



FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS
UNIVERSIDAD NACIONAL DEL LITORAL
SANTA FE, ARGENTINA

Tesis para optar por el grado académico de:
Magister Scientiae en Cultivos Intensivos

Rehabilitación de suelos con impedimentos físicos de uso hortícola degradados por riego con aguas bicarbonatadas sódicas

Alumno: Ing. Agr. Alberto Fabio Muguero

Director: MSc. Ing. Hid. Roberto Paulo Marano

Esperanza, 2013

**Rehabilitación de suelos con impedimentos físicos de uso hortícola
degradados por riego con aguas bicarbonatadas sódicas ¹**

Ing. Agr. Alberto Fabio Muguero

Director: MSc. Ing. Hid. Roberto Paulo Marano

Comité Asesor:

¹Proyecto de Tesis financiado por INTA

AGRADECIMIENTOS

Deseo expresar mi agradecimiento:

- ❖ Al INTA, Institución donde aprendí el mundo de la investigación y extensión, a quién agradezco mi formación profesional.
- ❖ A la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional del Litoral y sus docentes, por el apoyo brindado en todo momento durante el cursado de la Maestría.
- ❖ Un reconocimiento especial a mi director de tesis, Roberto Paulo Marano quien con sus conocimientos me guio y acompañó en todo momento y supo enseñarme lo importante de la investigación.
- ❖ Al Ing. Agr. Cristian Álvarez, mi asesor de tesis, quien supo orientarme en todo momento, dedicando mucho tiempo, esfuerzo y a quien le debo que este trabajo tenga un buen fin.
- ❖ A los Ing. Agr. Rodolfo Grasso, Carlos Pechin, Ramiro Bagnato, Walter Ascencio y Juan Carlos Hernández, excelentes compañeros de trabajo, responsables del seguimiento de algunas de los experimentos de campo.
- ❖ A mi hijo Pedro quien se vio privado de muchas horas de juego.
- ❖ Y finalmente, a mi padres, que siempre están conmigo y me enseñaron a ser una persona de bien.

INDICE GENERAL

INDICE GENERAL	I
INDICE TEMÁTICO	II
ÍNDICE DE TABLAS	IV
ÍNDICE DE FIGURAS	VII
ABREVIATURAS	IX
RESUMEN	XI

INDICE TEMÁTICO

1	INTRODUCCIÓN.....	1
1.1	Ambiente	1
1.1.1	Descripción general del área de estudio en la Provincia de La Pampa	1
1.1.2	Caracterización climática y de suelo	1
1.1.3	Balace hídrico	4
1.1.4	Heladas.....	6
1.2	Recursos Hídricos	7
1.2.1	Los acuíferos y su utilización en el riego.....	9
1.2.2	pH y alcalinidad.....	10
1.2.3	Salinidad	11
1.2.4	Sodicidad	13
1.2.5	Efecto de toxicidad.....	15
1.2.6	Efecto osmótico.....	16
1.2.7	Criterios de clasificación de aguas vigentes	17
1.3	Suelo	17
1.3.1	Clasificación de suelos.....	18
1.3.2	Remediación	19
1.3.3	Infiltración.....	20
1.3.4	Tipos de enmienda.....	22
1.4	Cultivo	22
1.4.1	Clasificación botánica	23
1.4.2	Variedades botánicas.....	23
1.4.3	Morfología	24
1.4.4	Fisiología.....	24
1.4.5	Condiciones agroecológicas	25
1.4.6	Métodos de riego y prácticas de recuperación de suelos	27
1.4.7	Manejo de la salinidad mediante la técnica de riego por goteo.....	28
2	HIPÓTESIS.....	30
3	OBJETIVO GENERAL.....	30
3.1	Objetivos específicos.....	30
4	MATERIALES y METODOS	30
4.1	Mediciones meteorológicas	31
4.2	Suelo	31
4.3	Agua.....	32
4.4	Preparación del terreno	32
4.5	Manejo de riego.....	32
4.6	Tratamientos	34
4.6.1	Mediciones en cultivo y suelo	35
4.7	Diseño Estadístico.....	36

5 RESULTADOS y DISCUSIÓN.....	37
5.1 Evolución de Temperaturas media y la evapotranspiración años 2010 y 2011	37
5.2 Manejo del riego.....	40
5.3 Análisis de la productividad	41
5.4 Evolución de los túneles.....	44
5.5 Análisis de variables de suelo	47
5.5.1 Salinidad y pH.....	47
5.5.2 Na, pH, PSI y CIC	50
5.5.2.1 Tratamiento T0 (Testigo)	50
5.5.2.2 Tratamiento T2 (Enmienda+ Drenaje)	52
5.5.2.3 Tratamiento T1 (Enmienda).....	53
5.5.2.4 Tratamiento T3 (Drenaje)	56
5.5.3 Análisis de los túneles (año)	57
5.5.3.1 Análisis de las profundidades	58
5.5.3.2 Análisis del Sodio	58
5.5.3.3 Propiedades Físicas: densidad aparente (DA) y contenido hídrico variable en el tiempo	60
5.5.3.4 Análisis del pH y CE	62
6 CONCLUSIONES	65
7 REFERENCIAS	66
8 ANEXO	76

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Precipitaciones mensuales y estacionales correspondientes al período 1961-2011 para la localidad de Caleufú. Estación meteorológica de INTA Anguil.	5
Tabla 2: Balance hídrico mensual climático de Thornthwaite (1948). Caleufú - La Pampa.	6
Tabla 3: Balance hídrico mensual climático de Thornthwaite (1948), modificado por Penman. Caleufú - La Pampa.	6
Tabla 4: Fechas medias y desvío estándar de primeras y últimas heladas, temperatura mínima media y absoluta a 1,5 m y 0,05 m en el Este de la provincia de La Pampa (período 1973-1998). Datos de la estación meteorológica del INTA Anguil.	7
Tabla 5: Clasificación del agua de riego	12
Tabla 6: Concentración de las principales sales presentes en el agua de riego y su correspondiente CE.	12
Tabla 7: Valores de CE (dS m^{-1}) de referencia para diferentes cultivos hortícolas	12
Tabla 8: Grado de tolerancia de algunos cultivos a las sales, según el rendimiento esperado (en % de la cosecha máxima).....	13
Tabla 9: Valores máximos y óptimos de concentración de sodio en agua ($\text{cmmol}_c \text{L}^{-1}$) para los diferentes cultivos hortícolas.....	14
Tabla 10: Sensibilidad de cultivos al porcentaje de sodio de intercambio (PSI, %).....	15
Tabla 11: Concentración de iones que pueden causar problemas en los cultivos hortícolas	15
Tabla 12: Aguas aptas para riego según valores de Carbonato de sodio residual (CSR) los valores de CSR están expresados en $\text{cmmol}_c \text{L}^{-1}$	17
Tabla 13: Efecto de la calidad de agua (CE y RAS) sobre el movimiento de agua en el suelo (infiltración) y toxicidad específica.....	21
Tabla 14: Tolerancia a la salinidad, expresada en CE (dS m^{-1}) del agua de riego en el cultivo de lechuga en relación con su rendimiento potencial.	27
Tabla 15: Valores de pH, conductividad eléctrica del extracto de saturación (CE), Porcentaje de sodio intercambiable (PSI), porcentaje de materia orgánica (MO) e Índice de fertilidad (IMO) para un suelo Haplustol Éntico con diferentes manejos.....	31
Tabla 16: Composición química del agua utilizada para de riego.....	32
Tabla 17: Detalle de las fechas de los distintos ciclos de cultivos.	35
Tabla 18: Técnicas analíticas empleadas en las diferentes determinaciones.....	36
Tabla 19: Evapotranspiración: ET_o , evapotranspiración de referencia (mm); ET_c , evapotranspiración del cultivo (mm); DNR, necesidad de riego neta (mm); DBR, necesidad de riego bruta (mm); RL: requerimientos de lixiviación (mm) RL: requerimientos de lixiviación (%) N°	

de Riegos: número de riegos total en el ciclo completo del cultivo. IR: intervalo de riegos (días), (A-M-J) meses de abril, mayo y junio, (A-S-O) meses de agosto, septiembre y octubre, (E) Mes de enero, (A-M-J) meses de mayo, junio y julio. 41

Tabla 20: Valores medios de rendimiento (kg m^{-2}) y peso individual de plantas (kg pl^{-1}) de los tratamientos Testigo (T0), Enmienda (T1), Enmienda+ Drenaje (T2) y Drenaje (T3); con túneles de 2 años (B1) y 4 años (B2); para cuatro ciclos de cultivo. 43

Tabla 21: Diferencias de Productividad (P) entre túneles de 2 años (B1) y 4 años (B2) para cada ciclo de cultivo y entre ciclos para cada túnel. 45

Tabla 22: Valores medios de conductividad eléctrica del suelo (CE: dS m^{-1}) y pH para cuatro ciclos de cultivo de los tratamientos Testigo (T0), Enmienda (T1), Enmienda+ Drenaje (T2) y Drenaje (T3); en los túneles de 2 años (B1) y 4 años (B2); para los primeros 0,20 m del perfil de suelo. 48

Tabla 23: Granulometría del suelo en los diferentes tratamientos evaluados..... 50

Tabla 24: Concentraciones de sodio en el suelo ($\text{Na}^+ \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$), pH, porcentaje de sodio intercambiable (PSI, %) y capacidad de intercambio catiónico (CIC $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$) en el tratamiento T0 para los dos túneles en estudio en los primeros 0,20 m..... 51

Tabla 25: Capacidad de intercambio catiónico (CIC $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$), pH y porcentaje de sodio intercambiable (PSI) promedio de ambos túneles en el tratamiento T0 para diferentes profundidades de suelo hasta la presencia de tosca (0,80 m)..... 51

Tabla 26: Concentraciones de sodio ($\text{Na}^+ \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$) promedio de ambos túneles en el tratamiento T0 y T2 para diferentes profundidades de suelo hasta la presencia de tosca (0,80 m).. 52

Tabla 27: Concentraciones de sodio en el suelo ($\text{Na}^+ \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$), capacidad de intercambio catiónico (CIC $\text{meq } 100\text{gr suelo}^{-1}$), porcentaje de sodio intercambiable (PSI) y valores de pH para el tratamiento T2 en los túneles de 2 años (B1) y 4 años (B2). 52

Tabla 28: Concentraciones de sodio en el suelo ($\text{Na}^+ \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$), capacidad de intercambio catiónico (CIC $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$), y pH en el tratamiento T2 para las profundidades de suelo 0-0,80 m.. 53

Tabla 29: Concentraciones de sodio en el suelo ($\text{Na}^+ \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$) capacidad de intercambio catiónico (CIC $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$), valores de pH y porcentaje de sodio intercambiable (PSI, %) en el tratamiento T1 para los túneles de 2 años (B1) y 4 años (B2) considerando 0,20 m de espesor del suelo. 54

Tabla 30: Concentraciones de sodio en el suelo ($\text{Na}^+ \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$), capacidad de intercambio catiónico (CIC $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$), valores de pH y porcentaje de sodio intercambiable (PSI %) en el tratamiento T1 para las profundidades de suelo 0-0,80 m..... 54

Tabla 31: Concentraciones de sodio en el suelo ($\text{Na}^+ \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$), capacidad de intercambio catiónico (CIC $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$), valores de pH y porcentaje de sodio intercambiable (PSI %) en el tratamiento T3 para los túneles de 2 años (B1) y 4 años (B2) en los primeros 0,20 m del perfil de suelo. 56

Tabla 32: Concentraciones de sodio en el suelo ($\text{Na}^+ \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$), capacidad de intercambio catiónico (CIC $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$), valores de pH y porcentaje de sodio intercambiable (PSI %) en el tratamiento T3 para las profundidades de suelo 0-0,80 m..... 56

Tabla 33: Valores de pH en el suelo en los tratamientos T0 (Testigo), T1 (Enmienda), T2 (Enmienda+Drenaje) y T3 (Drenaje) para el túnel de 2 años (B1) y 4 años (B2) para el espesor de 0-0,20 m.	58
Tabla 34: Valores de pH en el suelo en los tratamientos T0 (testigo), T1 (Enmienda), T2 (Enmienda+ Drenaje) y T3 (Drenaje) en el túnel B1 para la profundidad de 0-0,20 m. En la Tabla se presenta comparaciones entre T1 y el resto de los tratamientos.	58
Tabla 35: Concentraciones de sodio en el suelo (Na^+ $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$) en los tratamientos T0 (testigo), T1 (enmienda), T2 (Enmienda+Drenaje) y T3 (drenaje) para los valores medios de túneles de 2 años (B1) y 4 años (B2) para la profundidad de 0-0,20 m.	59
Tabla 36: Concentraciones de sodio en el suelo (Na^+ $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$) en los tratamientos T1 (enmienda), T2 (Emnienda+Drenaje) y T3 (drenaje) promedios de los túneles de 2 años (B1) y 4 años (B2), para la profundidad de 0-0,20 m.....	59
Tabla 37: Concentraciones de sodio en el suelo (Na^+ $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$) en los tratamientos T0 (testigo), T1 (enmienda), T2 (enmienda + drenaje) y T3 (drenaje) para los túneles de 2 años (B1) y 4 años (B2) en la profundidad de 0,20-0,40 m.	60
Tabla 38: Valores de densidad aparente (DA) (gr cm^{-3}) y materia orgánica (MO) (%) para ambos túneles (B1, 2 años y B2, 4 años).	60
Tabla 39: Valores de pH en funcion del ciclo productivo (días) para los diferentes tuneles B1 (2 años) y B2 (4 años).	62
Tabla 40: Valores de pH en funcion del ciclo productivo (días) para los diferentes tratamientos T0(testigo),T1(Enmienda),T2 (Enmienda+Drenaje) y T3 (Drenaje).	63
Tabla 41: Valores de conductividad electrica en el suelo (dS m^{-1}) en funcion del ciclo productivo (días) para los diferentes túneles de 2 años (B1) y 4 años (B2).	63
Tabla 42: Valores de conductividad electrica en el suelo (dS m^{-1}) en funcion del ciclo productivo (días) para los diferentes tratamientos T0 (testigo), T1(Enmienda),T2 (Enmienda+Drenaje) y T3 (Drenaje).	64

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1:	Distribución espacial de las Subregiones geomorfológicas del centro-norte de la provincia de La Pampa	2
Fig. 2:	Isohietas de la región centro-norte de la provincia de La Pampa	3
Fig. 3:	Distribución espacial de los suelos de la región centro -norte de la provincia de La Pampa.	4
Fig. 4:	Ubicación del acuífero Caleufú-Conhello en la provincia de La Pampa.....	8
Fig. 5:	Profundidad y calidad del agua en el norte y este de La Pampa	9
Fig. 6:	Reducción relativa de la infiltración provocada por la salinidad y el RAS (FAO, 1987).	21
Fig. 7:	Lechuga crispera verde. Fuente: Manual de Producciones Hortícolas (Ferrato <i>et al.</i> , 2006).	24
Fig. 8:	Túnel alto con cultivo de lechuga de hoja, La Pampa. Fuente: Manual de Producciones Hortícolas (Ferrato <i>et al.</i> , 2006).....	26
Fig. 9:	Evolución de la temperatura media mensual (°C) para los años 2010 y 2011.....	37
Fig. 10:	Evolución de la evapotranspiración de referencia (ET _o) y evapotranspiración del cultivo (ET _c) de lechuga a partir de transplante, bajo condiciones de invernadero, para cada ciclo de producción del cultivo de lechuga: a, 1º ciclo; b, 2º ciclo; c, 3º ciclo, d, 4º ciclo.....	38
Fig. 11:	Evolución de la productividad (P) de los tratamientos: Testigo (T0), Enmienda (T1), Enmienda+ Drenaje (T2) y Drenaje (T3); con túneles de 2 años (B1) y 4 años (B2); para cuatro ciclos de producción.	44
Fig. 12:	Evolución de los rendimientos acumulados de lechuga para los diferentes tratamientos en función de la duración del ensayo en el túnel de 4 años de riego (B2). Letras diferentes en sentido vertical indican diferencias significativas entre tratamientos (p<0,10) según test LSD.	46
Fig. 13:	Evolución de los rendimientos acumulados de lechuga expresados en kg m ⁻² para los diferentes tratamientos en función de la duración del ensayo en el túnel de 2 años de riego (B1). Letras diferentes en sentido vertical indican diferencias significativas entre tratamientos (p<0,10) según test LSD.	46
Fig. 14:	Evolución de la conductividad eléctrica del suelo (CE) de los primeros 0,20 m de profundidad para los tratamientos Testigo (T0), Enmienda (T1), Enmienda+ Drenaje (T2) y Drenaje (T3); con túneles de 2 años (B1) y 4 años (B2); para el 1º ciclo de cultivo.	48
Fig. 15:	Evolución del pH de los primeros 0,20 m de profundidad para los tratamientos Testigo (T0), Enmienda (T1), Enmienda+ Drenaje (T2) y Drenaje (T3); con túneles de 2 años (B1) y 4 años (B2); en el 1º ciclo productivo.....	49

Fig. 16: Concentración del Ión Na ⁺ en el perfil en función de la profundidad entre el tratamiento T0 y T1 valores promedios para ambos túneles (B1 y B2). * indica diferencias significativa entre T0 y T1 (p<0,10).....	55
Fig. 17: Concentración del Ión Na ⁺ en el perfil en función de la profundidad entre el tratamiento T0 y T3, valores promedios para ambos túneles (B1 y B2).	57
Fig. 18: Contenido hídrico del suelo en función de las horas después de la infiltración de agua para los diferentes tratamientos (D2 años=drenaje de 2 años, D4 años=drenaje 4 años, E+D 2 años=enmienda más drenaje 2 años, E+D4 años=enmienda más drenaje 4 años, E 2años=enmienda 2 años, E4 años=enmienda 4 años, T2 años= testigo 2 años, T4 años= testigo 4 años).	61
Fig. 19: Evolución del pH para los diferentes túneles de 2 años (B1) y 4 años (B2) en función de los ciclos del cultivo de lechuga.	62
Fig. 20: Evolución de la conductividad eléctrica con valores medios expresados en dS m ⁻¹ para los diferentes tratamientos en función de los ciclos del cultivo de lechuga.....	65

ABREVIATURAS

A: arcilla

A+L: arcilla más limo

ARE: arena

CC: capacidad de campo

CE: conductividad eléctrica extracto de saturación

CEa: conductividad eléctrica del agua de riego

CERET: centro regional de educación tecnológica

CIC: capacidad de intercambio catiónica

CSR: carbonato de sodio residual

CUARTO CICLO: 4°

CUD: coeficiente de uniformidad de distribución.

DA: densidad aparente

DBR: dosis bruta de riego

Σ DNR: sumatoria de la dosis neta de riego

DS: espesor de suelo

DW: lámina de agua de lavado

EPR: evapotranspiración real

Σ ET0: sumatoria de la evapotranspiración de referencia

ETC: evapotranspiración del cultivo

ET0: evapotranspiración de referencia

EVP: evapotranspiración potencial

HP: caballos de fuerza

IMO: relación de fertilidad

K_0 : coeficiente único de cultivo

KH: conductividad hidráulica

LDT: polietileno larga duración térmica

MAXCEE: conductividad eléctrica del extracto de saturación del suelo que reducirá la cosecha a cero

Mg: magnesio

MO: materia orgánica

NO-SE: noroeste sureste

NRB: necesidades de riego brutas

NRN: necesidades de riego netas

N-S: norte sur

P: productividad

PIP: peso individual por planta

PMP: punto de marchitez permanente

PRIMER CICLO: 1°

PSI: porciento de sodio intercambiable

RAS: relación de adsorción de sodio

RASaj relación de adsorción de sodio ajustado.

RL: requerimiento de lixiviación

SAS: programa estadístico

SEGUNDO CICLO: 2°

STD: desviación estándar

TEMP: temperatura en C°

TERCER CICLO: 3°

RESUMEN

El exceso de sodio, carbonatos y bicarbonatos, presentes en el agua de riego, incrementa el pH, la conductividad eléctrica y el porcentaje de sodio intercambiable en el suelo y, la mayoría de las veces, afecta el crecimiento de los cultivos. La producción hortícola bajo cubierta en la provincia de La Pampa, comparada con otras actividades como por ejemplo la ganadería o la agricultura, es relativamente nueva. En este trabajo se plantearon hipótesis a consecuencia de la naturaleza química de las aguas y su manejo, teniendo como objetivo general mejorar la sustentabilidad de los productores de lechuga, recuperando tierras degradadas por riego con aguas subterráneas bicarbonatadas sódicas en suelos petrocálcicos de La Pampa. Se realizaron evaluaciones físicas y físico-químicas en los horizontes superficiales de suelos irrigados durante diferentes años con aguas subterráneas bicarbonatadas sódicas. En túneles de 2 y 4 años con riego localizado continuo (B1 y B2 respectivamente) se aplicaron los siguientes tratamientos: 1) T0, testigo sin tratar; 2) T1, 3.5 Mg ha⁻¹ de yeso agrícola de composición granulada, 3) T2, 3.5 Mg ha⁻¹ de yeso agrícola + drenaje y 4) T3, drenaje. El diseño utilizado fue factorial (2 y 4 años con sus respectivos tratamientos) y completamente aleatorizado y se utilizaron sub-muestras como unidades de medición. Se evaluaron cuatro ciclos de cultivo de lechuga (durante los meses de abril, agosto, enero y mayo,). En el cultivo se determinaron: la productividad (P), el peso individual por planta (PIP), la conductividad eléctrica (CE) y el pH del suelo en cada ciclo. También se determinaron la materia orgánica (MO), la densidad aparente (DA) y los cationes de intercambio (CIC) al comienzo y final del ciclo. En el túnel más antiguo con riego continuo todos los tratamientos, incluido el drenaje, mejoraron P en relación al T0 en los cuatro ciclos, con las mayores diferencias cuando se aplicó yeso. Por el contrario, B1 sólo tuvo respuesta productiva en el 2º ciclo para los tratamientos con aplicación de yeso, mientras que el drenaje no tuvo impacto en relación a T0. Considerando el valor acumulado de P, fue siempre estadísticamente significativo en el túnel B2, en tanto que en el túnel B1 sólo fue estadísticamente significativo hasta el 2º ciclo productivo. Estos resultados indican que el efecto de la enmienda de yeso sólo se registró hasta el 2º ciclo productivo, provocando caídas muy abruptas de P y PIP 300 días después de haber incorporado la práctica. Los valores de PSI fueron menores en las capas superficiales en los tratamientos con enmiendas, en tanto que en profundidad los valores fueron similares entre tratamientos. Integrando los resultados obtenidos se corrobora la reducción del PSI inicial en los diferentes túneles y tratamientos. En cambio, considerando pH, no se registraron diferencias significativas entre ambos factores evaluados. CE varió entre tratamientos sin comprobarse diferencias significativas entre los mismos y los años de producción ($p < 0,10$). Estos

resultados pueden estar relacionados con el índice de fertilidad (IMO, que resultó 6,6 vs 11,5 para los túneles B1 y B2 respectivamente. Las zanjas de drenaje tuvieron mayor impacto en el túnel B2 a causa de las mejores condiciones físicas del suelo y una mejor permeabilidad. Estas zanjas resultaron efectivas cuando fue necesario lavar el suelo. En el 2º y 3º ciclo la CE disminuyó abruptamente y se ubicó por debajo de aquel umbral.

Palabras clave: riego localizado, salinidad, alcalinidad, lechuga, enmienda, yeso.

ABSTRACT

The excess of sodium, carbonates and bicarbonates, which are present in irrigation water, increases the pH, the electric conductivity and the percentage of interchangeable sodium in the soil, and, most of the times, it also affects crop growth. The horticultural production in greenhouses in the province of La Pampa, compared with other activities such as farming and cattle raising, is relatively new. In this thesis work, some hypothesis originated as a consequence of the chemical nature of the water and its handling were stated, bearing as the general aim to improve sustainability for the lettuce producers through the recovering of the soils degraded by irrigation with sodium bicarbonate underground waters in the petro-calcium soils of La Pampa. Physical and physic-chemical evaluations were performed in the superficial horizons of soils irrigated during different years with underground bicarbonate sodium waters. In 2 and 4-year-old tunnels with continuous localized irrigation (B1 and B2 respectively) the following treatments were applied: 1) T0, non-treated witness; 2) T1, 3.5 Mg ha⁻¹ of granulated agricultural gypsum, 3) T2, 3.5 Mg ha⁻¹ of agricultural gypsum + drainage, and 4) T3, drainage. The factorial design was utilized (2 and 4 years with their respective treatments) and completely at random, and subsamples were employed as measuring units. Four lettuce crop cycles were evaluated (during the months of April, August, January and May). The productivity (P), the individual weigh per plant (PIP), the electric conductivity (CE) and the pH of the soil were determined for each crop cycle. The organic material (MO), the apparent density (DA) and the interchange cations (CIC) were also determined at the beginning and end of the cycle. In the tunnel with more years of continuous irrigation all the treatments, including drainage, improved P in the four cycles in relation to T0, showing higher differences when gypsum was applied. On the contrary, B1 only showed productive response in the 2nd cycle for those treatments with gypsum application, while drainage did not have an impact in relation to T0. Considering the accumulated value of P, it was always statistically significant in tunnel B2, while in B1 it was only statistically significant until the second productive cycle. These

results show that the effect achieved by the gypsum amendment was only registered until the 2nd productive cycle, provoking really abrupt drops of P and PIP 300 days after having incorporated the practice. PSI values were lower in superficial layers in treatments with amendments, while values were similar between treatments in depth. Thus, the reduction of initial PSI in the different tunnels and treatments could be corroborated. However, no significant differences were registered for the pH variable between both evaluated factors. CE varied between treatments, but no significant differences between those and the years of productions ($p < 0,10$) could be confirmed. These results can be related to fertility rates (IMO, resulting 6,6 vs. 11,5 for B1 and B2 respectively). Drainage ditches had more impact on tunnel B2 because of the better physical conditions and permeability of the soil. These ditches were effective when soil washing was needed. During the 2nd and 3rd cycle the CE decreased abruptly and was placed below that earlier threshold.

Key words: localized irrigation, salinity, alkalinity, lettuce, soil amendment, gypsum

1.1 AMBIENTE

1.1.1 Descripción general del área de estudio en la Provincia de La Pampa

La zona en estudio, comprende los departamentos Rancul, Realicó, Trenel, Conhelo, Capital, Atreucó y Guatraché, con una superficie total de **2.398.202 ha**. Esta zona se ubica en el centro-norte de la Provincia de La Pampa, limitado hacia el norte con Córdoba, extendiéndose en el sur y hacia el este limita con la provincia de Buenos Aires. La característica central que delimita esta zona es la presencia de un manto de tosca sobre el que se depositó un manto de suelo arenoso determinando, en general, un perfil poco profundo. Sin embargo, al contar con una considerable extensión en sentido N-S pone de manifiesto diferencias climáticas dentro de ella. Los sistemas productivos hacen uso, principalmente, de cultivos forrajeros implantados perennes y anuales y se complementan con una rotación de cultivos de cosecha, cuyos rendimientos presentan una gran variabilidad en función del manto de tosca (Lorda *et al.*, 2008).

1.1.2 Caracterización climática y de suelo

Esta región del este pampeano se corresponde con la denominación de **Estepa**, y desde el punto de vista agroecológico está conformada por dos grandes zonas (planicie con tosca y medanosa). La característica central de la "**Planicie con Tosca**" es la presencia de un manto de tosca (carbonato de calcio- CaCO_3) sobre el que se desarrolló paulatinamente un suelo arenoso, determinando en general, un perfil poco profundo (Inventario de los Recursos Naturales de la Provincia de la Pampa, 2004).

Desde el punto de vista geomorfológico esta gran franja presenta gran diversidad NO-SE y dentro de las principales subregiones que la conforman, el 21,5 % de la superficie pertenece a la planicie con tosca norte; el 22,9 % del área está ocupada por mesetas y valles en el SE de la región y un 15,0 % de acumulaciones arenosas en NO provincial (Departamento Rancul) (Fig. 1).

