuye porque aumenta el contenido de arcillas (causalidad). Las arcillas juegan un rol fundamental en numerosas propiedades edáficas como la CIC, el contenido de MO y la retención de agua (HV). Se supone que quizás pueda estar enmascarando el efecto de alguno de estas últimas propiedades que también influyen en la CEap del suelo (Sudduth et al., 2001). Por ejemplo, Espinosa Criales (2021) estudió las relaciones entre la CEap medida con EMI con algunas propiedades físicas en suelos contrastantes en su composición textural y en distintos contenidos hídricos; la autora encontró coeficientes de correlación positivos y significativo entre la CEap y el contenido de arcillas (0.62) cuando el suelo explorado tenía un alto contenido hídrico y negativos cuando contenido hídrico era bajo (-0.39) No hubo relación con la HV medida con muestras a laboratorio. Aunque si se encontró relación con la HV_{TDR} en el análisis "Parcial", con un coeficiente bajo de 0.24 pero significativo, la humedad aumenta con la CEap del suelo.

Tabla 11. Coeficientes de correlación lineal Pearson particionado de manera "Parcial" (incluyendo solo las parcelas E19/M19/J19/N19) y "General" (todas las parcelas).

Variable	General	Parcial
CEs	0,50	0,56
pH	0,58	0,66
PSI	0,53	0,65
Na	0,54	0,63
CIC	ns	ns
NO3	0,53	0,66
PO4	ns	ns
Hv	ns	ns
Dap	0,19	0,27
Pt	-0,20	-0,28
R	ns	ns
Arc	sd	-0,48
Are	sd	0,38
HV_{TDR}	ns	0,24
$CEap_{sup}$	ns	ns

ns= no significativo, sd= sin datos

2.4 CONCLUSIONES

El diseño exploratorio EMI_{EH} resultó más apropiado para el estudio de la CEap ya que se encontraron patrones más claros en la distribución de las zonas de conductividad (contrastes), menores datos outliers (errores) y mejores ajustes con las propiedades del suelo estudiadas respecto al otro diseño utilizado (EMI_{cv}) (cumplimiento hipótesis y objetivo específico A)

Mediante las exploraciones realizadas con sensor EMI se logró estudiar en detalle la CEap del suelo y sus propiedades asociadas. Los mapas obtenidos con geoestadística reflejaron el comportamiento y distribución de la CEap, delimitando zonas de alta, media y baja conductividad. En algunas de las parcelas exploradas con el diseño EMI_{EH} se observó que, la distribución espacial mostraba un patrón similar al uso del riego. Específicamente en J19 y N19 se obtuvo que la zona cubierta por riego presenta mayores valores de CEap, disminuyendi abruptamente en zona de secano (cumplimiento hipótesis y objetivo específico B).

Se encontraron relaciones fuertes entre las variables químicas relacionadas con la salinidad-sodicidad y la CEap del suelo. Esta tendencia se mantuvo en los tres análisis abordados; por rango o categorias de CEap, en correlación por parcela y con correlaciones generales y parciales utilizando el conjunto completo de datos. El análisis por rangos de CEap permitió separar las categorías de los extremos “Alta” vs “Baja”, quedando la “Media” solapada con alguna de las otras categorías, dependiendo de la parcela. Los coeficientes de correlación Pearson en cada parcela fueron > 0,5 y postivos entre la CEap con el pH, PSI y CEs. Tanto en las correlaciones utilizando todos los datos (“general”) como en los acotados a las exploradas con el diseño EMI_{EH} (“parcial”) se observaron relaciones positivas y moderadas con la salinidad del suelo y pH. En este ultmo análisis también surgieron relaciones positivas y moderadas con el contenido de NO_3. Este anion responde a la fertilidad del suelo, aumentando la salinidad e impactando en forma directa en la CEs y en consecuencia tambien en la CEap. Por todo lo anterior, se concluye que el estudio del suelo mediante exploraciones de la CEap resulta apropiado para evaluar cambios en la salinidad y sodicidad del suelo debido al riego complementario (cumplimiento hipótesis y objetivo específico C).

Se hallaron correlaciones bajas pero significativas entre la CEap y el contenido hídrico obtenido con el sensor de humedad TDR (HV_{TDR}), no así con la HV medida con método de cilindro (tradiciónal). Esto posiblemente ocurrió por el mayor número de mediciones de humedad con el sensor TDR (entre 5 y 8 veces más) respecto a la tradicional. A su vez, en las parcelas del 2019 los patrones de distribución de esta propiedad coinciden parcialmente con los de la CEap. Es esperable que la CEap se relacione con la HV y/o HV_{TDR} ya que el agua es el medio conductor dentro del suelo, pero en este caso la asociación fue baja. Este resultado es importante debido a que se intento trabajar en condiciones constantes de humedad con el fin de estudiar exclusivamente la salinidad del suelo. Por otro lado, las parcelas fueron exploradas con porcentajes altos de humedad (salvo en N19), requisito necesario para favorecer la conducción eléctrica en el suelo durante las mediciones de CEap. Entonces, si bien el método también fue sensible a pequeños cambios en la HV del suelo (cumplimiento parcial hipótesis y objetivo específico C), las correlaciones más fuertes se dieron con la salinidad del suelo y no la humedad de acuerdo con lo esperado.

Respecto a las propiedades físicas del suelo: se reportó una relación baja y negativa, entre la porosidad y la CEap en la correlación "general", es decir utilizando todos los datos. En suelos no saturados, aumentos de porosidad pueden contener mayor proporción de aire y por ende menor conducción eléctrica (disminución de la CEap). En el resto de las propiedades físicas relevadas no hubo relación con la CEap del suelo. En esta escala pequeña de estudio los cambios en las propiedades físicas son menores, y no detectables con este método geofisico (cumplimiento parcial hipótesis y objetivo C).

En conclusión, la aplicación de sensores geofísicos en el estudio del suelo y en particular el sensor electromagnético EMI, permitió relevar la CEap del suelo en forma sencilla rápida y eficaz. A su vez se encontró que esta variable está estrechamente relacionada con algunas propiedades edáficas de interés agronómico como la salinidad, el contenido hídrico y la porosidad en menor medida, que podrían verse modificadas con el riego complementario. Por ello, la utilización de esta tecnología permitirá predecir y describir cambios en el suelo debido a esta práctica.

2.5 BIBLIOGRAFIA

Archie, G. E. (1942). The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics. Transactions of the AIME, 146(1), 54– 62.

Aini, I. N., Ezrin, M. H., & Aimrun, W. (2014). Relationship between soil apparent electrical conductivity and pH value of Jawa series in oil palm plantation. Agriculture and Agricultural Science Procedia, 2, 199-206.

Al-Gaadi, K., (2012). Employing electromagnetic induction techniques for the assessment of soil compaction. Am. J. Agric. Biol. Sci. 4, 425–434.

Alonso S.J. (2019). Alternativas de medición de la conductividad eléctrica aparente para estimar la distribución espacial de propiedades de suelos agrícolas. Tesis de Licenciatura en Ciencias Físicas, Depto de Física. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. UBA.

Allred B. J., J.J. Daniels and M. R. Ehsani (2008). Handbook of Agricultural Geophysics, CRC Press.

Amezketa, E. (2007). Use of an electromagnetic technique to determine sodicity in saline-sodic soils. Soil Use and Management, 23(3), 278-285.

Bosch Mayol, M., Luís Costa, Jose, Néstor Cabria, Fabián, & Carolina Aparecio, Virginia (2012). Relación entre la variabilidad espacial de la conductividad electrica y el contenido de sodio del suelo. Ciencia del suelo, 30(2).

Bozkurt, A., Kurtulus, C., & Endes, H. (2009). Measurements of apparent electrical conductivity and water contentusing a resistivity meter. International Journal of Physical Sciences, 4(12), 784-795.

Cambardella, C. A., Moorman, T. B., Novak, J. M., Parkin, T. B., Karlen, D. L., Turco, R. F., & Konopka, A. E. (1994). Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. Soil science society of America journal, 58(5), 1501-1511.

Carroll, Z. L., & Oliver, M. A. (2005). Exploring the spatial relations between soil physical properties and apparent electrical conductivity. Geoderma, 128(3-4), 354-374.

Cicore, P. L., Sanchez, H. R., Peralta, N. R., Aparicio, V., Castro, F. M., & Costa, J. L. (2016). Utilización de la conductividad eléctrica aparente y la elevación para delimitar ambientes edáficos en suelos ganaderos. Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica (pp 19-25), 23 (4).

Conti, M. E., & Giuffré, L. (2014). Edafología: bases y aplicaciones ambientales argentinas (No. 631.4982). Editorial Facultad de Agronomía, UBA.

Cook, P.G., Walker, G.R., (1992). Depth profiles of electrical conductivity from linear combinations of electromagnetic induction measurements. Soil Sci. Soc. Am. J. 56, 1015–1022.

Corwin, D. L. y Scudiero, E. (2019). Chapter One: Review of soil salinity assessment for agriculture across multiple scales using proximal and/or remote sensors. En: Sparks, D.L. (Ed.). Advances in Agronomy. (pp. 1-130). Amsterdam, Netherlands: Academic Press, Elsevier.

Corwin, D.L., and Lesch, S.M., (2005). Apparent soil electrical conductivity measurements in agriculture, Computers and Electronics in Agriculture Journal, 46, 11-43.

Costa, M. M., Queiroz, D. M., Pinto, F. D., Reis, E., & Santos, N. T. (2014). Moisture content effect in the relation ship between apparent electrical conductivity and soil attributes. Acta Scientiarum. Agronomy, 36(4), 395-401.

Di Rienzo J.A., Casanoves F., Balzarini M.G., Gonzalez L., Tablada M., Robledo C.W. (2011). InfoStat, versión 2011, Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.

Doerge, T.; Kitchen, N.R.; Lund, E.D. (2004) Soil electrical conductivity mapping. Site-Specific Management Guidelines. N.30. 2004

Doolittle, J. A., & Brevik, E. C. (2014). The use of electromagnetic induction techniques in soils studies. Geoderma, 223, 33-45.

Doolittle, JA.; KA Sudduth; NR Kitchen & SJ Indorante (1994). Estimating depths to claypans using electromagnetic induction methods. J. Soil Water Conserv. 49(6): 572-575

Espinosa Criales, E. M. (2021). Identificación de las relaciones entre la conductividad eléctrica aparente y las propiedades físicas del suelo. Tesis Magister en Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Colombia.

European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics, 21st. Near Surface Geoscience (2015), 6-10 September, Turin, Italia

Fisher, R. A. (1936). Statistical methods for research workers. Springer New York (6th Ed).

Friedman, S. P. (2005). Soil properties influencing apparent electrical conductivity: a review. Computers and electronics in agriculture, 46(1-3), 45-70.

Gallardo, A. (2003). Spatial variability of soil properties in a floodplain forest in northwest Spain. Ecosystems 6: 564– 576

Ganjegunte, G. K., Clark, J. A., Sallenave, R., Sevostianova, E., Serena, M., Alvarez, G., &Leinauer, B. (2017). Soilsalinityofanurbanpark after long-termirrigationwith saline groundwater. AgronomyJournal, 109(6), 3011-3018.

Gee, G.W., and D. Or. 2002. Particle-size analysis. p. 255—293. En: Methods of soil analysis. Part 4. J.H. Dane y G.C. Topp (eds.). SSSA Book Series No. 5. SSSA, Madison.

Génova, L. J. (2007). Resiliencia a la degradación salina y sódica de algunos suelos pampeanos, regados complementariamente con aguas subterráneas bicarbonatadas sódicas (Doctoral dissertation, Universidad Nacional de La Plata).

Gibbons. J.D. (1983). Kolmogorov-Smirnov symmetry test, in Encyclopedia of Statistical Sciences (S. Kotz. N.L. Johnson, and C.B. Read, cds.) vol. 4. Wiley, New York. pp. 396–398.

He, B., Y. Cai, W. Ran, X. Zhao, H. Ziang (2015). Spatiotemporal heterogeneity of soil salinity after the establishment of vegetation on a coastal saline field. Catena 127: 129–134

Heilig, J., Kempenich, J., Doolittle, J., Brevik, E. C. y Ulmer, M. (2011). Evaluation of electromagnetic induction to characterize and map sodium-affected soils in the northern great plains. Soil Survey Horizons, 52: 77-88. Doi: https://doi.org/10.2136/sh2011.3.0077

Hillel, D. (1998). Environmental soil physics: Fundamentals, applications, and environmental considerations. Elsevier.

Huang, J., Pedrera-Parrilla, A., Vanderlinden, K., Taguas, E. V., Gómez, J. A., &Triantafilis, J. (2017). Potential to map depth-specific soil organic matter content cross an olive groveusing quasi-2d and quasi-3d inversionof DUALEM-21 data. Catena, 152, 207-217.

Johnston, M.A., Savage, M.J., Moolman, J.H., du Plessis, H.M., (1997). Evaluation of calibration methods for interpreting soil salinity from electromagnetic induction measurements. Soil Sci. Soc. Am. J. 61, 1627–1633.

Jung, W. K., Kitchen, N. R., Sudduth, K. A., Kremer, R. J., & Motavalli, P. P. (2005). Relationship of apparent soil electrical conductivity to claypan soil properties. Soil Science Society of America Journal, 69(3), 883-892.

Keller, T., Colombi, T., Ruiz, S., Manalili, M. P., Rek, J., Stadelmann, V., Wunderli, H., Breitenstein, D., Reiser, R., Oberholzer, H., Schymanski, S., Romero-Ruiz, A., Linde, N., Weisskopf, P., Walter, A., & Or, D. (2017). Long-term Soil Structure Observatory for monitoring post-compaction evolution of soil structure. Vadose Zone Journal, 16(4)

Klute, A. (1986). Methods of soil analysis: Part 1: Physical and mineralogical methods, 5, 635-662.

Kolmogorov, A. (1933). Sulla determinazione empirica di una lgge di distribuzione. Inst. Ital. Attuari, Giorn., 4, 83-91.

Li, N., Zhao, X., Wang, J., Sefton, M., &Triantafilis, J. (2019). Digital soil mapping based site-specific nutrient management in a sugarcane field in Burdekin. Geoderma, 340, 38-48.

Losinno, B. N., Sainato, C. M., & Giuffré, L. (2005). Propiedades edáficas y del agua subterránea: Riesgos de salinización y sodificación de los suelos, en la zona de Pergamino-Arrecifes. Ciencia del suelo, 23(1), 47-58.

Machado, F. C., Montanari, R., Shiratsuchi, L. S., Lovera, L. H., & Lima, E. D. S. (2015). Spatial dependence of electrical conductivity and chemical properties of the soil by electromagnetic induction. RevistaBrasileira de Ciência do Solo, 39(4), 1112-1120.

Martinez, G., Vanderlinden, K., Ordóñez, R., & Muriel, J. L. (2009). Can apparent electrical conductivity improve the spatial characterization of soil organic carbon?. Vadose Zone Journal, 8(3), 586-593.

Matheron, G. (1963). Principles of geostatistics. Economic geology, 58(8), 1246-1266.

McNeill, J.D., (1980). Electromagnetic terrain conductivity measurement at low induction numbers, Technical Note TN-6, Geonics Ltd., Canada.

Mead, R. (2017). Statistical methods in agriculture and experimental biology. Chapman and Hall/CRC.

Medeiros, W. N., Valente, D. S. M., Queiroz, D. M. D., Pinto, F. D. A. D. C., &Assis, I. R. D. (2018). Apparent soil electrical conductivity in two different soil types. Revista CiênciaAgronômica, 49, 43-52.

Marquez Molina, J. M., Sainato, C. M., Urricariet, A. S., Losinno, B. N., & Heredia, O. S. (2014). Bulk electrical conductivity as an indicator of spatial distribution of nitrogen and phosphorous at feedlots. Journal of Applied Geophysics, 111, 156-172.

Moysey, S. M., & Liu, Z. (2012). Can the onset of macropore flow be detected using electrical resistivity measurements?. Soil Science Society of American Journal, 76(1), 10-17.

Nagy, V., Milics, G., Smuk, N., Kovács, A. J., Balla, I., Jolánkai, M. &Neményi, M. (2013). Continuous field soil moisture content mapping by means of apparent electrical conductivity (ECa) measurement. Journal of Hydrology and Hydromechanics, 61(4), 305-312.

Narjary, B., Meena, M. D., Kumar, S., Kamra, S. K., Sharma, D. K., &Triantafilis, J. (2019). Digital mapping of soil salinity at various depths using an EM38. Soil Use and Management, 35(2), 232-244.

Narsimha, A., Narshimha, C. H., Srinivasulu, P., &Sudarshan, V. (2013). Relating apparent electrical conductivity and pH to soil and water in Kanagal surrounding area, Nalgonda district, Andhra Pradesh. Der ChemicaSinica, 4(2), 25-31.

Neely, H. L., Morgan, C. L., Hallmark, C. T., McInnes, K. J., & Molling, C. C. (2016). Apparent electrical conductivity response to spatially variable vertisol properties. Geoderma, 263, 168-175.

Page, A. L., & Keeney, D. R. (1982). Methods of soil analysis. American Society of Agronomy.

Peralta, N., Costa, J. L., Simón, M., & Tagle, N. (2014). Conductividad eléctrica aparente. herramienta para zonificar ambientes. Curso Internacional de Agricultura de Precisión. 13. 2014 09 24-25, 24 y 25 de septiembre 2014. Manfredi, Córdoba. AR.

Priori, S., Martini, E., Costantini, E. A. C., Gilkes, R. J., & Pragonkep, N. (2010). Three proximal sensors for mapping skeletal soils in vineyards. In Proceedings of the 19th World Congress of Soil Science, Soil Solutions for a Changing World (Vol. 121).

Quiroga, A. R., Fernández, R., & Álvarez, C. (2018). Análisis y evaluación de propiedades físico hídrica de los suelos. Capitulo 5: Un indicador de compactación relacionado con el agua del suelo (pp 45-49). Ediciones INTA.

Rhoades, J. D., Manteghi, N. A., Shouse, P. J., & Alves, W. J. (1989). Soil electrical conductivity and soil salinity: New formulations and calibrations. Soil Science Society of America Journal, 53(2), 433-439.

Rodríguez, R. A., Leiva, F. R., & Gómez, M. I. (2015). Zonas homogéneas para manejo específico por sitio en maíz usando un sensor de inducción electromagnética en la Sabana de Bogotá. Revista UDCA Actualidad & Divulgación Científica, 18(2), 373-383.

Romero-Ruiz, A., Linde, N., Keller, T., & Or, D. (2018). A review of geophysical methods for soil structure characterization. Reviews of Geophysics, 56(4), 672-697.

Saksa, P. J., & Sorsa, J. (2017). System stability and calibrations for hand-held electromagnetic frequency domain instruments. Journal of Applied Geophysics, 140, 84-92.

Sanches, G. M., Magalhães, P. S., Remacre, A. Z., & Franco, H. C. (2018). Potential of apparent soil electrical conductivity to describe the soil pH and improve lime application in a clayey soil. Soil and Tillage Research, 175, 217-225.

Sibson, R. (1981). A 1981 Brief description of natural neighbor interpolation. Interpreting multivariate data, 21-36.

Simón, M., Peralta, N. R., & Costa, J. L. (2013). Relación entre la conductividad eléctrica aparente con propiedades del suelo y nutrientes.

Sudduth, K. A., Drummond, S. T., & Kitchen, N. R. (2001). Accuracy issues in electromagnetic induction sensing of soil electrical conductivity for precision agriculture. Computers and Electronics in Agriculture, 31(3), 239–264.

Sudduth, K., Kitchen, N.R., Chung, S.-O., Drummond, S.T. (2010). Site-specific compaction, soil physical property, and crop yield relationships for claypan soils. Annual International Meeting of American Society of Agricultural and Biological Engineers.

Paper No. 1009432. American Society of Agricultural and Biological Engineers, St. Joseph, Michigan

Sudduth, K.A., Kitchen, N.R., Myers, D.B., Drummond, S.T. (2009). Estimating depth to argillic soil horizons using apparent electrical conductivity response functions. Proceedings of the Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems, 2. SAGEEP, pp. 859–868.

Waine, T.W., Blackmore, B.S., Godwin, R.J. (2000). Mapping available water content and estimating soil textural class using electromagnetic induction. EurAgEng Paper No. 00-SW-044, Warwick, United Kingdom.

Wang, H. , Ren, S. , Hao, Z. , Meng, L. , Wei, W. and Jing, C. (2016) Quantitative Evaluation and Uncertainty Assessment on Geostatistical Simulation of Soil Salinity Using Electromagnetic Induction Technique. Journal of Environmental Protection, 7, 844-854.

Wang, J., Zhang, X., & Du, L. (2017). A laboratory study of the correlation between the thermal conductivity and electrical resistivity of soil. Journal of Applied Geophysics, 145, 12-16.

Webster, R., & Oliver, M. A. (1990). Statistical methods in soil and land resource survey. Oxford University Press (OUP).

White, M.L., Shaw, J.N., Raper, R.L., Rodekohr, D., Wood, C.W. (2012). A multivariate approach for high-resolution soil survey development. Soil Sci. 177 (5), 345–354

Wienhold, B. J., Doran, J. W., Allred, B. J., Daniels, J. J., & Ehsani, M. R. (2008). Apparent electrical conductivity for delineating spatial variability in soil properties. Handbook of Agricultural Geophysics. CRC Press, Taylor and Francis Group, Boca Raton, Florida, 211-215.

Wienhold, B.J., Doran, J.W., (2008). Apparent electrical conductivity for delineating spatial variability in soil properties. In: Allred, B.J., Daniels, J.J., Ehsani, M.R. (Eds.), Handbook of Agricultural Geophysics. CRC Press, Taylor and Francis Group, Boca Raton, Florida, pp. 211–215

Capítulo 3.

EVALUACIÓN DE PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS DE SUELOS REGADOS EN FORMA COMPLEMENTARIA

3.1 INTRODUCCIÓN

3.1.1 Calidad del agua subterránea

Un aspecto importante en el uso del recurso hídrico con aplicación a riego es determinar su calidad para tal fin y clasificar el agua de acuerdo con las normativas de uso. El concepto de calidad de agua se encuentra íntimamente relacionado a su uso, y por eso su clasificación dependerá de la actividad destino ya sea industrial, riego o consumo (Caselles et al., 1996). En el riego, los criterios más utilizados se basan en la sodicidad y salinidad de las aguas. El criterio de salinidad evalúa el riesgo por aumento en la concentración de sales en el suelo, modificando el potencial agua por efecto osmótico. Esta situación implica una disminución en la disponibilidad del agua en el suelo para los cultivos, afectando el crecimiento y desarrollo vegetal, con una disminución de los rendimientos de los cultivos (Rhoades, 1989). El indicador que se utiliza normalmente para estimar la salinidad es la conductividad eléctrica de la solución de agua en el suelo expresada en dS/m. El criterio de sodicidad, analiza el riesgo a incrementar el PSI (Porcentaje de Sodio Intercambiable), promoviendo una desfloculación coloidal, dispersando agregados, alterando la estructura y la porosidad del suelo, disminuyendo la permeabilidad, con lo cual disturba la capacidad de flujos verticales y horizontales de agua en el suelo (infiltración, conductividad hidráulica). Para evaluar el riesgo de sodicidad el Laboratorio de Salinidad de Riverside propuso la determinación de la Relación de Adsorción de Sodio (RAS) sobre la base de las observaciones empíricas apoyadas teóricamente en la ley de acción de masa aplicadas al intercambio catiónico. La ecuación 6 muestra la expresión para el cálculo del RAS:

$$RAS = \frac{Na}{\sqrt{\frac{Ca+M}{2}}} \quad (6)$$

Na, Ca, y Mg corresponden a la concentración de estos cationes en el agua de riego en meq/L.

Existen diversos sistemas de clasificación de agua para riego. En un breve repaso, el laboratorio de Salinidad de EEUU (Riverside) desarrollaron 4 categorías de salinidad que luego fueron modificadas a 6 (Thorne y Peterson, 1954) y 4 de sodicidad. Este esquema (ver Figura 15) se planteó para climas templados, en cultivos tolerantes y con riego

permanente. Esta clasificación fue resistida por su poco énfasis en el peligro sódico donde no se pondera la interacción entre la salinidad y sodicidad (Báez, 1999 Manual San Luis). Por otro lado, la FAO (Ayer y Westcot 1985) establece límites menos restrictivos para el riesgo salino e incorpora la relación entre el RAS y la CE del agua a la hora de evaluar ese riesgo (ver Figura 16). Finalmente, el INTA (1999) realizó una serie de recomendaciones sobre la aptitud de agua para riego en donde además de evaluar la salinidad y sodicidad de la misma, incorpora variables edáficas del suelo receptor ajustado para distintas zonas de Argentina (Tabla 12).

3.1.2 Efecto del contenido de sodio intercambiable y la salinidad en la solución del suelo

Como se mencionó en el Capítulo I introductorio, uno de los indicadores más utilizados para determinar la sodicidad de un suelo es el PSI. Este indicador refleja, de alguna manera, la concentración del Na^+ y su relación con los cationes Ca^{2+} y Mg^{2+}que se encuentran adsorbidos en el complejo de intercambio catiónico (CIC) de los coloides del suelo (principalmente arcillas silicatadas y sustancias húmicas) (Taboada y Lavado, 2009). La actividad de estos coloides está relacionada con las características mineralógicas y en buena parte, de factores externos como los cationes intercambiables presentes y la concentración de electrolitos de la solución del suelo.

En condiciones de suelo seco, la carga negativa de estos coloides se compensa con carga positiva de los cationes presentes formando así, una "doble capa" que rodea a estas partículas. Cuando el suelo se humedece, la superficie coloidal ya no retiene fuertemente estos cationes (en la solución interna) debido a que difunden para igualar diferencias de concentración con la solución "externa". Entonces para neutralizar la carga negativa de los coloides, se forma una "doble capa difusa" (DCD) con los iones presentes en la solución "interna". El espesor de la DCD estará determinado por la concentración de iones de la solución externa y por la valencia de los cationes adsorbidos. Cuanto mayor sea la concentración de iones de la solución externa menor será el espesor de la DCD, y de igual modo, mayor valencia de los cationes también menor el espesor (Conti y Giuffré, 2014). El espesor de la DCD juega un rol fundamental en el proceso de estructuración del suelo a través de dos mecanismos; floculación-dispersión e hinchamiento de las partículas (Sumner M., 1993). La floculación se favorece cuando la distancia entre partículas de arcillas es próxima debido al menor espesor de la DCD lo cual permite la atracción entre

las mismas, mediada por las fuerzas de Van de Wals. De modo contrario, cuando el espesor es alto, las partículas se encuentran más distanciadas y se favorecen las fuerzas de repulsión por electrostática (Conti y Giuffré, 2014). Por otro lado, cuando dos partículas de arcillas se juntan, sus DCD se superponen de manera tal que la concentración de cationes entre las mismas es mayor que en la solución externa y en consecuencia se crea un gradiente osmótico (de concentración). Esto induce a la entrada de agua por lo cual las partículas se humedecen y se "hinchan". Este proceso también depende del tipo de arcilla, *"*ante un mismo valor de concentración electrolítica y PSI, las suspensiones de illita tienden a "hincharse" más que las suspensiones de montmorillonita (i.e. esmectitas). Se requiere una mayor concentración de sales para flocular arcillas illíticas" (Sumner, 1993) El hinchamiento de las arcillas aumenta la separación entre partículas favoreciendo así mismo, la dispersión de estas. Además, esto genera grandes presiones dentro de los agregados del suelo que puede resultar en la desagregación de este. Las arcillas dispersas producto de este proceso potencialmente podrían producir bloqueo de los poros del suelo, afectando negativamente el movimiento del agua (Taboada y Lavado, 2009) como se muestra en la figura 17.

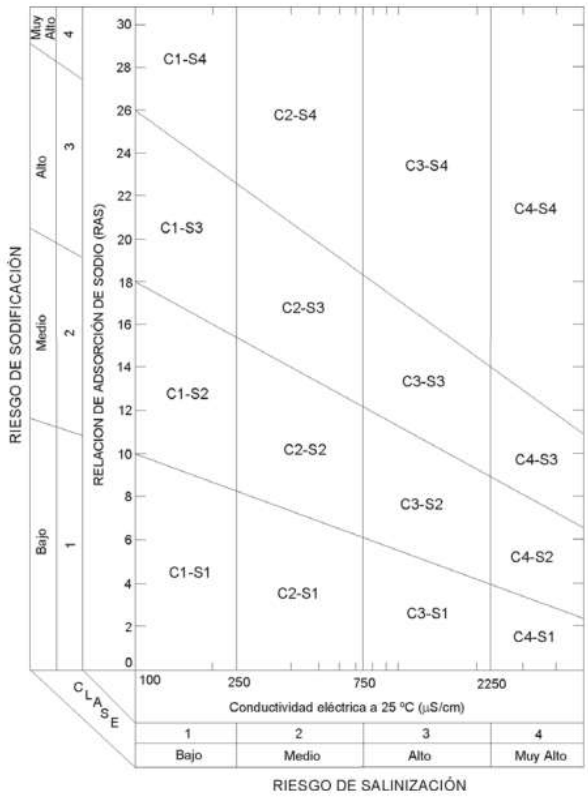


Figura 15. Nomograma de Riverside (extraído de Thorne y Peterson, 1954)

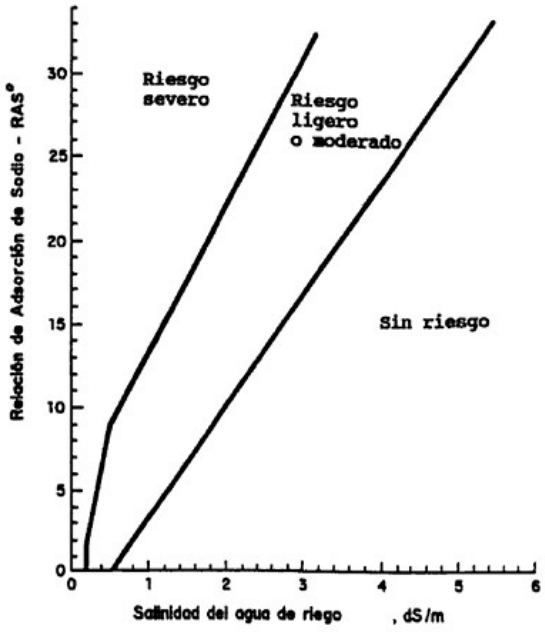


Figura 16. Límites de RAS y CE del agua para agua riego propuesto por la FAO (Ayres y Westcot 1985).

Tabla 12. Tabla con directrices para determinar aptitud de agua de riego desarrollado por INTA (1999)

RIESGO DE SALINIDAD y SODICIDAD EN RIEGO COMPLEMENTARIO.				
Válido para la región pampeana húmeda. Fuente: IPG-Taller sobre calidad de agua 1998.				
1) Riesgo de salinidad	Indicador	Aptitud del agua de riego		
		Buena	Dudosa	No recomendada
Zonas donde el excedente otoñal de lluvias produzca el lavado de sales, en suelos con nivel freático < - 3 m	CE *(dS/m)*	Menor de 2	2y4	Mayor de 4
2) Riesgo de sodicidad				
a) Suelos del sudeste bonaerense MO superficial 6-7%, % arcilla 25-26 CIC 22-25 cmol/kg, pH 6-7 Req.de riego 70-160 mm/año	RAS	<15	15 a 20	>20
b) Argiudoles del norte de Bs. As. MO= 2,5-3%, % arc horiz A=22-24% Req. de riego,150-2oo mm/año	RAS	< 10	10 a 15	>15
c) Argiudoles del NE de Santa Fé Arc. Horiz A=26%, limo= 70 % CIC= 20 cmol/kg, pH ligeram. Ácido Req. De riego 15Ò300 *mm/año*	RAS	<7	7 a 12	>12
d) Haplustoles del centro sur de Córdoba, franco limosos en superficie CIC= 15-17 cmol/kg y Rea. De riego*200-350 mm/año.*,-	RAS	<5	5a 10	>10

.

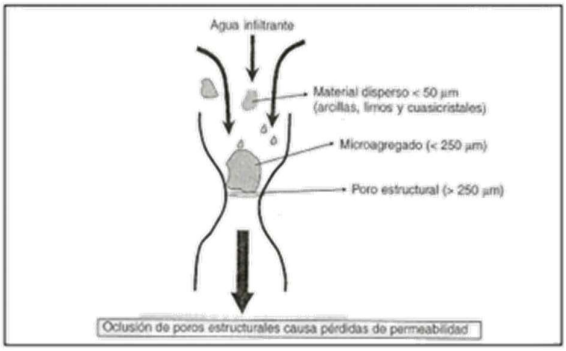


Figura 17. Esquema de oclusión de los poros del suelo por dispersión de arcillas. (extraído de Taboada y Lavado 2009).

En este sentido, la presencia del catión sodio dominando el complejo de intercambio de los coloides del suelo en un escenario con baja concentración iónica en la solución externa va a ocasionar una DCD extensa activando así procesos de hinchamiento y dispersión. De este modo, el PSI y la conductividad eléctrica de la solución, juegan un papel fundamental en la calidad física de un suelo determinado por la respuesta a la dispersión de arcillas y sellado de poros (Oster y Shainberg, 2001). En la Figura 18 se muestra la pérdida relativa de la conductividad hidráulica (Kh) ante el aumento de la concentración de sales para suelos con distinto valor de RAS (0, 9.5, 21 y 50). Se observa que, para todas las curvas, la Kh relativa disminuye con la concentración de sales y la tasa de pérdida de Kh es aún mayor en los suelos con RAS elevados.

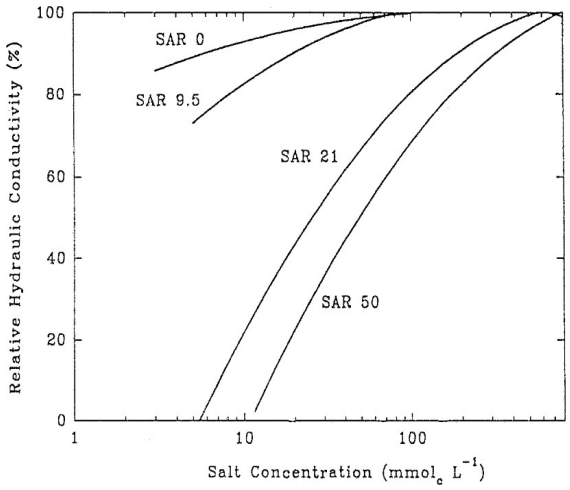


Figura 18. Perdida relativa de Kh ante cambios en salinidad con distintos niveles de RAS. (Extraído de Cass and Sumner 1982)

3.1.3 Las propiedades químicas de suelos regados en la Región Pampeana.

Existen numerosos antecedentes sobre el efecto del riego complementario en la calidad edáfica, tanto en la región pampeana como en el resto del país. Desde el punto de vista químico, en la mayoría de los estudios se muestra un aumento, con distinta intensidad, en los principales indicadores de salinización y sodificación del suelo. Irutia y Mon (1998) estudiaron los cambios producidos por 5 años de riego complementario en las propiedades edáficas de un Argiudol típico, reportando leves aumentos de salinidad, sodicidad y pH. Andriulo et al. (1998) encontraron un efecto acumulativo en suelos de Pergamino, luego de 11 años de riego complementario continuo con aguas bicarbonatadas sódicas extraídas del acuífero Puelche con un RAS de 10.6 y CE= 1 dS/m. La CE del suelo prácticamente se duplicó, el pH se incrementó en una unidad y la concentración de Na intercambiable aumento de 0.4 a 2.5 cmol/kg, de esta manera el PSI se sextuplicó. Los autores concluyen que, si bien se alcanzaron niveles críticos de los indicadores de salinización y sodificación, no se traduce en pérdida de productividad, de modo contrario, se obtuvieron rendimientos más estables y mayores bajo riego complementario. Vázquez et al (2006) evaluaron la sustentabilidad del riego en el NO y Centro-E de la Prov. Buenos Aires y la aplicabilidad de criterios clasificatorios del agua empleada. En cada región se estudiaron 3 establecimientos con tipos de suelos Hapludol Típico en el Noroeste y Udipsament en el Centro-Este. Las aguas utilizadas en este caso fueron de baja-moderada salinidad (0.6-1.3 dS/m) y RAS desde bajo a mediano con problemas de infiltración (0.9-9.6). Se comprobaron leves aumentos en la salinidad del suelo e importantes en cuanto a la sodicidad aunque variables en cada situación (región-suelo-calidad de agua). Sin embargo, estos resultados no permitieron concluir de forma generalizada sobre la sustentabilidad de esta práctica, aunque los autores hacen énfasis en revisar los efectos en la particularidad de cada agroecosistema. Además, las predicciones de estos procesos no se ajustaron a las clasificaciones de aptitud de agua para riego utilizadas, evidenciando la necesidad de realizar calibraciones para esta región. Mon et al (2007) estudiaron el efecto del riego complementario en 21 localidades de la Región Pampeana luego de 10 años. En este estudio se presentaban dos tipos de suelo: Hapludol y Argiudol. En suelos bajo riego, los análisis químicos mostraron un pequeño incremento del PSI, de 2.56 a 5.52 y en pH, de 6.13 a 6.45, respecto a los suelos sin riego. Sin embargo, la CE se mantuvo en los mismos valores para ambos sistemas. Por otro lado, Génova (2003; 2006; 2007; 2010; 2012; 2013) estudió durante más de 20 años los efectos de la degradación salina de los

suelos regados y la relación con la calidad del agua en la Pampa Ondulada. Si bien evidenció aumentos en los contenidos de sales y sodio en el suelo luego de cada temporada de riego, las magnitudes alcanzadas no superan la capacidad resiliente del suelo receptor. El autor (Genova , 2003) propone la existencia de un mecanismo natural de control de la salinización y sodificación edáfica en esta zona, operado por la interrelación de varios factores y procesos, como el régimen de lluvias, la escasa lámina de riego aplicada en cada campaña, el lavado de sales, la abundancia de calcio intercambiable, el intercambio catiónico favorecido por la mayor actividad del ión calcio en soluciones diluidas, la drenabilidad de los suelos y la escasa influencia del acuífero freático. Taboada y Lavado (2009) refuerzan esta idea y afirman que la degradación del suelo bajo riego complementario por exceso de sodio intercambiable no ha llegado a valores extremadamente altos, se llega a un nuevo equilibrio. Este equilibrio se encuentra cerca de los valores críticos de sodicidad y podrían aparecer algunos problemas físicos. Sin embargo, la productividad de los suelos no ha sido afectada. De todas maneras, se evidencia cierto nivel de deterioro potencial en estos suelos lo que requiere considerar medidas correctivas. Otros autores han estudiado el comportamiento químico de los suelos regados en forma complementaria en la región Pampeana, reportando cambios en los indicadores de salinización y sodificación: Marano et al. (1999), Peinemann et al (1998), Ghiberto et al (2002), Palatti et al. (2004), Torres Duggan et al (2012) Giubergia (2013a), Aparicio et al (2014).

Finalmente, los nutrientes incorporados al suelo (NO_3 y PO_4) como fertilizante durante el ciclo de cultivo, son aniones que alteraran la salinidad y, en definitiva, la química del suelo. La dinámica de estos nutrientes puede modificarse en sistemas bajo riego complementario debido a cambios en la disponibilidad de agua. Procesos tales como la lixiviación, escorrentia o nitrificación/desnitrificación podrían ser afectados ante una mayor disponibilidad de este recurso (Knapp y Schwabe, 2008; Wang y Li, 2019). Son escasos los antecedentes sobre el efecto del riego en los nutrientes del suelo. Sin embargo, en la región pampeana algunos estudios indican que no hay efectos significativos en los suelos regados en forma complementaria (Rimski-Korsakov et al., 2014; Torres Duggan et al., 2012)

3.1.4 Las propiedades físicas de suelos regados en la Región Pampeana

Por otro lado, otro grupo de autores además de estudiar el aspecto químico de los suelos regados evaluaron también su calidad física junto con los cambios asociados a incrementos en los indicadores de salinización y sodificación. Peinemann et al (1998) realizaron simulaciones de riego en permeámetros de laboratorio con suelos Hapludoles y Argiudoles de la región Pampeana para determinar el efecto sobre la permeabilidad hidráulica. Las aguas empleadas en la simulación fueron clasificadas según Riverside con las categorías entre C2S1 y C2S3, con baja o moderada salinidad, pero con elevado RAS. Encontraron una importante disminución de la Conductividad Hidráulica Saturada (Ks) pasando desde 9.3 cm/h en la situación inicial hasta 3.9 cm/h al final de la experiencia. Además, evidenció una disminución de la Ks del suelo ante el incremento del contenido de sodio en el agua de riego. También concluyen que la intensidad del impacto del riego con aguas bicarbonatadas sódicas en la permeabilidad del suelo estará determinada por el contenido de arcilla+limo. Los cambios son más sensibles cuanto menor es el contenido de arcilla+limo. De esta forma en los suelos Hapludoles la pérdida de permeabilidad fue mayor que en los Argiudoles. Pilatti et al (2006) estudiaron la tasa de infiltración y la estructura de los coloides del suelo mediante su estado de agregación (floculación o unión de las partículas del suelo) en seco y húmedo en suelos del orden de los Molisoles bajo riego complementario en la Provincia de Santa Fe. Encontraron una reducción significativa en la agregación en seco y en húmedo (con distintos pretratamientos) en varios de los sitios regados respecto al testigo. Además, muestran que el efecto del riego sobre la agregación depende del contenido de carbono orgánico (CO), el contenido de arcilla y el PSI. La infiltración del agua se estimó mediante la lámina acumulada (mm) bajo una lluvia simulada. Se evidenció que en la mayoría de los sitios bajo riego la lámina acumulada fue menor que en los de secano. Mon et al. (2007) estudiaron el impacto del riego complementario en el comportamiento hídrico de suelos en 21 sitios de la región pampeana. Realizaron lluvias simuladas de 30 mm durante 30 minutos bajo dos tratamientos: riego y secano en el mismo establecimiento cuantificando la lámina de escurrimiento e infiltración. Los suelos regados mostraron menores valores de ingreso de agua al perfil y tasa de infiltración, y mayores valores de escurrimiento y producción de sedimentos. La entrada de agua pasó de 23 mm en secano a 18.5 mm en riego y la tasa de infiltración resultó de 46 y 37 mm/h respectivamente. Estos resultados fueron acompañados por aumentos en los índices de sodificación**.** Ghiberto et al (2007)

evaluaron la conductividad hidráulica (Kh) mediante infiltrómetros de tensión con tres presiones distintas, y la dispersión de arcillas en distintos suelos regados y no regados en la Provincia de Santa Fe. Los incrementos en el PSI del suelo en los suelos regados causaron una disminución entre el 10% y 79 % en la Kh respecto al secano. Esta disminución en la Kh fue acompañada por mayor dispersión de arcillas, lo cual evidenció la degradación estructural del suelo por procesos de hinchamiento y dispersión de estas por el aumento del contenido de sodio intercambiable. La dispersión de arcilla fue entre el 51 y 62 % respecto al total en la situación bajo riego; en cambio en secano, fue entre el 36 y 44%. Tanto la pérdida de Kh como la dispersión de arcilla tuvieron comportamiento diferente en cada sitio evaluado debido a propiedades intrínsecas de cada tipo de suelo. Torres Duggan et al (2012) analizaron el impacto del riego complementario en algunas propiedades físicas en Pampa Ondulada. No se encontraron cambios en la densidad aparente del suelo ni en el contenido hídrico, y en la tasa de infiltración; si bien se observó un aumento a favor de los suelos no regados, la variabilidad de los datos no permitió identificar diferencias significativas. En cambio, se reportó un aumento del 15% en los valores de resistencia a la penetración (RP) del suelo en el perfil de 40 cm explorado del suelo regado respecto al secano. También hubo menor inestabilidad estructural (IE) de los agregados del suelo bajo riego lo que podría explicarse por mayor CO debido al manejo en siembra directa en conjunto con riego complementario. Giubergia (2013a) trabajó en un lote agrícola bajo riego complementario en la Provincia de Córdoba analizando cambios en las propiedades edáficas. Nuevamente no se encontraron diferencias significativas en la tasa de infiltración, aunque las tasas fueron más elevadas en secano que en riego. La densidad aparente del suelo aumentó alrededor de un 6% en la zona de riego en todas las profundidades analizadas. Se obtuvieron diferencias significativas en la estabilidad estructural (EE) pero sólo en el horizonte superior (0-6cm), donde la EE bajo riego fue del 67% y en secano 48%. Estos resultados que indican una mejor estructura de los suelos regados se explican con los resultados de CO encontrados en esta tesis. El CO en el estrato superior fue significativamente (α=10%) mayor en riego que en secano. Entonces los mayores valores de EE en riego son coincidentes con mayores contenidos de CO.