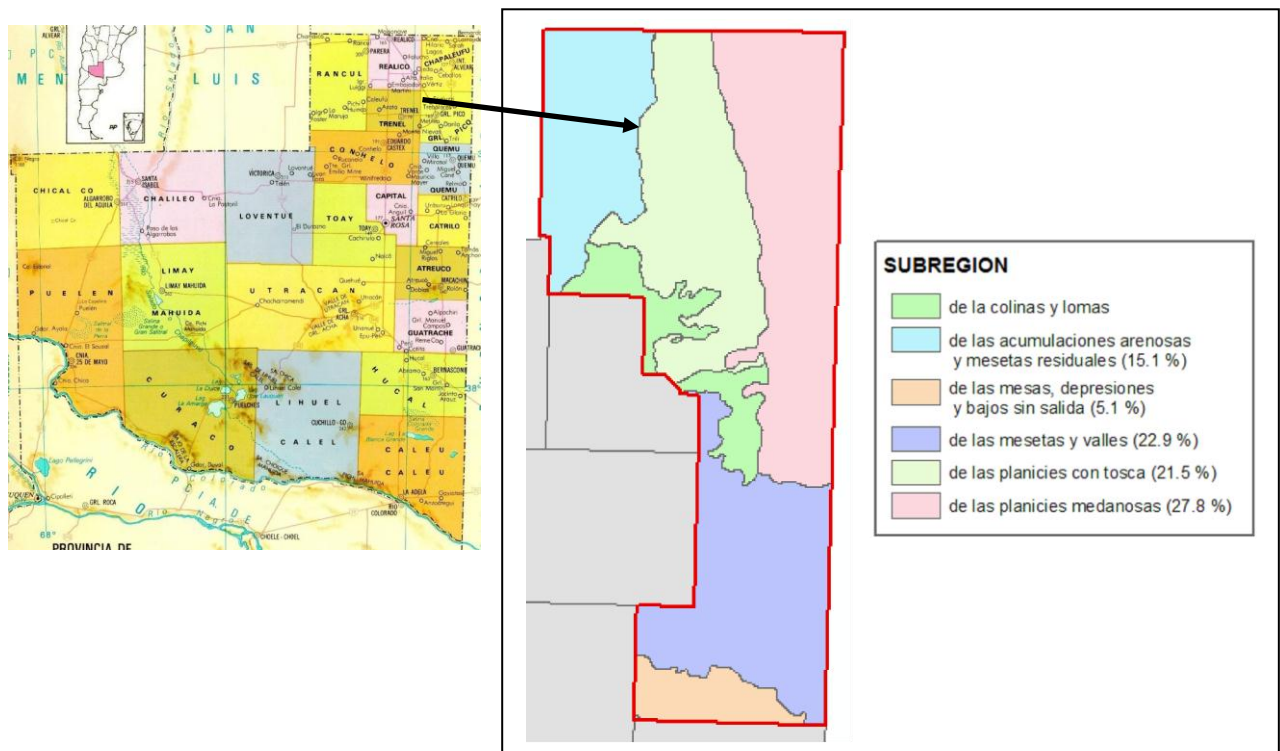


Fig. 1: Distribución espacial de las Subregiones geomorfológicas del centro-norte de la provincia de La Pampa

Fuente: Bases para el ordenamiento territorial, (Roberto & Martínez Uncal, 2012).

La zona **centro-norte** se corresponde con una planicie suavemente ondulada con lomas y depresiones, dispone de una pendiente regional y diseños de drenaje en dirección SO-NE, aunque sin vías de drenaje de importancia. Los 180 km de orientación N-S determina diferencias climática que se reflejan en que la temperatura media del mes más frío en el sur es de 10° C menos. Esta situación genera un desplazamiento en la fecha de siembra de los cultivos de verano entre 10 a 15 días. El Departamento Rancul, en el extremo NO, cuenta con perfiles de suelo de hasta 1,5 m. de profundidad y texturas franco y franco-limoso. Combina áreas desmontadas e introducidas al cultivo con el típico bosque de caldén abierto. Posee un régimen de mayor humedad relativa, un mayor período libre de heladas (200 a 220 días) facilitando la realización de cultivos de cosecha con mayor seguridad. La presencia de suelos de rápida permeabilidad y profundos, evitan anegamientos permanentes (Inventario de los Recursos Naturales de la Provincia de la Pampa, 1980).

La zona posee un régimen general ústico (Van Wambeke y Scoppa, 1976). En los balances hídricos no existen marcadas diferencias, aunque la evapotranspiración potencial es ligeramente superior en el norte por ser más elevada la temperatura (Tabla 1 y 2). Como localidades de referencia pueden mencionarse a las localidades de Alta Italia, Trenel, Eduardo Castex, Winifreda y Santa Rosa con un rango en el régimen pluviométrico de 700 a 850 mm (Fig. 2).

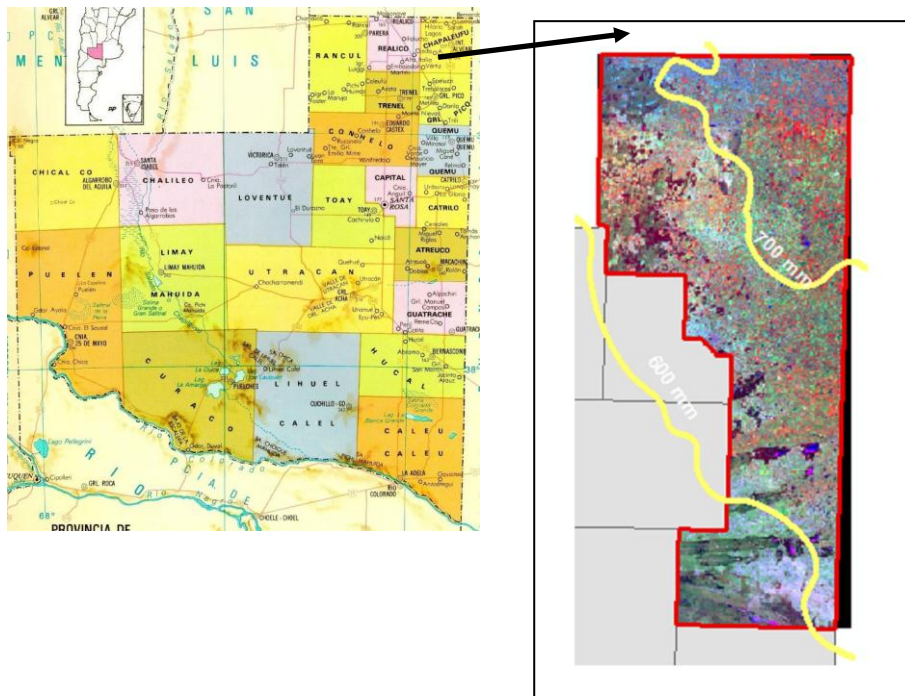


Fig. 2: Isohietas de la región centro-norte de la provincia de La Pampa
Fuente: Bases para el ordenamiento territorial, (Roberto & Martínez Uncal, 2012).

Durante el período invernal, el aumento de la velocidad y la frecuencia de los vientos, determinan épocas donde la erosión eólica puede alcanzar su mayor intensidad. El clima predominante es semiárido templado, con un régimen térmico que responde al clima continental, pero atenuado por la influencia marítima. Los vientos predominantes son de N-NO, con velocidades de mayor intensidad en los meses de primavera y verano, principalmente en diciembre y enero. El balance hidrológico medio anual, define al clima como subhúmedo-seco, con nulo o pequeño exceso de agua. En términos generales, en las estaciones de otoño-invierno, se produce una reposición de agua en el suelo, y a partir del mes de noviembre, comienza una situación deficitaria que se agudiza en los meses de enero y febrero (Inventario de los Recursos Naturales de la Provincia de la Pampa, 1980).

Aunque los suelos de la región se caracterizan por una gran heterogeneidad y evolución, a nivel de Orden predominan en la región los **Molisoles** con el 96 %, seguidos por los **Entisoles** con el 3 % y en mínima participación los **Aridisoles** 0,5 % (Fig. 3), (Caviglia *et al.*, 2010).

Geomorfológicamente está asociado a un conjunto de lenguas y planos medanosos, en los cuales se intercala, en el este, una capa de ceniza volcánica de unos pocos centímetros de espesor, acumulada por erupciones antiguas. El espesor de la arena raramente supera el metro, excepto hacia el oeste, donde localmente se desarrollan cubetas de deflación y médanos de importancia local. Estas arenas se apoyan sobre la formación Cerro Azul (Linares *et al.*, 1980), la que está compuesta en general por arenas muy finas, limosas, castañas, que suelen culminar con un encostramiento calcáreo.

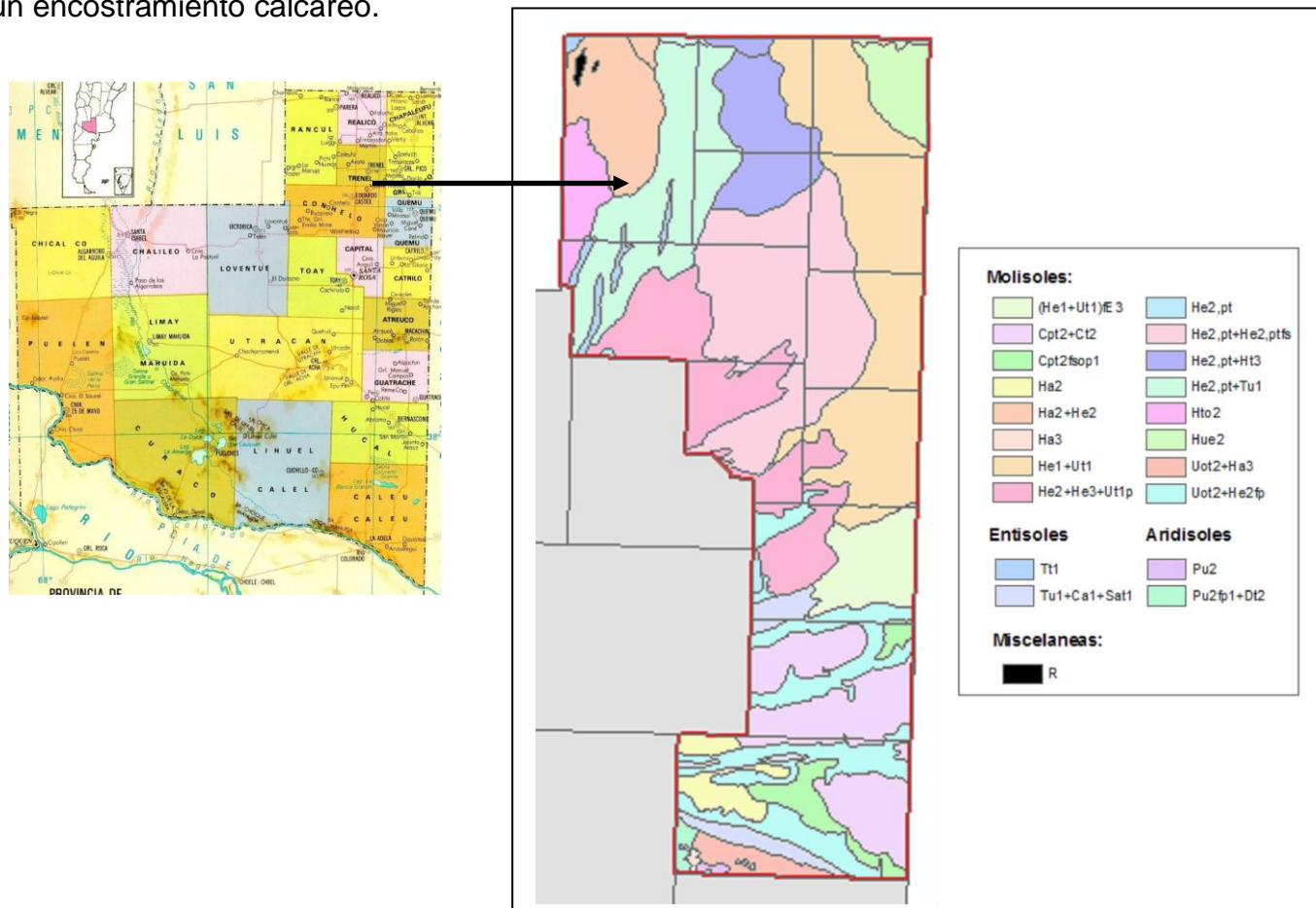


Fig. 3: Distribución espacial de los suelos de la región centro -norte de la provincia de La Pampa.

Fuente: Bases para el ordenamiento territorial, (Roberto & Martínez Uncal, 2012).

1.1.3 Balance hídrico

En la Tabla 1 se presenta la información detallada de las precipitaciones medias, desvío estándar, mínimas y máximas mensuales que se observaron entre los años 1961 y 2011.

Tabla 1: Precipitaciones mensuales y estacionales correspondientes al período 1961-2011 para la localidad de Caleufú. Estación meteorológica de INTA Anguil.

Meses	N° Obs	Media	Std	Mínima	Año	Mediana	Máxima	Año
Enero	49	95,3	44,69	17	2009	94,0	189,0	1985
Febrero	48	91,0	44,64	25	1997	80,0	231,0	1998
Marzo	50	117,3	80,18	17	2008	100,5	408,0	1999
Abril	50	67,0	50,18	0	2005	58,0	200,0	1999
Mayo	49	25,1	29,54	0	2011	13,0	132,0	1990
Junio	44	17,3	24,43	0	2009	9,0	126,0	1979
Julio	44	17,9	33,11	0	2009	7,5	189,0	1985
Agosto	45	22,4	23,11	0	2011	17,0	101,0	1976
Septiembre	48	44,1	37,62	0	1983	34,0	167,0	2001
Octubre	50	76,5	57,65	1	1988	62,5	312,0	2001
Noviembre	49	94,7	52,41	23	2010	85,0	227,0	1981
Diciembre	49	102,9	75,84	6	1993	84,0	341,0	1996
Año	35	814,1	222,93	516,0	2003	815,0	1475,0	1999

Al presentar un régimen monzónico las precipitaciones muestran la siguiente distribución semestral: 577,7 mm (74,9 %) para el semestre cálido (Octubre - Marzo) y 193,9 mm (25,1 %) para el semestre frío (Abril - Septiembre). En cuanto al orden decreciente en importancia estacional la distribución trimestral es la siguiente:

1º Verano (Diciembre + Enero + Febrero)= 289,1 mm (37,5 %)

2º Primavera (Septiembre + Octubre + Noviembre.)= 215,3 mm (27,9 %)

3º Otoño (Marzo + Abril + Mayo)= 209,4 mm (27,1 %)

4º Invierno (Junio + Julio + Agosto)= 57,7 mm (7,5 %)

En las Tablas 2 y 3 se presenta el balance hídrico mensual según método de Thornthwaite modificado para la localidad de Caleufú (Casagrande *et al.*, 2012).

Tabla 2: Balance hídrico mensual climático de Thornthwaite (1948). Caleufú - La Pampa.

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Obs.Pp	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51
Pp mm	95,3	91,0	117,3	67,0	25,1	17,3	17,9	22,4	44,1	76,5	94,7	102,9
Etp. mm	144,9	96,1	92,0	53,6	35,9	7,2	16,2	26,2	42,0	70,1	91,3	131,8
Alm.mm	85,1	83,0	108,3	121,7	115,2	115,3	117,0	114,8	116,9	123,3	126,7	109,4
Dif. mm	-24,3	-2,2	25,3	13,4	-6,5	0,1	1,7	-2,2	2,1	6,4	3,4	-17,2
Etr. mm	119,6	93,2	92,0	53,6	31,6	17,2	16,2	24,6	42,0	70,1	91,3	120,1
Def. mm	25,3	2,9	0,0	0,0	4,3	0,0	0,0	1,6	0,0	0,0	0,0	11,7
Exc. mm	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Pp: precipitaciones; Etp: evapotranspiración potencial; Alm: almacenaje; Dif: diferencia; Etr: evapotranspiración real; Def: deficiencia; Exc: exceso.

Capacidad de campo= 200,0 mm ETP media: 1980-2010. Precipitación media: 1980-2011

Tabla 3: Balance hídrico mensual climático de Thornthwaite (1948), modificado por Penman. Caleufú - La Pampa.

Obs,	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre,	Noviembre	Diciembre
Pp mm	95,3	91,0	117,3	67,0	25,1	17,3	17,9	22,4	44,1	76,5	94,7	102,9
Etp, mm	184,0	143,0	106,0	65,0	34,0	17,0	26,0	46,0	71,0	111,0	157,0	196,0
Alm,mm	2,7	2,1	13,4	15,4	14,7	15,0	14,4	12,8	11,2	9,4	6,8	4,3
Dif, mm	-1,5	-0,6	11,3	2,0	-0,7	0,3	-0,6	-1,6	-1,6	-1,8	-2,5	-2,6
Etr, mm	96,8	91,6	106,0	65,0	25,8	17,0	18,5	24,0	45,7	78,3	97,2	105,5
Def, mm	87,2	5,4	0,0	0,0	8,2	0,0	7,5	22,0	25,3	32,7	59,8	90,5
Exc, mm	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Capacidad de campo= 200,0 mm ETP media: 1980-2010; Precipitación media: 1980-2011.

1.1.4 Heladas

En la Tabla 4 se presentan las fechas medias de primera y última helada para diferentes localidades de la zona en estudio para el Este de la provincia de La Pampa (período 1973-1998).

Tabla 4: Fechas medias y desvío estándar de primeras y últimas heladas, temperatura mínima media y absoluta a 1,5 m y 0,05 m en el Este de la provincia de La Pampa (período 1973-1998). Datos de la estación meteorológica del INTA Anguil.

	1,50 m. de altura			
Localidad	Fecha Media	Fecha Media	T°C. Mínima	T°C Mínima
	1º helada	Ultima. Helada	media	absoluta
Gral. Pico	4/5 +/-17 días	22/9 +/-18 días	7,3°C	-11,4°C.
Bordenave	30/4 +/-20 días	4/10 +/-21 días	-6,7°C.	-8,5°C.
Anguil	21/4 +/-16 días	14/10 +/-18 días	-8,9°C.	-12,3°C.
Gral. Acha	1/3 +/-33 días	22/11 +/-17 días	-14,2°C.	-18,5°C.

1.2 RECURSOS HÍDRICOS

El acuífero de esta Región se denomina Caleufú- Conhello y se ubica a ambos lados de la ruta provincial 9, desde el sur de Caleufú hasta 7 km al norte de la localidad de Conhello (Miglianelli, 1985) (Fig. 4).

Desde el punto de vista hidrogeológico, constituye la roca almacén de un acuífero multicapa, la que en esta zona tiene un espesor de unos 150 m y es la que contiene al acuífero. Esta última se apoya, a su vez, en rocas pre-terciarias. El nivel estático se ubica entre los 10 y 15 m de profundidad al sur de Caleufú, mientras que en la zona de la estancia Alto Verde, se lo encuentra por lo general entre 35 y 50 m, mientras más al sur (entre Alto Verde y Conhello) está en el orden de los 80 y 90 m de profundidad. El contenido salino de las aguas varía entre 600 y 2.000 mg L⁻¹, siendo el carácter iónico bicarbonatado a bicarbonatado sulfatado sódico. Los caudales específicos en el área explotada al sur de Caleufú, oscilan entre 0,2 y 1,0 m³ h⁻¹ m⁻¹. Con el grado de conocimiento alcanzado de esta zona, las reservas reguladoras se estimaron en 1 x 10⁶ m³ año⁻¹ (Giai & Tullio, 1990).

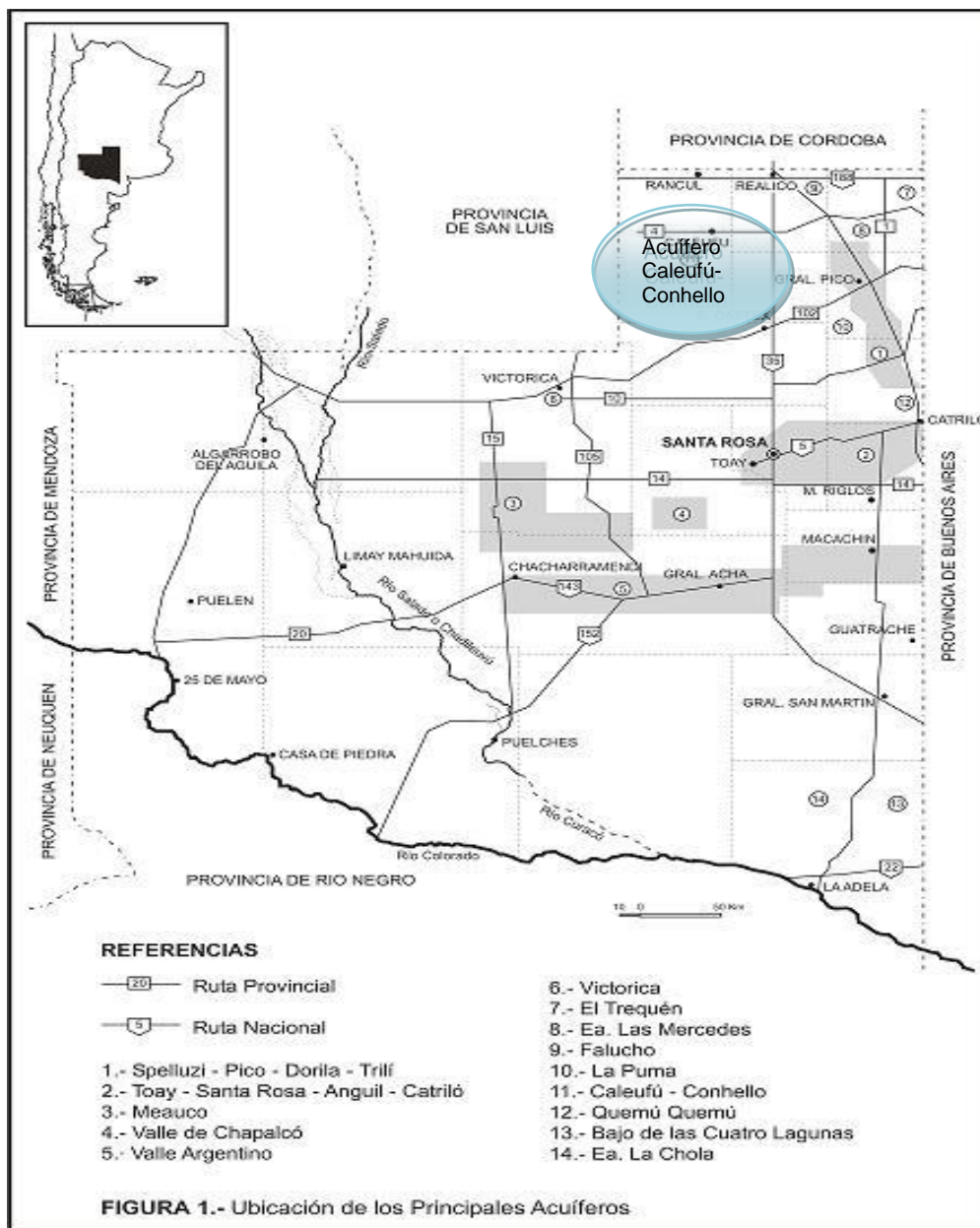


Fig. 4: Ubicación del acuífero Calefú-Conhelo en la provincia de La Pampa.

Fuente: (Giai & Tullio, 1990).

Como se observa en la figura 5 hay áreas sin información respecto a la calidad del agua. Hacia el oeste de la región la profundidad supera los 20 m y la calidad presenta gran variabilidad, pero en general supera los 2 g L^{-1} .

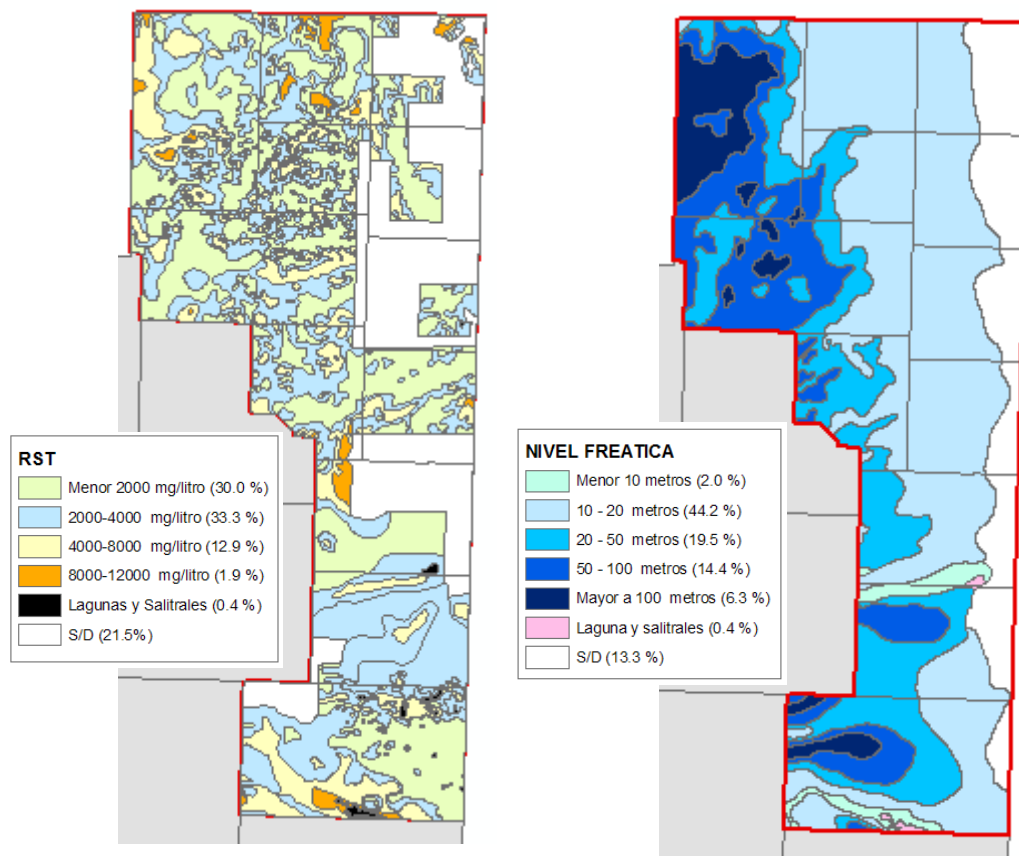


Fig. 5: Profundidad y calidad del agua en el norte y este de La Pampa

Fuente: Bases para el ordenamiento territorial, (Roberto & Martínez Uncal, 2012).

1.2.1 Los acuíferos y su utilización en el riego

El riego integral es un importante factor de salinización de los suelos agrícolas, cuando no es manejado correctamente. En general todas las aguas destinadas al riego poseen cierto contenido de sales solubles (Rhoades, 1972).

Cuando se habla de calidad de agua de riego se da por entendido que se trata de calidad en relación con la salinidad en el sentido amplio del término. Existen otros criterios de calidad; por ejemplo en riego por goteo es muy importante el riesgo de obturaciones de los emisores (Rhoades, 1972). La calidad del agua se define principalmente por los componentes químicos que en ella se encuentran, aunque el efecto de su aplicación dependerá de otros factores, tales como el tipo de suelo, cultivo a regar, sistema de producción (bajo cubierta o a campo) y condiciones climáticas (Medina San Juan, 1993; Báez, 1999). La composición y concentración de sales en la solución del suelo puede afectar el crecimiento de las plantas debido a: 1) cambio en algunas propiedades físico- químicas del suelo (fundamentalmente pH, salinidad, alcalinidad y sodicidad); 2) efecto de toxicidad de algunos iones específicos (Na^+ y HCO_3^-) y 3) efecto osmótico (Rhoades, 1972) y se acentúa por el balance hídrico negativo desde el punto de vista de las sales que se acumulan dentro del invernadero. En estos casos, el problema se agrava por el aumento de la cantidad total de riego aplicado y ausencia de lavado del exceso de sales acumuladas, a partir de las precipitaciones.