En definitiva, el impacto del riego complementario sobre las propiedades hidráulicas y físicas en suelos de la región pampeana no es claro. O bien no se encuentran diferencias significativas o bien, los cambios que se reportan son leves. Es evidente que los estudios

y la evidencia sobre el efecto del riego complementario en las propiedades químicas son más evidentesy robustos que los realizados para las propiedades físicas. Por ello, esta tesis se propone evaluar el efecto sobre estas variables edáficas con el fin de aportar evidencias sobre estos aspectos y discutir los resultados observados.

3.2 METODOLOGÍA Y DISEÑO EXPERIMENTAL

3.2.1 Diseño experimental

Las parcelas estudiadas se detallaron en el capitulo 1. En cada una, los tratamientos analizados fueron: riego (R) y secano (S) en un diseño apareado (Figura 19). El tratamiento R corresponde a suelos regados en forma complementaria con sistema de riego pivote central, en donde se acumulan los posibles efectos históricos y/o recientes (dependiendo si fueron regados o no durante el estudio). El tratamiento S representa el suelo "testigo" (respecto al R), fuera del círculo de riego, pero dentro del mismo lote o parcela y bajo las mismas condiciones (edáficas, climáticas y manejo).

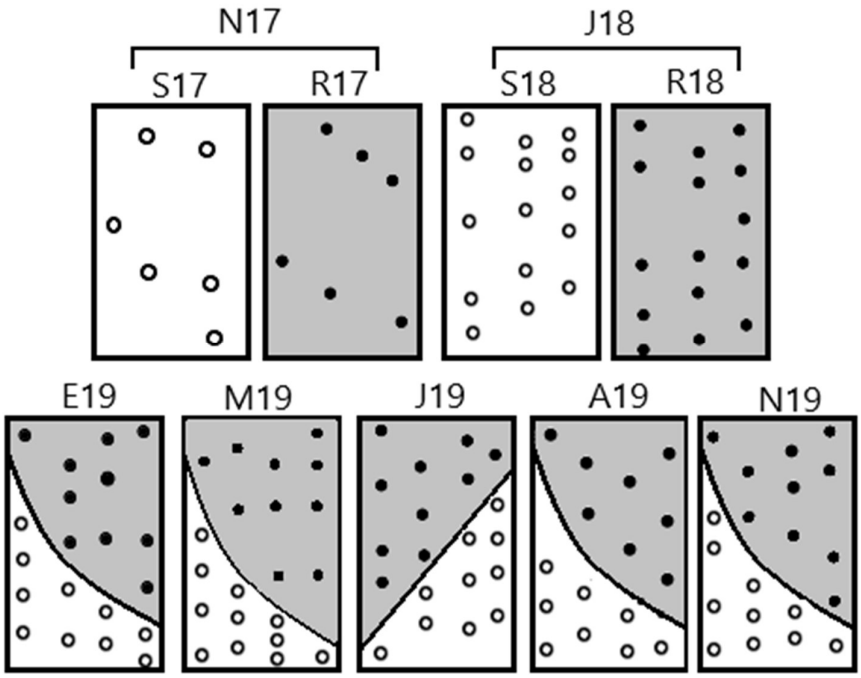


Figura 19. Esquema de las parcelas estudiadas, diseño experimental y sitios de muestreo de suelo. (zona oscura corresponde a tratamiento R y zona clara a tratamiento S, círculos llenos=sitios de muestreo en R, círculos blancos= sitios de muestreo en S)

3.2.2 Caracterización del perfil del suelo en estudio

Para caracterizar el suelo del establecimiento se realizaron muestreos en el mes de julio del 2019 en un lote agrícola luego de la cosecha de maíz (campana 2018-2019) cuando el mismo se encontraba en barbecho. Se realizaron dos pozos: uno en el centro del lote, cerca del pivote central (R) y otro pozo en el extremo del mismo lote, donde no se riega (S). Estos pozos se realizaron hasta una profundidad de 1m, en los cuales se tomaron muestras cada 20 cm mediante un barreno helicoidal. Se realizaron las siguientes determinaciones en cada estrato: análisis textural con técnica de Bouyoucos (Gee y Or, 2002), CEs y pH en dilución 1:2,5 con conductímetro, contenido de sodio intercambiables (Na^+), Potasio (K^+), Calcio (Ca^{2+}), Magnesio (Mg^{2+}) y capacidad de intercambio catiónico (CIC) con fotómetro de llama, porcentaje de sodio intercambiable (PSI), fósforo (P), nitratos (NO_3^-) por SNEED como indica la metodología propuesta en Page (1982)

3.2.3 Determinación de calidad de agua de riego

Con el fin de caracterizar el agua de riego se extrajeron muestras en el mes de noviembre del 2019 de los 3 pozos de captación de agua subterránea que se utilizan para el riego dentro del establecimiento. Se realizaron las siguientes determinaciones: CEa, pH, RAS, dureza, cationes (Ca, Mg, K, Na) y aniones (CO_3, HCO_3, Cl, SO_4, PO_4, NO_3) según metodología S.M. (2006). Se realizaron las clasificaciones sobre su aptitud para el riego según las siguientes normativas: Riverside, (Thorne y Peterson 1954), Ayres y Westcot (1985) e INTA (1999). Esta última clasificación, se ajusta mejor a las condiciones edafoclimáticas de la región pampeana y es la que se utilizó en este trabajo. Los resultados del análisis de agua se expresarán como el promedio de los valores obtenidos en los distintos pozos ya que todos extraen agua del mismo acuífero pampeano, se encuentran a 500 m entre si y finalmente porque el agua utilizada para el riego proviene de la mezcla de todos.

3.2.4 Muestreo y determinaciones de las propiedades químicas

En las parcelas descriptas se seleccionaron entre 12 y 30 sitios de muestreo, la mitad corresponde a R y la otra a S como se indica en la Figura 19 y Tabla 13. En cada sitio se tomaron muestras de suelo compuestas (3 submuestras) mediante barreno helicoidal en dos profundidades: 0-20 cm y 20-40 cm. Las determinaciones realizadas en cada muestra de suelo fueron las siguientes: CEs y pH en dilución 1:2.5, contenido de sodio

intercambiable (Na^+) y capacidad de intercambio catiónico (CIC) con fotómetro de llama para obtener el porcentaje de sodio intercambiable (PSI), fosfatos (PO_4^{3-}) y nitratos (NO_3^-) por SNEED como indica la metodología propuesta en Page A., (1982).

Tabla 13. Numero de muestras de suelo para el análisis de laboratorio por tratamiento y parcela en cada profundidad *(R= muestras en riego para cada profundidad, S= muestas en secano para cada profundidad, N_P= número de muestras por parcela para cada profundidad y N_{total} = número muestras totales para cada profundidad)*

Parcela	R	S	N_p
N17	6	6	12
J18	15	15	30
E19	10	10	20
M19	11	10	41
J19	10	10	20
A19	8	8	20
N19	10	10	20
N_{total}			163

3.2.5 Muestreo y determinaciones de las propiedades físicas

En los mismos sitios de muestreo de suelo de las propiedades químicas (Figura 19) se realizó el muestreo de las propiedades físicas, aunque finalmente para determinadas variables, algunas muestras o bien se dañaron durante el traslado o acondicionamiento, o bien no se pudo realizar la medición a campo por problemas con el instrumental o climáticas (lluvia durante muestreo). Para este estudio, todas las propiedades físicas estudiadas se analizaron únicamente a la profundidad de 0-20 cm. En la Tabla 14 se muestra el número de muestras obtenidas por variable física evaluada por tratamiento y por parcela. Las determinaciones se llevaron a cabo según metodología propuesta por Hillel (1998). Mediante cilindros de acero de 7 cm de altura x 6 cm de diámetro se extrajeron muestras sin disturbar en las que se determinó la densidad aparente (Dap), el contenido de humedad gravimétrica (Hg) del suelo mediante estufa a 105°C hasta peso constante para luego calcular la humedad volumétrica (Hv). La porosidad total (Pt) se calculó con los valores de Dap de cada muestra y con densidad de partícula (Dp) determinada según método del picnómetro para el estrato superficial. La resistencia a la penetración del suelo (Rp) se midió con penetrómetro de golpes (Quiroga et al., 2018) tipo INTA Villegas con cono de 30° cada 5 cm hasta una profundidad final de 30 cm. Debido a la fuerte dependencia de la Rp con HV del suelo al momento del muestreo, cuando existan diferencias significativas entre tratamientos para la HV, se realizaron

correcciones mediante ajuste lineal entre ambas variables (Rp_{cor}). La composición textural (CT) se midió según Bouyocus (Gee y Or, 2002) y se clasificó con USDA Soil texture. La Estabilidad de Agregados (EA) se estimó mediante el diámetro medio ponderado (DMP) en mm. El DMP se analizó según la técnica propuesta en Le Bissonnais (1996), sometiendo a los agregados del suelo al pretratamiento de humedecimiento rápido durante 10 min en agua destilada. Para la conductividad hidráulica saturada (Ks), se extrajeron muestras en cilindros de 7 cm de altura x 6 cm de diámetro sin perturbar y se determinó mediante permeámetro de carga variable (Klute y Dirsken, 1986). Finalmente, la tasa de infiltración básica (Tib) se obtuvo mediante ensayos de infiltración con infiltrómetros de doble anillo, (anillo de Muntz, estandarizado por el Departamento de Agricultura de los EE.UU., "Cylinder Infiltrometers", USDA, ARS) según el modelo propuesto por Kostiakov-Lewis (Kostiakov, 1932; Lewis, 1937).

Tabla 14. Número de muestras de suelo por parcela para análisis de las variables físicas en la profundidad de 0-20 cm *(N_{total} por tratamiento, SD=sin determinar, Dap = densidad aparente, CT=composición textural, Hg=humedad gravimétrica, Hv=humedad volumétrica, Pt=porosidad total, Rp=resistencia a la penetración, EA=estabilidad estructural, Ks=conductividad hidráulica saturada, Tib=tasa de infiltración basica)*

Parcela/	N17		J18		E19		M19		J19		A19		N19		N_{Total}
Variable	R	S	R	S	R	S	R	S	R	S	R	S	R	S	
Dap	6	6	6	6	10	10	10	10	10	10	8	8	10	10	120
CT	SD		SD		10	10	10	10	10	10	8	8	10	10	96
Hg	6	6	6	6	10	10	10	10	10	10	8	8	10	10	120
Hv	6	6	6	6	10	10	10	10	10	10	8	8	10	10	120
Pt	6	6	6	6	10	10	10	10	10	10	8	8	10	10	120
Rp	SD		9	9	10	10	8	8	10	10	SD		10	10	94
EA	6	6	15	15	SD		10	10	10	10	8	8	10	10	118
Ks	6	6	5	5	10	10	SD		SD		SD		10	10	62
Tib	SD		4	4	SD		1	1	5	5	SD		SD		20

3.2.6 Metodología de análisis de relaciones entre propiedades físicas y químicas

Las correlaciones entre las propiedades químicas se realizaron de a pares mediante el estadístico Pearson, en donde, las relaciones fuertes se consideran en un rango entre 0.7 y 1, las intermedias entre 0.5 y 0.7 y las bajas entre 0.3 y 0.5. Los datos utilizados para

este análisis corresponden a todo el conjunto de muestras analizadas en cada tratamiento/parcela. En cambio, para las relaciones entre las propiedades físicas y las físicas con las químicas se utilizaron los valores medios de cada propiedad por tratamiento y parcela.

3.2.7 Análisis estadístico

En un primer análisis se evaluó el efecto del tratamiento riego (R vs S) dentro de cada parcela de manera independiente, para cada variable y profundidad. Para ello se considero cada sitio de muestreo dentro de la misma como pseudoreplica del tratamiento respectivo. El número de pseudoréplicas utilizadas en este análisis dependió de cada parcela y variable analizada (ver Tablas 14 y 13). El análisis consistió en una prueba T de medias con una significancia estadística del 5%.

En otro nivel de análisis, a escala de establecimiento, se evaluó el efecto del tratamiento apareado según el diseño experimental descripto. Este cuenta con un n_{total}= 7 (parcelas) por cada profundidad. Se utilizaron pruebas t apareada en donde se evalúa si las diferencias entre el tratamiento R y S son distintas de 0 con una significancia del 5%, evaluando el sentido del cambio en las variables analizadas (valores positivos indicaran aumentos en R respecto a S y negativos, disminución)

Para mejorar la interpretación de los resultados se realizaron adicionales. De esta manera se realizó un ANOVA con comparaciones de medias con LSD Fisher entre las parcelas estudiadas con las variables de relevadas. Además, se hicieron análisis de correlación mediante el coeficiente de Pearson entre las variables edáficas relevadas para las profundidades estudiadas.

Los análisis estadísticos desarrollados en esta sección se llevaron a cabo con software InfoStat versión 2011 (Di Rienzo et al 2011)

3.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.3.1 Caracterización de suelo de la zona de estudio

En esta sección se muestran y discuten los resultados de los dos perfiles de suelo realizados dentro del establecimiento agrícola donde se trabajó. La Tabla 15 y 16 detalla en forma resumida las variables determinadas en los mismos.

La principal característica de estos suelos es que tiene un alto contenido de limos que van desde 43 a 59 %. Siendo de textura franco-limosa en los horizontes superficiales y franco limo arcillosa o franco arcilloso en los horizontes subsuperficiales. En ambos perfiles se puede observar una acumulación de arcillas entre las profundidades de 40 a 80 cm. Este patrón concuerda con la presencia de un horizonte Bt a esa profundidad que se describe en la serie de suelo Chacabuco (ver Capitulo 1). El perfil de secano reporta en promedio, mayores contenidos de limo en detrimento de las arcillas respecto al riego en donde la relación se invierte.

La materia orgánica presenta una tendencia de acumularse en los primeros centímetros, se encontró un valor de 2,3 % para riego y 2,1 % en secano. Luego la tendencia es similar en ambos perfiles, disminuye el contenido significativamente en función de la profundidad hasta los 100 cm donde se encuentra su valor más bajo de 0,5%.

Respecto a los cationes, los dos perfiles tienen concentraciones y distribución similar en Ca^{2+} y K^{+}. En promedio, su concentración aumenta con la profundidad desde 8,5 a 12,5 meq/100g para Ca^{2+} y de 0,85 a 1,2 meq/100g para K^{+}. En cambio, el Mg^{2+} se diferencia solo en los dos primeros estratos, en donde en secano es menor su concentración (3,5 y 6 meq/100g respectivamente) y luego a mayor profundidad se mantiene constante en ambos (entre 4,5 y 5 meq/100g). Donde efectivamente se vieron claras diferencias es en el contenido de Na^{+}, de particular interés en esta tesis. En el perfil de riego, prácticamente se duplica su concentración respecto al secano. Aumenta desde una concentración relativamente baja de 0,8 en secano a 1,5 meq/100g en riego. No hay diferencias sensibles del contenido de Na^{+} en función de la profundidad, se mantiene constante, al menos hasta los 100 cm. Por otro lado, en las profundidades de 0-20 y 20-40 cm la CIC es de 19,5 y 18 meq/100g respectivamente en riego y menor en secano con valores de15,2 y 16

meq/100g. A mayores profundidades, en los dos perfiles, se obtuvo valores cercanos a los 20 meq/100g y éstos se mantienen relativamente constantes hasta 1m.

La CEs en pasta de saturación resultó mayor en el pozo de riego en todos los estratos. Una tendencia a destacar es que; en ambos perfiles, a nivel de superficie, se encuentran los valores máximos y mínimos a profundidades intermedias: 40-60 cm en riego y 60-80 en secano, y que finalmente entre 80-100 cm vuelve a aumentar. Estos últimos aumentos de la salinidad en profundidad podrían deberse a la fluctuación del nivel freatico ya que esta juega un rol fundamental en la hidroquímica del suelo por su influencia en la franja capilar.

En el pH se encontraron valores más altos en profundidad que en superficie y se reportan valores más bajos en el perfil de secano respecto al de riego. Por último, el PSI manifiesta un comportamiento similar al pH y al contenido de Na. En casi todo el perfil, el riego prácticamente duplica los valores de PSI (%) respecto al secano. En riego se observa una clara tendencia del PSI a disminuir con la profundidad desde 8,3 a 6,5 %, en cambio, en secano los valores son más constantes con la profundidad con valores promedio de 4,5%

Tabla 15. Caracterización de un perfil de suelo bajo riego de la zona de estudio

Prof. (cm)	Are (%)	Lim (%)	Arc (%)	MO (%)	Ca	Mg	K	Na	CIC	CE µS/cm	pH	PSI (%)
					meq/100g							
0-20	27,3	42,7	30,1	2,3	9,0	6,0	0,8	1,6	19,5	148,2	6,6	8,3
20-40	27,2	48,9	23,9	1,0	9,0	5,0	0,8	1,4	18,0	93,6	6,7	7,8
40-60	22,5	45,0	32,5	0,8	11,0	5,0	1,1	1,5	20,0	84,7	6,7	7,7
60-80	24,5	44,3	31,3	0,5	12,0	5,0	1,2	1,4	20,4	85,5	6,8	6,9
80-100	28,2	46,9	24,9	0,5	12,5	4,5	1,2	1,4	21,0	81,1	6,7	6,5

Tabla 16. Caracterización de un perfil de suelo bajo secano de la zona de estudio

Prof. (cm)	Are (%)	Lim (%)	Arc (%)	MO (%)	Ca	Mg	K	Na	CIC	CE µS/cm	pH	PSI (%)
					meq/100g							
0-20	22,3	59,0	18,8	2,1	8,0	3,5	0,9	0,7	15,2	94,6	5,6	4,6
20-40	24,7	50,5	24,8	1,0	9,0	3,5	0,9	0,8	16,0	46,5	6,2	4,9
40-60	23,0	47,2	29,8	0,8	10,5	4,5	1,1	0,8	18,3	38,3	6,5	4,3
60-80	23,2	47,0	29,8	0,7	12,0	5,0	1,2	0,9	20,8	39,6	6,6	4,4
80-100	27,6	46,2	26,3	0,5	11,5	5,5	1,2	0,9	19,5	42,1	6,5	4,6

3.3.2 Calidad del agua subterránea de la zona de estudio

Los resultados del análisis de agua de los pozos usados para el riego nos muestran que el agua subterránea es bicarbonatada sódica por la alta proporción de aniones CO_3^{2-} (8,9 meq/l) y cationes Na^{2+} (4,9 meq/l), con un pH ligeramente alcalino de 8,3, CEa 1,2 dS/m y un RAS relativamente bajo para la región, con un valor de 2,7 (ver Tabla 17). Estos resultados concuerdan con los antecedentes de la región norte de Buenos Aires (Alvarez et al, 2016; Losinno et al, 2002). También, tanto la dureza como las concentraciones de nitratos y fosforo presentan valores bajos y aceptables para los niveles guía (Sainato et al, 2006).

Respecto a la salinidad y sodicidad, según la clasificación de Riverside (Thorne y Peterson 1954) son aguas utilizables para riego, aunque con precauciones. Se clasifican como C3S1, lo cual implica, una peligrosidad media para la salinidad (C3), deberán utilizarse en suelos permeables y aun así usar con precauciones, y una baja peligrosidad por sodicidad (S1); se puede usar en todos los suelos sin riesgo de acumulación de sodio.

Tabla 17. Resultados del análisis químico del agua subterránea utilizada para riego

Variable	Valor
C.E. (dS/m)	1,2
pH	8,3
Calcio (meq/l)	3,8
Magnesio(meq/l)	2,8
Potasio(meq/l)	0,4
Sodio(meq/l)	4,9
Carbonatos(meq/l)	1,7
Bicarbonatos(meq/l)	8,9
Cloruros(meq/l)	1,2
Sulfatos(meq/l)	0,3
PO_4^{3-} (mg/l)	0,3
NO_3^- (mg/l)	2,3
Dureza (mg/l)	6,6
RAS	2,7
CSR (meq/l)	4,0

Para Ayers y Wetscot (1985), tiene un grado de restricción de uso bajo a moderado en salinidad por los valores de CE y ninguna restricción en cuanto al impacto en la

permeabilidad (sodicidad) del suelo, criterio que surge de la combinación del RAS y CEa. Finalmente, la clasificación especifica realizada por INTA (1999) para la región pampeana, nos indica que podrían clasificarse como "aguas seguras" para el riego en función de su salinidad, aunque no se cumple con el supuesto de esta clasificación que establece un acuífero freático por debajo de los 3 m. Por otro lado, en el criterio de sodicidad, se clasifican como "aceptables" ya que se encontró un RAS menor a 10 y se cumplen con las condiciones edáficas propuestas (Argiudoles bien provistos de materia orgánica) y una lámina de riego entre 100-200 mm/año. Torres Duggan (2017) en un estudio que contó con más 300 muestras de agua que comprende al sitio experimental, obtuvo que solo el 13% presentaba riesgo de salinización, pero en cuanto a la sodificación, por el elevado nivel de RAS, se encontró que el 57% se clasificaron con riesgo desde moderado a severo.