Como consecuencia de un manejo inadecuado del riego, este puede causar deterioros de la fertilidad de los suelos (Lentz *et al.*, 1996; Ruiz & Paolini, 1999; Tarchitzky *et al.*, 1999). Barnes (1988) citó extensas regiones Argentinas afectadas por esta práctica. El crecimiento tecnológico en la actividad hortícola, bajo cubierta trajo aparejado una gran difusión del riego por goteo integral. A pesar de la baja cantidad del agua recibida por el suelo con este sistema de riego, el aumento de la salinidad, el deterioro físico causado por la sodicidad a la vez que situaciones de toxicidad específicas de ciertos iones, podrían ser importantes, de acuerdo a otros antecedentes (Abrego *et al.*, 1998; Andriulo *et al.*, 2000).

En situaciones de riego bajo cubierta en el área hortícola de la provincia de La Pampa, el agua que ingresa al suelo es derivada de acuíferos. En esa región, como en otros ejemplos de la Argentina, es común encontrar acuíferos de regular calidad para el riego (Auge & Hernández, 1983; Minghinelli, 1995). Entre las problemáticas habituales se encuentran las derivadas de sodicidad, salinidad, pérdida de materia orgánica y fertilidad física (Andriulo *et al.*, 1998; Barbacone & Costa, 1999; Costa & Aparicio, 1999; Caviglia & Papparoti, 2000; Pilatti *et al.*, 2004; Pilatti *et al.*, 2006; Vázquez *et al.*, 2006 a y b; Ghiberto., *et al.* 2007; Vázquez *et al.*, 2008). El aumento de la concentración de Na^+ afecta la estructura y porosidad de los suelos, alterando la circulación de los fluidos, propiciando la ocurrencia de anegamientos y dificultando la renovación del ambiente edáfico. Por otro lado, los suelos se tornan excesivamente duros al secarse y se encuentran con facilidad, entre otros perjuicios. Estas problemáticas físicas se agravan por la naturaleza textural de la mayor parte de los suelos de la región platense, con elevados contenidos de arcilla y en muchos casos, de tipo expandible, así como por la intensidad de las prácticas de laboreo en este tipo de agricultura intensiva (Alconada, 1996; Alconada & Huergo, 1998; Alconada & Minghinelli, 1998). Según numerosos autores, entre ellos Richards (1980), Suárez (1981), Pizarro (1985) y Ayers & Westcot (1987), las principales propiedades de la calidad de las aguas para tener en cuenta y calificar las aguas para riego de lechuga son: pH-alcalinidad, salinidad y sodicidad.

1.2.2 pH y alcalinidad

El pH y alcalinidad del agua subterránea determinan la aptitud para el desarrollo de los cultivos. El pH elevado del agua de riego está relacionado con altos valores de bicarbonatos, la mayoría de las aguas de la región pampeana son bicarbonatadas sódicas, aumentando la concentración del ión sodio del suelo, con los riesgos de disminución de la permeabilidad y modificación de la estructura del suelo (Marano, 2000).

1.2.3 Salinidad

El agua contiene una serie de sales que son aportadas a la solución del suelo mediante el riego, lo que genera una disminución del potencial hídrico total debido principalmente al potencial osmótico. Esto reduce el crecimiento de las plantas al dificultar la absorción por parte de las raíces, y por ende se produce disminución de los rendimientos, especialmente en cultivos sensibles (Marano, 2000).

El movimiento del agua desde el suelo hacia la planta se debe a diferencia de potencial hídrico que existe entre la solución y el citoplasma. El potencial total en la proximidad de las raíces está determinado por las siguientes tensiones:

ψ_m : potencial mátrico o capilar, resultante de la interacción entre la superficie de las partículas del suelo y el agua.

ψ_o : potencial osmótico, resultante de las sales disueltas en el agua.

ψ_g : potencial gravitacional, resultante de la acción de la gravedad.

ψ_p : potencial de presión, que se presenta en la zona saturada del suelo.

Este último se puede considerar nulo debido a que se abordó solamente la zona no saturada. La planta para absorber agua tiene que vencer estos potenciales y le es indistinto que la tensión total sea determinada por disminución de ψ_m de ψ_o o de ambos.

Para igual ψ_m disponible, la planta se resentirá a medida que aumente la salinidad, pero si aquél aumenta debido a riegos más frecuentes, se podría aumentar la salinidad sin que afecte a la planta, pues la tensión total resultante será la misma (Medina San Juan, 1993).

La acumulación de sales se produce por aporte directo del agua de riego de mala calidad (pH mayores a 8 y conductividades eléctricas superiores a $1,5 \text{ dS m}^{-1}$) (Ayers & Westcot, 1987; Pilatti *et al.*, 2012).

El problema se produce por acumulación de sales solubles en la zona radical de los cultivos (Tabla 5). Este disminuye cuando el contenido de sales en la solución del suelo es tan alta que no dejan que los cultivos extraigan suficiente agua, provocando estrés hídrico a la planta (Báez, 1999).

La magnitud de los incrementos en la salinidad depende del tipo y concentración de sales presentes en las aguas, del manejo del riego y de la eficiencia del drenaje (Ayers & Westcot, 1987).

En general, los efectos nocivos de la salinidad sobre el crecimiento de las plantas se resumen en una disminución del potencial hídrico de la solución del suelo y disminución de la disponibilidad de agua para la planta, a la vez que toxicidad específica de iones Na^+ y Cl^- , que

provocan desequilibrios nutricionales debidos a la competencia en la absorción de nutrientes (Tejera *et al.*, 2006).

Tabla 5: Clasificación del agua de riego

Salinidad	Índice de CE (dS m ⁻¹)	Riesgo de salinidad
1	100-250	Bajo
2	250-750	Medio
3	750-2250	Alto
4	> 2250	Muy alto

Fuente: (Richard, 1954).

Las sales presentes en el agua de riego tienen diferente CE en función de su mayor o menor solubilidad (Richard, 1954), tal como se puede observar en la Tabla 6.

Tabla 6: Concentración de las principales sales presentes en el agua de riego y su correspondiente CE.

Concentración 1 g L ⁻¹	CE (dS m ⁻¹ a 25°C)
MgCl ₂	2,40
CaCl ₂	2,10
NaCl	2,00
NaSO ₄	1,55
MgSO ₄	1,35

Fuente: (Richard, 1954).

El contenido de sales, expresados en forma de CE (dS m⁻¹) se relaciona con la presión osmótica (Po) de la solución del suelo según la siguiente fórmula:

$$Po = 0,36 \times CE \quad \text{donde } Po = \text{atm [1]}$$

La Po se relaciona con la velocidad de absorción del agua por parte de la planta y por lo tanto con el desarrollo y crecimiento de la misma.

La Tabla 7 presenta la tolerancia a las sales en dS m⁻¹ que tienen las diferentes especies hortícolas, según Carter (1981).

Tabla 7: Valores de CE (dS m⁻¹) de referencia para diferentes cultivos hortícolas

Cultivos	Tolerancia a sales dS m ⁻¹	Cultivos	Tolerancia a sales dS m ⁻¹
Chaucha	1,0	Melón	2,5
Apio	1,0	Tomate	2,5
Coliflor	2,5	Brócoli	2,8
Lechuga	1,3	Pimiento	1,5

Fuente: (Carter, 1981).

Los valores de referencia mostrados anteriormente, dependen de las condiciones ambientales (luz y temperatura) que juegan un papel importante. A igualdad de CE podría haber

niveles de iones considerados tóxicos, como en el caso del Na^+ y Cl^- para algún cultivo en estudio, frente a valores de Ca^{2+} y Mg^{2+} , iones que no son tóxicos para ese mismo cultivo hortícola (Casas Castro & Casas Barba, 1999).

En la Tabla 8 se observa la disminución del rendimiento potencial en función de la conductividad eléctrica del agua y el suelo, para diferentes especies citadas (Ayers *et al.*, 1976). En la misma se comprueba como al incrementarse la CE_a y CE reduce el potencial de rendimiento de los diferentes cultivos, y como melón y tomate resultan más tolerantes al mismo nivel de conductividad que el resto de las especies citadas.

Tabla 8: Grado de tolerancia de algunos cultivos a las sales, según el rendimiento esperado (en % de la cosecha máxima).

Cultivo	100 %		90 %		80 %		50 %		Max. CE
	CE_a	CE	CE_a	CE	CE_a	CE	CE_a	CE	
Judía Verde	0,7	1,0	1,0	1,5	1,5	2,3	2,4	3,6	6,5
Melón	1,5	2,2	2,4	3,6	3,8	5,7	6,1	9,1	13,5
Lechuga	0,9	1,3	1,4	2,1	2,1	3,2	3,4	5,2	9,0
Espinaca	1,3	2,0	2,2	3,3	3,5	4,9	5,7	8,6	15,0
Tomate	1,7	2,5	2,3	3,5	3,4	5,0	5,0	7,6	12,5

CE_a : conductividad eléctrica del agua de riego (dS m^{-1}).

CE: conductividad eléctrica del extracto de saturación del suelo del cultivo, adecuado al grado de tolerancia de la reducción de cosecha (dS m^{-1}).

Max CE: máxima conductividad eléctrica tolerante del extracto de saturación del suelo para ese cultivo.

Fuente: (Ayers *et al.*, 1976).

La salinidad, para el caso de la lechuga, ocasiona otros problemas como la dificultad para el crecimiento inicial de la plántula, la reducción de la tasa transpiratoria (consecuente aumento de la temperatura de la planta, con incremento de riesgo de floración anticipada) (Marotto *et al.*, 2000).

1.2.4 Sodidad

Un alto contenido de Na^+ en el agua de riego puede inducir elevados valores de porcentaje de sodio de intercambio (PSI) en el suelo, con los efectos consiguientes de pérdida de estructura por dispersión y deterioro de la permeabilidad del mismo (Báez, 1999). La posibilidad de que un agua para fines de riego ocasione estos problemas intentó evaluarse a través del índice llamado Relación de Adsorción de Sodio (RAS) propuesto por Richards (1954), que a pesar de ser empírico es ampliamente empleado por su correlación con el PSI (Báez, 1999).

Al ingresar al suelo el agua de riego produce un nuevo equilibrio químico, y como consecuencia, una parte del Na^+ va a quedar adsorbido a las partículas sólidas del suelo. Una

medida relativa utilizada para establecer la cantidad de Na^+ adsorbido por el mismo es la determinación del porcentaje de sodio intercambiable (PSI) (ecuación 3). Este valor expresa que proporción de los sitios totales de adsorción del suelo conocidos como complejo de intercambio catiónico (CIC) está siendo ocupado por el Na^+ .

Los iones más comunes que se encuentran al analizar la pasta saturada del suelo son: Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , NH_4^+ y H^+ ; Cl^- , HCO_3^- , CO_3^{2-} , SO_4^{2-} , NO_3^- y H_2PO_4^- . Analizando el primero de estos iones, es decir el Na^+ , y considerando como valor inicial de referencia el existente en el agua de riego, para fracciones de lavado de hasta 20 % se puede esperar una acumulación de sodio también del 20 %. Esto se puede expresar con la siguiente ecuación:

$$\text{Na}_{\text{es}} = 1,2 \text{ Na}_a \quad [2]$$

Na_{es} = Concentración de Na^+ en el suelo.

Na_a = Concentración de Na^+ en el agua.

En base a esto los valores máximos y óptimos para los diferentes cultivos hortícolas se presentan en el Tabla 9.

Tabla 9: Valores máximos y óptimos de concentración de sodio en agua ($\text{cmmol}_c \text{L}^{-1}$) para los diferentes cultivos hortícolas.

Cultivo	Máximo ($\text{cmmol}_c \text{L}^{-1}$)	Optimo ($\text{cmmol}_c \text{L}^{-1}$)
Pimiento	10	< 7
Chaucha	9	< 6
Lechuga	10	< 7
Tomate	20-25	< 15
Berenjena	13	< 10
Melón	20	< 15

Fuente: (Casas Castro & Casas Barba, 1999).

El PSI se calcula como el cociente porcentual entre el Na^+ de intercambio y la capacidad de intercambio catiónico (CIC).

$$\text{PSI} = (\text{Na intercambio} / \text{CIC}) \times 100 \quad [3]$$

El RAS se calcula como:

$$\text{RAS} = \frac{\text{Na}^+}{[(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/2]^{1/2}} \quad [4]$$

Donde las concentraciones de los iones en solución se expresan en $\text{cmmol}_c \text{L}^{-1}$.

El incremento gradual del PSI es una consecuencia del incremento de la concentración de Na^+ en la solución del suelo, y se denomina proceso de sodificación. El suelo con PSI igual o superior a 15 % se considera sódico (Richards, 1954). La intensidad del proceso de sodificación depende de la concentración de sales del agua aplicada al suelo, de la cantidad de agua agregada cada año y de la CIC del suelo (Richards, 1954; Rhoades, 1972; Ayers & Westcot, 1987; Anderson *et al.*, 1972).

En la Tabla 10 se registran los diferentes grados de sensibilidad a PSI del suelo, para algunos cultivos de referencia e intensivos.

Tabla 10: Sensibilidad de cultivos al porcentaje de sodio de intercambio (PSI, %)

Sensibilidad	PSI	Cultivo
Extremadamente sensible	2-10	cítricos- aguacate
Sensibles	10-20	chaucha *
Moderadamente sensibles	20-40	Arroz**
Tolerante	40-60	tomate***

Fuente: (Bresler *et al.*, 1982).

*Impide el crecimiento para bajos valores de PSI, aunque las condiciones físicas del suelo sean buenas

** Impide el crecimiento debido a factores nutricionales y condiciones adversas del suelo

*** Impide el crecimiento debido a condiciones adversas del suelo

Suelos con textura fina y valores de PSI > a 20 resultan peligrosos (Ayers & Westcot, 1987).

1.2.5 Efecto de toxicidad

Los problemas de toxicidad se diferencian de los de salinidad en que ocurren en el interior de las plantas. Se producen cuando un ión absorbido se acumula en las hojas, por efecto de la transpiración, hasta un nivel que daña el cultivo.

Los iones de las aguas de riego que pueden causar daño en forma individual o combinada son: Cl^- , Na^+ y B^+ (Maas, 1984).

Para evaluar el riesgo de toxicidad del agua de riego se utiliza la clasificación de la FAO (Ayers & Westcot, 1976), Tabla 11.

Tabla 11: Concentración de iones que pueden causar problemas en los cultivos hortícolas

Ión	Concentración que puede causar problemas		
	Inexistentes	Crecientes	Graves
Na^+ (cmmol _c L ⁻¹)	< 3	3 – 9	> 9
Cl^- (cmmol _c L ⁻¹)	< 4	4 – 10	> 10
B^+ (cmmol _c L ⁻¹)	< 0,7	0,7 – 2	> 2

La tolerancia al Na^+ dependerá de las condiciones ambientales y su evaluación dependerá de la época del año en que se desarrollen los cultivos. Un exceso de Na^+ puede causar deficiencias de Ca^{2+} e inducir problemas de “*blosson-end rot*” en algunos cultivos hortícolas

(tomate, pepino, pimiento); mientras que en lechuga origina *tipburn* (Camacho-Ferre, 2004). Éste es un trastorno fisiológico expresado como necrosis en los bordes de las hojas jóvenes en desarrollo, y también en hojas maduras de cultivares de lechuga tipo arrelladas.

Los síntomas de toxicidad por Na^+ son el quemado y muerte de tejidos en la periferia de la hoja, comienzan en las hojas más maduras, progresando hacia el centro (Zhilong *et al.*, 2003).

Uno de los efectos tóxicos del estrés salino es que afecta directamente a la productividad de la planta por la acumulación de Na^+ y Cl^- en las hojas (Munns *et al.*, 2002). La acumulación de estos iones pueden alterar el equilibrio iónico, lo que provocan desequilibrio nutricional debido a la obstrucción de otros cationes tales como K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} o aniones tales como NO_3^- y por lo tanto se expresan los síntomas de deficiencia nutricional (Sariam *et al.*, 2002).

1.2.6 Efecto osmótico

El aumento de la salinidad provoca situaciones similares a estrés hídrico, con una disminución del potencial osmótico de la solución presente en el suelo, que se suma al potencial matriz.

De esta forma, aguas con elevado tenor de sales, sumado a la disminución del potencial matriz producido por evapotranspiración, provoca pérdidas de rendimiento de la mayor parte de los cultivos. Las constantes de la ecuación, resultan de la linealización de datos experimentales que relacionan empíricamente la reducción del rendimiento con el incremento de CE y cuyos valores pueden apreciarse en la Tabla 8 (Maas & Hoffman, 1977):

$$Y = 100 - B(CE - A) \quad [5]$$

Dónde:

Y: rendimiento del cultivo, en %

B: % de disminución del rendimiento por unidad de CE, cuando se alcanza un nivel dado considerado umbral.

A: Umbral de concentración salina, por encima del cual disminuyen los rendimientos.

Los valores de salinidad umbral para diferentes especies propuestos por Ayers & Westcot (1997) son presentados en la Tabla 8.

La frecuencia de riego influye considerablemente en el aumento o disminución del potencial total de agua en el suelo. Con métodos de alta frecuencia (riego localizado) es posible aumentar el potencial total, mejorando el comportamiento de los cultivos, ya que las sales se mantienen fuera del alcance de la principal zona de extracción (Medina San Juan, 1993).

1.2.7 Criterios de clasificación de aguas vigentes

Existen numerosos procedimientos para evaluar la calidad de agua, en los que se analizan criterios desarrollados bajo determinadas condiciones que por lo general representan situaciones locales específicas.

Los índices estándares para evaluar calidad de agua para riego, fueron establecidos por diversos autores entre ellos Wilcox (1948), Eaton (1949), Richards (1954); Nijensohn (1961), Bower *et al.* (1968), Pla Sentis (1979) Suárez (1981) y Ayers & Westcot (1987).

En 1954, el equipo técnico perteneciente al Laboratorio de Salinidad de Riverside, California, publicó una clasificación de aguas de riego en base a la peligrosidad salina estimada a través de la Conductividad eléctrica (CEa), expresada en dS m^{-1} a $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ y a la peligrosidad del Na^+ , expresada por la RAS. Esta clasificación es la que goza aún de mayor difusión en nuestro medio. La misma fue determinada para regiones áridas, prácticamente sin el aporte de precipitaciones. Además, esta propone valores límites de carbonato de sodio residual (CSR), concepto introducido por Eaton (1949); donde $\text{CSR} = (\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^-) - (\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$. En base a este criterio se estableció una escala de aptitud para el agua de riego (Tabla 12).

Tabla 12: Aguas aptas para riego según valores de Carbonato de sodio residual (CSR) los valores de CSR están expresados en $\text{cmmol}_c \text{L}^{-1}$.

$0 < \text{CSR} < 1,25$	Aguas aptas
$1,25 < \text{CSR} < 2,5$	Necesitan enmiendas
$\text{CSR} > 2,5$	Águas no aptas

El agua con elevadas concentraciones de carbonatos y bicarbonatos, al evaporarse se concentran, y al incrementar la concentración de la misma, el producto de solubilidad de los compuestos de Ca^{2+} y Mg^{2+} , precipitan en parte, quedando en solución los compuestos de Na^+ , que son perjudiciales para el suelo (perdida de estructura por dispersión de MO) y para el cultivo (por elevar el pH y poner a disposición de la planta otros nutrientes en exceso, como por ejemplo B).

1.3 SUELO

El comportamiento de un suelo en contacto con el agua salada depende de las propiedades físicas iniciales del suelo y el contenido de sales del agua. Por lo tanto, la composición inicial del suelo, influencia las propiedades de cambio durante el contacto agua – suelo. Las sales presentes en las aguas de riego y en la solución del suelo provienen en última instancia de los procesos de meteorización química de los minerales de la corteza terrestre, en cuya acción intervienen el agua y el CO_2 derivados de la actividad biológica. Condiciones de alta humedad y temperatura pueden acelerar dicho proceso. En el proceso de salinización revisten

particular importancia los cambios que pueden ocurrir en la composición de la solución suelo por la precipitación de ciertas sales de solubilidad limitada, tales como, carbonatos de Ca^{2+} y Mg^{2+} , y sulfatos de Ca. En cualquier caso, las condiciones que favorezcan dicho proceso, como el predominio de bicarbonatos en el agua, pérdida de CO_2 , mal drenaje, contribuyen a un enriquecimiento relativo de Na^+ de la solución del suelo y consecuentemente en el complejo de cambio (Bauder & Brock, 2001; Levy *et al.*, 2003; Emdad *et al.*, 2004).

1.3.1 Clasificación de suelos

Los valores de CE y PSI se utilizaron para desarrollar una clasificación de suelos: **salinos, sódicos-salinos y sódicos no salinos** (Richards, 1954).

El término salino se aplica a suelos cuya CE es mayor de 4 dS m^{-1} a $25 \text{ }^\circ\text{C}$, con un PSI menor de 15 % (son los suelos llamados “Solonchaks” por los autores rusos) y que se reconocen por la presencia de costras blancas de sal en su superficie. Predominan sulfatos y cloruros de Ca^{2+} , Mg^{2+} y Na^+ en cantidades que afectan a las plantas fundamentalmente por la alta concentración osmótica de la solución suelo y la consiguiente limitación impuesta a la absorción de agua. Este tipo de suelo, no tiene tanta incidencia sobre las propiedades físicas del mismo, pero sí sobre la disminución de la productividad de varios cultivos.

Los suelos **sódicos-salinos** son aquéllos cuya CE es mayor de 4 dS m^{-1} a $25 \text{ }^\circ\text{C}$ y el PSI es mayor de 15 %. Este tipo de suelos es el resultado de los procesos combinados de salinización y acumulación de Na^+ . Siempre que contengan un exceso de sales, su apariencia y propiedades son similares a las de los suelos salinos. Cuando hay exceso de sales, el pH raramente es mayor de 8,5 y las partículas permanecen floculadas. Cuando existen suficientes sales en solución, fundamentalmente sulfato de Na^+ , las mismas pueden afectar la absorción de agua por las plantas y la producción económica de los cultivos. Las mismas al ser lixiviados con agua, sufren un deterioro marcado de sus propiedades físicas, que les da características de suelos sódicos. Si el exceso de sales solubles es lavado, las propiedades de estos suelos pueden cambiar notablemente, llegando a ser idénticas a las de los suelos sódicos-no salinos. En cualquier caso, el lavado puede hacer el suelo mucho más alcalino (pH mayor de 8,5), las partículas se dispersan, y el suelo se vuelve desfavorable a la infiltración del agua y para las labores. El retorno de las sales solubles puede hacer que baje el pH y se restauren las partículas a una condición floculada, no obstante el manejo de los suelos sódicos-salinos sigue siendo un problema hasta que se elimina el exceso de sales y de Na^+ intercambiable de la zona radical del cultivo y se restablecen las condiciones físicas del suelo.

Los suelos **sódicos-no salinos** (“Solonetz” por los autores rusos) son aquellos cuyo porcentaje de Na^+ intercambiable es mayor de 15, la conductividad es menor de 4 dS m^{-1} , a $25 \text{ }^\circ\text{C}$ y el pH varía generalmente entre 8,5 y 10. En los suelos altamente sódicos, la materia orgánica

dispersa y disuelta puede depositarse en la superficie debido a la evaporación, causando ennegrecimiento del suelo (Richards, 1954). Por otro lado, los suelos se tornan excesivamente duros al secarse y se encostran con facilidad, entre otros perjuicios. Estas problemáticas físicas se agravan por la naturaleza textural de la mayor parte de los suelos de la región, con elevados contenidos de arcilla y en muchos casos, de tipo expandible, así como por la intensidad de las prácticas de laboreo en este tipo de agricultura intensiva (Alconada, 1996; Alconada & Huergo, 1998; Alconada & Minghinelli, 1998).

El agua de riego, al ingresar en el suelo produce un nuevo equilibrio químico en el mismo, y esto trae como consecuencia que una parte del Na^+ va a quedar adsorbido a las partículas sólidas. Una medida relativa para conocer la cantidad de Na^+ adsorbido por el suelo es la determinación del PSI. Este expresa que proporción de los sitios totales de adsorción del suelo conocidos como capacidad de intercambio catiónico (CIC) están siendo ocupados por este.

El Na^+ sustituye al Ca^{2+} y al Mg^{2+} en el complejo del suelo y cuando alcanza un valor aproximado de un 15 % de PSI, variable según la textura y tipo de arcilla, el proceso de degradación se torna casi irreversible. A medida que aumenta el PSI, las partículas de suelo se hacen más inestables y por lo tanto comienza a producirse una pérdida de la estructura de los mismos. Los rasgos más típicos, son el encostramiento superficial y la compactación del suelo, que en definitiva producen una disminución en la infiltración del agua en el perfil del mismo. Otra consecuencia de la presencia de altos niveles de Na^+ es el efecto directo de este sobre las plantas produciendo una marcada disminución en los rendimientos de los cultivos hortícolas en estudio.

Las sales que contribuyen a generar un problema de salinización son siempre sales solubles y, por lo tanto, fácilmente transportables por el agua. Como el agua es el principal transporte, su acumulación en la zona radical de los cultivos se produce por aporte directo del agua de riego (Prieto & Angueira, 1996). Una alta concentración de sales en el suelo reduce principalmente la disponibilidad de agua para las plantas debido al aumento en el potencial agua total.

1.3.2 Remediación

Los perjuicios derivados del incremento en los niveles Na^+ pueden revertirse, o al menos mitigarse, mediante el empleo de enmiendas dirigidas a provocar el desplazamiento del mismo y disminuir el pH, tales como el yeso o el azufre elemental (Costa & Godz, 1999; Longo *et al.*, 2005). Otras enmiendas procuran mejorar la condición física deteriorada, en este sentido se aplican diferentes abonos orgánicos frescos o compostados (Minhas *et al.*, 1995; Cooperband, 2000; Choudhary *et al.*, 2002). Los mismos contribuyen a mejorar la condición física y mantener el balance de MO en estas situaciones de altas tasas de mineralización (cultivos bajo cubierta y alta

frecuencia de laboreos mecánicos), entre otros beneficios. Paralelamente, las enmiendas orgánicas podrían propiciar la lixiviación de Na^+ por síntesis de CO_2 en su proceso de mineralización. En aplicaciones conjuntas de abonos orgánicos y yeso, el Ca^{2+} de este último tiende a reemplazar al Na^+ en el complejo sorbente, que por otro lado se halla incrementado por la enmienda orgánica (Walker & Bernal, 2008; Qadir *et al.*, 2008; Jalali & Ranjbar, 2009). Ambas acciones promueven una mejora estructural. En la práctica, la elección de la enmienda y su dosis, responde más a cuestiones de disponibilidad, costo y tradición, que a criterios con sustento científico (Andreau *et al.*, 2012).

El Na^+ y los niveles de salinidad, influyen también en la conductividad hidráulica (KH), aunque en menor medida, debido a que en la reducción de la velocidad de infiltración se suman los impactos mecánicos y la acción de remoción del agua aplicada.

Se debe tratar que el ión Na^+ no sustituya al Ca^{2+} en el complejo de intercambio. En la medida que ello ocurra, los suelos se vuelven impermeables y algunos cultivos sensibles pueden llegar a intoxicarse. Los bicarbonatos de sodio son responsables de los mayores valores de PSI en el suelo. Generalmente la salinización conduce a un incremento del PSI, debido a que las sales de Na^+ , pueden mantenerse en solución aún en concentraciones muy elevadas (Richards, 1954; Rhoades, 1972; Ayers & Westcot, 1987; Anderson *et al.*, 1972).