3.3.3 Propiedades químicas de los suelos estudiados

3.3.3.1 Conductividad eléctrica del suelo (CEs)

En la Tabla 18 se muestran los resultados de la CEs por parcela para las profundidades de estudio. En ambas, se observan que la variabilidad y los valores medios entre las distintas parcelas son contrastantes. De manera independiente al tratamiento, un análisis adicional (ANOVA) determinos que las reportaron mayores valores son las que se estudiaron en primavera-verano con cultivo en pleno desarrollo y fertilización de base reciente. Estas corresponden a N17, N19 y E19 con promedios de 210, 124 y 194 µS/cm respectivamente. En cambio, las parcelas estudiadas en otoño-invierno, en barbecho o cultivo senescente, presentaron menores valores de CEs promedio. Estas variaciones entre parcelas pueden deberse a factores edafoclimáticos y de manejo productivo tales como, estado de cultivo, nivel de fertilidad, tipo de suelo, lluvia acumulada luego del riego, entro otros (no analizados en esta tesis). Otro aspecto importante es la disminución de los valores medios de CEs con la profundidad de 20-40 cm.

En las parcelas donde hubo diferencias significativas (pvalor<0.05 ó pvalor<0.1) la CEs fue mayor en R que en S. En la profundidad de 0-20 cm, las parcelas J18, M19, J19 y A19 tuvieron diferencias con pvalor<0.05 y M19 con pvalor<0.1. Por otro lado, las parcelas que no presentaron diferencias significativas entre tratamientos son las que se estudiaron en primavera-verano, es decir, con los valores más altos de CEs.

En la profundidad de 20-40 cm también se muestran diferencias entre tratamientos (Tabla 16), con mayor intensidad que en la superficial y siendo la CEs siempre más elevada en R. Aquellas que no se diferenciaron estadísticamente (E19 y M19) pertenecen a la misma serie de suelo (Villa Moll), con característica de mal drenaje y ligera sodicidad en superficie. Además, en éstas, se obtuvieron los coeficientes de variacion más altos, con valores de 45 y 75 % respectivamente, muy superiores al resto que resultan inferiores al 33%. En particular, en la parcela de E19, pudo haber una fuente de variación importante no representada por el tratamiento. En este caso, existía dentro de la misma, una zona, mayormente situada en tratamiento S, con evidentes signos de mal drenaje (encharcamientos), con altos valores de Na y CEs en los estratos analizados. Seguramente esta fuente de variación haya interferido en el efecto R vs S y explique en parte, la ausencia de diferencias.

Tabla 18. Resultados de CEs (µS/cm) por parcela y profundidad. (*R=riego, S=secano, p=probabilidad, ns=no significativo (pvalor≥0,1), (*)= pvalor <0,1 , (**)= pvalor < 0,05)*

Parcela	0-20 cm			20-40 cm		
	R	S	p	R	S	p
N17	199	221	ns	127,2	90,8	**
J18	97	71	**	97,3	70,7	**
E19	213	174	ns	197,7	160,5	ns
M19	121	95	*	130,1	74,4	ns
J19	113	72	**	97,3	70,7	**
A19	99	74	**	90,8	70,5	**
N19	112	135	ns	102,2	132,2	ns

3.3.3.2 pH

En la Tabla 19 se muestran los resultados en el pH del suelo. La variabilidad de esta propiedad resultó ser baja con valores de CV <10%. En la profundidad de 0-20 cm se observa que, en todas las parcelas, R aumenta levemente respecto al S. El análisis estadístico presentó diferencias significativas entre tratamientos, excepto en E19 donde R fue mayor, pero sin significancia estadística. Esta parcela, presenta los valores medios más alcalinos tanto en R como en S en ambas profundidades dentro del establecimiento. A su vez, las parcelas con pH más bajos se reportaron en N17 y N19, en donde, a diferencia del resto, el lote se había fertilizado recientemente y se encontraba bajo cultivo de maíz. La fertilización con urea genera protones que acidifican el suelo a causa de la

hidrolisis cationes de NH_4 , que luego por nitrificación se convierten a NO_3 (Álvarez et al., 2021)

En la profundidad de 20-40 cm la tendencia es similar, el pH en R es mayor que en S. Nuevamente, no hubo diferencias significativas para E19 y M19, posiblemente ocasionado por el tipo de suelo de esas parcelas con la característica alcalina y levemente sódica (serie Villa Moll).

Un aspecto importante para remarcar es que el pH aumentó en ambos tratamientos con la profundidad, es decir, el pH es mayor en la profundidad de 20-40 cm respecto al estrato superior.

Tabla 19. Resultados de pH por parcela y profundidad. (*R=riego, S=secano, p=probabilidad, ns=no significativo (pvalor≥0,1), (*)= pvalor <0,1 , (**)= pvalor < 0,05)*

Parcela	0-20 cm			20-40 cm		
	R	S	p	R	S	p
N17	6,0	5,7	**	6,4	6,3	ns
J18	6,5	6,1	**	6,6	6,2	**
E19	6,9	6,5	ns	7,4	6,9	ns
M19	6,5	6,0	*	7,1	6,5	ns
J19	6,8	5,9	**	7,0	6,4	**
A19	6,3	5,9	**	6,5	6,2	**
N19	6,2	5,8	**	6,2	5,8	**

3.3.3.3 Contenido de Na^+, capacidad de intercambio catiónico (CIC) y porcentaje de sodio intercambiable (PSI)

En la tabla 20 y 21 se encuentran los resultados de PSI y concentración de Na^+ en las distintas parcelas de las profundidades estudiadas. En la profundidad de 0-20 cm se observó un incremento en R para ambas variables y en todas las parcelas, presentando diferencias significativas con pvalor<0.05 en la mayoría y con un pvalor<0.1 en M19. Los resultados para la profundidad 20-40 cm son similares, ambas variables se incrementaron de forma significativa, con excepción de la parcela E19. Se reportó también un aumento generalizado en la concentración de Na y PSI con la profundidad en ambos tratamientos. Los valores reportados de ambas variables en E19 y M19 en secano son cercanos a los descriptos en las cartas de suelo de la zona de estudio (INTA, 1966)

para la serie de suelo Villa Moll presente en este establecimiento. Por ello, estas parcelas presentan valores altos en estas variables tanto en secano como en riego.

La CIC del suelo presenta valores moderados, coherentes con suelos argiudoles de textura franco-limosa arcilla para la región (Mon et al., 2007), con valores medios entre 15,8 y 20 meq/100g en la profundidad de 0-20 cm y disminuyendo en la de 20-40 cm con valores entrer entre 14,3 y 19,1 meq/100g en 20-40 cm. En la mayoría de las parcelas, el tratamiento R obtuvo mayores valores medios que en S. Pero solo en algunas, se pudo evidenciar diferencia estadistica con pvalor<0.05 (Tabla 20 y 21). Sí consideramos la textura del suelo como relativamente constante a esta escala de estudio, se podría suponer que la fuente de variación de la CIC podría darse por el contenido de materia orgánica (MO) del suelo. Giubergia (2013b) encontró un leve incremento en el carbono orgánico (CO) del horizonte superficial en sitios regados respecto al testigo en secano, adjudicado a la mayor producción de biomasa y residuos de cosecha.

Tabla 20. Resultados de PSI, CIC y Na por parcela para la profundidad de 0-20 cm. (*R=riego, S=secano, p=probabilidad, ns=no significativo (pvalor≥0,1), (*)= pvalor <0,1 , (**)= pvalor < 0,05)*

Parcela	PSI (%)			CIC (meq/100g)			Na (meq/100g)		
	R	S	p	R	S	p	R	S	p
N17	2,9	1,7	**	20,0	17,8	**	0,6	0,3	**
J18	4,6	1,5	**	19,3	17,4	**	0,9	0,3	**
E19	9,5	6,9	ns	17,1	18,1	ns	1,6	1,3	ns
M19	6,5	4,0	*	18,9	18,5	ns	1,2	0,7	*
J19	7,5	1,1	**	17,9	15,9	**	1,4	0,2	**
A19	4,9	0,5	**	17,3	15,8	**	0,9	0,1	**
N19	6,2	4,8	**	16,0	16,2	ns	1,0	0,8	**

Tabla 21. Resultados de PSI, CIC y Na por parcela para la profundidad de 20-40 cm. (*R=riego, S=secano, p=probabilidad, ns=no significativo (pvalor≥0,1), (*)= pvalor <0,1 , (**)= pvalor < 0,05)*

Parcela	PSI (%)			CIC (meq/100g)			Na (meq/100g)		
	R	S	p	R	S	p	R	S	p
N17	3,6	2,2	**	19,1	16,0	**	0,7	0,4	**
J18	4,3	1,6	**	18,6	17,3	**	0,8	0,3	**
E19	11,5	8,6	ns	16,6	16,4	ns	1,9	1,4	ns
M19	8,8	5,0	**	14,4	14,3	ns	1,3	0,7	*
J19	6,0	1,8	**	17,8	16,2	**	1,1	0,3	**
A19	4,2	0,4	**	15,9	16,9	ns	0,7	0,1	**
N19	7,3	5,4	**	15,6	15,6	ns	1,1	0,8	**

3.3.3.4 Nitratos y fosfatos de los suelos evaluados

Desde el punto de vista de la fertilidad, en la Tabla 22 y 23 se muestran los resultados de las concentraciones de NO_3^- y PO_4^{3-} del suelo para las dos profundidades estudiades. Lo primero que se observa es que, para ambos nutrientes, existe una disminución significativa (pvalor<0,05) con la profundidad, el estrato superficial tiene concentraciones más elevadas que la subsuperficial, independientemente del tratamiento. Por otro lado, analizando los tratamientos por parcela, no se observan diferencias significativas en la profundidad de 20-40 cm. Pero en el estrato superficial (0-20 cm) se reportaron diferencias en la concentración de PO_4^{3-} en N19 siendo más baja en R y en A19 la concentración de NO_3^-resulto más alta en R (ambos con pvalor<0.10). De todas maneras, no se observa una tendencia general como se observó con las otras variables químicas, los resultados no son concluyentes en este análisis.

Tabla 22. Resultados de PO_4 y NO_3 por parcela para la profundidad de 0-20 cm. (R=riego, S=secano, p=probabilidad, ns=no significativo (pvalor≥0,1), (*)= pvalor <0,1 , (**)= pvalor < 0,05)

Parcela	PO_4^{3-}(ppm)			NO_3^- (ppm)		
	R	S	p	R	S	p
N17	15,5	22,8	ns	211	177	ns
J18	14,5	19,2	ns	29	32	ns
E19	14,3	22,5	ns	155	139	ns
M19	9,7	8,4	ns	143	142	ns
J19	13,5	10,5	ns	42	37	ns
A19	21,0	31,3	ns	58	41	*
N19	15,2	22,0	*	20	48	ns

Tabla 23. Resultados de PO4 y NO3 para pseudoréplicas por parcela para la profundidad de 20-40 cm. (*R=riego, S=secano, p=probabilidad, ns=no significativo (pvalor≥0,1), (*)= pvalor <0,1 , (**)= pvalor < 0,05)*

Parcela	PO_4^{3-}(ppm)			NO_3^-(ppm)		
	R	S	p	R	S	p
N17	13,2	9,6	ns	79,2	46,4	ns
J18	12,2	15,4	ns	28,8	32,1	ns
E19	11,1	9,8	ns	96,5	91,4	ns
M19	9,3	10,1	ns	96,4	78,5	ns
J19	8,8	7,9	ns	41,5	36,6	ns
A19	9,1	15,1	ns	41,2	34,4	ns
N19	14,0	16,6	ns	10,9	44,4	ns

3.3.4 Análisis apareado de las variables químicas estudiadas

En esta sección se muestran los resultados del análisis apareado que se realizó a escala de establecimiento entre los tratamientos R y S. Como se indicó en la sección metodológica, la hipótesis a prueba en este análisis es si las diferencias en cada propiedad y profundidad estudiada son distintas de cero.

3.3.4.1 CEs

Para la salinidad se obtuvo que en la profundidad de 0-20 cm la diferencia entre R y S fue de 16 µS/cm en promedio, es decir un aumento en R. Sin embargo, debido a la variabilidad de las diferencias entre las parcelas no resultaron estadísticamente distintas de 0. En la profundidad de 20-40 cm la diferencia promedio fue de 33,8 µS/cm, superior al estrato superficial. En este caso, las diferencias encontradas son significativamente distintas de 0 (pvalor<0.05). En la Figura 20.a se muestran estos resultados con los intervalos de confianza del 95% para ambas profundidades. Se puede establecer con una confianza del 95% (IC 95) que el riego complementario puede generar un aumento en la CEs de entre 0.01 y 49,4 µS/cm respecto al secano en la profundidad de 20-40 cm.

3.3.4.2 pH

En la Figura 20.b se muestra los resultados para el pH en ambas profundidades. Se puede observar que en todo el perfil analizado las diferencias de pH en R y S son significativas (pvalor<0.05) mayores a 0. Es decir, existe un aumento de los valores medios del pH en R respecto a S. En la profundidad superior estas diferencias son levemente mayores que

en el inferior con valores de 0.48 para 0-20 cm y 0.42 para 20-40 cm. Los intervalos de confianza del 95% indican que el pH del suelo regado puede llegar a aumentar entre 0,27 y 0,65 respecto al testigo en secano en la profundidad de 0-20 cm, y entre 0,21 y 0,62 en la profundidad de 20-40 cm.

3.3.4.3 PSI, Na^+ y CIC

Las diferencias más significativas e importantes se dan en las variables relacionadas con la sodificación. En el PSI se encontró un aumento significativo del orden de 3,1 % (representando un incremento del 80% respecto al secano) en la profundidad de 0-20 cm y 2,9 % en la profundidad de 20-40 cm. Los IC (95%) de estas variables se encuentran entre 1,4 y 4,8 % para 0-20 cm y entre 2 y 4 % para 20-40 cm (ver Figura 20.c). La tendencia es similar en la concentración de Na^+, las diferencias fueron significativas con valores de 0,6 meq/100g en la profundidad 0-20 cm y de 0,5 meq/100g en la de 20-40 cm. Estos valores corresponden a un marcado aumento de alrededor del 120% y 83%, respectivamente, para la profundidad de estudio del riego respecto al secano. Los intervalos de confianza obtenidos para estos aumentos son entre 0,2 y 0,9 meq/100g en 0-20 cm y entre 0,35 y 0,7 meq/100g para 20-40 cm (ver Figura 20.d).

En cambio, en la CIC, no se observaron diferencias significativas (pvalor<0,05) en las profundidades estudiadas (ver Figura 20.g). La tendencia muestra que la CIC aumenta en riego y disminuye con la profundidad en ambos tratamientos.

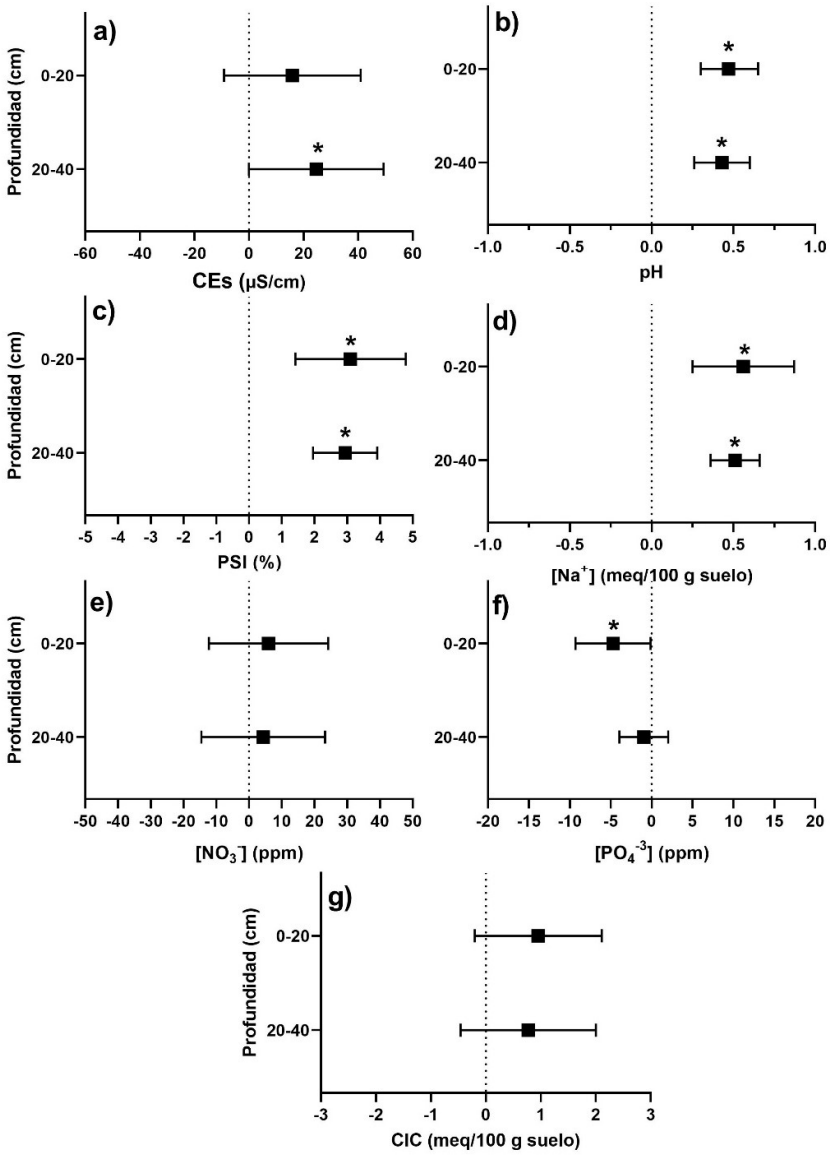


Figura 20. Resultados de los análisis apareados de las propiedades químicas estudiadas en ambas profundidades. (cuadrados llenos indican el valor medio de la diferencia entre R y S, las barras contienen el intervalo de confianza del 95%, (*) indica significancia con pvalor<0.05)

3.3.4.4 Concentración de NO_3^- y PO_4^{3-}

En la Figura 20.e se observa que la concentración NO_3^- aumenta levemente bajo riego en las dos profundidades estudiadas, sin embargo, esta tendencia no es significativa debido a la alta variabilidad que muestran los resultados.

En el caso de la concentración de PO^{4+} (ver Figura 20.f), la tendencia muestra una disminución respecto al secano en ambas profundidades. Solo en la profundidad

superficial resultó significativa esta tendencia. El valor promedio de la diferencia es de-4,7 ppm con una disminución que podría ser entre -9,3 y -0,1 ppm (IC 95%) en la profundidad de 0-20 cm.

3.3.5 Relaciones entre las propiedades químicas evaluadas

En las figuras 21 y 22 se muestran los resultados de las correlaciones entre las propiedades químicas evaluadas para ambas profundidades.

Para la profundidad superficial se encontraron relaciones altas entre el PSI-Na^+, PSI-pH, Na+-pH y CEs-NO_3^- con coeficientes de 0.99, 0.80, 0.82 y 0.68 respectivamente. Luego se observa una relación media entre PSI y Na^+ con CEs con un coeficiente de 0,54 en ambas. Finalmente, se puede describir relaciones bajas entre pH-CEs, y CIC-NO_3^- con coeficientes de 0,33, y 0,28 respectivamente. Para el resto de las comparaciones no hay correlaciones significativas (ver figura 21).

En la profundidad de 20-40 cm las correlaciones son similares, aunque cambian las intensidades. No se encontraron relaciones altas, las relaciones medias encontradas se dan entre PSI y Na – pH (0,61 y 0,64 respectivamente), CE-pH (0,48) y CE-NO3 (0,44). Finalmente, se determinaron bajas relaciones entre pH-PO4 (0,29) y PSI-NO3 (0,29). El resto de las comparaciones no son significativas (ver figura 22).

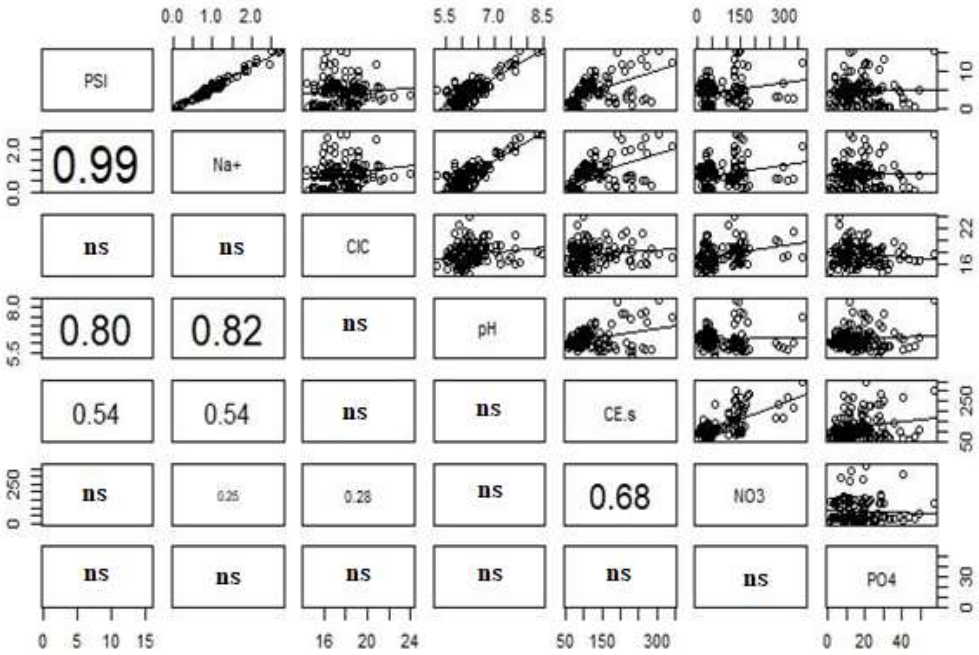


Figura 21. Correlaciones entre las propiedades químicas evaluadas a la profundidad de 0-20 cm. (Diagonal hacia abajo muestran los valores de coeficiente correlación Pearson cuando son significativos o "ns" no significativos entre las variables y diagonal hacia ar riba gráficos de dispersión entre variables)

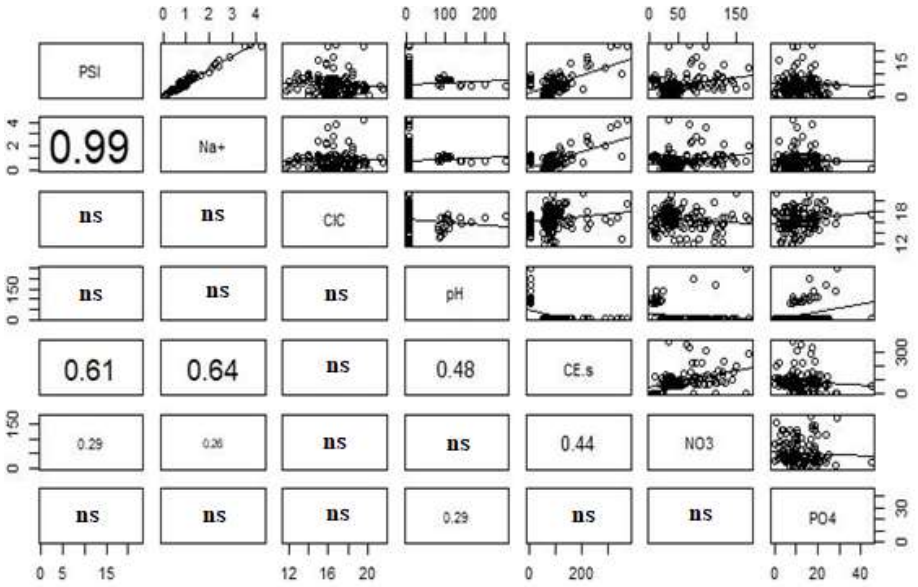


Figura 22. Correlaciones entre las propiedades químicas evaluadas a la profundidad de 20-40 cm. (Diagonal hacia abajo muestran los valores de coeficiente correlación Pearson cuando son significativos o "ns" no significativos entre las variables y diagonal hacia arriba gráficos de dispersión entre variables)

3.3.6 Discusión propiedades químicas

Los resultados hallados en este apartado muestran aumentos claros en la salinidad, el contenido de sodio en el complejo de intercambio y el pH en suelos regados en forma complementaria respecto al secano-testigo para ambas profundidades estudiadas. Si bien estos incrementos fueron significativos estadísticamente, son leves ya que los valores se mantienen relativamente bajos, no alcanzan los límites críticos para salinidad-sodicidad (FAO, 2015) y por ello, no deberían implicar una pérdida de funcionalidad ni comprometer la disponibilidad de nutrientes. A su vez, existe un efecto más marcado en los procesos relacionados con la adsorción de sodio que en el aumento de la concentración de sales totales. Estos cambios observados se encuentran directamente relacionados con la naturaleza de las aguas subterráneas utilizadas en el establecimiento con predominancia de bicarbonatos de sodio. El bicarbonato de sodio (NaHCO3) se disocia en HCO_3^- que absorbe protones (H+) para formar H_2CO_3 causando alcalinización del suelo, y el Na+ que es adsorbido en el complejo de intercambio de los coloides del suelo aumentando el PSI. Por otro lado, debido a que las aguas utilizadas no tienen riesgo de salinidad, no era de esperar aumentos importantes en la CE del suelo.

Estas observaciones son coherentes con lo obtenido por Mon R. et al, (2007) en un estudio que comprendió 21 localidades de la región pampeana, en donde la intensidad de los cambios obtenidos en las propiedades químicas bajo riego complementario fue similar. El autor menciona que el clima húmedo de la región pampeana permite la lixiviación profunda de las sales durante la temporada de lluvias impidiendo su concentración en superficie. Además, remarca que la magnitud de estos cambios es aceptable para las condiciones químicas de estos suelos. Génova L (2007) concluye que es una práctica agronómica sustentable debido a que los posibles impactos no superan la capacidad resiliente del sistema determinada por:el régimen de lluvias, láminas de riego menores a 300 mm, la escasa influencia de la freática y, la buena permeabilidad, capacidad de intercambio catiónico y la abundancia del ion calcio intercambiable de estos suelos.

Respecto a la relación entre las propiedades químicas estudiadas, se observó una correlación positiva entre el sodio y la salinidad del suelo, siendo más fuerte en la profundidad de 20-40 cm. Este hallazgo es importante ya que el posible efecto dispersivo del sodio ocurre cuando las concentraciones de sales son bajas (Oster y Shainberg, 2001). Y como se indicó anteriormente, los aumentos de PSI fueron acompañados con un

incremento en la CE del suelo. Otra relación importante que comprueba el impacto del uso de aguas bicarbonatadas sódicas es: la fuerte correlación entre el pH y el sodio, que como se ha comentado, la disociación del NaHCO3 produce aumento del PSI y pH. Sin embargo, esta relación se da en el estrato superior sin ser significativa en la profundidad de 20-40 cm. Esto nos podría indicar que el efecto del riego en la sodificación es más evidente a la profundidad de 0-20cm. Finalmente, es relevante la relación entre la CEs y la concentración de nitratos que ocurre en ambas profundidades, pero con mayor intensidad en la superficial de 0-20 cm. Esto da cuenta que la variación de la salinidad no solo se explica con el tratamiento bajo riego complementario, sino que también depende del nivel de fertilización nitrogenada.

3.3.6 Propiedades Físicas de los suelos estudiados

3.3.6.1 Humedad gravimétrica y volumétrica

En esta sección se muestran los resultados de la humedad del suelo expresada en gravimétrica (Hg) y volumétrica (Hv) a nivel de parcela y las comparaciones entre los tratamientos. Por supuesto, Hg y Hv están fuertemente relacionadas (r^2=0.95 para valores medios) y siguen la misma tendencia. Por ello se eligió la Hv (%) para caracterizar el estado hídrico de cada parcela y tratamiento, y la comparación de los resultados (ver Tabla 24).

Se observaron contenidos hídricos contrastantes entre las parcelas, con un amplio rango de Hv, entre un mínimo de 23,6 % en secano N19 y máximo de 42,7 % en secano M19. Para mejorar la interpretación de los resultados se realizó un ANOVA adicional utilizando cada parcela como tratamiento para evaluar si los valores de Hv son distintos entre las parcelas. Se encontraron tres grupos de parcelas que se diferencian claramente entre sí (pvalor 0.05). Un primer grupo con alto contenido hídrico: J19, M19, J18 y A19 con valores medios de Hv =38 % aproximadamente, un segundo grupo con menor humedad en E19 y N17 con Hv=33% y por último la parcela con el más bajo en N19 con un valor medio de HV=25,7 %. Este agrupamiento de parcelas por HV, es coherente con el periodo climático y estado del lote (cultivo o barbecho) en el cual se realizaron los estudios. El primer grupo de alta humedad corresponde a campañas que se realizaron en el periodo otoño-invierno cuando las lluvias son más abundantes y los lotes se

encontraban en barbecho. El segundo y tercer grupo de baja humedad corresponde a campañas realizadas en primavera-verano cuando el lote ya se encontraba bajo cultivo.

Tabla 24. Valores promedio de HV (%) por parcela. (letras distintas determinan diferencias significativas)

Parcela	Promedio	CV
J19	42,6 (A)	4,9
M19	42,4 (A)	3,8
J18	40,5 (AB)	15,3
A19	38,6 (B)	7,5
E19	33,2 (C)	9,8
N17	32,8 (C)	7,8
N19	25,7 (D)	14,7

En el análisis estadístico a escala de parcela que se muestra en la Tabla 25, se observó que en la mayoría de las parcelas no se reportaron diferencias significativas (α <0,05) entre los tratamientos. Solo en N19, el tratamiento S con 23,6 % de Hv es significativamente menor a R con 27,9%. Es válido mencionar que, dentro de esta parcela, el área de secano lindaba con el camino rural ya que se encontraba el límite del establecimiento. Esta ubicación marginal puede haber influenciado en la humedad del secano debido a una posible mayor evapotranspiración por viento y menor retención de la humedad por falta de vegetación, en comparación al lote donde el cultivo y/o rastrojo brinda una leve protección contra el viento y retiene mejor la humedad.

Tabla 25. Resultados de Hg y Hv por parcela para la profundidad de 0-20 (*R=riego, S=secano, p=probabilidad, ns=no significativo (pvalor≥0,1), (*)= pvalor <0,1 , (**)= pvalor < 0,05)*

Parcela	Hg (g/g)			Hv (%)		
	R	S	p	R	S	p.
N17	26,0	28,7	ns	32,9	32,8	ns
J18	33,1	35,2	ns	41,9	41,4	ns
E19	28,1	27,5	ns	33,6	32,8	ns
M19	34,4	34,6	ns	42,1	42,7	ns
J19	33,6	35,9	*	41,9	43,2	ns
A19	31,8	33,5	ns	38,4	38,9	ns
N19	25,3	21,9	**	27,9	23,6	**

En el análisis apareado a escala general, las diferencias entre los tratamientos no son estadísticamente distintas de 0 (pvalor=0,52> α). Es decir, no hay diferencias entre la Hv entre riego y secano.

3.3.6.2 Composición textural

El análisis textural muestra una fuerte presencia de limos en los suelos bajo estudio con valores entre 46,8 y 55,2 %. Los resultados promedio para el estrato superficial indican que el suelo del establecimiento se clasifica con una textura franco-limosa según triangulo textural USDA, coicidiendo con la clasificación textural (INTA 1966) para las tres series de suelo presentes en la zona de estudio.

En la Tabla 26 se observan las medias del porcentaje de cada fracción textural con su clasificación correspondiente, por parcela para la profundidad de 0-20. Si bien no existen contrastes importantes entre las parcelas (las clases texturales van de franco a franco limoso), se hallaron diferencias significativas entre algunas de ellas. Esta información será importante para contextualizar los resultados de otras propiedades físicas evaluadas. En el contenido de arcilla se separan totalmente en dos grupos: A19, N19 y M19 con valores mayores y E19 con menor contenido. Por otro lado, en el contenido de arenas, se diferencian totalmente: E19 en primer lugar, A19 en segundo, N19 en tercer lugar y M19-J19 del resto, con los menores valores.

Tabla 26. Valores promedios (%) de arenas, limos y arcillas con su clasificación textural para la profundidad de 0-20 cm por parcela y a nivel general. (letras distintas determinan diferencias significativas)

Parcela	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	Clasificación textural
E19	35,3 (a)	46,8 (d)	17,9 (c)	Franco
M19	26,8 (d)	53,3 (b)	19,8 (ab)	Franco limoso
J19	25,7 (d)	55,2 (a)	19,1 (bc)	Franco limoso
A19	32,6 (b)	46,2 (d)	21,2 (a)	Franco
N19	30,0 (c)	49,0 (c)	21,0 (a)	Franco
General	29,9	50,3	19,8	Franco limoso

En la comparación de los tratamientos se observa que algunas parcelas también presentan diferencias significativas en su textura en la profundidad de 0-20 cm (ver Tabla 27). Estas diferencias se reportaron en el contenido de arenas en E19, M19 con pvalor<0.1 y en J19

con pvalor<0.05, siendo mayores en R. De manera inversa, en esas parcelas el contenido de arcillas disminuye. En el resto de las parcelas, si bien no fueron significativas, se observó la misma tendencia. Estas diferencias podrían deberse a la propia variabilidad de esta propiedad del suelo o a efectos de error de laboratorio ya que la separación de las arenas se realizó con tamiz de 0,05 mm. Tambien podrían existir diferencias en el contenido de materia organica por el efecto del riego, reportado por Giubergia (2013) debido a una mayor productividad del cultivo. En este caso, como en el análisis textural la MO no fue combustionada previamente, esta podría impactar en la cuantificación del %arenas. Finalmente se hipotetiza que en los sitios regados, con aumentos en la concentracion de Na, por efecto de dispersión de los coloides, las arcillas podrían haber migrado hacia estratos mas profundos.

Tabla 27. Resultados en la composición textural por parcela para la profundidad de 0-20 cm (*R=riego, S=secano, p=probabilidad, ns=no significativo (pvalor≥0,1), (*)= pvalor <0,1 , (**)= pvalor < 0,05)*

Parcela	Arena (%)			Limo (%)			Arcilla (%)		
	R	S	p	R	S	dif	R	S	p
E19	36,8	33,7	*	46,3	47,3	ns	16,9	19,0	ns
M19	27,9	25,5	*	53,3	53,5	ns	18,8	21,0	**
J19	26,8	24,5	**	55,2	55,1	ns	17,9	20,3	**
A19	32,7	32,5	ns	46,2	46,3	ns	21,1	21,2	ns
N19	30,8	29,1	ns	49,8	48,2	ns	21,0	20,9	ns

En el análisis apareado (ver Figura 23) se observaron lo mismos resultados que en el anterior análisis por parcela. Se muestra que el contenido de arcilla disminuye con un pvalor>0.1 en riego con un IC 95% entre -2.9 y 0.2 % y aumenta la proporción de arenas con un pvalor>0.05 en un 2% promedio con IC95% entre 0.6 y 3.3 %.

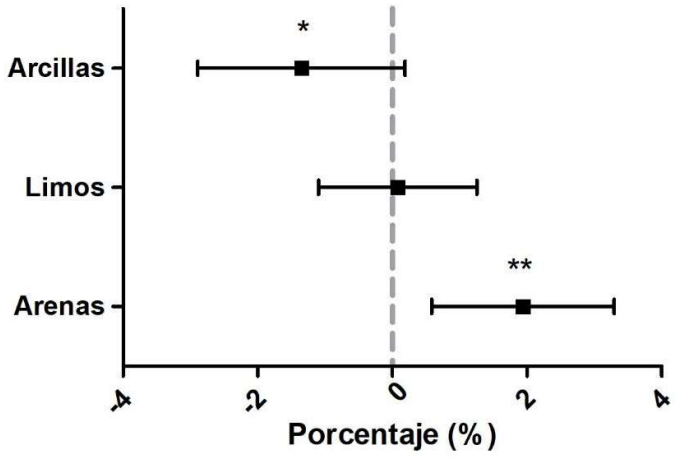


Figura 23. Resultados análisis apareados en la composición textural. *(cuadrados llenos indican el valor medio de la diferencia entre R y S, las barras contienen el intervalo de confianza del 95%, (**) indica significancia estadística con pvalor<0.05, (*) significancia estadística con pvalor<0.1)*

3.3.6.3 Densidad aparente y porosidad

En la Tabla 28 se muestran los resultados promedios de la densidad aparente (Dap) para cada tratamiento en cada parcela. El resultado de la Dap promedio para los suelos de este establecimiento es de 1,19 g/cm3, la cual se corresponde con los valores de referencia encontrados por diversos autores para suelos franco limo arcillosos (Steinbach y Alvarez, 2007). Los CV de esta propiedad para todas las parcelas estudiadas fue bajo, menor al 10%. No se encontraron diferencias significativas en los valores de Dap entre las parcelas, la única que se separó estadísticamente del resto fue N19 con una Dap baja de 1,09 g/cm3.

Tabla 28. Valores promedio y CV (%) de la Dap (g/cm3) y Pt (%) por parcela y general. (letras distintas determinan diferencias significativas entre parcelas)

Parcela	Dap (g/cm3)	CV (%)	Pt (%)	CV (%)
M19	1,23 (A)	4,33	45,2 (C)	5,1
J19	1,23 (A)	5,61	45,4 (BC)	6,6
N17	1,21 (AB)	8,66	46,3 (BC)	10,0
E19	1,19 (AB)	5,3	47,0 (BC)	6,0
A19	1,19 (AB)	8,14	47,2 (BC)	9,0
J18	1,17 (B)	6,26	48,2 (B)	6,6
N19	1,09 (C)	8,36	51,6 (A)	7,8
General	1,19	7,69	47,3	8,5

En la comparación entre los tratamientos en cada parcela (Tabla 29), en la mayoría, no se encontraron diferencias significativas entre R y S. Sólo en N17 se observó una diferencia significativa entre R y S, en donde se obtuvo un valor alto de 1,27 g/cm3 en R más denso que su par en S (1,15 g/cm3). Sin embargo, la tendencia general a esa escala es que la Dap promedio en R es superior a S.

Finalmente, en el análisis general apareado (n=7), se encontró que la diferencia entre ambos tratamientos es distinta de 0 con un pvalor<0.05. Los resultados de este análisis indican que los suelos bajo riego aumentan su Dap en promedio un 3,5 % (0,05 g/cm3) respecto al secano, con un intervalo de confianza del 95% entre 0.002 y 0.1 g cm/3.

Para determinar la Porosidad Total (Pt), previamente se determinó experimentalmente el valor de la densidad de partícula (Dp). En este trabajo se obtuvo un valor de Dp=2,25 g/cm3. Este valor es sensiblemente inferior al que se usa habitualmente (2,65 g/cm3) para calcular la porosidad total en suelos minerales arcillosos. Esto se debe a la textura limosa de estos suelos y a la particular baja densidad de los mismos por su origen genético (Cosentino y Pecorari, 2002). El valor medio de Pt para el suelo estudiado fue de 47,3%, el cual se encuentra dentro del rango de suelos franco-arcillosos (Conti y Giuffre, 2014). Los resultados son similares a los de la Dap ya que la PT es una magnitud que depende de esta propiedad.

En el análisis comparando las parcelas sin considerar los tratamientos (Tabla 28) se obtuvo que la única que se diferencia estadísticamente del resto es N19 con un valor alto de PT (51,6 %). Por otro lado, comparando tratamientos a nivel de parcela (Tabla 29) no se encontraron diferencias significativas entre tratamientos, salvo en N17 en donde la porosidad fue menor en R (43,6%) que en secano (49,0%). Esto puede indicar un grado de compactación mayor en el suelo regado en esta parcela ya que también se evidenció en la Dap.

Finalmente, en el análisis a nivel general con un diseño apareado, se obtuvo un pvalor de 0.22 muy superior al α establecido. Indicando que no hay evidencia para afirmar que las diferencias entre R y S para esta propiedad sean distintas de 0.

Tabla 29. Resultados en la Dap (g/cm3) y Pt (%) por parcela para la profundidad de 0-20 cm (R=riego, S=secano, p=probabilidad, ns=no significativo (pvalor≥0,1), (*)= pvalor <0,1 , (**)= pvalor < 0,05)

Parcela	Dap (g/cm3)			Pt (%)		
	R	S	p	R	S	p
N17	1,27	1,15	**	43,6	49,0	**
J18	1,27	1,15	ns	49,2	47,1	ns
E19	1,19	1,19	ns	46,9	47,1	ns
M19	1,23	1,24	ns	45,5	45,0	ns
J19	1,25	1,21	ns	44,4	46,4	ns
A19	1,21	1,16	ns	46,3	48,3	ns
N19	1,10	1,07	ns	50,9	52,3	ns

3.3.6.4 Resistencia a la penetración (Rp)

Los resultados de la Rp que se muestran en la Figura 24, nos indican que los suelos de este establecimiento presentan una mayor compactación a nivel subsuperficial. En general se perciben máximos en esta propiedad, entre los 10 y 20 cm de profundidad y luego vuelve a disminuir. Esta tendencia se puede observar, de manera independiente con el tratamiento, es característica de los suelos del norte de la Provincia de Bs As con valores semejantes a lo reportado por Castiglioni y Bianco (2021).

Como era de esperar, la Rp está fuertemente condicionada por el contenido hídrico al momento del muestreo. Existe una fuerte correlación negativa con un R^2=-0.97 entre la Rp promedio acumulada a los primeros 20 cm y la Hv promedio para la profundidad de 0-20 cm. Es decir, la Rp disminuye al aumentar el contenido hídrico de los sitios muestreados. Las parcelas que presentaron menor Hv (%) evidenciaron un alto Rp tanto en lo acumulado como en los primeros centímetros (por ejemplo, en las parcelas N19 y E19). Además, aquellas donde la Rp no superó el límite de 2 MPa presupuesto para una adecuada calidad física (Bengough et al., 2011) también resultaron ser las que tenían mayor contenido hídrico.

Sin embargo, como se demostró en el apartado anterior, las parcelas no mostraron diferencias de HV dentro de cada una entre los tratamientos R y S, salvo N19 (ver tabla

25). Como los análisis y comparaciones se acotan a la parcela estudiada bajo tratamiento, solo se realizó la corrección de los valores de Rp en función de HV en esta última.

En general, se puede observar que no hay grandes diferencias entre tratamientos en cada parcela en las distintas profundidades, solo en algunos estratos en particular se hallaron diferencias significativas (Figura 24).

En particular, en la parcela J18 (Figura 24a) con una HV de 40,5% muestra que la Rp en S es mayor que en R en todos los estratos, siendo significativas entre las profundidades de 10 y 25 cm, en donde el S resultó con valores más elevados que en R.

La parcela E19 (Figura 24 b) con un valor bajo de HV (33,2%), a diferencia del resto, tiene la particularidad de presentar altos valores de Rp en el primer estrato de 2,5 cm (R=1,8 y S=1,9 MPa), luego se observa que en todo el perfil no hay diferencias entre los tratamientos. Estos valores altos que superan el límite crítico podrían adjudicarse al bajo contenido hídrico y las características fisicoquímicas determinadas por un suelo de mal drenaje (comunicación personal con productor) y con elevados valores en superficie de PSI (%) (ver tabla 20).

En la parcela M19 (Figura 24 c) en la mayoría del perfil no se encontraron diferencias, solo en la profundidad de 12,5 cm se encontró valores más altos en R que en S (1,8 vs 1,4 Mpa). En esta parcela se observaron valores bajos de Rp, seguramente asociados a un buen contenido hídrico (Hv=43,3%).

En J19 (Figura 24d) también se encontraron bajos valores de Rp (HV= 42,6%) y diferencias en la profundidad de 12,5 cm con R=1,7 vs S=1,3 MPa.