1.3.3 Infiltración

Los problemas de infiltración aparecen en función de la calidad del agua de riego, dados por la CE y RAS, además del tipo de arcilla que posea el suelo. La infiltración aumenta cuando lo hace la CE y disminuye cuando aumenta el RAS (Camacho-Ferre, 2004). Las aguas de baja salinidad, con CE inferior a $0,2 \text{ dS m}^{-1}$, crean graves problemas de infiltración debido a su gran poder de disolución. Igualmente, altas relaciones $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$ que dan origen a RAS muy altos, afectan a la infiltración por el hinchamiento de las arcillas del suelo. Esto origina una clara disminución de la porosidad del suelo (Camacho-Ferre, 2004) (Fig. 6).

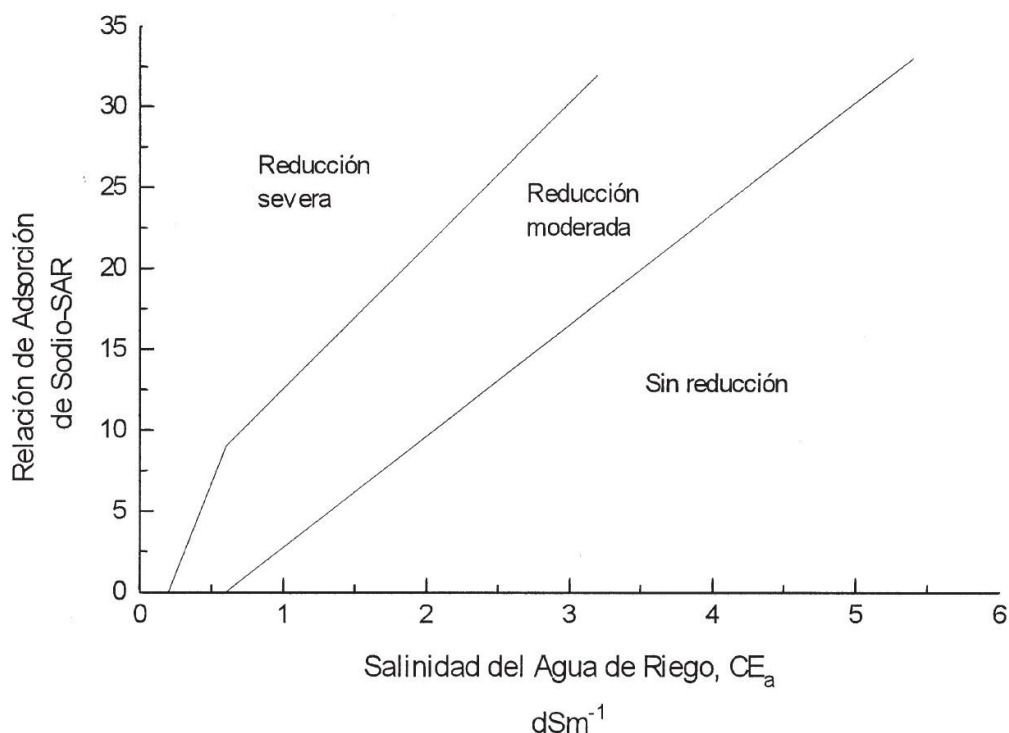


Fig. 6: Reducción relativa de la infiltración provocada por la salinidad y el RAS (FAO, 1987).

En la Tabla 13 se puede observar como varia el movimiento del agua, por efecto de diferentes calidades de la misma según Ayers & Westcot (1997).

Tabla 13: Efecto de la calidad de agua (CE y RAS) sobre el movimiento de agua en el suelo (infiltración) y toxicidad específica.

			No hay problema	Problema creciente	Problema grave
Salinidad	CE _a dS m ⁻¹		< 0,7	0,7-3	> 3
Infiltración	RAS= 0,3	CE _a dS m ⁻¹	< 0,7	0,7-0,2	< 0,2
	RAS= 3-6		< 1,2	1,2- 0,3	< 0,3
	RAS= 6-12		< 1,9	1,9- 0,5	< 0,5
	RAS= 12-20		< 2,9	2,9- 1,3	< 1,3
	RAS= 20-40		< 5	5 – 2,9	< 2,9
Toxicidad iónica específica	Sodio cmmol _c L ⁻¹		< 3	3- 9	> 9
	Cloruros cmmol _c L ⁻¹	Riego superficie	< 3	> 3	
		Riego Aspersión	< 4	4- 10	> 10
	Boro cmmol _c L ⁻¹	Riego superficie	< 0,7	0,7-2	> 2
Efectos diversos	Bicarbonatos cmmol _c L ⁻¹		< 1,5	1,5 – 8,5	> 8,5

La disminución de la infiltración da origen a problemas de encharcamiento en los suelos por problemas de drenaje y por la imposibilidad de hacer un lavado de sales acumulados en el

mismo. Todo esto hace que se formen costras en el suelo, originando problemas de pudrición de las raíces de los cultivos, por la falta de buena aireación. Como así también de realizar un buen lixiviado de sales incide en el aumento de la salinidad del suelo (Casas Castro & Casas Barba, 1999).

Ayers & Westcot, 1997 proponen tratamientos como enmiendas químicas (yeso), enmiendas orgánicas, y tratamientos físicos (mecánicos) para tratar en parte los problemas de infiltración.

1.3.4 Tipos de enmienda

a) Enmiendas químicas: consiste en la aplicación al suelo de productos químicos que aumentan la proporción de Ca^{2+} frente al Na^+ que está en el suelo. Así disminuye el RAS y aumentar la infiltración. Ejemplo de este tipo de práctica es el yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$) como uno de los productos a utilizar citados por varios autores (López-Aguilar *et al.*, 2012).

b) Enmiendas orgánicas: pueden ser de forma sólida o líquida. Se utilizan estiércol de ganado, compost de residuos agrícolas, lombricompost o ácidos húmicos (líquidos).

c) Tratamientos físicos: como las aradas con diferentes herramientas con el objetivo de romper costras superficiales y compactaciones del suelo en profundidad. Todo esto hace que las enmiendas químicas reaccionen mejor y sean más efectivas en el suelo (Casas Castro & Casas Barba, 1999).

1.4 CULTIVO

La horticultura en nuestro país es una actividad de gran importancia económica y social. Utiliza un 2,0 % de la superficie agrícola pero produce un 11,6 % del PBI Agrícola Nacional, generando una demanda de mano de obra directa (conjuntamente con la fruticultura) que involucra a 200.000 personas. En la provincia de La Pampa ésta actividad se encuentra en constante expansión, acompañada por el trabajo que realiza el Centro Regional de Educación Tecnológica (CERET), produciéndose en los últimos 10 años un aumento de la superficie cultivada de 2,0 hectáreas bajo cubierta (INDEC, 2002) a 9,0 hectáreas (Censo Hortícola, 2011).

En la provincia, el cultivo de la lechuga ocupa el primer lugar en importancia dentro de los cultivos protegidos. Se producen aproximadamente unas 3,5 hectáreas en el año principalmente de hoja (Censo Hortícola, 2011).

La lechuga es una planta anual herbácea de la familia de las Asteráceas. Su consumo se remonta a aproximadamente 2.300 años; los griegos y los romanos la conocían, aunque no eran las mismas variedades que se utilizan en la actualidad. El origen no es muy definido, pues algunos sostienen que es originaria de Europa Meridional y otros de Asia. En su estado silvestre

son plantas pequeñas y de sabor amargo, pero la selección del hombre a lo largo del tiempo ha producido gran variedad.

Es la más importante dentro del grupo de las hortalizas de hoja; generalmente se consume cruda en ensaladas, es ampliamente conocida y se cultiva casi en todos los países del mundo. Presenta una gran diversidad dada principalmente por diferentes tipos de hojas y hábitos de crecimiento de las plantas.

1.4.1 Clasificación botánica

Familia: Compuestas o Asteraceas

Nombre científico: *Lactuca sativa* L

Nombre vulgar en español: lechuga

El nombre genérico *Lactuca* deriva del latín “lac”, que significa “leche” (presencia de látex) y *sativa* porque es cultivada.

1.4.2 Variedades botánicas

Lactuca sativa es una especie muy polimorfa dividida en 4 variedades botánicas:

* *L. sativa* Var. *augustana* Vilm: lechuga espárrago o de tallo. Se la cultiva en pequeña escala por sus tallos suculentos con hojas angostas puntiagudas y lanceoladas, no apetitosas. No forman cabeza. Solo se cultivan en China.

* *L. sativa* var. *acephala* Dill: lechuga de hoja o de cortar. No forman cabeza, son hojas anchas con margen rizado y a veces muy recortado (hoja de roble), sueltas y dispersas. Desarrollan una roseta de hojas libres que en algunos casos contienen antocianos (lechuga morada).

* *L. sativa* var. *longifolia* Lam: lechuga “cos o romana o gallega”. No forman un verdadero cogollo. Hojas largas de borde entero, forman una cabeza alargada, oblonga, semi compacta. En la zona de Rosario ha sido desplazada por el cultivar mantecosa.

* *L. sativa* var. *capitata* L: lechuga acogolladas o arrepolladas. Hojas redondeadas, anchas, cabeza esférica, forman un cogollo apretado.

Dentro de los cultivares de la var. *capitata* puede hacerse la siguiente clasificación:

-De hoja consistente: crespas, capuchinas, iceberg o batavias, con cabezas firmes y resistentes al transporte.

-De hoja mantecosa: mantecosa o aceitosa, con cabezas no tan firmes, menor resistencia al transporte. Existe una tendencia a cultivarse cada vez más ya que es muy apreciada por ser una lechuga cuyas hojas son muy suaves al tacto y al paladar.

L. sativa var. crispata o intybasea L.: (Fig. 7) llamada lechuga crespata, de hoja, de corte o de mata, o francesa; no forman cabeza tienen hojas anchas con margen muy recortado, sueltas y dispersas. Sus hojas pueden presentar color verde o morado según cultivar comercial.



Fig. 7: Lechuga crespata verde. Fuente: Manual de Producciones Hortícolas (Ferrato *et al.*, 2006).

1.4.3 Morfología

Planta: de ciclo anual, cultivada por sus hojas en forma de roseta.

Raíz: es pivotante y tiene numerosas raíces laterales, las que se desarrollan superficialmente en el suelo (en los primeros 0,2 a 0,3 m).

Hojas: son alternas, espatuladas o circulares. El color varía de verde claro- amarillento a verde oscuro o rojizo. Borde liso, ondulado, dentado (crespata) y por su consistencia pueden ser desde rústicas y gruesas hasta tiernas y finas (mantecosas).

Tallo: en la etapa vegetativa el tallo es corto (0,1 a 0,3 m); en la fase de floración éste se alarga pudiendo alcanzar una altura de hasta 1,5 m.

Flores: las flores están agrupadas en capítulos; es una especie autógama.

Fruto: es un aquenio de colores variables del blanco al marrón oscuro, casi negro, achatado, pequeño, uniseminado y con una cantidad de aproximadamente 800 a 1.000 semillas por gramo. (Marotto *et al.*, 2000).

1.4.4 Fisiología

La lechuga es un cultivo anual, con un ciclo de producción que oscila de 30 a 120 días, en función de los cultivares y de la estación del año. Desde el punto de vista agronómico se pueden distinguir las siguientes fases:

- Emergencia y crecimiento inicial.
- Formación de una roseta.
- Formación de un cogollo más o menos compacto (solo para los materiales que forman cabeza).

- Alargamiento del tallo floral.
- Reproducción o emisión de un tallo floral (en este estado no es posible su comercialización).

La acción de las altas temperaturas, constituye el factor más limitante en el cultivo de esta especie, provocando la floración prematura, germinación deficiente de la semilla, quemadura de los extremos de las hojas o *tipburn*, sabor amargo de sus hojas por aumento de látex y falta de compacidad en cultivares arrepollados (Maroto *et al.*, 2000).

1.4.5 Condiciones agroecológicas

Es una especie que prefiere climas templados y húmedos, pero existen un gran número de cultivares que se adaptan a una gama muy amplia de climas. En términos generales es sensible a las heladas, aunque algunos cultivares pueden resistir varios grados bajo cero.

En condiciones extremas de temperatura baja y alta (invierno y verano) tiene problemas de producción; por ello, en nuestro país, su cultivo se ha expandido en zonas templadas con menor amplitud térmica.

La incidencia de regímenes continuados de vientos, sobre todo cálidos y secos, resulta negativo para este tipo de planta, ya que puede generar pérdida de humedad en sus hojas.

El suelo es necesario prepararlo correctamente, con una buena nivelación, pues el encharcamiento favorece la aparición de enfermedades, aunque en invernadero este problema se minimiza debido a la ausencia de precipitaciones y el uso de riego localizado. Se debe trabajar en profundidad, para lograr un buen drenaje y favorecer el lavado de las sales del agua de riego y de la fertilización.

El límite óptimo de pH oscila entre 6,5 y 7,4, no obstante puede vegetar, con un manejo agronómico adecuado, con valores entre 5,0 a 8,5 (Davis *et al.*, 1997). Algunos autores (Hemphill & Jackson, 1982) señalan que cuando el pH es mayor a 6,0; la respuesta a un incremento del abonado nitrogenado es positiva para la producción.

El sistema productivo más utilizado para la producción intensiva de lechuga son los Túneles Altos (Ferrato *et al.*, 2006) (Fig. 8). Esto túneles son estructuras metálicas semicirculares de seis metros de ancho y tres metros de alto en la parte central. El largo es variable, pero es conveniente que no supere los cincuenta metros, ya que no disponen de ventilación lateral y la misma debe hacerse por los frentes y los cenitales (aberturas en el techo). Estas medidas permiten asegurar un volumen de aire adecuado (2,3 m³ por m² y un 20 % de superficie ventilable), además de un espacio suficiente para circular con herramientas. Sobre la estructura metálica conformada por caños estructurales de 0,038 m se apoyan alambres de alta resistencia en dirección al eje principal del túnel cuya función es sostener el polietileno para que no se

formen bolsas de agua cuando llueve. El polietileno LDT se coloca por encima en forma de fajas transversales y se sujetan enterrando los extremos en el suelo. Esta forma de construcción permite conferirle a éstas estructura una resistencia importante a los vientos predominantes en La Pampa.



Fig. 8: Túnel alto con cultivo de lechuga de hoja, La Pampa. Fuente: Manual de Producciones Hortícolas (Ferrato *et al.*, 2006).

Entre las principales ventajas que ofrece éste tipo de construcción se encuentran:

- Permiten el aumento de la calidad comercial, pues se obtienen plantas sanas, limpias, tiernas, grandes, de buen aspecto y con larga vida poscosecha, factores fundamentales para estimular el consumo de esta hortaliza.
- Continuidad de la producción durante todo el año, el cultivo no es afectado por heladas, lluvias, granizo, entre las más importantes. Este aspecto tiene un valor estratégico en un esquema de comercialización directa a supermercados, y/o grandes verdulerías.
- Elevada producción, no sólo por la mayor productividad, sino también por el acortamiento del ciclo productivo (60 días desde trasplante a cosecha) lo que permite aumentar el número de cultivos durante el año.
- Protección contra la acción de los vientos porque evita la erosión eólica dentro de la túneles con cubierta plástica.

En la Tabla 14 se observa la reducción del rendimiento potencial en función de diferentes autores como los citados en la misma. Variación porcentual del rendimiento potencial en función del aumento en la CE del agua de riego

Tabla 14: Tolerancia a la salinidad, expresada en CE (dS m^{-1}) del agua de riego en el cultivo de lechuga en relación con su rendimiento potencial.

Autores	Rendimiento Potencial				
	CE 100%	CE 90%	CE 75%	CE 50%	CE 0%
Sonneveld, 1988	0,6				
California Fertilizer Association, 1990	1,3	1,4	2,1		
Ayers <i>et al.</i> , 1976	1,3	2,1	3,2	5,1	9

1.4.6 Métodos de riego y prácticas de recuperación de suelos

Este tipo de producción enfrenta un importante problema de manejo del suelo, ya que el riego por goteo con aguas subterráneas y bajas dosis de aplicación, genera acumulación de sales en el perfil que no pueden ser lavadas por las precipitaciones.

Cuando se riega con aguas bicarbonatadas sódicas se eleva el valor del PSI y pH, proceso que se acelera en ausencia de precipitaciones (Marano, 2000). Además es posible que el suelo se salinice porque se aplica con riego toda el agua que necesita el cultivo para evapotranspirar, sin agua de lluvia que lixivie las sales. Esto trae como consecuencia problemas para el cultivo (restricción osmótica y toxicidad específica) y en el suelo, donde algunas propiedades físicas como la dispersión y la floculación de las partículas coloidales podrían ser afectadas (Wilson *et al.*, 2004).

El paquete tecnológico utilizado en el cultivo de lechuga en la región incluye, además de túneles altos, el riego por goteo. Ésta es una técnica de aplicación localizada del agua al suelo, mediante caudales reducidos, generando un bulbo de dimensiones restringidas donde crecen las raíces. De esta manera se logran pequeños caudales a través de goteros o emisores más o menos espaciados según el tipo de cultivo. El manejo de agua se basa en reponer diariamente la lámina de evapotranspiración, sin considerar un exceso a modo de fracción de lavado. Esto es adoptado por los productores en reponer diariamente la lámina de evapotranspiración del cultivo, lo que implica que las sales incorporadas con el agua de riego se concentren en la superficie, sin posibilidad de ser lixiviadas en profundidad.

Ventajas (adaptado de Pereira, 2010; Pizarro, 1985):

- Aumenta la calidad y el rendimiento de los productos hortícolas.
- Permite fertirrigar, es decir incorporar fertilizantes solubles con el agua de riego.
- Disminuye los costos operativos.
- Ahorra agua ya que se reducen las pérdidas por evaporación y percolación.
- Disminuye las enfermedades causadas por hongos y bacterias dada la reducción de la humedad ambiental y a nivel del cuello de las plantas.

- Permite regar con niveles de sales muy superiores en el agua y en el suelo.
- Permite la incorporación de productos fitosanitarios al agua de riego.

Desventajas:

- Requiere una alta inversión inicial.
- No se produce un lavado uniforme del perfil del suelo.
- Es necesario contar con buenos sistemas de filtrado.

1.4.7 Manejo de la salinidad mediante la técnica de riego por goteo

Las técnicas de control de la salinidad permitirían poner a disposición mayor disponibilidad de agua para las plantas. El riego por goteo permite utilizar aguas de menor calidad química (de 1,0 a 2,5 dS m⁻¹) donde las sales aportadas que no son utilizadas por la planta se acumulan en la periferia del bulbo mojado de suelo, incrementando CE hasta niveles nocivos para el cultivo. Bajo cubierta plástica este proceso puede alcanzarse en una o dos campañas y deben desplazarse fuera del sistema radical para que no dificulten la normal absorción de los elementos nutritivos (Marano, 2000).

Teniendo en cuenta que en riego por goteo la masa de raíces se concentra en una porción reducida del suelo, las necesidades de lavado van a ser menores que en cualquier otro sistema, representando una importante ventaja para el ahorro de agua.

Las necesidades de lixiviación representan la fracción de agua que debe percolar para no exceder una determinada conductividad eléctrica del suelo. De acuerdo con Ayers & Westcot, (1985), los requerimientos de lixiviación (RL) para riego por goteo se determinan con la siguiente ecuación:

$$RL = \frac{CEa}{2 \times CE \text{ umbral}} \quad [6]$$

La necesidad de riego bruta (NRb) será entonces:

$$NRb = \frac{NRn}{1 - RL} \quad [7]$$

CE umbral (se entiende el valor a partir del cual disminuye el rendimiento potencial, Pej: ver valores de Tabla 14, depende del cultivo a considerar, NRn representa la necesidad de riego neta, obtenida en función de la evapotranspiración y NRb es la necesidad de riego bruta considerando únicamente RL. Al utilizar el sistema de riego por goteo en lechuga con agua entre 1,0 y 2,5 dS m⁻¹, deberá incrementarse la dosis de riego entre un 20 y un 50 % para provocar el lavado extra de sales.

Pero además, se ha comprobado mediante estudios que el lavado de sales con este sistema de riego, de manera constante, es más eficaz que el que se realiza por inundación continua. Esto lleva a que los ahorros de agua de riego sean superiores al 30 % para conseguir igual lavado de sales (Medina San Juan, 1993). Con sistemas de riego localizado, goteo, y en cultivos tipo enarenado de la zona de Almería se puede trabajar con fracciones de lavado que oscilen entre el 20-22 %, consiguiéndose así que las conductividades en el extracto saturado estén entre un 10-20 % por encima de la conductividad eléctrica del agua. En suelos de textura muy pesada podrá existir el inconveniente de posibles encharcamientos que imposibilitará estos valores de fracción de lavado (Casas Castro & Casas Barba, 1999).

Conociendo el perfil de distribución de las sales bajo los goteros y el tipo de cultivo se puede aumentar o disminuir la dosis de lixiviación de acuerdo a las necesidades. Si el volumen de agua utilizado para riego es de bajo caudal, no permite la lixiviación de sales es necesario realizar lavados periódicos según lo requiera el sistema de producción, pudiendo utilizar el riego por goteo durante un periodo más prolongado de tiempo, para que las dosis de riego sean más elevadas que los de una aplicación normal. Para eliminar estas sales que se acumulan en el perfil de suelo, hay que recurrir a la técnica de lavado con volúmenes de agua más elevados. Este lavado requiere de cálculos y depende mucho del sistema de riego utilizado. El riego por goteo es uno de los más aconsejados para evitar salinizar el suelo ya que al regar con intervalos menores que otros sistemas permite mantener niveles de humedad altos en el suelo y por lo tanto un potencial mátrico bajo. Un control importante de la salinización se puede hacer acortando los intervalos de riego a medida que aumenta la salinidad del agua con la cual regamos. Al igual que en la presente tesis las dosis de riego calculadas a partir de ET_o y ET_c son dosis netas, por lo que hay que tener en cuenta la falta de uniformidad del sistema de riego y las necesidades de lavado para el cálculo de la dosis bruta de riego (Fernández, 2000). Algunos autores han desarrollado modelos para determinar el balance hídrico salino, como por ejemplo: Mirábile & Fornero (1986) que toma en cuenta la modalidad y lámina de riego aplicada, la salinidad de dicho agua y la del suelo, la textura del suelo y las precipitaciones efectivas acontecidas. Esto permite visualizar dinámica hídrica salina de los suelos en función de la modalidad con que se opera la zona de riego y las eficiencias con que los agricultores riegan; además permite conocer las láminas de riego y lixiviación necesarios para mantener la salinidad del suelo constante o para llevarla a un valor deseado.

2 HIPÓTESIS

- Se pueden rehabilitar suelos con horizontes someros debido a barreras naturales – tosca-degradados por aguas bicarbonatadas sódicas, a través de enmiendas minerales y/o drenaje subsuperficial, con riego por goteo como método de lavado.
- El cultivo de lechuga incrementa la productividad con la disminución del contenido de sales solubles del suelo.

3 OBJETIVO GENERAL

- Rehabilitar suelos con impedimentos físicos degradados por riego con aguas subterráneas bicarbonatadas sódicas.
- Mejorar la sustentabilidad de los productores de lechuga recuperando tierras degradadas por riego con aguas subterráneas bicarbonatadas sódicas, en suelos petrocálcicos de la Pampa.

3.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Evaluar la efectividad del yeso agrícola como enmienda mineral para disminuir niveles de sodio en suelo.
- Evaluar la efectividad de zanjas abiertas como método de drenaje subsuperficial para rehabilitar suelos salino-sódicos.
- Evaluar la efectividad del riego por goteo como método de lavado de sales.
- Determinar la respuesta productiva del cultivo de lechuga a diferentes niveles de sodicidad y salinidad del suelo.

4 MATERIALES Y METODOS

El trabajo se llevó a cabo en el Módulo Demostrativo hortícola de la municipalidad de Caleufú, provincia de La Pampa (35° 40´S; 63° 46´O), desde el mes de marzo del año 2010 hasta el mes de noviembre del 2011. Se utilizó una estructura de túnel alto con las siguientes dimensiones: 32 m de largo, 6 m de ancho y 3 m de alto. Fue construido con caños estructurales y cubierto con polietileno térmico transparente de 150 micrones de espesor. En la época estival (noviembre a marzo) sobre el polietileno se colocó media sombra con un 35 % de sombreo. El cultivo de lechuga se sistematizó sobre platabandas de 1 m de ancho con 0,4 m de pasillo, sobre las mismas se dispusieron los plantines en 4 hileras de cultivo y dos laterales de riego, con una densidad de 12,5 plantas m⁻² y 8,3 goteros m⁻². El cultivar utilizado correspondió a una variedad botánica crispa, cuyo nombre comercial es “Brisa, (Seminis)”.

4.1 MEDICIONES METEOROLÓGICAS

Las variables meteorológicas que se midieron fueron las temperaturas medias mensuales y la evapotranspiración de referencia (ET_o), a partir de datos obtenidos de la estación meteorología situada en Intendente Alvear (LP) a 100 km del sitio bajo estudio.

4.2 SUELO

El trabajo se realizó sobre un suelo Haplustol Éntico, con presencia de tosca a 0,8 m de profundidad, totalmente modificado desde el punto de vista químico respecto al original (suelo prístino con monte nativo), debido principalmente a su historial de uso (2 y 4 años de horticultura bajo cubierta).

En la siguiente Tabla 15 se midieron los valores de pH, CE, PSI y MO del suelo, es importante destacar los valores del suelo virgen sin ninguna intervención por parte de riego con aguas bicarbonatadas sódicas.

Además se calculó el índice de fertilidad $IMO = (MO/L+A*100)$ (Quiroga *et al.*, 2005).

MO= materia orgánica (%)

L= Limo (%)

A= Arcilla (%)

Tabla 15: Valores de pH, conductividad eléctrica del extracto de saturación (CE), Porcentaje de sodio intercambiable (PSI), porcentaje de materia orgánica (MO) e Índice de fertilidad (IMO) para un suelo Haplustol Éntico con diferentes manejos.

Tipo de suelo	pH	CE (dS m ⁻¹)	PSI (%)	MO (%)	IMO
Suelo virgen	5,13	2,06	< 1	3,57	11,9
Túnel alto de 2 años de riego (B1)	8,11	1,96	27	2,09	6,8
Túnel alto de 4 años de riego(B2)	8,38	2,61	22	3,46	11,6

Fuente: Laboratorio Integral Esagro

Se realizó un relevamiento de las características del perfil (espesor, textura) y su grado de representatividad, debido a la heterogeneidad que presentaba el lote del ensayo.

Suelo condición prístina:

Descripción técnica de un Haplustol Éntico- Ht3- Calicata N° 425C "Arata". Descripta y muestreada en las proximidades de Embajador Martini a 42 km al WNW de Gral. Pico. Situación: Latitud 35°28' S, Longitud 64°11' O, Altitud 167 m. Pendiente: 0-1 %.Relieve: Normal - subnormal. Grado de desarrollo del perfil: Débil desarrollo. Ecurrimiento: Lento a medio. Permeabilidad

(estimada): Moderadamente lenta. Drenaje natural: Bien drenado. Salinidad: No salino (Inventario de recursos naturales de la provincia de La Pampa, 1980).

4.3 AGUA

El agua para riego utilizada en el experimento tiene origen subterráneo y su composición química se presenta en la Tabla 16.

Tabla 16: Composición química del agua utilizada para de riego

Variables	VALORES
pH	8,3
CE dS m ⁻¹	1,31
Dureza g L ⁻¹	34
RAS (*)	28,2
CSR (***) cmmol _c L ⁻¹	9,3
Bicarbonato (***) cmmol _c L ⁻¹	10
Sulfatos cmmol _c L ⁻¹	1,54
Cloruros cmmol _c L ⁻¹	0,66
Carbonatos cmmol _c L ⁻¹	0,13
Calcio cmmol _c L ⁻¹	0,29
Magnesio cmmol _c L ⁻¹	0,41
Sodio cmmol _c L ⁻¹	16,4

Fuente: Laboratorio Integral Esagro

* RAS ajustado: 31,2 calculado (RAS x [1+(8,4 - pH)])

** Cuando se superan los 2,50 cmmol_c L⁻¹ las aguas son consideradas de mala calidad (USSL Staff, 1954).

*** Valores superiores a 8 cmmol_c L⁻¹ son considerados restrictivos para el riego. (Metcalf & Eddy, 1995).

4.4 PREPARACIÓN DEL TERRENO

Las labores culturales consistieron en la roturación del suelo y al mismo tiempo se procedió a la aplicación de enmiendas orgánica, la misma se incorporó con motocultivador y se utilizó cama de gallina en dosis de 1 kg m⁻², en cada ciclo de cultivo. Desmalezado, realizándose dos por cultivo, en forma manual con zapín y durante la etapa intermedia del ciclo productivo, aplicaciones fitosanitarias, para el control de rutina de plagas y enfermedades. El drenaje consistió en excavar una zanja trapezoidal (con retroexcavadora) hasta la profundidad de la barrera (tosca) y distanciada 5 m de las platabandas con cultivo y 1 m de la pared del túnel (profundidad aproximada de 0,8 m).