Por último, en la parcela N19 (Figura 24e), se corrigieron los valores de Rp a una HV % promedio de la parcela (26,2%). Se reportaron diferencias significativas (con pvalor<0.1) en los primeros dos estratos (2,5 y 7,5 cm) en donde R tuvo valores más altos que S en las dos profundidades (R=0,9 vs S=0,7 y R=3,2 vs S=2,5 MPa respectivamente). Esta parcela presenta los valores más resistentes a la penetración, pero también el suelo se encontraba con un bajo nivel de humedad al momento del muestreo.

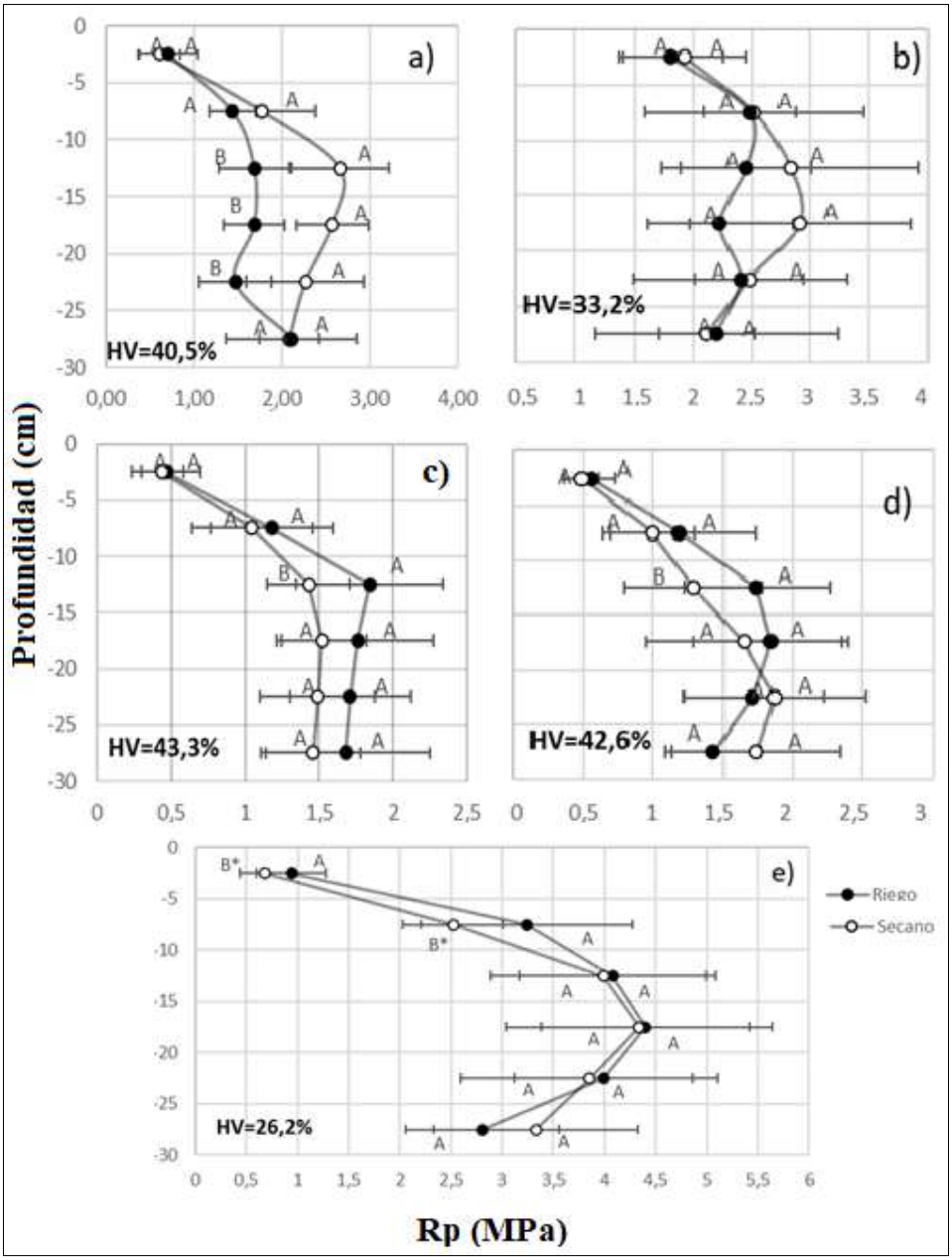


Figura 24. Resultados de la Rp (MPa) entre R y S por parcela en las profundidades estudiadas (a-J18, b-E19, c-M19, d- J19, e-N19, R=círculos llenos, S=círculos vacíos, letras distintas indican diferencia estadística con pvalor<0.05, (*) diferencias con pvalor<0.1)

Finalmente, en el análisis apareado (ver Figura 25), los resultados son similares; no hay diferencias significativas entre los tratamientos en las profundidades exploradas para esta propiedad. Los promedios de las diferencias entre los tratamientos en cada profundidad se encuentran cercanos a 0 y sus intervalos de confianza (95%) contienen este valor, lo

cual nos indica que no hay diferencias significativas. Se puede describir una leve tendencia en los primeros estratos en favor de R , es decir, valores de Rp más altos en R que en S. Luego se revierte la relación con la profundidad, Rp mayor en S que en R. Sin embargo, se reportó mucha variabilidad que no permite evidenciar efectos del riego en la Rp de los suelos estudiados.

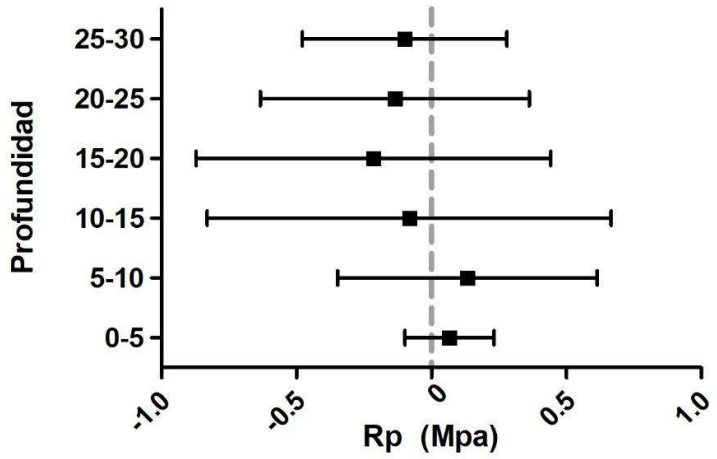


Figura 25. Resultados análisis apareados en la Resistencia a la penetración (Mpa).
(cuadrados llenos indican el valor medio de la diferencia entre R y S, las barras contienen el intervalo de confianza del 95%, (*) indica significancia estadística con pvalor<0.05)

El efecto del riego complementario en esta propiedad ha sido estudiado por Torres Duggan M. et al. (2012) en el norte de Buenos Aires, en donde encontró que el tratamiento regado superó al secano en un 15% (alrededor de 0.387 MPa) considerando los primeros 40 cm. El mismo autor en un experimento desarrollado en la serie de suelo de Venado Tuerto (Bs As) también muestra un aumento la Rp en un 56% en sus valores medios y dando mayor variabilidad en riego respecto al secano (Duggan y Alvarez, 2017). Posiblemente en esta tesis, los resultados no fueron concluyentes debido a la fuerte variabilidad espacial reportada en esta propiedad. La Rp depende de numerosas variables que pueden cambiar rápidamente en pocos metros de distancia en el suelo, por ello, seguramente sea necesario aumentar el número de muestras para conseguir evidencias más robustas.

3.3.6.5 Estabilidad de agregados

Esta propiedad se cuantificó a través del diámetro medio ponderado DMP (mm) de los agregados del suelo luego de ser sometidos a un tratamiento de humedecimiento rápido. El valor en el DMP promedio para los suelos estudiados es de 0,60 mm, reportando un CV (%) del 34,4 (Tabla 30). Estos resultados son representativos del tipo de suelo de esta región ya que algunos autores han reportados resultados consistentes; Kraemer (2015) encontró valores entre 0,48 y 0,73 mm en suelos agrícolas del tipo Argiudol en la zona norte de la Provincia de Buenos Aires, Gabioud E. et al. (2011) trabajaron con Argiudol Acuico de textura franco arcillo limoso obteniendo valores cercanos a 0.50 mm y finalmente Rubio V. et al. (2019) hallaron un valor promedio de 0,57 mm para 16 sitios agrícolas en Molisoles de textura franco limosa. Estos autores señalan la importancia del pretratamiento de humedecimiento rápido debido a que permite separar los distintos tratamientos propuestos. En particular, la inestabilidad de esta prueba se asocia a la probabilidad de ocurrencia de problemas de encostramiento superficial (Le bissonnais, 1996).

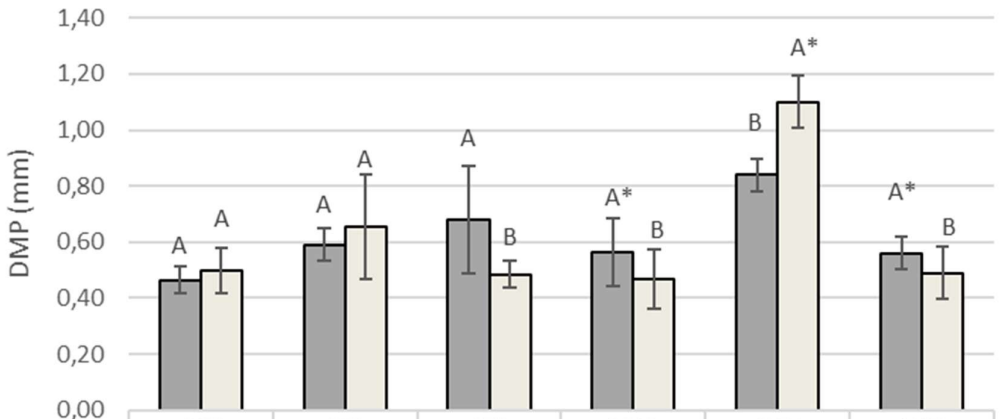
Las parcelas dieron valores similares entre 0,48 y 0,98 mm con una CV que no superó el 30%, lo cual indica una baja variabilidad para esta técnica (ver Figura 26). La única que se separó estadísticamente del resto fue N17 (pvalor<0.05), obteniéndose los valores más elevados en esta propiedad (sin considerar tratamientos).

Tabla 29. Valores promedios del DMP (mm) por parcela de los agregados del suelo sometido a pretratamiento de humedecimiento rápido. (letras distintas determinan diferencias significativas)

Parcela	DMP (mm)	CV (%)
N17	0,98 (A)	27,8
J18	0,63 (B)	22,6
J19	0,59 (B)	29,3
N19	0,53 (B)	15,7
M19	0,52 (B)	23,6
A19	0,48 (B)	13,9
General	0,60	34,4

En la Figura 31 se muestran los resultados de las comparaciones (t de student) entre los tratamientos dentro de cada parcela. No es claro el sentido del efecto de R en esta propiedad ya sea positivo o negativo. Por un lado, N17 reportó diferencias significativas entre los mismos (pvalor<0.1) con valores de DMP más bajos en R. Luego, de manera contraria, se observó que en las parcelas N19, M19 (con pvalor<0.1) y J19 (con pvalor<0.05) los suelos bajo R presentan valores más altos que en S. Por último, en las parcelas A19 y J18 no se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos.

Por ultimo, en el análisis general apareado se obtuvo que el promedio de las diferencias en R y S es cercano a 0. En definitiva, tampoco se encontraron diferencias entre los tratamientos bajo este análisis.



	A19	J18	J19	M19	N17	N19
Riego	0,47	0,59	0,68	0,57	0,84	0,56
Secano	0,50	0,66	0,49	0,47	1,10	0,49

Figura 26. Resultados ANOVA para la DMP (mm) entre R y S por parcela (letras distintas indican diferencia estadística con pvalor<0.05, (*) diferencias con pvalor<0.1)

Si bien es importante contar con datos de carbono orgánico por su efecto positivo en la agregación y estabilidad del suelo debido a su rol como agente cementante (Tisdall y Oades, 1982), hay algunas relaciones que podrían explicar estos resultados. En la primera parte de este capítulo, sobre las propiedades químicas, se observó que existe una tendencia (en algunas parcelas significativa) de aumentar la CIC bajo riego (ver tabla 18). A su vez, la CIC se encuentra íntimamente relacionada con el contenido de arcillas y carbono

orgánico (Camilión de Hurtado, 1984). Entonces, quizás, estos aumentos en la CIC reflejen un aumento en el carbono orgánico en los suelos regados como demostró Giubergia, J. (2013b) debido a la mayor productividad de los cultivos regados en forma complementaria, y que finalmente son incorporados como materia orgánica al suelo. Siendo así, la mejor performance en la EA en los suelos regados (J19, M19 y N19) podría vincularse con este aumento en la MO manifestado por la CIC. Por otro lado, hemos visto en el apartado 3.3.6.2 (análisis textural) que los suelos regados tienen un %arc menor respecto al secano. Se ha demostrado que la actividad de las arcillas aumenta la EA y el DMP en suelos Argiudoles debido a que aumentan la cohesión del suelo y los sitios de intercambio para interactuar con la materia orgánica (Kraemer F., 2015). Entonces, en el caso particular de N17 posiblemente el menor DMP de R respecto a S se explique, en parte, por el menor contenido de arcillas.

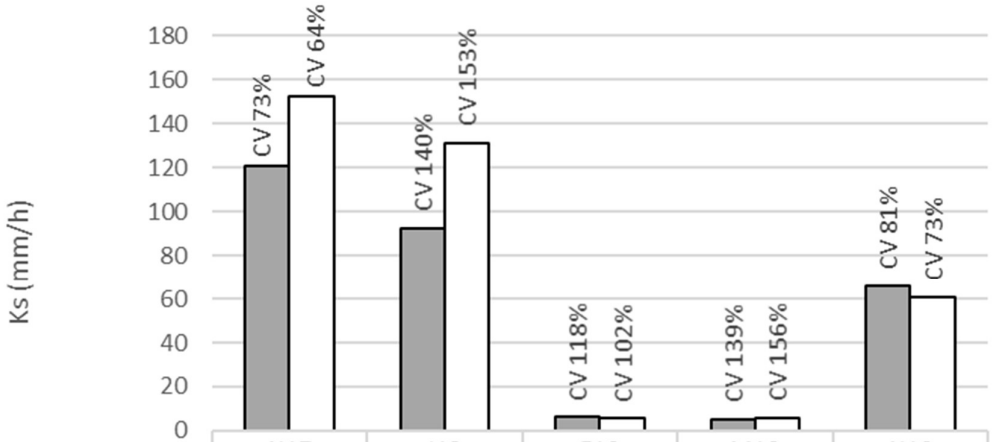
3.3.6.6 Conductividad hidráulica saturada (Ks)

En la Figura 27 se pueden observar los resultados de la Ks, reportando también valores de CV (%) por tratamiento en cada parcela. Esta propiedad presenta CV muy elevados >50% (Jury, 1986) con valores entre 64 y 156 %. Este nivel de variabilidad es típico de las propiedades hídricas del suelo por la dificultad técnica de su medición en laboratorio y su variabilidad espacial (Hillel, 1998). De todas maneras, los valores de CV hallados son coherentes con los reportados por otros autores en suelos similares (Martínez et al., 2011; Castiglioni et al., 2013). Esta característica no permitió diferenciar tratamientos ni a escala de parcela ni en el diseño apareado general.

De modo descriptivo, se logró diferenciar y caracterizar la Ks de las distintas parcelas, independientemente del tratamiento. La mayor Ks se encontró en N17 (135,3 mm/h) junto con J18 (103,4 mm/h), luego intermedia en N19 (63,3 mm/h) y finalmente en M19-E19 se hallaron los valores más bajos: 5,8 y 5,5 mm/h respectivamente. Se encontraron diferencias estadísticas entre los grupos de N17- J18 respecto a E19 y M19 (pvalor<0.05). Este comportamiento coincide con la serie de suelo en la que se ubican las parcelas, el comportamiento hídrico descripto por el productor (comunicación personal) y visto en campo (encharcamientos). Las parcelas pertenecientes a la serie Villa Moll (E19 y M19) con los menores valores de Ks se caracterizan por exhibir problemas de drenaje, con sodio en superficie; en cambio las de la serie Chacabuco (N17, J18 y N19) con los más altos valores de Ks no evidenciaron encharcamientos importantes y resultaron con bajos

valores de sodio. Finalmente, se reportó un valor promedio de 94 mm/h para los suelos pertenecientes a esta serie, con textura franco-limosa. Se encuentra en un rango similar a los obtenidos por otros autores en suelos de la región pampeana con textura similar (Castiglioni et al., 2013; Castiglioni et al., 2018 y Cabria y Culot, 2000)

Respecto al análisis de los tratamientos, tanto el ANOVA realizado a escala de parcela (pseudoreplicas) como el análisis apareado a escala de establecimiento no reportaron diferencias significativas. Seguramente debido a la alta variabilidad que caracteriza a esta propiedad.



	N17	J18	E19	M19	N19
Riego (mm/h)	121,0	92,4	6,11	5,22	65,89
Secano (mm/h)	152,5	131	5,51	5,87	60,93

Figura 27. Valores promedio y CV (%) de la Ks (mm/h) por tratamiento y parcela.

3.3.6.7 Infiltración

En la tabla 14 de la sección metodológica de este capítulo, se detallaron los ensayos de infiltración realizados en el estudio. Para el análisis por parcela entre R y S, los ensayos realizados en la parcela M19 fueron incluidos como pseudoréplicas de la parcela J18, debido a la proximidad a la misma (lote contiguo) y por solo contar con uno replica por tratamiento. Por otro lado, debido al rápido ingreso de las láminas aplicadas, comportamiento atípico para esta clase textural, dos ensayos de esta última parcela realizados en S fueron desestimados.

Los resultados se muestran en la tabla 31 de manera resumida. Para la zona de estudio sobre todos los ensayos realizados muestra nunvalor promedio de Tib= 5,6 mm/h con un desvio estandar= 2,09 mm/h lo cual nos indicarían una baja infiltración, característica del tipo de suelo franco arcilloso según la familia de curvas representativas de infiltración de Kostiakov-Lewis (1932). Por otro lado, Del Barrio (1984) estudió la infiltración de los suelos pampeanos con ensayos de doble anillo aplicando el modelo de Kostiakov-Lewis (misma metodología) reportando valores Tib entre 9,9 y 7,2 mm/h para suelos Argiudoles. Si bien los valores de esta tesis son levemente menores a los observados por este autor, se encuentran en el mismo orden. De manera que las pequeñas diferencias pueden deberse a cuestiones de manejo, contenido de partículas finas o por efecto del sodio (Tschapek, 1966).

Se pudo observar que la Tib (mm/h) en la parcela J19 en R es superior al S, mientras que en J18 la relación se invierte siendo menor la diferencia entre los tratamientos. Sin embargo, en ninguno de los dos casos estas diferencias encontradas fueron significativas. Torres Duggan (2012) y Giubergia (2013a) utilizando método de anillo simple encontraron tendencias similares que muestran menores tasas de infiltración bajo riego. Pero al igual que en los ensayos de esta tesis, la alta variabilidad de los valores de esta propiedad no permitió determinar efectos claros. Sin embargo, de manera contrastante, otros autores pudieron evidenciar significativamente menores valores de infiltración en sitios regados respecto al testigo en secano (Mon et al, 2007, Pilatti 2006). Aunque estos últimos, obtuvieron sus parámetros de infiltración mediante simuladores de lluvia a campo. En la Tabla 31, también se muestran los valores medios para cada parcela sin discriminar los ensayos por tratamiento, de esta manera se encontró que la parcela de J19 obtuvo valores más elevados en esta propiedad que J18 (sin diferencias significativas) con valores similares de variación (CV).

Tabla 30. Resultados promedio de la Tib (mm/h) por tratamiento y parcela con CV(%). (letras distintas indican diferencias significativas entre tratamientos, sin T= sin distinguir por tratamiento)

Parcela	Tib (mm/h)					
	R	n	S	n	Sin T	$CV(\%)_{sin\ T}$
J19	7,75 (A)	5	5,08 (A)	5	6,41	41,58
J18	3,71 (A)	5	5,91 (A)	3	4,57	54,47

En definitiva, estos resultados indican que es necesario profundizar y unificar el método de medición de las variables hídricas del suelo para verificar si realmente en estas condiciones edafoclimáticas, el riego complementario puede modificar la infiltración del suelo ya sea de manera positiva o negativa.

3.3.6.8 Relaciones entre las propiedades físicas evaluadas

En esta sección se reportan las relaciones que se encontraron entre las propiedades físicas estudiadas. Es importante recordar que los datos utilizados en este análisis corresponden a los promedios de tratamientos por parcela para la profundidad superficial en el rango de 0 a 20 cm. En la Tabla 32 se exponen los resultados de estas correlaciones con su probabilidad asociada.

Los valores de Rp analizados corresponden a la profundidad acumulada de 0-15 cm y los mismos, fueron corregidos con la HV (se los ajustó a un HV=37% que es el promedio de todas las parcelas). Para la Rp_{cor} se observó correlación positiva con un coeficiente de 0,74 con la EA. Esto nos indica que los sitios con mayor EA (cuantificado con el DMP) también reportaron mayor Rp. En realidad, no hay una hipótesis previa específica que relacione ambas propiedades, aunque es de esperar que un suelo con buena estructura física (alta EA) presente menor grado de compactación (estimada con Rp). Sin embargo, en esta tesis se determinó la EA a través del pretratamiento de humedecimiento rápido de los agregados, lo cual intenta reproducir la estabilidad de los agregados ante eventos de precipitación (Le Bissonnais, 1996) y no eventos de compactación superficial (encostramientos) y/o subsuperficiales. Es decir, estas variables son indicadoras de distintos procesos fisicos. También, se observó una relación inversa con Pt (-0,43) y directa con la Dap (0,12), lo cual es coherente, ya que sitios que presenten menor Pt y mayor Dap podrían evidenciar cierto grado de compactación de su espacio poroso que se debería reflejar con valores más altos en la Rp_{cor} (sin significancia estadística). Por último,

se determinó una relación moderada con la textura, resultando negativo (-0,69) para los primeros centímetros del suelo (Rp entre 0-15 cm).

La Ks presenta una relación positiva fuerte con la EA (0,78) y débiles con la Pt (positiva) y Dap (negativa). Estas observaciones son esperables ya que sitios con mejor calidad física, manifestada, en este caso, con valores más altos en la Pt y la EA y con baja Dap tendrán una mayor permeabilidad (Ks). Además, se reportó una fuerte correlación positiva con las arcillas (0.77) y negativa con las arenas (-0.73), lo cual, muestra la importancia de la fracción fina (arcillas) en los suelos limosos, en donde la estructura es débil, para favorecer la aireación y conducción del agua en suelo a través de los poros.

Las propiedades Dap y Pt están fuertemente relacionadas, ya que PT depende de Dap linealmente. Aunque también se encontraron que ambas se relacionaban con la HV% al momento del muestreo. Se halló una relación positiva de HV% con la Dap (r=0.68) y negativa con la Pt (r=0.62). Esto podría dar indicios de cierto comportamiento de contracción-expansión de las arcillas (illita mayormente y en menor medida esméctica) de estos suelos ante el contenido hídrico. En una situación de bajo contenido hídrico, las arcillas podrían contraerse en cierta medida dando lugar a mayor porosidad y menor densidad aparente. Este comportamiento fue evidenciado por otros autores en suelos similares de la Región pampeana (Cosentino y Pecorari, 2002; Kraemer 2015)

Tabla 31. Correlaciones entre valores promedios por tratamiento y parcela entre las variables físicas estudiadas. (diagonal hacia arriba valor de probabilidad, diagonal hacia abajo valores de coeficiente de correlación Pearson, valores en negrita indican relaciones significativas)

Probabilidades/ Coeficientes	**Ks**	**Rp_{cor}**	**EA**	**Pt**	**Dap**	**HV**	**Arc**	**Are**	**Ar+lim**
Ks	1	0,97	0,02	0,63	0,73	0,8	0,03	0,04	0,04
Rp_{cor}	-0,02	1	0,04	0,22	0,65	0,67	0,06	0,33	0,33
EA	**0,78**	**0,74**	1	0,78	0,87	0,53	0,29	0,02	0,02
Pt	0,17	-0,43	-0,09	1	0,00	0,02	0,23	0,37	0,37
Dap	-0,12	0,16	0,05	**-0,81**	1	0,01	0,26	0,33	0,33
HV	-0,09	0,15	-0,2	**-0,63**	**0,69**	1	0,5	0,55	0,55
arc	**0,77**	**-0,69**	0,37	0,38	-0,35	-0,22	1	0,09	0,09
are	**-0,73**	**0,40**	**-0,73**	0,28	-0,31	-0,19	**-0,51**	1	0,00
Ar+lim	**0,73**	**-0,40**	**0,73**	-0,28	0,31	0,19	**0,51**	-1	1

3.3.7 Relaciones entre las propiedades físicas y químicas

Se evaluaron las relaciones entre los promedios de cada tratamiento por parcela de las propiedades químicas y físicas estudiadas para la profundidad de 0-20 cm.

3.3.7.1 Conductividad Hidráulica Saturada

Se encontró que esta propiedad se encuentra fuertemente relacionada con los indicadores de sodificación (PSI, pH y Na+). A su vez hemos visto, en apartados anteriores, que estos indicadores están muy relacionados entre sí y responden significativamente al efecto del riego (ver figura 20 y 21). En la Figura 28 se muestra la relación entre la Ks y la concentración de Na^+, en donde esta propiedad disminuye sensiblemente ante el aumento del sodio con un ajuste R^2=0.69 y una pendiente de -113.5 mm.l/h.meq. De esta manera, se observa una caída de alrededor de un 95% en la Ks entre los suelos con bajos (0.3 meq/100g) y altos (1.5 meq/100g) valores de Na+. Respecto al PSI y pH las relaciones con la Ks fueron ambas negativas y significativas con R^2=0.66 y R^2=0.33 respectivamente.

Esta relación evidencia el impacto que el sodio genera en los agregados del suelo, aumentando la hinchazón y migración de las arcillas que producen la obstrucción de los poros, es decir, reduciendo el movimiento del agua en el suelo. Si bien no se cuantificó, se pudo observar, durante las mediciones de la Ks en el laboratorio que; en general, los suelos con más alto PSI presentaban lixiviados más oscuros que los de bajo valor, lo cual indicaría mayor migración de arcillas. Esos resultados son coherentes con Bagarello et al, (2006) que obtuvieron una relación lineal negativa entre Ks y el RAS del suelo y una pérdida de la permeabilidad de alrededor del 100%, pero en ese caso se trabajó con una gradiente mayor en la concentración de Na+, que fue desde entre 0 a 30 meq/100g en suelos franco-arcillosos. A su vez, Barreto y Carballo (2003) describieron un modelo exponencial (negativo) de la Ks en función del PSI, confirmando el valor de 15% como crítico para la pérdida de Ks. Muestran que cuando el PSI del suelo pasa de 4.8 a 15 % la Ks relativa cae del 73 al 38%, una pérdida de alrededor del 48%. Por ello, es posible que la magnitud de la pérdida de Ks hallada se deba a que, por el rango de valores de PSI (entre 0.5 y 10 promedio) de los suelos estudiados en esta tesis, nos encontremos en la primera parte de la curva exponencial en donde las caídas son más pronunciadas antes pequeños cambios en el nivel de sodio. Además, estos efectos pueden verse magnificados

debido a la textura de los suelos estudiados. Ben-Hur et al. (2009) estudiaron el efecto del sodio en la Ks en suelos de textura contrastante obteniendo una reducción baja en suelos franco-arenosos con un factor de 1.5 pero más marcada en los de textura fina (arcillosos), con un orden de magnitud mayor en un gradiente de PSI de 4.5 y 10.2 %.

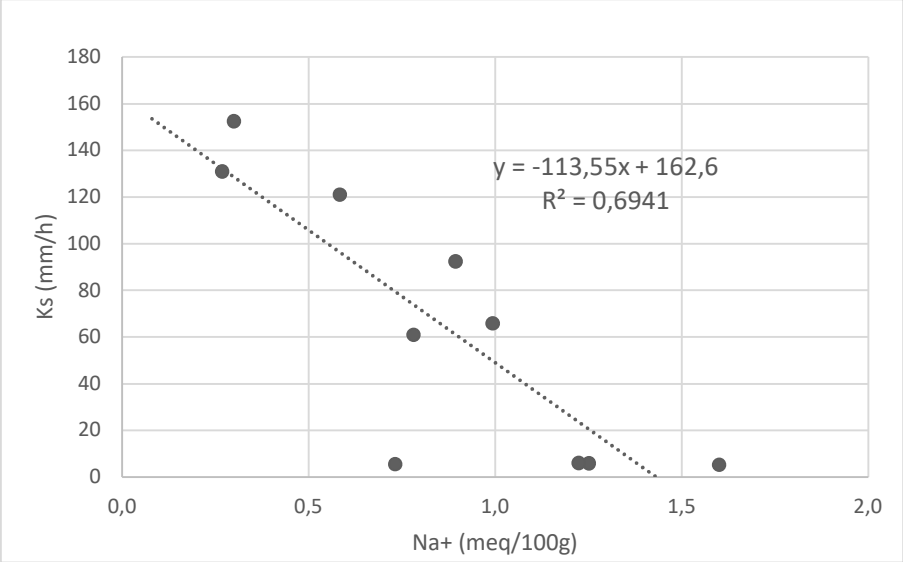


Figura 28. Gráfico de regresión lineal entre la Ks (mm/h) y el contenido de Na+ (meq/100g) para valores promedio por parcela y tratamiento.

3.3.7.2 Estabilidad de los agregados del suelo

Los resultados del análisis de esta propiedad con las variables químicas nos indican que está fuertemente correlacionada positivamente con la salinidad de suelo (R^2=0.68). En la Figura 29 se observa que los valores más altos de EA, estimada a través del DMP (mm), se encontraron en los sitios con mayor CE del suelo. Este resultado evidenciaría la función floculante que ejerce la concentración de sales en el suelo (Oster &Shainberg, 2001), que podría estar enmascarando el efecto dispersivo del sodio en los suelos regados.

En el caso de la CIC (Figura 30), la relación fue baja pero positiva con el EA (R^2=0.15). Algunos autores han establecido que la CIC del suelo se encuentra determinada principalmente por el contenido de arcillas y de materia orgánica, entre otras propiedades (Conti y Giuffré, 2014). A su vez estas variables juegan un papel fundamental en la estabilidad de los agregados por aumentar la cohesión entre las partículas y favorecer la

humectación lenta de los mismo (Chenu, 2000). Suponemos entonces, que este aumento en el EA de los agregados durante el pretratamiento de humedecimiento rápido que se debe a una mayor CIC pueda deberse a un mayor contenido de CO (asociado al aumento de la CIC), que funciona como aglutinante de los agregados brindando así mejor estructura física. Pero también al contenido de partículas finas, en la tabla 32 se muestra un coeficiente de correlación alto entre la EA y la fracción arcilla+limos con un valor positivo de 0.73 y negativo con la fracción gruesa (arenas).

Finalmente, el mejor ajuste se obtuvo con un modelo multivariado con la siguiente función EA (mm)= 0.05 - 0.02 PSI + 0.02 CIC + 3.08 CEs, en donde el mismo presentó un R^2=0.75 y un pvalor<0.05. Aquí se observa el mayor peso que tiene la CEs en la expresión de la variabilidad de la EA.

En concordancia con estos resultados, Giubergia (2013a) en su tesis de maestria concluye que, si bien en los sitios regados aumenta el PSI del suelo, la estabilidad de los agregados es mayor bajo riego respecto a secano debido al aumento en la salinidad del suelo y en el carbono orgánico en los primeros centímetros.

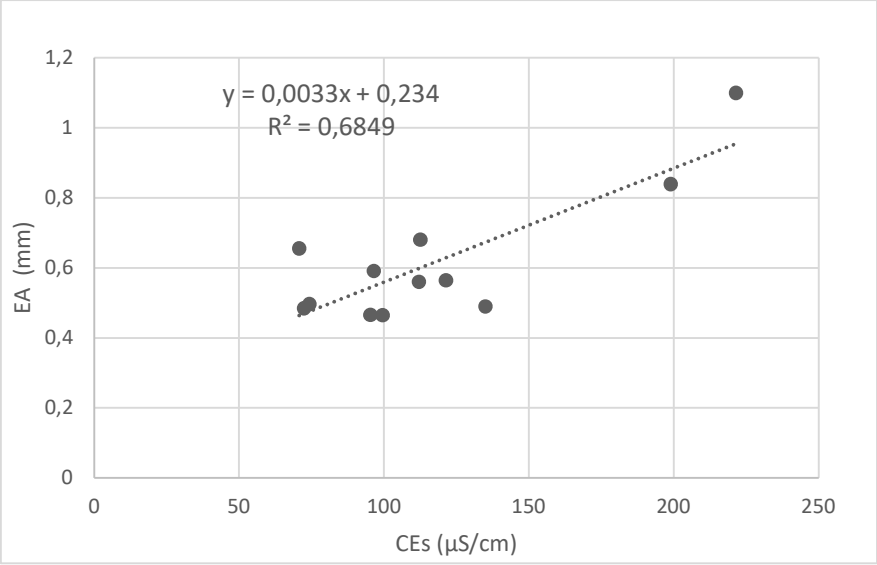


Figura 29. Gráfico de regresión lineal entre la EA (mm) y el CEs (µS/cm) para valores promedio por parcela y tratamiento.

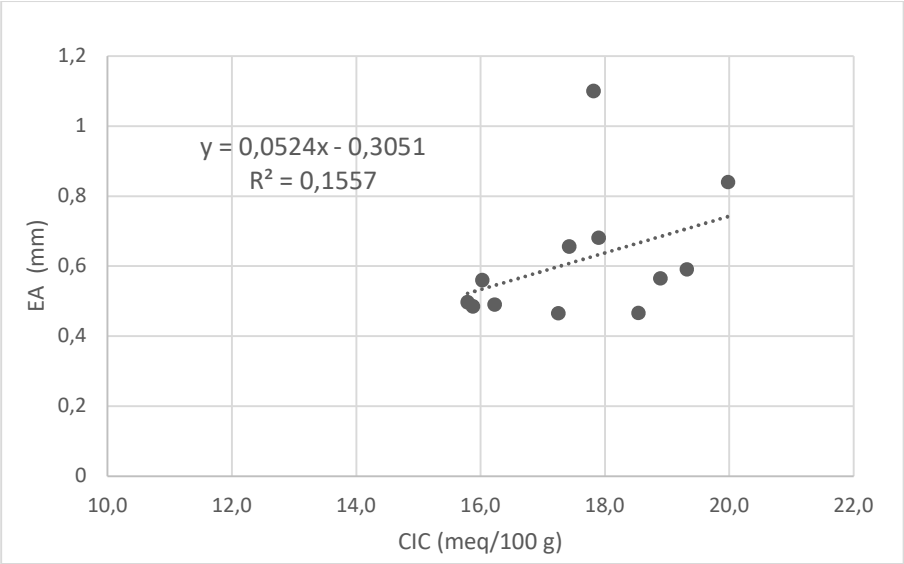


Figura 30. Gráfico de regresión lineal entre la EA (mm) y el CIC (meq/100 g) para valores promedio por parcela y tratamiento.

3.3.7.3 Resistencia a la penetración

El análisis de esta propiedad con las variables químicas estudiadas nos indica una leve tendencia a encontrar suelo más resistivo a la penetración mecánica cuando encontramos suelos con indicadores de sodificación (pH y Na) más altos. Se encontraron relaciones positivas con ambas propiedades, es decir, los suelos que resultaron levemente más alcalinos y con mayor concentración de Na fueron los que reportaron valores más altos de Rp. En la Figura 31 se muestran las regresiones entre la Rp_{cor} acumulada 0-15cm con el pH (R^2=0,39) y Na (R^2=0.14).

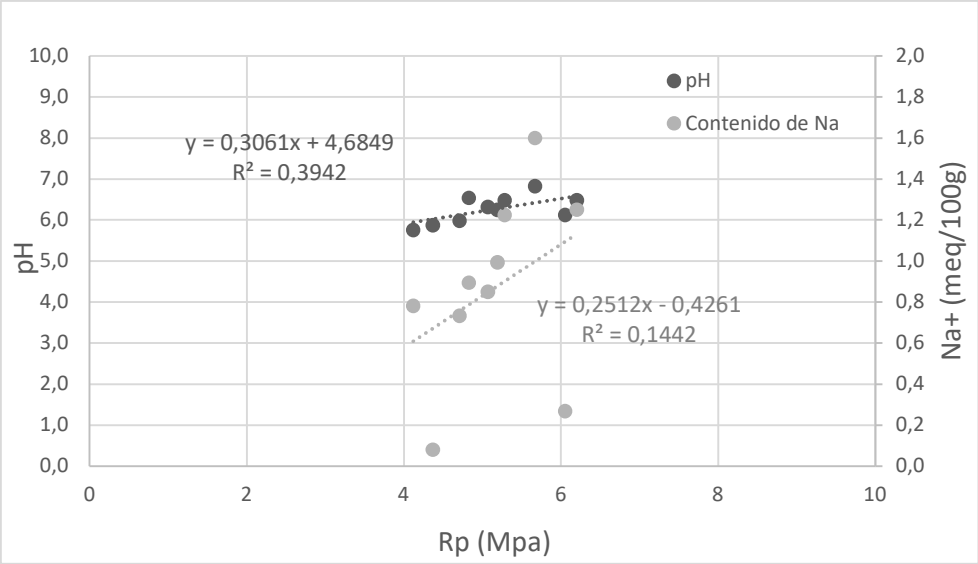


Figura 31. Gráfico de regresión lineal entre la Rp (Mpa) con el pH y el contenido de Na+ (meq/100g) para valores promedio por parcela y tratamiento

3.4 CONCLUSIONES

Se encontró que algunas de las propiedades químicas analizadas fueron afectadas significativamente por el riego complementario. La CEs presentó una fuerte tendencia de aumento bajo R en el estrato superior, siendo significativa en la profundidad de 20-40 cm. El pH, la concentración de Na^+ y el PSI mostraron un claro aumento (significativo), con distintas intensidades en los suelos regados para ambas profundidades, independientemente del momento de muestreo. Sin embargo, los cambios reportados en estas propiedades fueron significativos, en intensidad, son leves ya que los valores aun se mantienen relativamente bajos y se encuentran muy por debajo de los límites críticos para salinidad-sodicidad (FAO, 2015). Por ello, no deberían implicar una pérdida de funcionalidad ni comprometer la disponibilidad de nutrientes. Por otro lado, es importante mencionar que se observó una moderada correlación entre la CE y el PSI del suelo, lo cual sugiere que los sitios en los que hubo aumentos en el PSI también los hubo en la CE de la solución del suelo (Cumplimiento objetivo e hipótesis D para las propiedades quimicas).

Respecto al contenido de nutrientes analizados, no hubo evidencia que muestren cambios en la concentración de PO^{4+} y NO_3^- en ambas profundidades por efectos del riego. Sin

embargo, se halló que existe una alta correlación entre la CEs y la concentración de NO^{3-} en ambas profundidades, siendo mayor en la de 0-20 cm. (Cumplimiento objetivo e hipótesis D para las propiedades quimicas)

Sobre las propiedades físicas evaluadas; en el análisis textural se halló que los suelos bajo R tienen mayor proporción de arenas y menor de arcillas respecto a S. Esto puede deberse a la propia variablidad espacial de la propiedad o a error de laboratorio por fraccionamiento granulométrico de las arenas y no combustión de materia organica. En el contenido hídrico no se observaron diferencias entre tratamientos, salvo en N19 probablemente debido a la cercanía del sector secano al camino rural más expuesto, el cual manifestó menor humedad que su par en R. En la Dap se observó una leve tendencia de aumento bajo R, solo siendo significativo en N17. En el resto no se reportaron diferencias significativas entre los tratamientos. Los resultados de las variables físicas estudiadas fueron coherentes con antecedentes de la región y característicos del tipo de suelo y manejo, pero no evidencian cambios significativos por efecto del riego complementario, al menos, en esta escala de estudio. (Cumplimiento parcial objetivo e hipótesis D para las propiedades físicas)

Entre las propiedades físicas, el análisis de correlaciones mostró que los sitios con buen drenaje fueron los que tenían el más alto DMP y menor Dap. Estos resultados son los esperados ya que mayores valores DMP reflejan una mejor EA y junto con menores valores Dap indicarían una mejor calidad física de esos suelos que se puede manifestar con una mayor permeabilidad (Ks). Por otro lado, también, se reportó una asociación positiva entre la EA y la Rp_{cor} de los primeros 15 cm. Esta relación se esperaba que fuera al revés, sin embargo, ambas variables indican distintos mecanismos de degradación física, la EA se encuentra más relacionado con el impacto de la lluvia en los agregados y la Rp a la resistencia mecánica a la penetración de los primeros centímetros que puede verse afectada por una desnificación subsuperficial.

El aumento en los indicadores de sodificación debería ocasionar dispersión de las arcillas y en consecuencia pérdida de calidad física, lo que podría traducirse por ejemplo en disminución de la Ks y EA junto con aumentos en la Dap y Rp. Sin embargo, no se evidenciaron cambios importantes en estas propiedades bajo riego, incluso se encontraron algunas tendencias positivas en favor del riego, como por ejemplo aumento de la EA y

disminución Rp en algunas parcelas. En este caso, el aumento en la EA se vio fuertemente influenciado por la CEs y en menor medida con la CIC del suelo, que a su vez podria estar relacionada con un posible aumento en la MO. Entonces, si bien hubo un aumento en la sodificación del suelo no se reflejó en una degradación física o al menos no se logró evidenciar en este estudio, lo cual podría explicarse con la fuerte relación entre el PSI y CE del suelo. Los aumentos en el PSI fueron acompañados por aumentos en la CE del suelo. La salinidad del suelo tiene un efecto contrario a la dispersión producida por el sodio, ya que actúa como floculante de los agregados y partículas, mejorando la estructura del suelo. Quizás estos aumentos en simultáneo expliquen porque no se evidenciaron cambios por efecto del riego complementario en las propiedades físicas estos suelos. También es posible que la escasa pluviometría de riego aplicada en cada campaña, que incluso en algunos años húmedos puede ser nula, y la capacidad regulatoria de estos suelos acompañada por las lluvias de otoño (que producen la lixiviación de las sales superficiales) condicionen cambios leves o poco significativos en las propiedades edáficas debido a esta práctica agrícola (rechazo de hipótesis y objetivo E)

3.5 BIBLIOGRAFÍA

Álvarez, C.R., Rimski Korsakov, H. y Torres Duggan M. (2016). Calidad de agua e impacto del riego complementario en la Región Pampeana. Actas del XXV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. G. Cholaky y J.M. Cisneros (compiladores). Editorial Unirio. 278 p.

Alvarez, R., Steinbach H.S., De Paepe J. (2021). Capitulo 4. Nitrógeno. Fertilidad de suelos y fertilización de la Region Pampeana (pp 97-152). Editorial Facultad de Agronomía. Universidad de Buenos Aires

Andriulo, A; ML Galetto; C Ferreira; G Cordone & C Sasal (1998). Efecto de 11 Años de riego complementario sobre un Argiudol típico Pampeano. Ciencia del Suelo 16: 125-127.

Aparicio, V. C., Barbacone, A., & Costa, J. L. (2014). Efecto de la calidad de agua para riego complementario sobre algunas propiedades químicas edáficas. Ciencia del suelo, 32(1).

Ayers, R.S. y D.W. Westcot (1985). Water quality for agriculture. FAO, Irrigation and drainage, Paper 29 rev. 1, Roma. 174 pp.