4.5 MANEJO DE RIEGO

El riego se realizó a partir de una perforación de 20 m de profundidad, encamisada, con una bomba electro sumergible monofásica de 1,5 HP, erogando un caudal de 5,0 m³ h⁻¹, con una salida de 0,057 m. El agua fue conducida a los lotes por una tubería principal de 0,057 m y antes de pasar a las líneas submadres o secundarias fue filtrada con filtro de anillas de 0,057 m.

En el túnel alto la sistematización se realizó en 2 platabandas centrales (con dos laterales de riego) y 2 lomos laterales (con un lateral de riego). Los laterales utilizados fueron T-Tape de 150 μm de espesor, diámetro interior de 16 mm y con goteros cada 0,20 m, resultando una densidad de 8,3 goteros m^{-2} .

Para controlar la uniformidad del riego se estabilizó la presión del sistema en 1 kg cm^{-2} , se eligieron 20 emisores en cuatro líneas laterales y se procedió a aforar el agua de riego en 5 minutos de tiempo.

Los cálculos para determinar caudal de emisores y coeficiente de uniformidad de distribución (CUD) fueron;

$$q = \text{Vol (L)} \times 12 \quad [8]$$

$$\text{CUD} = \frac{q \text{ 25 \% inferior} \times 100}{q} \quad [9]$$

Dónde:

CUD - Coeficiente de uniformidad de distribución

q - caudal medio, L h^{-1}

q 25 % inferior- caudal del 25 % de los emisores por debajo de q, L h^{-1} .

Actualmente, el método FAO Penman-Monteith (Allen *et al.*, 2006) es el recomendado como el método estándar para el cálculo de la evapotranspiración de referencia (ET_o). Por otra parte, la evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar (ET_c) se determinó utilizando como coeficiente único de cultivo (K_c) el valor de 0,72 (Allen *et al.*, 2006).

Los valores diarios de ET_o se obtuvieron de una estación meteorológica automática próxima al sitio experimental (Establecimiento Loma Arisca-Int. Alvear (LP)).

La precipitación no fue considerada porque el cultivo creció bajo cubierta plástica, resultando la necesidad de riego neta (NR_n) igual a ET_c. para determinar la dosis bruta de riego (DBR) se consideró la dosis neta de riego (DNR), RL (ecuación 4) y la eficiencia de aplicación, que se adoptó igual a CUD dado que se desprecian las pérdidas por escorrentía y las pérdidas por percolación profunda estarían contempladas en el propio cálculo de RL.

Las siguientes ecuaciones fueron utilizadas para realizar los cálculos:

$$NRn = ETc \quad [10]$$

$$DNR = (\theta_{cc} - \theta_{pmp}) \times Fa \times E \quad [11]$$

$$DBR = \frac{DNR}{(1 - RL) CUD} \quad [12]$$

$$IR = \frac{DNR}{NRn} \quad [13]$$

Dónde:

θ_{cc} – contenido volumétrico de agua en el suelo a capacidad de campo, expresado en $m^3 m^{-3}$.

θ_{pmp} = contenido volumétrico de agua en el suelo en punto de marchitez permanente, expresado en $m^3 m^{-3}$.

E = espesor enraizable del suelo, expresado en m. (Granda & López Jacone, 2009) (Estudios de los sistemas de riego localizado por goteo y exudación en el rendimiento del cultivo de lechuga en invernadero).

Fa: factor de agotamiento: equivalente a 0,2 ya que se mantuvo la humedad del suelo a un 80,0 % de CC.

NRn: necesidad de riego neta, se expresa en $(mm \text{ dia}^{-1})$.

DNR: dosis neta de riego, se expresa en (mm).

DBR: dosis bruta de riego, expresado en (mm).

IR: intervalo entre riegos, expresado en días.

RL: requerimiento de lixiviación es adimensional.

Los valores de CEa y CE umbral en función de la tolerancia de la lechuga fueron de (0,9 y 1,31 $dS m^{-1}$, respectivamente), resultando RL en 0,5.

Estos cálculos se realizaron desde el inicio hasta el día de la cosecha, repitiéndose en los cuatro ciclos y para todos los tratamientos, incluido T0.

4.6 TRATAMIENTOS

El 1/03/2010 se comenzó con las tareas de preparación del terreno para realizar los tratamientos.

Al mismo tiempo se procedió a separar con polietileno los distintos sectores del túnel para aislar los diferentes tratamientos de suelo. El mismo fue colocado en forma vertical hasta una profundidad de 0,8 m lugar donde se encontraba el manto de tosca. De ésta forma el túnel quedó dividido en 8 sectores de 8 m de largo, 3 m de ancho, es decir 24 m^2 .

Una vez divididos los sectores para los tratamientos se distribuyó la enmienda orgánica en dosis de 1 $kg m^{-2}$ y se incorporó con motocultivador. En los tratamientos T1 y T2 se aplicó la

enmienda química (yeso agrícola pelletizado, SO₄Ca grado de pureza mayor al 92,0 %, S: 17,0 %, Ca: 22,0 % y SO₄: 54,0 %) y la ecuación para su cálculo fue la propuesta por Richards (1954): Corrección de los primeros 0,20 m de perfil de suelo.

$$Y = \frac{(\text{PSI final} - \text{PSI inicial}) \times \text{CIC}}{100} \quad [14]$$

Y: dosis de yeso, expresada en kg m⁻²

Ese valor resultó 0,35 kg m⁻² y luego de la incorporación se regó con 10 mm para favorecer la reacción de las enmiendas con el suelo.

4.6.1 Mediciones en cultivo y suelo

En la Tabla 17 se presentan las fechas de siembra, fecha de trasplante y cosecha. La siembra se realizó en bandejas multiceldas de 13 cm³ en sustrato formado por turba y perlita (50 y 50 v/v). Las cosechas se realizaron manualmente en diferentes épocas del año, eliminando las hojas inferiores que no presentaban calidad comercial. El muestreo fue al azar, con una superficie de 1 m² por muestra en cada uno de los tratamientos evaluados. Se determinó peso total de la muestra, P, expresado en kg m⁻² y dado que se contaron las plantas de cada muestra, se pudo obtener el peso individual de plantas (PIP), expresada como g pl⁻¹. Este procedimiento se repitió en cada uno de los cuatro ciclos de cultivo.

Tabla 17: Detalle de las fechas de los distintos ciclos de cultivos.

Ciclo	Siembra	Trasplante	Días al trasplante	Cosecha	Días trasplante a cosecha
1º	19/03/10	19/04/10	31	02/07/10	74
2º	20/07/10	20/08/10	31	26/10/10	67
3º	05/12/10	05/01/11	31	11/02/11	37
4º	03/04/11	03/05/11	30	16/08/11	105

Con respecto a las mediciones del suelo, se tomaron muestras disturbadas de los primeros 0,20 m al inicio del experimento y al finalizar cada ciclo de cultivo y en cada una de las unidades de medición de los tratamientos para determinar pH y CE en el último ciclo de producción se realizó en todos los tratamientos un análisis completo del perfil de suelo (de 0,0 m a 0,80 m, estratificado cada 0,20 m) obteniendo, además de pH y CE, CIC, PSI, y cationes de intercambio. Las técnicas analíticas se presentan en la Tabla 18 y se realizaron en el Laboratorio de Calidad, Suelos y Agua INTA Pergamino.

4.7 DISEÑO ESTADÍSTICO

El diseño que se utilizó fue factorial completamente aleatorizado con 4 submuestras (unidades de medición) por tratamiento. Este diseño da respuesta a las dificultades encontradas cuando no se pueden lograr repeticiones en todos los tratamientos (Carmer, 1976; Carmer & Walker, 1988; Machado, 2006).

Tratándose de un ensayo factorial no replicado, para las pruebas de significancia se emplearon las interacciones triples como estimador del error experimental. Los análisis se realizaron empleando los procedimientos GLM y MIXED de SAS (2004).

El factor A correspondió a diferentes tratamientos de rehabilitación del suelo: T0- Testigo; T1- 3,5 Mg ha⁻¹ de yeso agrícola de composición granulada; T2 - 3,5 Mg ha⁻¹ de yeso agrícola de composición granulada + drenaje y T3- Drenaje. El factor B correspondió a la cantidad de años de riego previos al inicio del experimento, B1: 2 años de riego y B2: 4 años de riego.

Las comparaciones de medias se realizaron con el test LSD de Fisher, para nivel de significancia del 10,0 %. Para seleccionar estos niveles de significancia se tuvo en cuenta, además de Perrett & Higgins (2006), el impacto productivo producido por esas diferencias entre tratamientos.

Tabla 18: Técnicas analíticas empleadas en las diferentes determinaciones

Propiedad	Denominación	Método
pH	pH actual	Potenciométrico, Agua 1:2,5- SSSI
CE	Conductividad Eléctrica	Conductimétrico, Agua 1:2,5
Ca ²⁺	Calcio intercambiable	Volumetría complejométrica- Schollenberger y Simon (1945)
Mg ²⁺	Magnesio intercambiable	Volumetría complejométrica- Schollenberger y Simon (1945)
K ⁺	Potasio intercambiable	Fotometría de llama- Schollenberger y Simon (1945)
Na ⁺	Sodio intercambiable	Fotometría de llama- Schollenberger y Simon (1945)
CIC	Capacidad intercambio catiónico	Saturación de amonio- Schollenberger y Simon (1945)

También se midió el valor de densidad aparente (DA) al inicio del experimento con el método del cilindro (Blake, 1986), tomando datos en los primeros 0,20 m de suelo en cada uno de las tratamientos, que permitió obtener la porosidad total (PT, %).

La infiltración se midió en el horizonte superficial al finalizar el 4º ciclo, mediante infiltrómetros de disco a tensión (Perroux & White, 1988), con plato de 120 mm de diámetro. Los sitios de estudios correspondieron a las platabandas donde se desarrolló el cultivo de lechuga. En el lugar designado para ubicar el instrumento se eliminó la vegetación y residuos presentes, buscando que la superficie de apoyo esté nivelada y lisa. También se agregó una capa de arena fina con la finalidad de que el instrumento apoye sobre una superficie horizontal. Se realizaron 24

determinaciones en los diferentes tratamientos, cada una de 1 hora de duración, con tensión cero y registrándose la lámina infiltrada en intervalos de 2 min al inicio y 5 min al final.

También al finalizar el experimento se realizó una prueba inédita para evaluar el grado de encharcamiento provocado por la aplicación de riego y cuantificar infiltración media de agua en el suelo. Para ello se aplicó una lámina de 150 mm mediante el bombeo con bomba de presión, generando encharcamiento en todo el invernadero a través de la construcción de bordes en los extremos laterales y frentes, suficiente como para infiltrar agua hasta el horizonte con presencia de tosca, y 6, 12, 24, 36 y 60 hs después de iniciada la infiltración se determinó el contenido de agua en el suelo con método gravimétrico a diferentes profundidades (0-0,20 m, 0,20-0,40 m, 0,40-0,60 m y 0,60 a 0,70 m).

5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 EVOLUCIÓN DE TEMPERATURAS MEDIA Y LA EVAPOTRANSPIRACIÓN AÑOS 2010 Y 2011

Las estaciones fueron bien marcadas, registrándose en los meses estivales temperaturas promedio de 24°C, en tanto que durante los meses invernales las temperaturas medias oscilaron en 7 °C (Fig. 9).

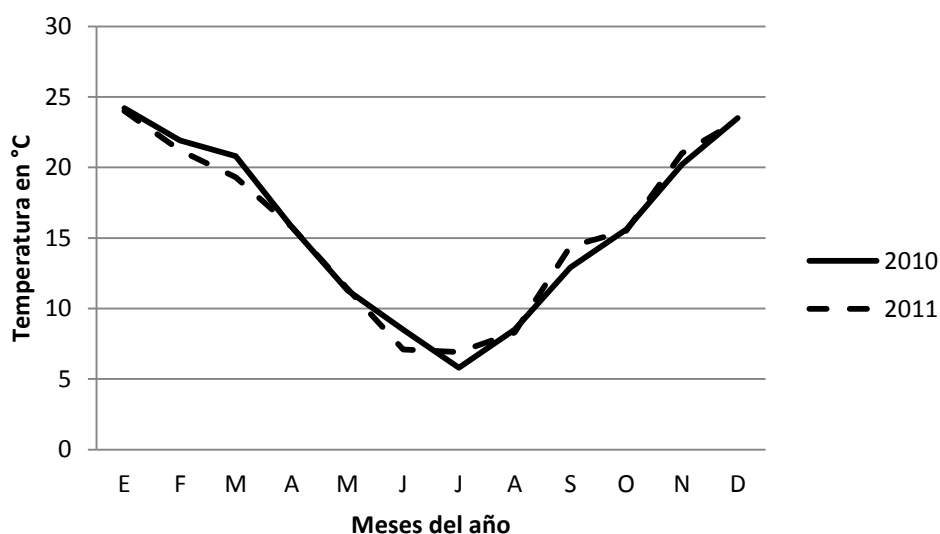
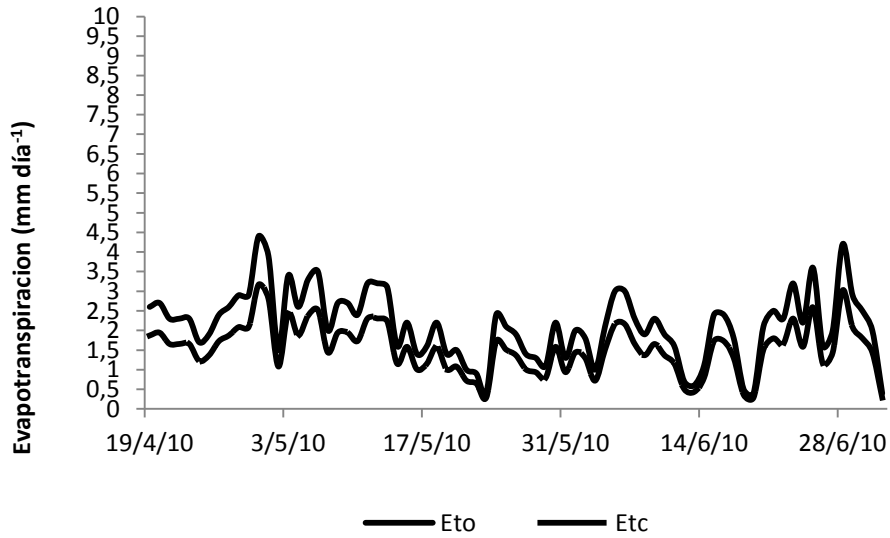


Fig. 9: Evolución de la temperatura media mensual (°C) para los años 2010 y 2011.

Fuente: Mediciones realizadas en el establecimiento "Don Osvaldo", en Caleufú, La Pampa, aire libre.

La Fig. 10 (a, b, c y d) presenta las variaciones de Eto, Etc y Kc del cultivo para cada ciclo de producción. Respecto a la Fig. 10 (a), Kc tuvo un valor de 0,72 (Defilipis *et al.*, 2004) durante el desarrollo del primer ciclo productivo, que coincidió con los meses de abril, mayo y junio. Los valores mínimos y máximos de Eto y Etc variaron entre 0,40 mm dia⁻¹ a 4,0 mm dia⁻¹ y 0,28 mm dia⁻¹ a 3,17 mm dia⁻¹, respectivamente.

(a)



b)

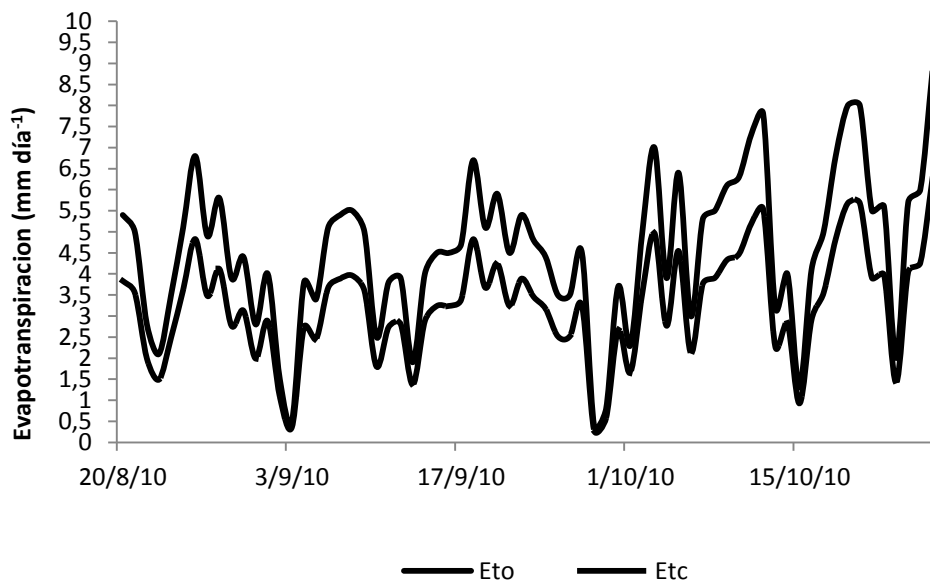


Fig. 10: Evolución de la evapotranspiración de referencia (ETo) y evapotranspiración del cultivo (ETc) de lechuga a partir de transplante, bajo condiciones de invernadero, para cada ciclo de producción del cultivo de lechuga: a, 1^o ciclo; b, 2^o ciclo; c, 3^o ciclo, d, 4^o ciclo.

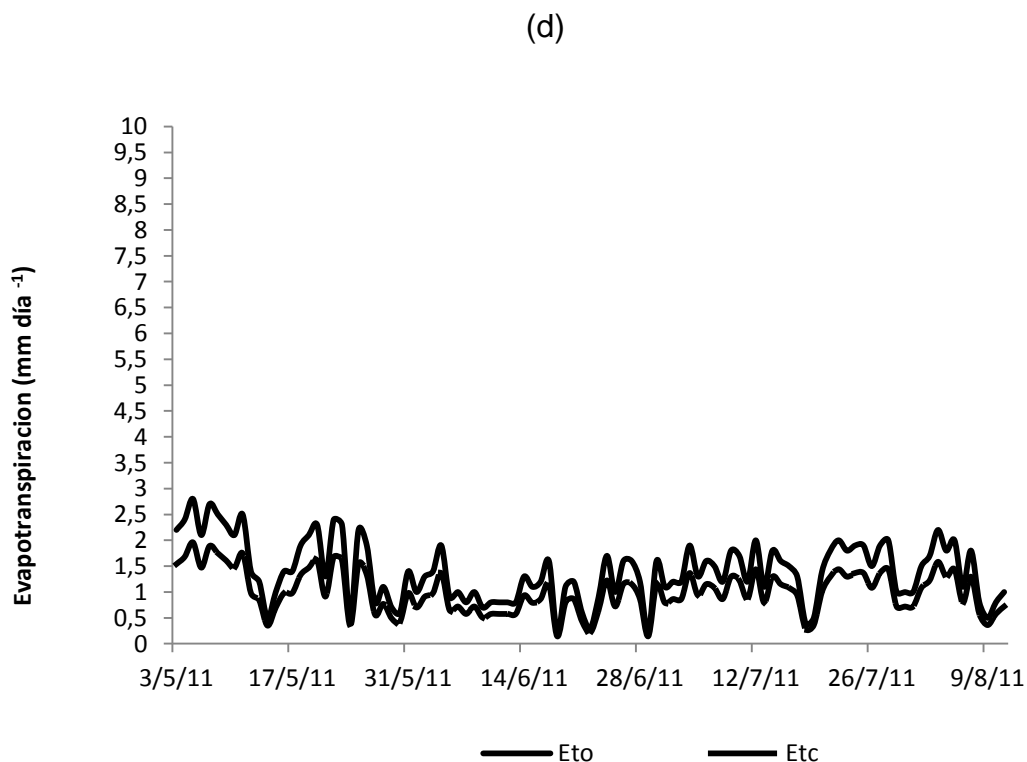
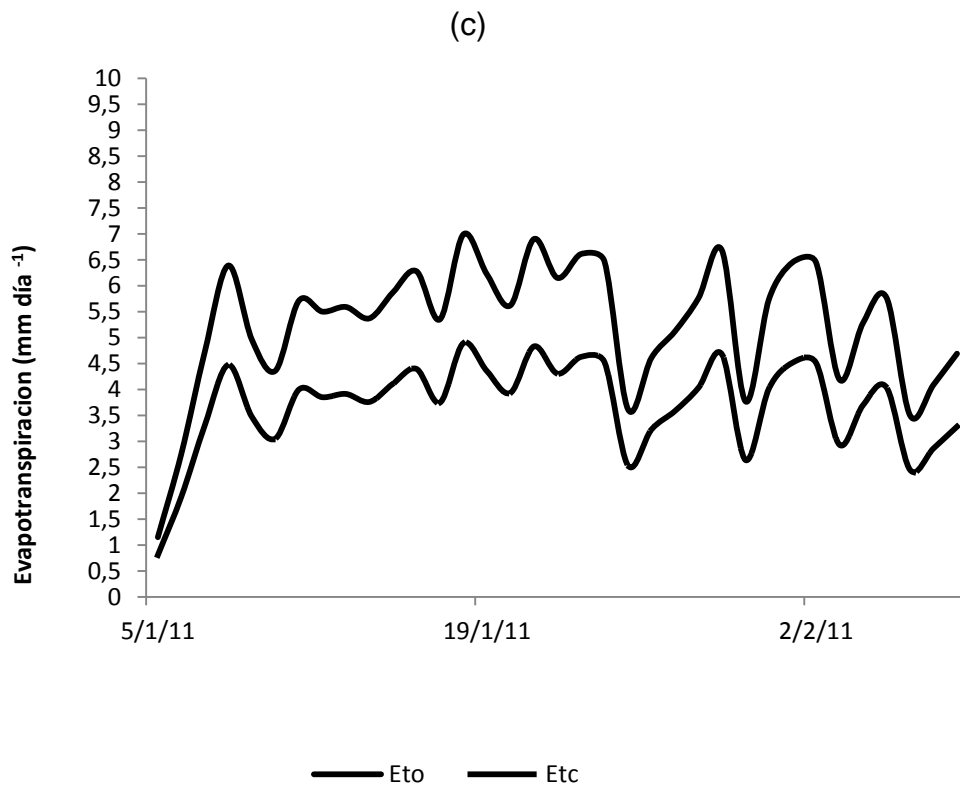


Fig. 10 Cont.: Evolución de la evapotranspiración de referencia (ET_o) y evapotranspiración del cultivo (ET) de lechuga a partir de transplante, bajo condiciones de invernadero, para cada ciclo de producción del cultivo de lechuga: a, 1^o ciclo; b, 2^o ciclo; c, 3^o ciclo, d, 4^o ciclo.

Si bien en el trabajo no se evaluó específicamente, Ortega *et al.* (1999) estudiaron las necesidades de agua del cultivo, las cuales variaron entre 52 y 125 mm, dependiendo de la época del año en que se produzca. La lechuga es un cultivo muy sensible al déficit hídrico debido a que

su sistema radical es poco profundo, efecto que se evidencia en la producción de materia verde y requiriendo contenidos hídricos en el suelo cercanos a capacidad de campo (Adrover *et al.*, 2001). Esta restricción implica que el productor riegue con alta frecuencia lo que resulta, en la mayoría de los casos, aplicaciones superiores a las necesarias.

Los diferentes consumos de agua según el ciclo analizado se explicarían por la influencia de la demanda evaporante de la atmósfera, siendo ésta superior en condiciones de mayores temperaturas y radiación (ciclo primaveral). En el ciclo invernal, la evapotranspiración decayó (Fig. 10 d) junto con las temperaturas y la radiación, ocurriendo lo contrario en el ciclo primaveral (Fig. 10 b).

En esta investigación se consideró la producción de lechuga destinada a consumo en fresco, por lo que la planta no alcanza a cumplir todas sus etapas fenológicas, ya que se cosecha en un momento de activo crecimiento y por ende el consumo de agua sería menor.

Allen *et al.* (2006) presenta valores de K_c inicial y medio para condiciones al aire libre de 0,70 y 1,0 respectivamente, superiores al utilizado en este trabajo. Otros investigadores (Gallardo *et al.*, 1996), determinaron valores experimentales en cultivo de lechuga a campo que variaron entre 0,70 y 0,89.

5.2 MANEJO DEL RIEGO

Para mantener un contenido de agua en el suelo equivalente al 80 % de capacidad de campo, se necesitó aplicar con cada riego un valor de DNR igual a 15 mm, teniendo en cuenta el espesor de suelo considerado (0,20 m). Para aplicar DBR, se consideró RL igual a 0,5 y CUD de 0,95. En cada uno de los ciclos se utilizó el criterio antes mencionado, excepto en el segundo, donde RL fue tan sólo 0,07 a causa de inadecuado control de la dosis aplicada. Debido a ello, en el ciclo siguiente se acumularon sales en superficie por lo que se cumplió con la pauta de RL de 0,53. En el cuarto ciclo se mantuvo igual magnitud de RL, sin advertirse problemas de encharcamiento.

El intervalo de riego (IR) fue de 3,3 días promedio en base a la duración del ciclo y n^0 de riegos (Tabla 19).

Los resultados verificación de caudales y prueba de uniformidad de emisores de riego indicaron valores medios de caudal de $1,5 \text{ L h}^{-1}$, que representó una pluviometría de $8,5 \text{ mm h}^{-1}$ y CUD de 0,95 justificado por las dimensiones de la subunidad de riego, que fueron equivalentes a las platabandas.

Tabla 19: Evapotranspiración: ETo, evapotranspiración de referencia (mm); ETc, evapotranspiración del cultivo (mm); DNR, necesidad de riego neta (mm); DBR, necesidad de riego bruta (mm); RL: requerimientos de lixiviación (mm) RL: requerimientos de lixiviación (%) N° de Riegos: número de riegos total en el ciclo completo del cultivo. IR: intervalo de riegos (días), (A-M-J) meses de abril, mayo y junio, (A-S-O) meses de agosto, septiembre y octubre, (E) Mes de enero, (A-M-J) meses de mayo, junio y julio.

Ciclo	$\sum DNR = \sum ETc$	DBR	RL(mm)	RL	N° de Riegos	IR
1° (A-M-J)	122	146	24	0,17	13	4,20 días
2° (A-S-O)	214	230	15	0,07	18	3,20 días
3° (E)	142	300	158	0,53	17	1,25 días
4° (M-J-J)	103	218	115	0,53	18	4,60 días

5.3 ANÁLISIS DE LA PRODUCTIVIDAD

El primer ciclo de cultivo fue de 74 días y estuvo comprendido entre los meses de abril y junio, encontrándose diferencias significativas ($p < 0,10$) entre tratamientos para P pero no en PIP, resultando uno de los ciclos más productivos (Tabla 20). Dado que los tratamientos T1 y T2 (ambos con aplicaciones de yeso) en los dos primeros ciclos tuvieron significativamente ($p < 0,10$) mayor P en relación a T0, la enmienda calcárea habría tenido un rol importante en los incrementos en P.

Diversos autores obtuvieron diferentes resultados en cuanto a la efectividad de la aplicación de yeso. Longo *et al.* (2005) evaluaron la productividad y calidad de lechuga de hoja adicionando yeso en Argiudoles en el cinturón hortícola de Rosario, sin encontrar respuesta productiva. En contraste, López-Aguilar *et al.* (2012), encontraron que el agregado de yeso como enmienda inorgánica en el cultivo de lechuga incrementó el rendimiento entre un 13,6 y un 15,4 % en parcelas que recibieron entre 4 y 8 Mg ha⁻¹ de yeso respectivamente.

La razón por la que las plantas tuvieron igual PIP entre tratamientos indicaría que hubo mayor número de plantas en los tratamientos T1 y T2 en relación al testigo, porque en algunas parcelas se perdieron plantes y al evaluar por superficie el tratamiento T0 contaba con menos plantas m² (datos no presentados).

Considerando ahora el efecto año (B1 y B2) y dado que no hubo interacción significativa con los tratamientos, hubo diferencias significativas ($p < 0,10$) entre años en las variables P y PIP (Tabla 20). El invernadero con más años de riego tuvo menor productividad en general, indicando que las aplicaciones de yeso y/o manejo del riego no alcanzaron a manifestarse en el 1° ciclo.

El segundo ciclo tuvo una duración de 67 días, entre los meses de agosto a octubre, con diferencias significativas ($p < 0,10$) entre los tratamientos en relación a T0, pero sin diferencias

entre ellos (Tabla 20). En este período se logró la mayor productividad en relación al resto de los ciclos debido a que esta época del año es muy favorable para el adecuado desarrollo de la lechuga (Maroto *et al.*, 2000).

En este ciclo fue notorio el impacto que tuvieron los tratamientos en relación a P, aunque es llamativo que no se diferenciaron estadísticamente. El impacto del manejo del riego fue reducido porque RL fue muy baja, apenas 0,07, por lo que la aplicación de enmiendas sería la causa principal de la mayor productividad. El drenaje nuevamente tuvo efectos contradictorios, porque si se considera T3, se diferenció estadísticamente ($p < 0,10$) de T0, indicando que aún con bajos RL el tratamiento habría permitido arrastrar las sales fuera de la profundidad enraizable y así mejorar las condiciones de absorción de agua y nutrientes. Si este supuesto fuera válido, el drenaje combinado con aplicación de yeso (T2) debería haber tenido mayor P que T1, situación que no fue tal (Tabla 20).

Estos resultados son coincidentes a los encontrados por Longo *et al.*, 2005, y Ghironi *et al.* (2010), quienes también encontraron diferencias significativas en la misma época de producción, en ensayos realizados sobre suelos arenosos similares a los estudiados en esta tesis. En tanto que Longo *et al.* (2005), al igual que en el ciclo anterior, no encontraron diferencias significativas tanto en P como en PIP.

Analizando la respuesta de P entre años, y también en el 2º ciclo, no se encontraron diferencias significativas entre sí, con una notable recuperación del túnel B2, que incluso superó en valor a B1 (Tabla 20). Esto indicaría un efecto de los tratamientos en su conjunto a partir de este ciclo, mejorando las condiciones de suelo para un adecuado desarrollo del cultivo.

Como en el 1º ciclo, PIP no se diferenció estadísticamente con el testigo ni entre túneles, indicando que el aumento de P en T1, T2 y T3 se debió a mayor número de plantas establecidas. El 3º ciclo (36 días) se desarrolló en el mes de enero, no comprobándose diferencias significativas de P y PIP entre tratamientos (incluyendo T0, Tabla 20). Dado que en este ciclo RL aumentó a 0,53 debido a la acumulación de sales en superficie, el manejo del riego sería probablemente la causa de que todos hayan resultado semejantes.

Analizando el efecto año para P, hubo diferencias significativas ($p < 0,10$), resultando mayor el túnel con mayor número de años de riego (B2), continuando con la tendencia que este túnel tuvo a partir del 2º ciclo. Las diferencias de P no se expresaron en PIP y las explicaciones de este comportamiento no estarían estrictamente en los tratamientos sino en año, aspecto que será analizado más adelante. Datos similares fueron encontrados por Longo *et al.* (2005); en tanto que Ghironi *et al.* (2010) trabajando sobre suelos, comparando a igual ciclo encontraron diferencias significativas tanto en P como en PIP, datos que difieren de los resultados encontrados en la presente tesis.

Tabla 20: Valores medios de rendimiento (kg m^{-2}) y peso individual de plantas (kg pl^{-1}) de los tratamientos Testigo (T0), Enmienda (T1), Enmienda+ Drenaje (T2) y Drenaje (T3); con túneles de 2 años (B1) y 4 años (B2); para cuatro ciclos de cultivo.

		Tratamientos				Túneles (años de riego)	
		T0	T1	T2	T3	B1 (2años)	B2 (4años)
1° ciclo	P (kg m^{-2})	2,37 (b)	3,02 (a)	3,12 (a)	2,65 (ab)	3,06 (a)	2,51 (b)
	PIP (kg pl^{-1})	0,16 (a)	0,21 (a)	0,23 (a)	0,19 (a)	0,21 (a)	0,19 (b)
2° ciclo	P (kg m^{-2})	2,39 (b)	4,12 (a)	3,52 (a)	3,39 (a)	3,17 (a)	3,54 (a)
	PIP (kg pl^{-1})	0,20 (a)	0,29 (a)	0,29 (a)	0,28 (a)	0,23 (a)	0,30 (a)
3° ciclo	P (kg m^{-2})	2,13 (a)	2,31 (a)	2,38 (a)	2,10 (a)	1,90 (b)	2,61 (a)
	PIP (kg pl^{-1})	0,18 (a)	0,17 (a)	0,19 (a)	0,17 (a)	0,15 (b)	0,20 (a)
4° ciclo	P (kg m^{-2})	1,08 (a)	1,33 (a)	1,15 (a)	1,06 (a)	1,12 (b)	1,18 (a)
	PIP (kg pl^{-1})	0,10 (a)	0,11 (a)	0,09 (a)	0,09 (a)	0,10 (a)	0,10 (a)

Medias con letras diferentes en sentido horizontal representan diferencias significativas ($p < 0,10$) según Test LSD.

La menor diferencia entre tratamientos ocurrió en los dos últimos ciclos, indicando dos posibles causas: i) el efecto de la enmienda alcanzaría sólo hasta el 2° ciclo productivo, con caídas muy abruptas a partir de 300 días después de haber incorporado la práctica, ii) en condiciones ambientales menos favorables para la producción de lechuga bajo cubierta plástica, el efecto residual de la enmienda es menos importante que las propias restricciones ambientales.

El último ciclo se desarrolló entre los meses de junio y agosto, con 104 días de duración. Las variables P y PIP tuvieron un desempeño similar al 3° ciclo, aunque no alcanzaron ni a la mitad de aquellos resultados (Tabla 20). En esta época del año las condiciones ambientales no son las mejores para el óptimo crecimiento de la lechuga por lo que tuvieron los valores más bajos de producción (P) y calidad de planta (PIP). Hubo interacción significativa ($p=0,031$) entre factores, con las mayores producciones para los tratamientos T1 y T2 de B2. El túnel B1 tuvo valores menores de P para todos los tratamientos comparados con B2, excepto T0 (Fig. 11). A pesar de B2 tener mayor número de años continuos de riego, el suelo de este túnel tuvo mejor

respuesta a la aplicación de los tratamientos, mientras que para la situación control (T0), el sólo manejo del riego no fue suficiente como para mejorar el suelo.

Estos resultados son coincidentes con los encontrados por Longo *et al.* (2005) solo en P, mientras que para PIP estos autores determinaron diferencias significativas para la misma fecha de producción. En tanto ambas variables estudiadas fueron coincidentes con las datos reportados por Ghironi *et al.* (2010).

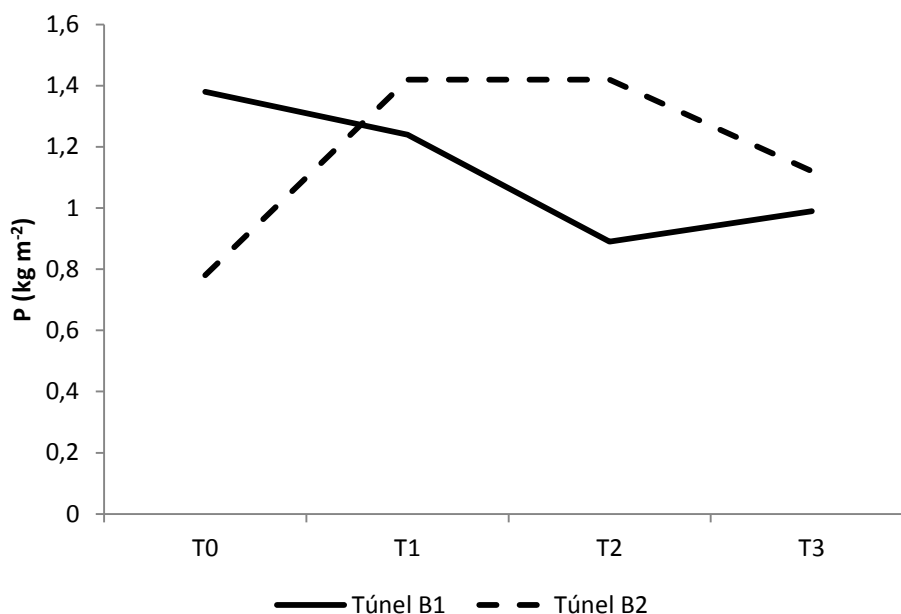


Fig. 11: Evolución de la productividad (P) de los tratamientos: Testigo (T0), Enmienda (T1), Enmienda+ Drenaje (T2) y Drenaje (T3); con túneles de 2 años (B1) y 4 años (B2); para cuatro ciclos de producción.

5.4 EVOLUCIÓN DE LOS TÚNELES

En la Tabla 21 se determinaron las diferencias entre los tuneles B1 y B2 para cada ciclo de cultivo y entre el ciclo posterior menos el anterior para cada túnel. Sólo en el 1º ciclo P resultó mayor en B1 que en B2, corroborando la tendencia de un mayor efecto de los tratamientos en el túnel con mayor cantidad de años de riego continuo.

Las diferencias de P entre ciclos están relacionadas tanto a la condición ambiental como a la evolución del suelo en función de los tratamientos. Si bien el 2º ciclo fue el de mayor P por la mejor condición ambiental, la diferencia positiva mayor se produjo en el túnel B2, indicando que en poco más de tres meses los tratamientos en su conjunto permitieron mejorar la productividad, en tanto que para el túnel B1 el impacto de los tratamientos fue más suave (Tabla 21), probablemente debido a que el suelo en este túnel necesitaría de mayor tiempo para que el yeso tuviese efecto o bien los tratamientos no tienen el efecto deseado. En ambos túneles disminuye P en el tercer ciclo debido a una diferente condición ambiental, pero la caída fue más abrupta en el

túnel B1 (Tabla 21). Éste, a pesar de tener condiciones de salinidad de suelo iniciales más favorables, no tuvo igual respuesta a los tratamientos que el túnel B2. El 4º ciclo ocurrió con condiciones ambientales muy desfavorables, por ende la disminución drástica de P (Tabla 21).

Tabla 21: Diferencias de Productividad (P) entre túneles de 2 años (B1) y 4 años (B2) para cada ciclo de cultivo y entre ciclos para cada túnel.

Túneles/ ciclo de cultivo (días)	P (kg m ⁻²)			
	1º ciclo	2º ciclo	3º ciclo	4º ciclo
B1	3,06 a	3,17 a	1,9 b	1,12 b
B2	2,51 b	3,54 a	2,6 a	1,18 a
% de diferencia de rendimiento entre túneles B1 y B2 por ciclo	22 *	-12*	-37*	-5*
% de diferencia de rendimiento entre ciclos de cultivo para el túnel B1		3,6**	-66**	-69**
% de diferencia de rendimiento entre ciclos de cultivo para el túnel B2		41***	-36***	-120***

Letras distintas en sentido vertical, indican diferencias significativas entre los túneles B1 y B2 para los diferentes ciclos de producción ($p < 0,10$) según test LSD.

*En caso positivo indica que P en el túnel B1 fue mayor que en el túnel B2, en caso negativo, lo contrario.

** En caso positivo indica que P del ciclo posterior fue mayor que el ciclo anterior, en caso negativo, lo contrario.

*** En caso positivo indica que P del ciclo posterior fue mayor que el ciclo anterior, en caso negativo, lo contrario.

Además de la productividad individual de cada ciclo, es conveniente analizar la producción acumulada de lechuga de los cuatro ciclos dado que permite una mejor comprensión del proceso. En B2 hubo respuestas ($p < 0,10$) a los tratamientos T1, T2, T3, sobre el tratamiento T0 en los 4 ciclos de producción del cultivo de lechuga (Fig. 12). Las mayores diferencias en este túnel entre tratamientos se registraron en T0 y T1 (Fig. 12). El mayor impacto de los tratamientos se registró en el túnel B2 posiblemente debido a su mayor degradación por su uso anterior a la experiencia (Tabla 15). En tanto que en B1 sólo se comprobó respuesta significativa ($p < 0,10$) en el 2º ciclo de los tratamientos T1 y T2 respecto de T3 y T0, no observándose diferencia en los otros ciclos de producción (Fig. 13). De ésta figura se desprende que el análisis acumulado de producción fue siempre estadísticamente significativo en el túnel B2, en tanto que en B1 solo fue estadísticamente significativo hasta el segundo ciclo productivo. Estas variables productivas pueden estar relacionadas a los índices de fertilidad y mejora en las condiciones de menor contenido de sales. (Tabla 15).

El índice de fertilidad IMO, resultando 6,6 y 11,5 para el túnel B1 y B2 respectivamente. Los valores calculados para la presente tesis, nos indica mayor potencial productivo en el túnel B2. Este indicador destaca la importancia de MO del suelo, que fue mucho mayor al inicio en el túnel B2, posiblemente, producto del manejo previo (Tabla 15).

Este tipo de análisis es el que realiza el productor para sacar sus resultados económicos. Es evidente en túnel B2 el efecto sobre el ingreso y la factibilidad de resultados positivos. Mientras que en el túnel B1 sólo tendría efecto sobre el resultado económico en el 2º ciclo productivo (Fig. 13).

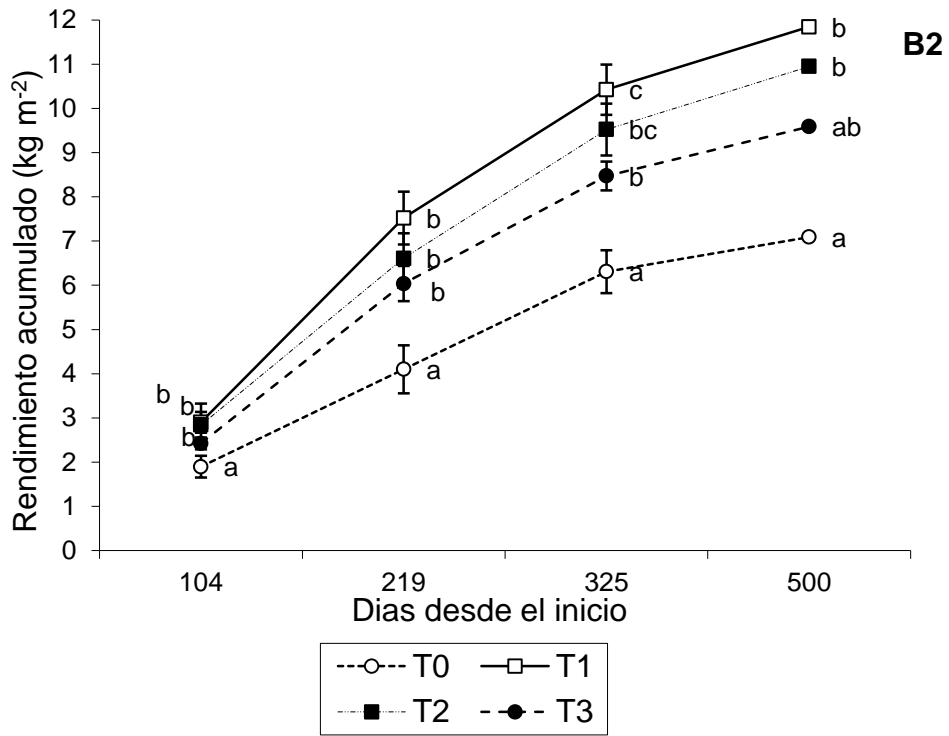


Fig. 12: Evolución de los rendimientos acumulados de lechuga para los diferentes tratamientos en función de la duración del ensayo en el túnel de 4 años de riego (B2). Letras diferentes en sentido vertical indican diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0,10$) según test LSD.

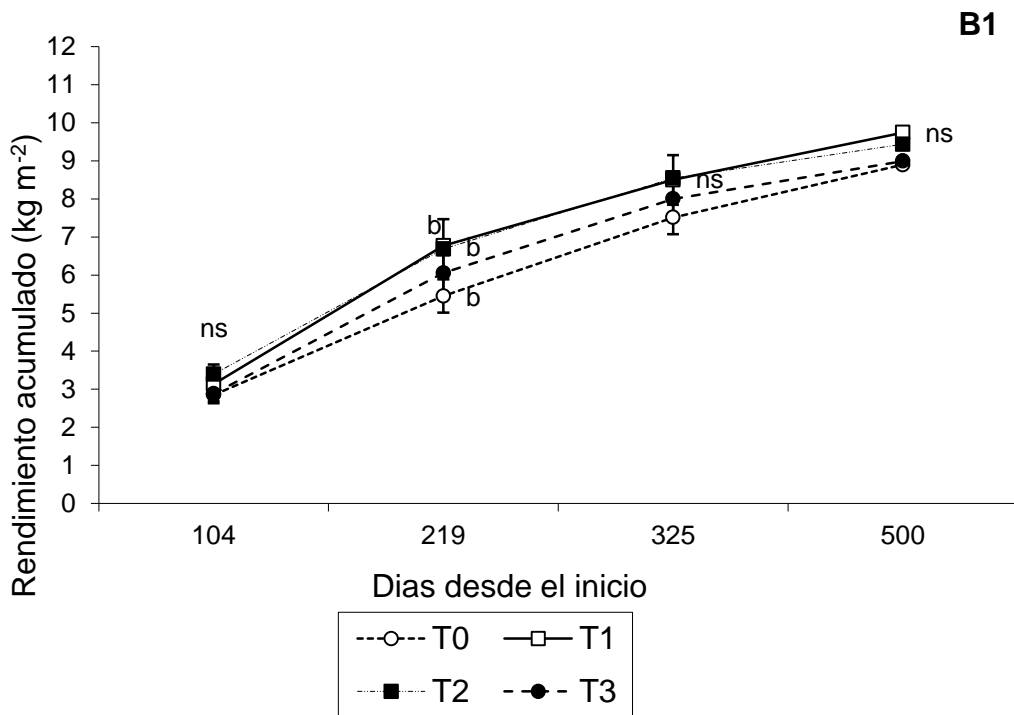


Fig. 13: Evolución de los rendimientos acumulados de lechuga expresados en kg m⁻² para los diferentes tratamientos en función de la duración del ensayo en el túnel de 2 años de riego (B1). Letras diferentes en sentido vertical indican diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0,10$) según test LSD.

5.5 ANÁLISIS DE VARIABLES DE SUELO

5.5.1 Salinidad y pH

La interacción entre los factores (años x tratamiento) para las variables pH y CE no fue significativa ($p < 0,10$) en ninguno de los ciclos productivos evaluados (Tabla 22). En tanto que si fue significativa entre años para la CE solo en el 3º ciclo ($p < 0,10$).

Considerando la variación de pH entre tratamientos y para cada uno de los ciclos de producción, en ninguno de ellos fue significativa estadísticamente, mientras que entre túneles la tendencia fue similar (Tabla 22). Los valores iniciales fueron muy elevados y superaron el rango de 5,0 a 8,5 que refiere Davis *et al.* (1997). A partir del 2º ciclo el valor de pH disminuyó en todos los tratamientos, sin observarse diferencias significativas entre ellos. Desde este ciclo el pH se estabilizó, lo cual indicaría un menor efecto de los tratamientos. Esta disminución generalizada podría deberse al manejo del riego, que aportó una dosis extra de agua como RL. Por otro lado, los valores de pH correspondientes al 1º ciclo de todos los tratamientos fueron mayores a los iniciales (Tabla 15), cuya explicación sería que los laboratorios que analizaron las muestras fueron diferentes.

Investigaciones desarrolladas en el cinturón hortícola de La Plata por Andreu *et al.* (2012) y Balcaza, 2003, los mismos no registraron resultados similares a los reportados en la presente tesis. Los ensayos fueron conducidos sobre suelos Argiudoles y en invernaderos de muchos años de riego, y, realizando las experiencias sobre cultivos de tomate, pimiento y verduras de hoja, encontraron disminuciones superiores a las registradas en este trabajo en la variable pH.

La CE fue inicialmente muy elevada y superior al umbral óptimo para que no haya disminución de productividad ($1,35 \text{ dS m}^{-1}$ según Maas & Hofmann, 1977). En el 2º y 3º ciclo disminuyeron abruptamente y se ubicaron por debajo de aquel umbral. Ya en el 4º ciclo se mantuvieron próximas a $0,5 \text{ dS m}^{-1}$. La disminución fue similar en todos los tratamientos, incluso T0, indicando que la causa sería el manejo del riego antes que los propios tratamientos. Entre túneles ocurrió lo mismo, sin diferencias estadísticas, excepto el 3º ciclo ($p < 0,10$; Tabla 22). Si bien no se observaron diferencias en los diferentes tratamientos en pH y CE, si se produjo un efecto positivo sobre la productividad del cultivo de lechuga. Posiblemente asociado al contenido de MO inicial e índice de fertilidad principalmente en el túnel B2 (Fig. 13).

Tabla 22: Valores medios de conductividad eléctrica del suelo (CE: dS m^{-1}) y pH para cuatro ciclos de cultivo de los tratamientos Testigo (T0), Enmienda (T1), Enmienda+ Drenaje (T2) y Drenaje (T3); en los túneles de 2 años (B1) y 4 años (B2); para los primeros 0,20 m del perfil de suelo.

Ciclos		Tratamientos				Túneles		Factor Tratamientos	Factor Años	Tratamientos x años
		T0	T1	T2	T3	B1 (2años)	B2 (4 años)			
1º ciclo	pH	8,93	8,79	8,76	8,84	8,80	8,80	ns	ns	ns
	CE (dS m^{-1})	1,93	2,73	3,14	2,56	2,47	2,71	ns	ns	ns
2º ciclo	pH	8,37	8,15	8,27	8,23	8,20	8,31	ns	ns	ns
	CE (dS m^{-1})	1,03	0,84	0,94	0,84	1,00	0,82	ns	ns	ns
3º ciclo	pH	8,35	8,21	8,32	8,35	8,24	8,37	ns	ns	ns
	CE (dS m^{-1})	0,52	0,77	0,53	0,78	0,54 (a)	0,76 (b)	ns	*	ns
4º ciclo	pH	8,24	8,29	8,46	8,48	8,40	8,33	ns	ns	ns
	CE (dS m^{-1})	0,44	0,61	0,54	0,55	0,49	0,58	ns	ns	ns

* ns: diferencias no significativas ($p < 0,10$) según Test LSD para cada ciclo(fila).

Fuente: Laboratorio de suelos EEA INTA Anguil.

En la Figura 14 se puede observar que CE fue mayor siempre en el túnel B2 respecto del túnel B1, excepto para T3, donde se evidenció la interacción año x tratamiento ($p=0,026$).

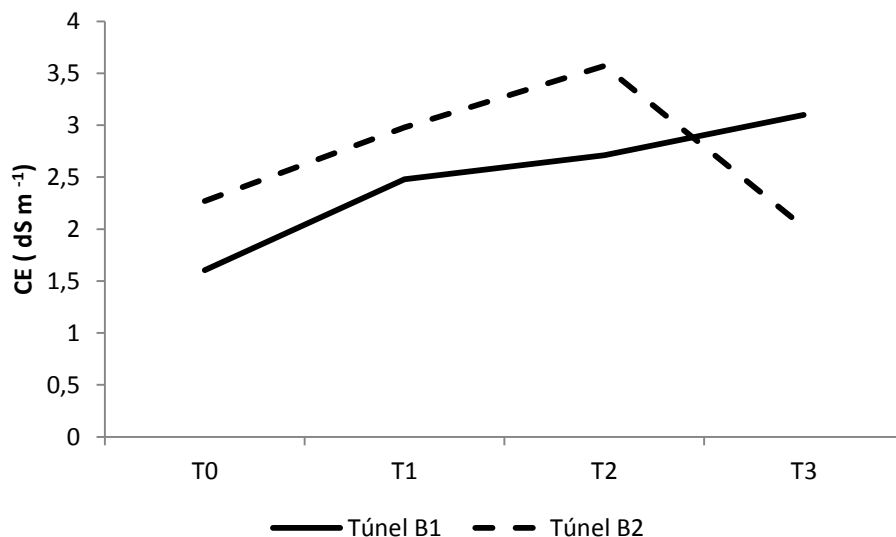


Fig. 14: Evolución de la conductividad eléctrica del suelo (CE) de los primeros 0,20 m de profundidad para los tratamientos Testigo (T0), Enmienda (T1), Enmienda+ Drenaje (T2) y Drenaje (T3); con túneles de 2 años (B1) y 4 años (B2); para el 1º ciclo de cultivo.

A través de la Fig. 15 se evidencia que el pH en el 1º ciclo tuvo una fuerte interacción entre los factores año x tratamiento ($p < 0,0001$) en el horizonte superficial (0-0,2 m). Analizando T0, B2 alcanzó menor pH que B1, a pesar que en la condición inicial fuese inverso (B2 tuvo mayor pH que B1). En el túnel B1 todos los tratamientos manifestaron un impacto en la disminución del pH, registrando el tratamiento T3 mayor relevancia, mientras que en B2 fue menos evidente, incluso contrastando el tratamiento de drenaje, que fue más alto que el resto, aunque sin diferencia estadística.

Diversos autores han encontrado respuestas positivas a la práctica de uso de enmiendas inorgánicas como mejoradoras del pH del suelo (López-Aguilar *et al.*, 2012; Wilson *et al.*, 2004), situación no encontrada nítidamente en este experimento.

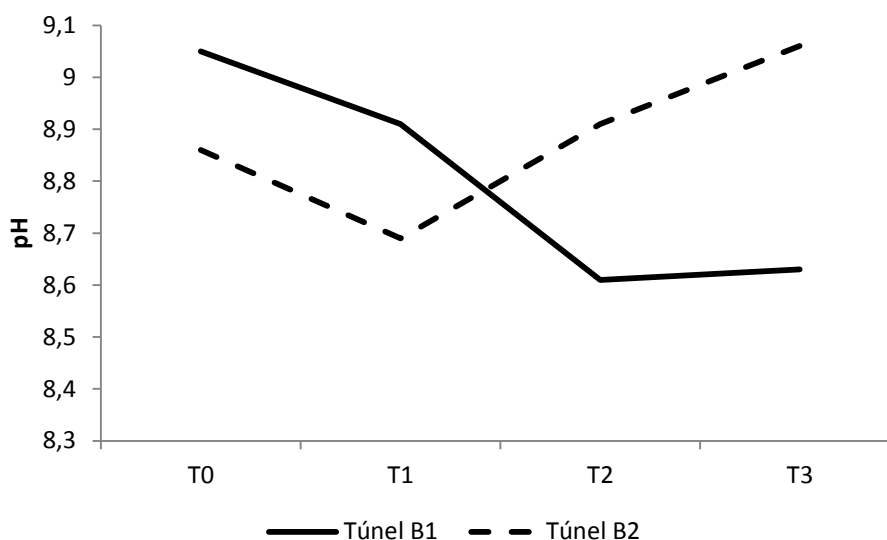


Fig. 15: Evolución del pH de los primeros 0,20 m de profundidad para los tratamientos Testigo (T0), Enmienda (T1), Enmienda+ Drenaje (T2) y Drenaje (T3); con túneles de 2 años (B1) y 4 años (B2); en el 1º ciclo productivo.