Bagarello, V., Iovino, M., Palazzolo, E., Panno, M., & Reynolds, W. D. (2006). Field and laboratory approaches for determining sodicity effects on saturated soil hydraulic conductivity. Geoderma, 130(1-2), 1-13.

Bengough, AG; BM McKenzie; PD Hallett & TA Valentine. 2011. Root elongation, water stress, and mechanical impedance: a review of limiting stresses and beneficial root tip traits. J. Exper. Bot. 62: 59–68. https://doi.org/10.1093/jxb/erq350

Ben-Hur, M., Yolcu, G., Uysal., Lado, M., & Paz, A. (2009). Soil structure changes: aggregate size and soil textura effects on hydraulic conductivity under different saline and sodic conditions. Soil Research, 47(7), 688-696.

Cabria, F. N., & Culot, J. (2000). Efectos de la labranza convencional sobre la sortividad y la conductividad hidráulica saturada en Udoles del sureste de la provincia de Buenos Aires. Ciencia del suelo, 18, 1-8.

Camilión de Hurtado, M. C. (1984). Relación entre la composición mineralógica y la capacidad de intercambio catiónico de suelos de la llanura pampeana (Tesis doctoral, Universidad Nacional de La Plata).

Caselles, J, M,, M.DF.Pérez Murcia, R.M. Herrero (1996). Análisis y Calidad del agua de riego Departamento de Química, E.U. de Ingeniería Técnica Agrícola de Orihuela Univ. Pol. Valencia, SPUPV-96.113 219p.

Cass, A., and Sumner, M. E. (1982). Soil pore structural stability and irrigation water quality: 11. Sodiumstability data. Soil Science Society of America Journal 46, 507-12.

Castiglioni, M. G., & Bianco, T. R. (2021). Variación temporal y espacial de la resistencia a la penetración en un lote bajo siembra directa. Ciencia del Suelo, 39(1), 12-19.

Castiglion, M. G., Behrends Kraemer, F., & Marquez Molina, J. J. (2018). Conductividad hidráulica saturada determinada por distintos procedimientos en suelos con alta humedad inicial. Ciencia del suelo, 36(2), 158-169.

Castiglioni, M., Wilson, M., Gonzalez, A., Sasal, C., & Oszust, J. (2013). Distribución espacial de la humedad edáfica y conductividad hidráulica saturada superficiales en un lote bajo siembra directa. Jornadas de investigación en la zona no saturada del suelo.

Chenu, C., Le Bissonnais, Y. y Arrouays, D. (2000). Influencia de la materia orgánica en la humectabilidad de las arcillas y la estabilidad de los agregados del suelo. Soil Science Society of America Journal, 64 (4), 1479-1486.

Conti, M. E., & Giuffré, L. (2014). Edafología: bases y aplicaciones ambientales argentinas (No. 631.4982). Editorial Facultad de Agronomía, UBA.

Cosentino, D. J., & Pecorari, C. (2002). Limos de baja densidad: impacto sobre el comportamiento físico de los suelos de la región pampeana. Ciencia del suelo, 20(1), 9-16.

Costa, J. L., & Aparicio, V. (1999). Efecto de la calidad del agua sobre las propiedades químicas y físicas de los suelos bajo riego suplementario en el sud-este de la provincia de Buenos Aires en la República Argentina. In XIV Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo, Pucón, Chile (pp. 8-12).

Del Barrio, R. A. (1984). Infiltración de agua en suelos de la Región Pampeana. Rev. Facultad de Agronomía, 5(3), 183-191.

Di Renzo, J. A., Casanoves, F., Balzarini, M. G., González, L., Tablado, M., & Robledo, C. (2011). InfoStatversión 2011e. Universidad Nacional de Córdoba.

FAO (2015). Estudio del Potencial de ampliación del riego en Argentina. UTF/ARG/017/ARG Desarrollo Institucional para la Inversión. FAO, MAGyP. ISBN 978-92-5-308995-6

Gabioud, E. A., Wilson, M. G., & Sasal, M. C. (2011). Análisis de la estabilidad de agregados por el método de Le Bissonnais en tres órdenes de suelos. Ciencia del suelo, 29(2), 129-139.

Gee, G.W., and D. Or. (2002). Particle-size analysis. p. 255—293. En: Methods of soil analysis. Part 4. J.H. Dane y G.C. Topp (eds.). SSSA Book Series No. 5. SSSA, Madison.

Génova, L. J. (1993). Estudio de la degradación de suelos bajo riego complementario de cultivos extensivos con aguas subterráneas del aquífero pampeano en el norte de Buenos Aires. In XIV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Mendoza, Argentina (pp. 25-29).

Génova, L. (2003). Resistencia y resiliencia de suelos pampeanos a la degradación salina y sódica, disturbados por riego complementario. Revista Facultad de Agronomía, 23, 2-3.

Génova, L. (2006). Sustentabilidad de agroecosistemas bajo riego complementario en la Pampa Húmeda Argentina. Cadernos de Agroecologia, 1(1).

Génova, L. (2007). Resiliencia a la degradación salina y sódica de algunos suelos pampeanos, regados complementariamente con aguas subterráneas bicarbonatadas sódicas. Tesis doctoral. FCAyF, UNLP. La Plata.

Génova, L. (2010). Sustentabilidad de agroecosistemas pampeanos argentinos regados complementariamente. Tomo II. Cap. Agrohidrología. pp 605-612. Azul, Buenos Aires, Argentina. ISBN 978-987-543-392-2.

Génova, L. (2012). Calidad del agua subterránea para riego complementario en la Pampa Húmeda argentina. Rev. Fac. de Agronomía Vol 110 (2): 63-81. La Plata.

Génova, L. J. (2013). Comparación de tres clasificaciones de calidad de aguas para riego complementario en el Norte de la provincia de Buenos Aires. In VIII Congreso Argentino de Hidrogeología y VI Seminario Latinoamericano sobre Termas Actuales de la Hidrología Subterránea (La Plata, 17 al 20 de septiembre de 2013).

Ghiberto, P. J., Marano, R. P., Pilatti, M. A., & Felli, O. M. (2002). Riego suplementario con aguas bicarbonatadas sódicas en Molisoles de Santa Fe. Estudio de caso: Degradación física en un Argiudol en el Centro-E santafesino. En Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo (Vol. 18).

Ghiberto, P. J., Pilatti, M. A., Imhoff, S., & De Orellana, J. A. (2007). Hydraulic conductivity of Molisolls irrigated with sodic-bicarbonated waters in Santa Fe (Argentine). agricultural water management, 88(1-3), 192-200.

Giubergia, Juan Pablo (2013a) Efectos del riego complementario sobre propiedades del suelo en sistemas de producción con siembra directa. Tesis Magister Cs. Suelo. Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires.

Giubergia, J. P., Martellotto, E., & Lavado, R. S. (2013b). Complementary irrigation and direct drilling have little effect on soil organic carbon content in semiarid Argentina. Soil and Tillage Research, 134, 147-152.

Hillel, D. (1998). Environmental soil physics: Fundamentals, applications, and environmental considerations. Elsevier.

INTA (1999). Recomendaciones para la utilización de aguas para riego en función de su calidad, síntesis de los trabajos realizados en las unidades del INTA-IPG. Seminario de capacitación. Impacto ambiental del riego complementario. Pergamino, Argentina. 87 p.

Irurtia, CB & R Mon (1998). Cambios en las propiedades físicas y químicas de los suelos de la región pampeana después de 5 años de riego suplementario. Actas XVI Congreso Argentino de la Ciencia del suelo. Villa Carlos Paz, Mayo 1998: 241- 242.

Jury, W. A. (1986). Spatial variability of soil properties. Vadose Zone Modeling of Organic Pollutants. Lewis Publishers, Inc., Chelsea Michigan. 1986. p 245-269, 7 tab, 60 ref.

Klute, A., & Dirksen, C. (1986). Hydraulic conductivity and diffusivity: Laboratory methods. Methods of Soil Analysis: Part 1 Physical and Mineralogical Methods, 5, 687-734.

Knapp, K. C., & Schwabe, K. A. (2008). Spatial dynamics of water and nitrogen management in irrigated agriculture. American Journal of Agricultural Economics, 90(2), 524-539.

Kostiakov AN (1932) On the dynamics of the coefficient of water percolation in soils and the necessity of study in git from the dynamic point of view for the purposes of amelio ration. Trans Sixth Comm Int Soc SoilSci 1:7–21

Kraemer, F. B. (2015). Influencia de la granulometría y la mineralogía en el comportamiento hidro-físico y estructural en suelos con distinta intensidad y secuencia de cultivos bajo siembra directa. Universidad de Buenos Aires.

Le Bissonnais, Y. (1996). Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodability. I. Theory and methodology. European J. Soil Sci. 47: 425-437.

Lewis M (1937) Therateofinfiltrationofwater in irrigation-practice. Eos Trans Am GeophysUnion 18:361–368

Losinno, B. N., Heredia, O. S., Sainato, C. M., Giuffré, L., & Galindo, G. (2002). Impacto potencial del riego con agua subterránea sobre los suelos en la cuenca del arroyo Pergamino, Provincia de Buenos Aires, Argentina. Ecología austral, 12(1), 055-063.

Marano, R., Pilatti, M., & Orellana, J. (1999). Estudio del efecto de la calidad del agua subterránea para riego, en el centro de Santa Fe, sobre las propiedades del suelo mediante la simulación física. Ed. Trineo, A. Hidrología Subterránea. Serie de correlación geológica, 13, 89-90p.

Martínez, D., Landini, A., Soza, E., Sainato, C., & Heredia, O. S. (2011). Efecto del pisoteo animal sobre las propiedades de un suelo. Parte II: infiltración y conductividad hidráulica saturada. ChileanJournalofAgricultural& Animal Sciences, 27(1), 15-27.

Mon, R., Irurtia, C., Fernando Botta, G., Pozzolo, O., BelloraMelcón, F., Rivero, D., y Bomben, M. (2007). Effects of supplementaryirrigationonchemical and physicalsoilproperties in therolling pampa regionof Argentina. Ciencia e investigaciónagraria, 34(3), 187-194.

Oster, J. D.; Shainberg, I. (2001) Soil responses tosodicity and salinity: challenges and opportunities. Soil Research, vol. 39, no 6, p. 1219-1224.

Page, A. L., & Keeney, D. R. (1982). Methods of soil analysis. American Society of Agronomy.

Peinemann, N., Díaz Zorita, M., Villamil, M. B., Lusarreta, H., & Grunewald, D. (1998). Consecuencias del riego complementario sobre propiedades edáficas en la llanura pampeana. Ciencia del suelo, 16(1), 39-42.

Pilatti, M. A., Imhoff, S., Ghiberto, P., & Marano, R. P. (2006). Changes in some physical properties of Mollisols induced by supplemental irrigation. Geoderma, 133(3-4), 431-443.

Pilatti, M., Marano, R., & de ORELLANA, J. (2004). Riego suplementario con aguas bicarbonatadas sódicas en Molisoles de Santa Fe. Sodificación y alcalinización. Agrochimica, 48(5-6), 233-248.

Quiroga, A. R., Fernández, R., & Álvarez, C. (2018). Análisis y evaluación de propiedades físico hídrica de los suelos. Capitulo 5: Un indicador de compactación relacionado con el agua del suelo (pp 45-49). Ediciones INTA.

Rimski-Korsakov, H., Rubio, G., & Lavado, R. S. (2004). Potential nitrate losses under different agricultural practices in the pampas region, Argentina. Agricultural Water Management, 65(2), 83-94.

Rhoades, J. D., Manteghi, N. A., Shouse, P. J., & Alves, W. J. (1989). Soil electrical conductivity and soil salinity: New formulations and calibrations. Soil Science Society of America Journal, 53(2), 433-439

Rubio, V., Pérez Bidegain, M., Beretta, A., Barolin, E., & Quincke, A. (2019). Impacto de propiedades físico-químicas en la estabilidad estructural de Molisoles. Ciencia del suelo, 37(2), 367-371.

S.M. (2006). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 22nd ed. (http://www.standardmethods.org/. Logged on in 2013).

Sainato, C. M., Galindo, G., & Heredia, O. (2006) Agua Subterránea: Exploración y utilización agropecuaria. Editorial Facultad de Agronomía. Universidad de Buenos Aires.

Steinbach, H. S., & Alvarez, R. (2007). ¿Afecta el sistema de labranza las propiedades físicas de los suelos de la Región Pampeana? Informaciones Agronomicas No. 33.

Sumner, M. E. (1993). Sodicsoils-New perspectives. Soil Research, 31(6), 683-750.

Taboada, M. A., & Lavado, R. S. (2009). Alteraciones de la fertilidad de los suelos: El halomorfismo, la acidez, el hidromorfismo y las inundaciones (pp. 103-127). Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires.

Thorne, D.W. y H.B. Peterson (1954). Irrigated soils. London: Constable and Company. Wilcox, L.V. 1960. Boron injury to plants. U. S.D.A Inf. Bull. 211, 7 pp.

Tisdall, J.M. y J.M. Oades (1982). Organic matter and water-stable aggregates in soils. J. Soil Sci. 62: 141–163.

Torres Duggan, M., Alvarez, C. R., & Rimski-Korsakov, H. (2017). Evaluación de la calidad del agua y del suelo regado en forma complementaria en la región pampeana argentina. Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica, 25(14), 23.

Torres Duggan, M., Álvarez, C. R., Taboada, M. A., Celesti, T., Vignarolli, F., & D'ambrosio, D. (2012). Riego complementario en un Argiudol típico de la Pampa Ondulada argentina bajo siembra directa: efectos sobre algunas propiedades químicas y físicas del suelo. Ciencia del suelo, 30(2), 201-207.

Tschapek, M., (1966). El agua en el suelo. 2a. ed. Madrid. España, 517 p.

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, la Plata, 106(1), 57-67.

Vázquez, M., Millán, G., & Gelati, P. (2008). Simulación del efecto del riego complementario en un suelo udipsament típico. Ciencia del suelo, 26(2).

Wang, Z. H., & Li, S. X. (2019). Nitrate N loss by leaching and surface runoff in agricultural land: A global issue (a review). Advances in agronomy, 156, 159-217.

Wyckers, A., & Génova, L. (1987). Evaluación del efecto del riego complementario en el cultivo de maíz con aguas bicarbonatadas sódicas en la región típica maicera. Trabajo de Intensificación. Fac. de Agronomía UBA.

CAPITULO 4.

CONCLUSIONES GENERALES

Este trabajo se propuso analizar la eficiencia de sensores geofísicos proximales para la detección de la variabilidad espacial en las propiedades intrinsecas del suelo (capitulo II) y evaluar los cambios producidos por el riego complementario en algunas propiedades edáficas en un establecimiento agrícola en la localidad de Suipacha, Provincia de Buenos Aires (Capitulo III).

Para la utilización de los sensores proximales se trabajó con un método electromagnético en la mayor parte del estudio (EMI) pero también se implementaron, en algunas parcelas, métodos de contacto (resistivímetro y TDR). Estos sensores determinaron la conductividad eléctrica aparente del suelo (CEap) y el contenido hídrico volumétrico (HV_{TDR}) a campo de manera rápida, inmediata y sin costos de procesamiento. En primer lugar, se determinó el diseño de exploratorio de la CEap apropiado para estudiar las propiedades físico-químicas del suelo en suelos de lotes agricolas bajo riego complementario (**objetivo e hipótesis A**). De esta manera se evaluó el desempeño para dos diseños distintos: EMI_{EH} que implicó determinaciones puntuales (medición manual en el sitio) con dipolo en orientación horizontal y en parcelas que contenían dos zonas contrastantes (con riego (R) y sin riego (S) y EMI_{CV} en donde las determinaciones fueron tomadas de manera continua durante el traslado en una transecta, con el dipolo en orientación vertical en parcelas separadas bajo riego y sin riego. Los análisis de relaciones por categoría de CEap y correlaciones punto a punto en cada parcela mostraron un mejor desempeño en el diseño de medición bajo EMI_{EH} . En el análisis por categoría de CEap, las zonas con categorías extremas (baja vs alta) fueron significativamente distintas para las variables edáficas relacionadas con los procesos de salinización y sodificación (ver Tabla 8). También en las correlaciones punto a punto, se obtuvieron coeficientes Pearson de moderados a altos entre las propiedades edáficas de interés y la CEap (Tabla 9). De manera contraria, en EMI_{CV} no hubo diferencias significativas en el análisis por categoría ni punto a punto (Tabla 7 y 9). Inclusive las tendencias, en algunas parcelas son inversas a lo esperado y reportado en EMI_{EH} .

Los resultados del párrafo anterior, que evaluaron el desempeño del diseño, también evidencian, en parte, la relación entre las propiedades edáficas y la CEap **(Objetivo e Hipotesis C**). Como se mencionó, las relaciones más robustas (que también son de particular interés para este trabajo) fueron las que se encuentran asociadas a posibles

efectos del riego complementario en la química del suelo. Para todos los datos relevados en el estudio, se obtuvieron correlaciones positivas y significativas entre la CEap y la CEs, pH y PSI. Los mejores ajustes se obtuvieron con el conjunto de datos provenientes de las parcelas exploradas con EMI_{EH} (Tabla 11). Sobre las propiedades físicas estudiadas no se encontraron buenas relaciones a escala de parcela, aunque nuevamente considerando los datos provenientes de EMI_{EH} se hallaron correlaciones bajas con la textura y con la Dap (ver tabla 11). Quizas el nivel de variabilidad espacial de estas propiedades dentro de cada parcela no sea suficiente para determinar cambios importantes en la CEap como si lo fue la química del suelo.

Mediante el sensor TDR se monitoreó la humedad volumétrica HV_{TDR} en todas las parcelas permitiendo caracterizar el contenido hídrico. Esto facilitó la representación espacial de esta propiedad (mapeo) y la identificación de regiones de alta, media y baja humedad para cada parcela. Así mismo, la HV_{TDR} obtuvo ajustes positivos y significativos con la CEap en las parcelas medidas bajo EMI_{EH} (Figura 11). Estos resultados indican que la CEap del suelo se encuentra relacionada con el contenido hídrico, aunque en menor medida que con la salinidad, lo cual era esperable ya que se intento trabajar bajo condiciones relativamente constantes de humedad en cada exploracion.

Por otro lado, se propuso elaborar mapas de la CEap con el fin de evaluar si; contrastes en la distribución espacial de esta propiedad responden al uso del riego complementario **(objetivo e hipótesis B).** En el diseño EMI_{CV} las parcelas exploradas no mostraron patrones claros en la distribución de la CEap, lo cual dificultó establecer relaciones con el uso del riego (Figura 12). Sin embargo, en dos parcelas relevadas con EMI_{EH} se pudo observar cómo la distribución de la CEap responde al perfil de riego, manifestándose con zonas de alta CEap en el área regada. A su vez, estas zonas también coicidieron con los valores mas elevados en la CEs, PSI y pH.

Por todo lo anterior se concluye que el monitoreo de la CEap en suelos regados con el sensor electromagnético EMP400 es un método eficaz, rápido, de bajo costo y un buen predictor de variables químicas relacionadas con la salinización del suelo como el pH, CEs y PSI y en menor medida lo es para el contenido hídrico volumétrico y la densidad aparente.

En segundo lugar, se propuso evaluar las propiedades fisico químicas en suelos bajo riego complementario. Se encontraron cambios importantantes en las propiedades químicas relacionadas con la salinización-sodificación. Los valores en las variables pH, PSI, contenido de Na, y CEs fueron mas altos en R en cada parcela estudiada y para todo el establecimiento (Figura 20). Los aumentos más importantes ocurrieron principalmente en las variables el pH y en el PSI en las profundidades de estudiadas. Sin embargo, en las propiedades físicas relevadas, si bien, en algunas parcelas se evidenciaron cambios entre R y S, no fue significativo en el análisis apareado que considera todas las parcelas evaluadas. (**objetivo e hipótesis D**).

Por otro lado, se establecieron relaciones entre las propiedades estudiadas con el fin de contexturalizar los cambios obtenidos bajo riego (**objetivo e hipótesis E**). Se obtuvo que, las variables asociadas con la sodificación (contenido de Na, PSI y pH) se encuentran fuertemente correlacionadas con la salinidad, es decir, que los sitios que mostraron mayor concentración de sodio también tenían altos valores la CEs (Figura 20 y 21). Este resultado es importante ya que el efecto dispersante del sodio podría ser contrarrestado por el efecto floculante de la salinidad y de esta manera, asegurar la calidad física de estos suelos. En este sentido, se encontró una fuerte relación entre la EA y la CEs, los sitios que mayor EA reportaron tuvieron altos valores de CEs (ver figura 29). Quizás esto explique que no se hayan reportados cambios significativos en las propiedades físicas estudiadas. Sin embargo, también se hallaron resultados que muestran que el sodio impacta en la estructura del suelo; la Rp se incremento ante aumentos en la concentración de Na+ y la Ks disminuyo abruptamente (para valores promedio por tratamiento y parcela, ver figura 28 y 31).

En conclusión, se encontraron aumentos significativos en el pH, CEs y PSI del suelo por efecto del riego complementario. A su vez, se vuelve a mencionar que estas propiedades químicas son las que mejor se relacionaron con la CEap, por ende, la importancia de esta medición para monitorear los suelos regados. Sin embargo, los cambios en las propiedades físicas no fueron claros en este nivel de uso (baja lámina de riego aplicada al año), incluso en algunas parcelas se obtuvieron mejores índices (EA, Tib, Rp) bajo riego. Es factible pensar que estos resultados ambiguos pueden deberse al aumento conjunto del sodio y la salinidad y un posible aumento en el CO superficial debido a la mayor productividad del cultivo (evidenciado por otros autores). La salinidad y el CO juegan un rol fundamental en la agregación del suelo y por ende

en su estructura física. En virtud de lo anterior, se sugiere que se deberá estudiar con mayor profundidad estas posibles causas juntamente con unificar metodología y aumentar el número de réplicas de las variables físicas indicadoras de degradación salino-sódica para lograr evidenciar si existe una pérdida de calidad física en los suelos regados.