Las condiciones iniciales de pH y CE del suelo donde se aplicaron los tratamientos fueron muy diferentes a los valores del suelo prístino, lo que implica posible deterioro y degradación de aquellas propiedades (Tabla 15). Ello indicaría baja sustentabilidad de estos sistemas productivos y la necesidad de desarrollar estrategias de recuperación y manejo ajustadas localmente. Además del riego con aguas bicarbonatadas-sódicas, hubo deterioro de algunas propiedades físicas del suelo ocasionadas por el excesivo laboreo y la pérdida de MO que, junto con el aumento de la sodicidad, tienen como consecuencia mayor impedancia mecánica. Trabajos realizados por Andriulo *et al.* (1998); Barbacone & Costa (1999); Costa & Aparicio, (1999); Caviglia & Paparoti (2000), Vázquez *et al.* (2006a y b); y Vázquez *et al.* (2008) coincidieron con los resultados encontrados en este trabajo. De acuerdo a estos antecedentes y los umbrales alcanzados en las variables químicas evaluadas (CE, pH), las consecuencias esperables

definirían a la práctica de riego con esta calidad de agua y la lámina empleada, en los ambientes edafo-climáticos estudiados, como no sustentable. Adicionalmente, según una experiencia realizada por Bustos *et al.* (2006) la pérdida neta de sales (ingreso/descarga) en un suelo de tipo franco-arenoso, similar texturalmente al estudiado en este trabajo, con la aplicación de láminas de lavado, demostró descargas variables según el tipo de sal. En particular se verificó una importante retención de CO_3H^- por parte del suelo.

Por otro parte, el suelo analizado se caracteriza como Haplustol éntico-franco arenoso. En la presente tesis la granulometría no tuvo diferencias entre túneles ni entre tratamientos (Tabla 23). Esta verificación fue fundamental para descartar diferencias significativas granulométricas entre túneles y permite considerar su homogeneidad como un factor relevante.

Tabla 23: Granulometría del suelo en los diferentes tratamientos evaluados.

Tratamiento	Año	Arcilla+Limo (%)	Arcilla (%)	Arena (%)
T3	B1	32,0	7,6	68,0
T1		31,3	7,8	68,8
T2		31,9	7,9	68,1
T0		31,6	7,7	68,4
T3	B2	30,2	6,4	69,8
T1		30,0	7,3	70,0
T2		30,9	7,4	69,1
T0		29,9	6,6	70,1

5.5.2 Na, pH, PSI y CIC

5.5.2.1 Tratamiento T0 (Testigo)

En Tabla 24 se presentan los promedios de Na^+ , pH y CIC para el tratamiento T0 al finalizar el 4º ciclo y para el espesor 0,0-0,20 m entre ambos túneles. Las tres variables tuvieron diferencias significativas ($p < 0,10$). En el túnel B2 hubo mayores concentraciones de Na^+ y de PSI y menor CIC que en el túnel B1, a pesar de haber recibido iguales dosis de riego. La causa probable sería la disminución de MO (túneles vs suelo pristino o virgen), provocando mayor dispersión de coloides orgánicos en estratos superiores del suelo e inorgánicos en profundidad. Según el análisis de agua utilizada, su composición permite establecer que en todos los casos domina el NaCO_3H , sal que se caracteriza por su elevada alcalinidad y efecto dispersante de los coloides (Pizarro, 1985).

Tabla 24: Concentraciones de sodio en el suelo (Na^+ $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$), pH, porcentaje de sodio intercambiable (PSI, %) y capacidad de intercambio catiónico (CIC $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$) en el tratamiento T0 para los dos túneles en estudio en los primeros 0,20 m.

Tratamiento	Variable	Túnel	
		B1	B2
Testigo (T0)	Na^+	2,31 a	2,60 b
	pH	8,72 a	8,77 b
	CIC	12,26 a	11,38 b
	PSI	17,41 a	23,40 b

Continuando con el análisis de T0, pero considerando el promedio de ambos túneles para todas las profundidades, la concentración de Na^+ de 0-0,20 m fue más elevada que en el resto del perfil, y sin embargo en esta profundidad se registraron los menores valores de pH. Además se comprobó que a mayor profundidad, los valores de PSI disminuyen y en contraste los valores de pH aumentan (Tabla 25). Esta mayor alcalinidad podría deberse a la presencia de un manto calcáreo (tosca) no demasiado profundo (0,80 m). Además se comprobó que a partir de 0,4 m de profundidad no hubo diferencias significativas en los valores de PSI, ni en las concentraciones de pH (Tabla 25).

Tabla 25: Capacidad de intercambio catiónico (CIC $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$), pH y porcentaje de sodio intercambiable (PSI) promedio de ambos túneles en el tratamiento T0 para diferentes profundidades de suelo hasta la presencia de tosca (0,80 m).

Tratamiento	Profundidad (m)	Variables		
		pH	PSI (%)	CIC ($\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$)
Testigo (T0)				
	0-0,20	8,53 a	23,65 b	12,30 a
	0,20-0,40	8,63 a	21,00 ab	12,65 a
	0,40-0,60	8,87 b	19,20 a	12,05 a
	0,60-0,80	8,93 b	17,80 a	12,27 a

Letras distintas en sentido vertical, indican diferencias significativas entre profundidades para el tratamiento T0 ($p < 0,10$).

Al no comprobarse interacción entre factores (año x tratamiento) se analizó la variable Na^+ en promedio para cada profundidad. En este caso se tomaron los tratamientos extremos (T0 y T2) para analizar el cambio en los diferentes estratos evaluados. La concentración de Na^+ promedio de los túneles B1 y B2 fue menor en profundidad cuando se analizan los tratamientos T0 y T2 (Tabla 26). Entre ambos tratamientos se destaca el efecto combinado del yeso + drenaje (T2),

dado que en el estrato superior (0-0,40 m) T0 tuvo mayores concentraciones de Na^+ respecto de T2, mientras que por debajo de esa profundidad y hasta 0,80 m fueron similares y si hubiese habido drenaje, el Na^+ desplazado por el Ca^{2+} debería acumularse en los estratos inferiores, máxime considerando la presencia de tosca. Según estudios de diversos autores (Dubey & Mondal, 1994; Makoi & Verplancke, 2010) el Na^+ en suelos arenosos se redujo gradualmente conforme se incrementaron las dosis de yeso.

Tabla 26: Concentraciones de sodio (Na^+ $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$) promedio de ambos túneles en el tratamiento T0 y T2 para diferentes profundidades de suelo hasta la presencia de tosca (0,80 m).

Profundidad	T0	T2
	Na^+ $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$	
0-0,20 m	2,82 b	2,55 b
0,20-0,40 m	2,63 b	2,53 ab
0,40-0,60 m	2,25 a	2,48 ab
0,60-0,80 m	2,12 a	2,28 a

Letras en sentido vertical indican diferencias significativas de concentración de Na^+ entre profundidades en cada uno de los tratamientos ($p < 0,10$).

5.5.2.2 Tratamiento T2 (Enmienda+ Drenaje)

Hubo diferencias significativas ($p < 0,10$) en Na^+ y pH entre túneles para el tratamiento T2, pero no en la CIC (Tabla 27). Esto puede deberse al efecto de enmienda, como el agregado de MO que impidió la dispersión de coloides, tal como sucedió en T0, a lo largo de los 4 ciclos del cultivo de lechuga (Rotondo *et al*, 2009).

Tabla 27: Concentraciones de sodio en el suelo (Na^+ $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$), capacidad de intercambio catiónico (CIC $\text{meq } 100\text{gr suelo}^{-1}$), porcentaje de sodio intercambiable (PSI) y valores de pH para el tratamiento T2 en los túneles de 2 años (B1) y 4 años (B2).

Tratamiento	Variable	Túnel	
		B1	B2
Enmienda +Drenaje (T2)	Na^+	2,34 a	2,53 b
		8,66 a	8,89 b
	CIC	12,22 a	12,93 a
	PSI	17,81 a	19,55 b

Letras distintas en sentido horizontal, indican diferencias significativas entre años para las variables analizadas en el T2 ($p < 0,10$).

Considerando el promedio de ambos túneles para cada profundidad del tratamiento T2, se comprobó que la concentración de Na^+ sólo presentó diferencias significativas ($p < 0,10$) entre 0-0,20 m respecto de 0,60-0,80 m (Tabla 28). Por otra parte, entre 0 a 0,40 m, en este tratamiento

disminuyó la concentración de Na^+ en $0,40 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ ($0,27+0,13$), mientras que entre $0,40$ y $0,80$ m del mismo tratamiento aumentó la concentración de este ión en $0,39 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ ($0,23+0,16$). Esto se explicaría por el efecto del uso de enmienda (yeso) provocando que el sodio lixiviado de los horizontes superficiales se haya transformado en carbonatos (carbonato de sodio) lo cual produce un aumento de pH en profundidad. Si se utiliza el valor de RAS ajustado del agua de riego la condición de sodicidad en el suelo aumenta considerablemente (de $28,2$ a $31,2$), debido a la posibilidad de precipitación de CaCO_3 . Esto es consecuencia de la menor actividad del Ca^{2+} y por lo tanto, mayor RAS efectiva en el suelo. Estos resultados concuerdan con los obtenidos por otros autores para regiones similares a las estudiadas en esta tesis (Alconada, 1996; Alconada & Huergo, 1998; Alconada & Minghinelli, 1998).

Tabla 28: Concentraciones de sodio en el suelo ($\text{Na}^+ \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$), capacidad de intercambio catiónico (CIC $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$), y pH en el tratamiento T2 para las profundidades de suelo $0-0,80$ m.

Tratamiento	Profundidad m	Variables		
		pH	Na^+	CIC
Enmienda +Drenaje (T2)	0-0,20	8,52 a	2,55 b	13,42 a
	0,20-0,40	8,70 b	2,50 ab	13,38 a
	0,40-0,60	8,95 c	2,48 ab	12,55 a
	0,60-0,80	9,20 c	2,28 a	12,70 a

Letras distintas en sentido vertical, indican diferencias significativas entre profundidades para el tratamiento T2 ($p < 0,10$).

5.5.2.3 Tratamiento T1 (Enmienda)

En la Tabla 29 se muestran las diferentes variables analizadas en los primeros $0,20$ m del perfil del suelo, no detectándose diferencias significativas en el tratamiento T1 entre túneles en ningunas de las variables analizadas, considerando el espesor superficial ($0-0,20$ m). En tanto que considerando el promedio de ambos túneles, este tratamiento provocó una disminución en la concentración de Na^+ respecto de T0 de $2,82$ a $2,43 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$.

Tabla 29: Concentraciones de sodio en el suelo (Na^+ $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$) capacidad de intercambio catiónico (CIC $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$), valores de pH y porcentaje de sodio intercambiable (PSI, %) en el tratamiento T1 para los túneles de 2 años (B1) y 4 años (B2) considerando 0,20 m de espesor del suelo.

Tratamiento	Variable	Túnel	
Enmienda (T1)	Na^+	B1	B2
		2,20	2,24
	pH	8,73	8,34
	PSI	16,20	16,57
	CIC	13,63	13,60

La Tabla 30 presenta los valores medios por profundidad de pH, Na^+ , PSI y CIC del tratamiento T1 hasta la presencia de tosca. La concentración de Na^+ fue diferente estadísticamente sólo en la profundidad de 0-0,20 m, en tanto que en el PSI hubo diferencias significativas ($p < 0,10$) entre 0-0,20 y 0,20-0,60 m.

Tabla 30: Concentraciones de sodio en el suelo (Na^+ $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$), capacidad de intercambio catiónico (CIC $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$), valores de pH y porcentaje de sodio intercambiable (PSI %) en el tratamiento T1 para las profundidades de suelo 0-0,80 m.

Tratamiento	Profundidad (m)	Variables			
Enmienda (T1)		pH	Na^+	PSI	CIC
	0-0,20	8,18 a	2,43 b	15,57 a	15,65 b
	0,20-0,40	8,22 a	2,25 a	17,32 c	13,00 a
	0,40-0,60	8,70 a	2,15 a	16,82 bc	12,82 a
	0,60-0,80	9,00 a	2,05 a	15,85 ab	12,95 a

Letras distintas en sentido vertical, indican diferencias significativas entre profundidades para el tratamiento T1 ($p < 0,10$).

En T1 el PSI alcanzó en superficie (0-0,2m) valores cercanos al objetivo pautado al inicio del ensayo (15 %), manteniéndose en profundidad. El horizonte superficial presentó mayores valores de CIC dado por un mayor contenido de MO, mientras que el pH aumentó en profundidad, aunque sin diferencias significativas entre profundidades.

Se calculó la diferencia de Na^+ entre T0 y T1 (Fig. 16).

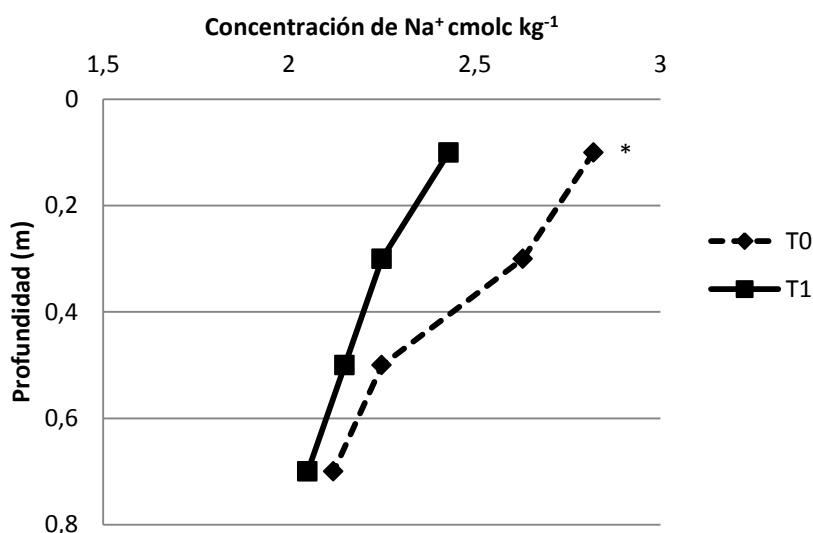


Fig. 16: Concentración del Ión Na⁺ en el perfil en función de la profundidad entre el tratamiento T0 y T1 valores promedios para ambos túneles (B1 y B2). * indica diferencias significativa entre T0 y T1 ($p < 0,10$).

La concentración de Na⁺ disminuyó en un total de 0,94 cmol_c kg⁻¹ al comparar el valor de este ión en todo el perfil, en tanto que los valores de PSI fueron menores en las capas superficiales. El mismo queda demostrado al observar la Tabla 30. Solo con el manejo del riego bajo el porcentaje de sodio intercambiable (PSI) de 27 a 23,65 %, inicial y final respectivamente. Si bien no se comprobó diferencias significativas entre profundidades en los valores de pH, éste se hizo más alcalino a mayores profundidades, posiblemente dado por aumento de la concentración de carbonatos en presencia de tosca.

Integrando los resultados obtenidos, se corrobora la reducción del PSI inicial en los diferentes túneles y tratamientos. Estos resultados son coincidentes con los reportados por Armstrong & Tanton (1992) y Gharaibeh *et al.* (2009) en las zonas donde se aplicó yeso, las cuales presentaron menores valores de Na⁺ dado por el desplazamiento en forma NaOH. Esta sal, al reaccionar con el agua de riego, posteriormente se combina con CO₂ libre en la solución del suelo para formar carbonato de sodio que es lavado a horizontes inferiores. Si bien se redujo los niveles de Na⁺ en los diferentes tratamientos respecto del testigo, no se registraron cambios significativos en los valores de pH a diferencias de lo encontrado por Gupta *et al.* (1985); Dubey & Mondal, 1994; Rodrigues da Silveira *et al.*, 2008 Makoi & Verplancke, 2010). Estos autores reportaron una contribución efectiva del yeso en la reducción del pH en Argiudoles con problemas de sodicidad. Por otro lado, los bicarbonatos causantes de la alcalinidad se combinan con el Ca²⁺ del yeso formando compuestos de baja solubilidad y contribuyendo también en la reducción del pH (Rodrigues da Silveira *et al.*, 2008).

5.5.2.4 Tratamiento T3 (Drenaje)

En la tabla 31 no se determinaron diferencias significativas entre B1 y B2 para ninguna de las variables que se presentan en la misma.

Tabla 31: Concentraciones de sodio en el suelo (Na^+ $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$), capacidad de intercambio catiónico (CIC $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$), valores de pH y porcentaje de sodio intercambiable (PSI %) en el tratamiento T3 para los túneles de 2 años (B1) y 4 años (B2) en los primeros 0,20 m del perfil de suelo.

Tratamiento	Variable	Túnel	
		B1	B2
Drenaje (T3)	Na^+	2,22	2,38
	pH	8,59	8,60
	PSI	17,76	18,66
	CIC	13,38	13,20

En la Tabla 32 se registraron diferencias significativas entre profundidades en los valores de pH y CIC del tratamiento T3 ($p < 0,10$). En tanto que, no se comprobó diferencias significativas entre profundidades para las variables Na^+ y PSI dentro del tratamiento T3 promedio de ambos túneles.

Tabla 32: Concentraciones de sodio en el suelo (Na^+ $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$), capacidad de intercambio catiónico (CIC $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$), valores de pH y porcentaje de sodio intercambiable (PSI %) en el tratamiento T3 para las profundidades de suelo 0-0,80 m.

Tratamiento	Profundidad (m)	Variables			
		pH	Na^+	PSI	CIC
Drenaje(T3)	0-0,20	8,30 a	2,82 a	19,08 a	15,02 c
	0,20-0,40	8,53 b	2,33 a	16,78 a	13,92 bc
	0,40-0,60	8,72 bc	2,07 a	18,22 a	11,72 a
	0,60-0,80	8,83 c	1,98 a	16,75 a	12,50 ab

Letras distintas en sentido vertical, indican diferencias significativas entre profundidades para el tratamiento T3 ($p < 0,10$).

Se realizaron los siguientes cálculos para determinar la diferencia de Na^+ entre T0 y T3 (Fig. 17).

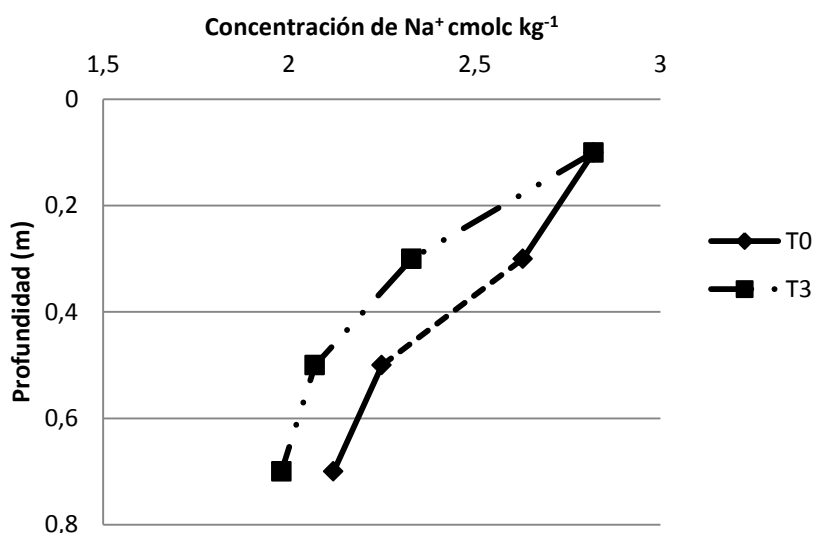


Fig. 17: Concentración del Ión Na⁺ en el perfil en función de la profundidad entre el tratamiento T0 y T3, valores promedios para ambos túneles (B1 y B2).

La diferencia de concentración de Na⁺ debida a T3 fue, para todo el perfil, de 0,62 cmol_c kg⁻¹. Para complementar estos datos se calculó la cantidad de Na⁺ aplicada con el total del agua de riego resultando 1,27 cmol_c L⁻¹ de Na⁺. Esta cantidad es muy importante y una fracción podría haber sido adsorbida en los horizontes superficiales fundamentalmente del testigo mientras que otra proporción se habría desplazado hacia los horizontes más profundos. Cabe mencionar que teniendo en cuenta la concentración inicial de 4 cmol_c kg⁻¹ de Na⁺ en los primeros 0,20 m y a pesar de aportar el agua de riego 1,27 cmol_c L⁻¹ del mismo ión, con un manejo adecuado de riego el testigo disminuyó a 2,82 cmol_c kg⁻¹.

5.5.3 Análisis de los túneles (año)

Para el caso de pH (Tabla 33), en el túnel B2 los tratamientos impactaron en forma positiva (baja el pH) en comparación con el T0. Estos resultados son coincidentes con los reportados por Gupta *et al.* (1985) quienes trabajaron sobre diferentes suelos y con dosis de enmiendas similares a la de este trabajo. El Na⁺ desplazado se combina como NaOH, liberando protones (H⁺) en el medio generando un proceso de acidificación suave que ocasiona la disminución del pH.

En el túnel B2 el tratamiento T2 presentó los valores de pH más altos, comprobándose diferencias significativas respecto del resto de los tratamientos evaluados (p<0,10). En tanto que en el túnel B1 se comprobó diferencias significativas entre tratamientos solo entre T1 y T3 (p<0,10). Sin embargo en T3 y T1 no se determinaron diferencias significativa en el túnel B2 (p<0,10).

Tabla 33: Valores de pH en el suelo en los tratamientos T0 (Testigo), T1 (Enmienda), T2 (Enmienda+Drenaje) y T3 (Drenaje) para el túnel de 2 años (B1) y 4 años (B2) para el espesor de 0-0,20 m.

Variable	Tratamiento	Años	
		B1 (1)	B2 (2)
pH	T0		8,77 a
	T1		8,24 b
	T0		8,77 a
	T2		8,88 b
	T0		8,77 a
	T3		8,59 b
	T1	8,72 * a+	
	T3	8,61 * b+	
	T1		8,20 a
	T2		8,88 ** b
	T2		8,88 a
	T3		8,59 b

Letras diferentes en sentido vertical indican diferencias significativas entre tratamientos
 Se contrastó valores medios de T1 vs T3 en espesor 0-0,20 m.
 Se contrastaron valores medios de los tratamientos vs T0 en espesor 0-0,20 m.

5.5.3.1 Análisis de las profundidades

En la Tabla 34 se puede observar que T1 fue diferente del resto de los tratamientos en la variable pH en forma significativa ($p < 0,10$) en la profundidad 0-0,20 m. Como se pudo observar el T1 fue el que mayores diferencias presentó respecto del resto de los tratamientos evaluados. Estos resultados coinciden con los presentados por Andreu *et al.* (2012), López-Aguilar *et al.* (2012) quienes trabajaron sobre suelos franco arenosos en dosis de enmiendas de 4 a 8 Mg ha⁻¹ y con calidades a agua similares a las utilizadas en la presente tesis.

Tabla 34: Valores de pH en el suelo en los tratamientos T0 (testigo), T1 (Enmienda), T2 (Enmienda+ Drenaje) y T3 (Drenaje) en el túnel B1 para la profundidad de 0-0,20 m. En la Tabla se presenta comparaciones entre T1 y el resto de los tratamientos.

Tratamiento	pH Túnel B1
T0	8,52 a
T1	8,12 b
T1	8,12 a
T2	8,47 b
T1	8,12 a
T3	8,43 b

Letras diferentes en sentido vertical indican diferencias significativas entre tratamientos en la profundidad 0-0,20 m, para la variable pH ($p < 0,10$).

5.5.3.2 Análisis del Sodio

En la profundidad 0-0,20 m T0 presentó diferencias significativas con todos los tratamientos, sin embargo solamente en T1 y T2 se registraron menores concentraciones de Na⁺

respecto del T0 (Tabla 35). Esto coincide con trabajos realizados por Armstrong & Tanton (1992); Gharaibeh *et al.* (2009), donde el agregado de enmiendas químicas inorgánicas (yeso agrícola) redujo la concentración del ión Na⁺ en el intercambio.

Tabla 35: Concentraciones de sodio en el suelo (Na⁺ cmol_c kg⁻¹) en los tratamientos T0 (testigo), T1 (enmienda), T2 (Enmienda+Drenaje) y T3 (drenaje) para los valores medios de túneles de 2 años (B1) y 4 años (B2) para la profundidad de 0-0,20 m.

Tratamiento	Na ⁺
T0	2,81 a
T1	2,51 b
T0	2,81 a
T2	2,55 b
T0	2,81 b
T3	2,94 a

Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamiento: Se analizó las diferencias entre el tratamiento T0 y el resto de los mismo (p<0,10).

En Tabla 36 se puede observar que el tratamiento T3 registró valores de Na⁺ superiores a los promedios de los tratamiento T2 y T1 comprobándose diferencias entre el T3 vs T1 y T2 (p<0,10).

Tabla 36: Concentraciones de sodio en el suelo (Na⁺ cmol_c kg⁻¹) en los tratamientos T1 (enmienda), T2 (Enmienda+Drenaje) y T3 (drenaje) promedios de los túneles de 2 años (B1) y 4 años (B2), para la profundidad de 0-0,20 m.

Tratamiento	Valores Na ⁺
T1	2,51 a
vs. T3*	2,94 b
T2	2,55 a
vs. T3**	2,94 b

Letras distintas indican diferencias significativas entre tratamiento en promedio de ambos túneles (p< 0,10).
* y ** indican contraste entre tratamientos.

En la Tabla 37 se puede observar que, el impacto sobre la concentración del ión Na⁺ disminuyo hasta los 0,40 m en todos los tratamientos respecto del T0. Este cambio en el espesor superior podría haberse afectado por la incorporación de estas dos prácticas: enmienda con yeso y drenaje. Trabajos relacionados con estas prácticas muestran mejoras en esta variable respecto de testigos (Armstrong & Tanton, 1992; Gharaibeh *et al.*, 2009; Andreau *et al.*, 2012; Ghironi *et al.*, 2010).

Este cambio se registró en ambos túneles evaluados. Estos cambios deberían estar asociados con la práctica de drenaje, actuando el mismo como movimiento de flujo no saturado (Tabla 36). Entre T1 y T2 en superficie (0-0,20 m) tuvo la misma efectividad. Sin embargo no alcanzo a 0,40 m.

Tabla 37: Concentraciones de sodio en el suelo (Na^+ $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$) en los tratamientos T0 (testigo), T1 (enmienda), T2 (enmienda + drenaje) y T3 (drenaje) para los túneles de 2 años (B1) y 4 años (B2) en la profundidad de 0,20-0,40 m.

Tratamiento	Valores Na^+
T0	2,64 b
vs. T1*	2,25 a
T0	2,64 b
vs. T3**	2,32 a
T0	2,64 b
vs. T2***	2,48 a

Letras distintas indican diferencias significativas entre pares de tratamiento: T0 y el resto de los mismos ($p < 0,10$). *, ** y *** indican contraste entre tratamientos.

5.5.3.3 Propiedades Físicas: densidad aparente (DA) y contenido hídrico variable en el tiempo

Los valores de DA entre túneles deberían ser similares debido a que las prácticas culturales fueron similares entre ambos. Sin embargo DA resultó menor en el túnel B2 (Tabla 38), debido posiblemente a la mayor contenido de MO.

Tabla 38: Valores de densidad aparente (DA) (gr cm^{-3}) y materia orgánica (MO) (%) para ambos túneles (B1, 2 años y B2, 4 años).

Túneles	DA (gr cm^{-3})	MO (%)
B1	1,34 b *	2,09
B2	1,18 a *	3,46

*Según test de Medias

Asociado a esto, sería de esperar una mayor porosidad total y estabilidad de agregados (variable no cuantificada), mejorando esto la dinámica hídrica de estos sistemas intensivos. Menores valores de DA representa mayor porosidad total y especialmente mayor proporción de poros grandes, además de una mayor capacidad de retención de agua en las horas siguientes al riego (Fig.18). La acumulación de carbono orgánico mejoró entre otras propiedades, la capacidad de retención del agua (Allison, 1973; Herrick & Wander, 1998).

Experiencias desarrolladas sobre variables estructurales dadas por MO como segmentante y aglutinantes de agregados, mejorarían las condiciones físico-hídricas de estos sistemas. Las diferencias encontradas en la presente tesis en concentración de MO, fue descripta por otros

autores, encontrando los mismo algunos de los cambios acontecidos en las variables físicas (Andreu *et al.*, 2012). Debe destacarse lo promisorio del hecho, ya que se trata de una única aplicación de las enmiendas y sólo un período de cinco meses entre dicha aplicación y la evaluación edáfica. La estabilidad estructural medida a través de la porosidad e infiltración es un atributo sensible que puede indicar tendencias a la recuperación o degradación en lapsos relativamente cortos, por tratarse de una propiedad de carácter dinámico (Doran & Parkin, 1994; Wilson *et al.*, 2000). Estos aspectos de la calidad edáfica cobran especial relevancia en el contexto de suelos texturalmente finos como los estudiados y en producciones intensivas como la hortícola/florícola.

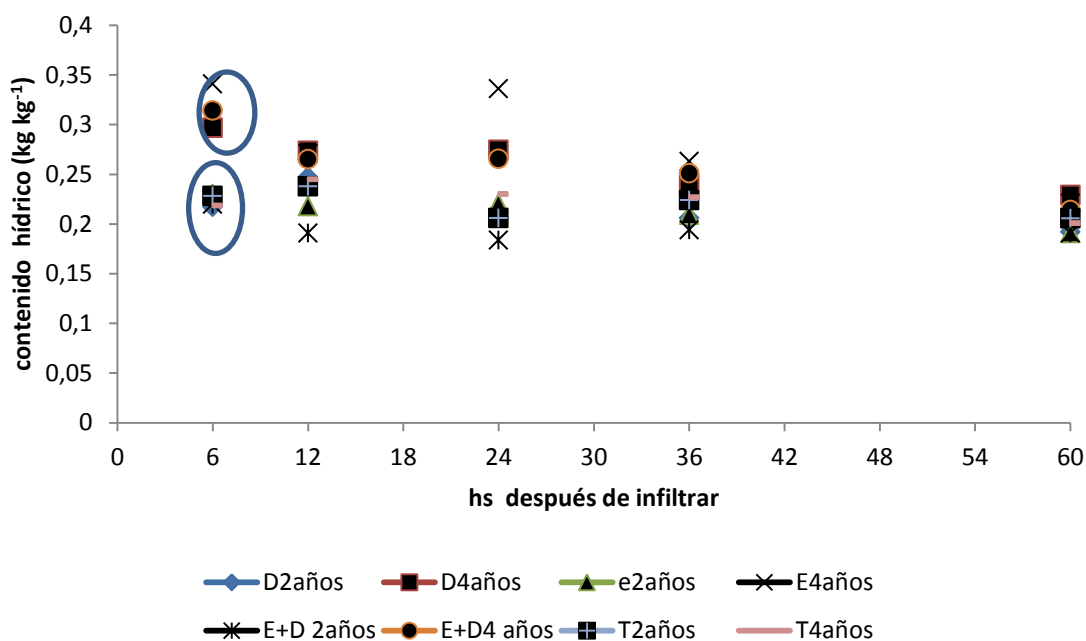


Fig. 18: Contenido hídrico del suelo en función de las horas después de la infiltración de agua para los diferentes tratamientos (D2 años=drenaje de 2 años, D4 años=drenaje 4 años, E+D 2 años=enmienda más drenaje 2 años, E+D4 años=enmienda más drenaje 4 años, E 2 años= enmienda 2 años, E4 años=enmienda 4 años, T2 años= testigo 2 años, T4 años= testigo 4 años).

En la Fig. 18 se observa que después de 12 horas de ser inundado, el túnel B1 (2 años) no cambia el contenido hídrico. En tanto que el túnel B2 las humedades fueron muy diferentes. Estos resultados pueden estar asociados a una menor DA y mayor concentración de MO en el túnel B2. Por otro lado, Orellana & Pilati, (1994) consideran a la estabilidad estructural como un componente importante de la calidad del suelo, dado que sus valores son resultantes de la calidad de los poros, el aporte orgánico y la actividad biológica.

Lebron *et al.* (2002) plantea que un aumento en la DA significa mayor peso de suelo por unidad de volumen, por lo tanto, cuando una mayor cantidad de suelo es confinado en el mismo volumen, el terreno se vuelve más compacto e inconveniente para la agricultura. Debido a que un

suelo compacto tiene menos espacio poroso, la infiltración del agua y crecimiento de las raíces se reduce (Murtaza *et al.*, 2006). El mejoramiento de la infiltración producido por el yeso pudo ser la causa que permitió el lavado de sales generadas por la aplicación de yeso. Mantener una concentración de electrolitos suficientemente alta es de crucial importancia, dado que favorece la circulación de agua de la que depende el proceso de recuperación (Oster, 1993).

5.5.3.4 Análisis del pH y CE

En la Tabla 39 se observan los valores medios de pH para los túneles B1 y B2, sin diferencias significativas a lo largo del ciclo completo del cultivo de lechuga.

Tabla 39: Valores de pH en función del ciclo productivo (días) para los diferentes túneles B1 (2 años) y B2 (4 años).

Túneles/ ciclo de cultivo	1° ciclo	2° ciclo	3° ciclo	4° ciclo
B1	8,79 a	8,20 a	8,24 a	8,40 a
B2	8,87 a	8,31 a	8,37 a	8,33 a
% de diferencia de pH entre túneles B1 y B2 por ciclo	0,91*	1,30*	1,57*	- 0,84*
% de diferencia de pH entre ciclos de cultivo para el túnel B1		7,00**	-0,48**	-1,90**
% de diferencia de pH entre ciclos de cultivo para el túnel B2		6,70***	-0,70***	0,48***

Letras distintas en sentido vertical, indican diferencias significativas entre los túneles B1 y B2 para los diferentes ciclos de producción (1°, 2°, 3°, 4° ciclos) ($p < 0,10$).

Si bien la condición del túnel B2 comenzó con un valor mayor de pH que el túnel B1, al comparar cual fue la variación de pH entre tratamientos se puede observar que no se registraron diferencias significativas entre los mismos ($p < 0,10$) (Fig. 19).

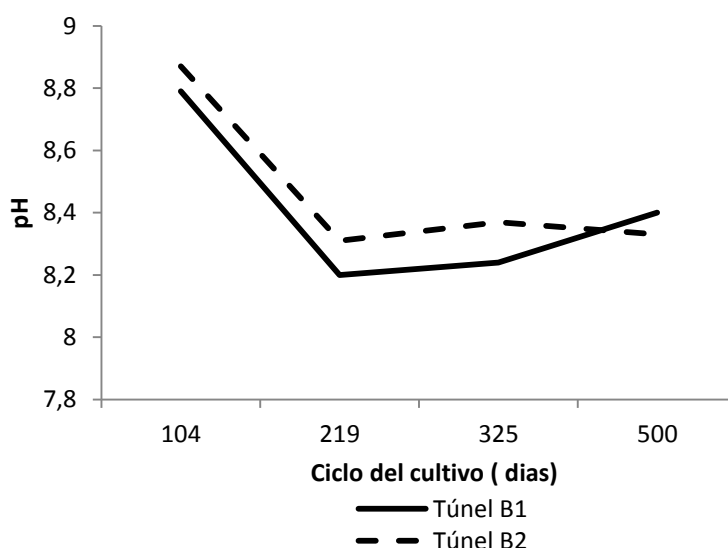


Fig. 19: Evolución del pH para los diferentes túneles de 2 años (B1) y 4 años (B2) en función de los ciclos del cultivo de lechuga.

El aumento de pH 1° ciclo (Tabla 40) pudo deberse al RAS del agua de riego que junto a una baja lámina de agua aportada al inicio, provocaron un aumento de esta variable. El pH del

suelo en el tratamiento T1 (enmienda), disminuyó notablemente a partir del 2° ciclo de producción, posiblemente a consecuencia de la activación de la enmienda por aplicación de una lámina mayor de riego provocando lavado de sales de Na⁺ a profundidad. Trabajos evaluados por Mendoza *et al.* (1980) señalaron que al agregar yeso a un suelo Natracualf de la serie Poblet Partido de Magdalena (Pcia. de Bs.As.), disminuyó el pH, la relación de absorción de sodio (RAS) y el PSI y aumentó la CE, y que la producción de materia seca a igual dosis de yeso estuvo en función de la intensidad de lavado. Lazovich *et al.* (1985) hallaron que el yeso fue la enmienda más eficiente para desplazar el sodio en un Natracuol de la serie Guido de Balcarce Toogood & Cairns, (1978) señalaron que aplicando yeso y mezclándolo con el horizonte A mejoraban las propiedades químicas de los horizontes A y Btn de suelos Solonetz de Alberta, Canadá.

Tabla 40: Valores de pH en función del ciclo productivo (días) para los diferentes tratamientos T0(testigo),T1(Enmienda),T2 (Enmienda+Drenaje) y T3 (Drenaje).

Tratamientos/ciclo de producción	1° ciclo	2° ciclo	3° ciclo	4° ciclo
T0	8,93 a	8,37 a	8,35 a	8,50 a
T1	8,79 a	8,15 a	8,21 a	8,29 a
T2	8,76 a	8,27 a	8,32 a	8,46 a
T3	8,84 a	8,23 a	8,35 a	8,48 a

Letras distintas en sentido vertical, indican diferencias significativas entre los tratamientos para los diferentes ciclos de producción (1°, 2°, 3°, 4° ciclos) ($p < 0,10$).

El pH fue significativamente menor en los tratamientos T1 (enmienda), debido a la formación de ácido y consecuente eliminación de alcalinidad.

Según la Tabla 41 solo se observó diferencia significativa ($p < 0,10$) en el 3° ciclo de cultivo a favor del túnel B1 ya que se obtuvo un valor menor que el túnel B2. Sin registrarse diferencias significativas entre los mismos ($p < 0,10$).

Tabla 41: Valores de conductividad eléctrica en el suelo (dS m^{-1}) en función del ciclo productivo (días) para los diferentes túneles de 2 años (B1) y 4 años (B2).

Túneles/ ciclo de cultivo	1° ciclo	2° ciclo	3° ciclo	4° ciclo
B1	2,47 a	1,00 a	0,54 b	0,49 a
B2	2,71 a	0,82 a	0,76 a	0,58 a
% de diferencia de conductividad entre túneles B1 y B2 por ciclo	10 *	-21	40	18
% de diferencia de conductividad entre ciclos de cultivo para el túnel B1		-147 **	-85	-10
% de diferencia de conductividad entre ciclos de cultivo para el túnel B2		-230 ***	-8	-31

Letras distintas en sentido vertical, indican diferencias significativas entre los túneles B1 y B2 para los diferentes ciclos de producción (1°, 2°, 3°, 4° ciclos) ($p < 0,10$).

La CE se incrementó con la aplicación de yeso en todos los tratamientos con enmienda, sin registrarse diferencias significativas entre tratamientos al inicio del ensayo (Tabla 42). Al evaluar

la aplicación de yeso en un suelo salino sódico, Holanda *et al.* (1998) también observaron un aumento en la CE. Este incremento se considera un resultado normal, ya que el yeso es una fuente de sales que ingresan a la solución del suelo. Sin embargo, el aumento de salinidad ocurre solamente al inicio. Con el transcurso del tiempo, el desplazamiento de Na^+ por el Ca^{2+} que sucede en el complejo de intercambio mejora la conductividad hidráulica e infiltración del agua de riego, como puede observarse en la figura 18 del túnel de 4 años de riego (B2), y por lo tanto una mayor facilidad para el lavado de sales conduce a la reducción de la CE del suelo. En el presente estudio la profundidad de muestreo fue 0-0,20 m, y en esta zona fue donde se registraron los incrementos en CE. Se considera que el periodo de tratamiento fue corto para detectar un proceso de lavado hacia capas más profundas, como lo demostraron Raza *et al.* (2001) quienes encontraron que las aplicaciones de yeso redujeron la CE en 49 % de 0-0,30 m de profundidad y en 15 % de 0,30-0,60 m, pero en la capa de 0,60-0,90 m la CE aumento un 20 % (López-Aguilar, 2012).

Tabla 42: Valores de conductividad electrica en el suelo (dS m^{-1}) en funcion del ciclo productivo (días) para los diferentes tratamientos T0 (testigo), T1(Enmienda),T2 (Enmienda+Drenaje) y T3 (Drenaje).

Tratamientos/ciclo de producción	1° ciclo	2° ciclo	3° ciclo	4° ciclo
T0	1,93 a	1,03 a	0,52 a	0,44 a
T1	2,73 a	0,84 a	0,77 a	0,61 a
T2	3,14 a	0,94 a	0,53 a	0,54 a
T3	2,56 a	0,84 a	0,78 a	0,56 a

Letras distintas en sentido vertical, indican diferencias significativas entre los tratamientos para los diferentes ciclos de producción (1°, 2°, 3°, 4° ciclos) ($p < 0,10$).

La Fig. 20 muestra la disminución de la CE a lo largo de los ciclos productivos del cultivo de lechuga.

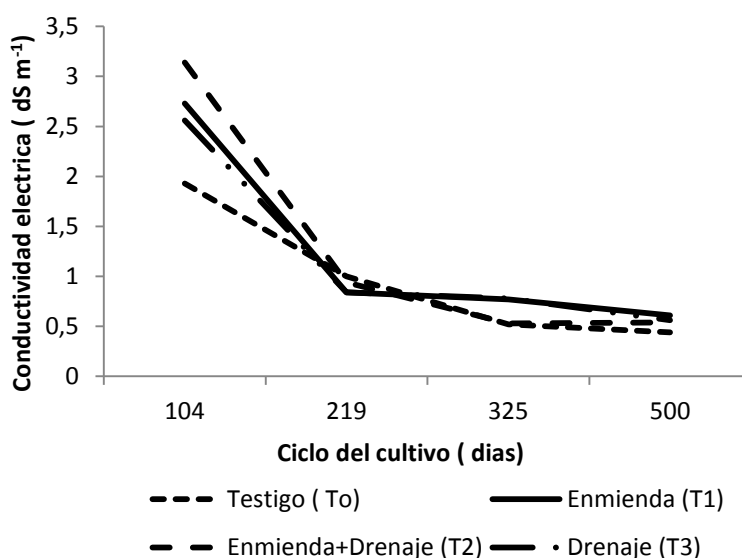


Fig. 20: Evolución de la conductividad eléctrica con valores medios expresados en dS m^{-1} para los diferentes tratamientos en función de los ciclos del cultivo de lechuga.

En el primer ciclo la conductividad eléctrica fue mayor en los tratamientos T1 y T2 debido a la salinidad aportada por la aplicación de la enmienda (yeso). Resultados similares encontraron Wilson *et al.* (2004). La conductividad eléctrica de los diferentes tratamientos disminuyó notablemente a partir del 2º ciclo de producción (Tabla 41 y 42- Fig. 20) posiblemente a consecuencia de la aplicación de una lámina mayor de riego. La conductividad eléctrica estuvo muy ligada a cantidad de enmienda (yeso) aplicado y agua de riego utilizada.

Se puede observar que los valores medios de conductividad eléctrica no tuvieron diferencias significativas entre los diferentes tratamientos ($p < 0,10$). Según Bauder & Brock (1992) y Shainberg & Letey (1984) una alta fracción de lavado reduce CE sin afectar el mismo.

La alta relación de adsorción de sodio del agua de riego aumentó los valores de PSI del suelo. La aplicación de yeso y MO en el suelo, sin embargo, reduce al mínimo el efecto negativo del agua de riego sobre la infiltración. Estos resultados son coincidentes con los encontrados en el presente trabajo, donde a igualdad de textura (Tabla 23) pero con diferentes concentración de MO y DA el túnel B2 presentó mayores valores de contenido hídrico, respecto de B1; Fig. 18. La alta frecuencia de riego también es esencial para mantener el estrés por salinidad lo más bajo posible, conservando el suelo húmedo (de mayor potencial matriz) y la solución tan diluida como sea posible (alto potencial osmótico). Esto pudo observarse en el presente trabajo a partir del cambio en la dosis de riego (Tabla 19) donde los valores de CE fueron menores a partir del segundo ciclo productivo en ambos túneles (Tabla 42). Por lo tanto, es factible producir cultivos como los hortícolas con una dosis alta de agua para la lixiviación. Esta práctica, junto con la solubilidad del yeso como una fuente de Ca^{2+} para desplazar al ión Na^+ adsorbido en los perfiles de suelo. Estos trabajos fueron evaluados por Beletse *et al.* (2004).

6 CONCLUSIONES

* La aplicación de yeso en los tratamientos T1 y T2 disminuyó la concentración de Na^+ entre un 11 y 17 % respecto del tratamiento T0 en las profundidades 0-0,20 y 0,20-0,40 m respectivamente. Considerando el perfil completo (0-0,80 m), la disminución de Na^+ fue de $0,94 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$. Con respecto a la variable pH no se obtuvieron diferencias significativas entre ambos factores (año x tratamiento) evaluados. A pesar de esto, los valores de pH fueron más alcalinos a mayores profundidades, posiblemente por un aumento de la concentración de carbonatos en presencia de tosca.

* El drenaje tuvo mayor impacto en el túnel B2 debido a las mejores condiciones físicas del suelo (mayor concentración de MO y menor DA), a la vez que una mejor permeabilidad, lo que explicaría la menor concentración de Na⁺ en todos los tratamientos con drenaje. El uso de zanjas de drenaje tendría mayor efectividad cuando fuera necesario eliminar el exceso de sales del suelo mediante lavado.

* El manejo del riego disminuyó el PSI de 27 a 24 % (situación inicial vs testigo), permitiendo reducir la concentración de Na⁺ inicial en los diferentes túneles y situaciones citadas anteriormente. La CE fue inicialmente muy elevada y superior al umbral óptimo para que no haya disminución de productividad del cultivo de lechuga. Sin embargo, en el 2º y 3º ciclo disminuyó abruptamente en todos los tratamientos, inclusive el testigo, estabilizándose en torno a 0,5 dS m⁻¹ en el último ciclo de riego. Esto último indicaría que el manejo del riego por goteo tiene un gran efecto sobre la disminución de la salinidad inicial.

* La respuesta productiva de la lechuga fue diferente según el túnel utilizado. En el de mayor cantidad de años con riego continuo (B2), en todos los tratamientos y en los 4 ciclos, hubo un aumento de la productividad en relación con T0; obteniéndose las mayores diferencias cuando se aplicó yeso. Por el contrario, el túnel con menor cantidad de años de riego continuo (B1) sólo tuvo una buena respuesta productiva en el 2º ciclo para los tratamientos con aplicación de yeso, mientras que con drenaje no tuvo impacto. Estas diferencias pueden estar relacionadas al índice de fertilidad y a las mejoras en la disminución en el contenido de sales en todo el perfil evaluado.

7 REFERENCIAS

- Abrego, F., Andriulo,A., Ferreyra,C., Galetto,M L., Galina,J., Irurtia,C., Mon,R., Rimatori, F & Sasal,C. 1998. Efecto de 11 años de riego complementario sobre algunas propiedades del suelo. II. Propiedades físicas. XVIº Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Córdoba, Argentina, pp. 249-250.
- Adrover, M., Miralles, P., Farrús, E., Lladó, G & Vadell, J. 2001. Aprovechamiento del agua de riego mediante el uso de distintos tipos de acolchado. Sociedad Española de Agricultura Ecológica. V Jornadas Técnicas. Mallorca, España. pp. 205-211.
- Alconada, M & F Minghinelli. 1998. Calidad del agua de riego según diferentes criterios: su influencia sobre la salinización – alcalinización de suelos con cultivos protegidos en el Gran La Plata. XVIº Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Carlos Paz, Argentina, 4 - 7 mayo, pp. 229- 230.
- Alconada, M & L Huergo. 1998. Degradación de suelos con cultivos protegidos: Tomate. Influencia de la calidad de agua de riego. I Reunión de Producción Vegetal, N.O.A., Universidad Nacional de Tucumán. Argentina. CD.

- Alconada, M. 1996. Deterioro físico-químico de un Vertisol con cultivos protegidos en el partido de La Plata, Bs. As., Argentina. Actas XIII Congreso Latinoamericano Ciencia del Suelo. Brasil. Versión electrónica. CD.
- Allen, R.G., Pruitt, W.O., Wright, J.L., Howell, T.A., Ventura, F., Snyder, R., Itenfisu, D., Steduto, P., Berengena, J., Yrisarry, J.B., Smith, M., Pereira, L.S., Raes, D., Perrier, A., Alves, I., Walter, I. & Elliott, R. 2006. A recommendation on standardized surface resistance for hourly calculation of reference ETo by the FAO56 Penman-Monteith method. *Agricultural Water Management* 81: 1-22
- Allison, L.E. 1973. Oversaturation method for preparing saturation extracts for salinity appraisal. *Soil Sci.* 116:65-69.
- Amstrong ASB, Tanton TWT. 1992. Gypsum applications to aggregated saline-sodic clay topsoils. *J. Soil Sci.* 43: 249-260.
- Anderson, J. U. F., O. Bailey., H. A. Dregne. 1972. Short-term effects on irrigation with high sodium waters. *Soil Sci.* 113 (5):358-362.
- Andreau., R., Gelati., P., Provaza., M., Bennardi, D., Fernández., D & Vázquez M. 2012. Degradación física y química de dos suelos del cordón hortícola platense: alternativas de tratamiento. *Ci. Suelo (Argentina)* 30(2): 107-117.
- Andriulo, A., M. de Galetto, C. Sasal, F. Abrego, M. Bueno, F. Rimatori & M. de la Cruz. 2000. Efecto del riego complementario con aguas salino-sódicas sobre algunas propiedades del suelo en el Sudoeste Santafesino. Actas del XVII Congreso. Argentino de Ciencia del Suelo, Com. IV, N° 5. CD-ROM. Mar del Plata. CD
- Andriulo, A., ML Galetto., C Ferreyra., G Cordone., C Sasal., F Abrego., J Galina & F Rimatori. 1998. Efecto de 11 años de riego complementario sobre algunas propiedades del suelo. I: Propiedades físico-químicas. XVI° Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Carlos Paz, Argentina, 4 -7 mayo, pp. 247- 248.
- Auge, MP & MA Hernández. 1983. Características geo-hidrológicas de un acuífero semiconfinado (Puelche) en la llanura bonaerense. Su implicancia en el ciclo hidrológico de llanuras dilatadas. *Hidrología de las Grandes Llanuras. Actas del Coloquio de Olavarría, Buenos Aires. UNESCO - CONAPHI, Vol. II, pp. 1019-1042.*
- Ayers, R.S & Westcot D.W. 1997. Calidad del agua en la agricultura .Estudio FAO: Riego y Drenaje. N° 29. Rev. 1 Roma. 174 pp.
- Ayers, R.S. & Westcot, D.W. 1987. La calidad del agua en la Agricultura. Serie FAO Riego y Drenaje N° 29 rev1. Roma, Italia, 174 pp.
- Ayers, R.S., Westcot, D.W. 1985. Water quality for agriculture. *Irrigation and Drainage Paper 29. FAO, Rome, Italy, 140 pp.*

- Ayers, R. S. & Westcot D. W. 1976. Water quality for agriculture. FAO, Irrigation and Drainage. Paper N° 29, Roma. Guidelines for computing crop water requirements" FAO Irrigation and Drainage Paper 56, Rome, Italy. 300 pp.
- Báez, A. 1999. Efecto de la calidad de agua de riego sobre las propiedades del suelo. Monografía para especialista en producción vegetal, UNMP-INTA Balcarce. 53 pp.
- Balcaza, L. 2003. Deterioro de los suelos cultivados bajo invernáculo. *Idia XXI* N° 4. Ediciones INTA, 196 pp.
- Barbacone, A & JL Costa. 1999. Efecto de la calidad de agua para riego sobre algunas propiedades químicas de dos suelos del sudeste de la provincia de Buenos Aires, Argentina. XIV° Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo, Pucón, Chile, 8-12 noviembre, pp. 57.
- Barnes, H. R. 1988. Los problemas hidráulicos en la actividad agropecuaria y sus soluciones. El deterioro del ambiente en la Argentina. (1995) Cap. VIII. pp. 253
- Bauder, J.W., Brock, T.A. 1992. Crops species, amendment, and water quality effects on selected soil physical properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56: 1292–298.
- Bauder, JW & Brock TA. 2001. Irrigation Water Quality, Soil Amendment and Crop effects on sodium leaching. *Arid Land Research and Management* 15(2): 101-113.
- Beletse, Y.G. 2004. Modelling the soil water and salt balance of planted pastures irrigated with Na₂SO₄ rich mine effluent. M.Sc. Dissertation. University of Pretoria, Pretoria, Republic of South Africa. 26-36 pp.
- Blake, G.R. & K.H. Hartge. 1986. Bulk density. *Methods of Soil Analysis, Part 1. Physical and Minerological Methods. Agronomy Monograph* 9: 363-376.
- Bower C.A., Ogata, G. & Tucker, J.M. 1968. Sodium hazard of irrigation waters as influenced by leaching fraction and by precipitation or solution of calcium cabonate. *Soil Sci.* 106: 29-34.
- Bresler, E., B.L McNeal y D.L.Carter. 1982. Saline and sodic soils. Springer-Verlag, Berlin. 236 pp.
- Bustos, A., Caballero, R & Román R. 2006. Net changes of mains ions in the soil profile of irrigated field plots in central Spain. *Irrig. Sci.* 25: 1-9.
- California Fertilizer Association, 1990. Interstate Publishers, 1998 - 362 pp.
- Camacho Ferre F., 2004. Técnicas de producción en Cultivos Protegidos. Suelos y aguas utilizados en la horticultura intensiva. Tomo 1 y 2. Ed. Caja Rural Intermediterránea, Cajamar. Almeria. 776 pp.
- Carmer S. G. & Walker W. M. 1988. Significance from a Statistician's Viewpoint *Journal of Production Agriculture* 1 (1): 27-33.
- Carmer, S. G. 1976. Optimal Significance Levels for Application of the Least Significant Difference in Crop Performance Trials *Crop Science* 16 (1): 95-99.

- Carter, D. L. 1981. Salinity and plant productivity, en: Handbook Series in Nutrition and Food. Chemical Rubber Co. pp. 146-151
- Casagrande, G.A.; Deanna, M.E.; Farrell, A.; Babinec, F. 2012. Estadísticas agroclimáticas de la EEA Anguil "Ing. Agr. Guillermo Covas". Boletín de divulgación técnica N° 88. Ed. INTA. pp 3-45.
- Casas Castro A & Casas Barba, E. 1999. El análisis de suelo-agua-planta y su aplicación en la nutrición de los cultivos hortícolas en la zona del sureste peninsular. Ed. Caja Rural de Almeria. España. 249 pp.
- Caviglia, J., Lorda, H., Lemes, J. 2010. Caracterización de las unidades de producción agropecuaria en la provincia de La Pampa. Boletín de divulgación técnica N° 99. Ed. INTA. pp. 10-15.
- Caviglia, OP & Paparotti, OF. 2000. Efecto del uso de aguas de riego de calidad dudosa sobre algunas propiedades químicas del suelo en el centro oeste de Entre Ríos. XVII Argentino de la Ciencia del Suelo (Comisión IV, Panel N°15), Mar del Plata, Argentina, 11-14 abril. 15 pp.
- Censo Hortícolas. 2011. INTA, CERET, Ministerio de la Producción de La Pampa. CD
- Choudhary, OP., Josan, AS & Bajwa, MS. 2002. Role of organic materials in mobilizing intrinsic calcium carbonate to ameliorate sodic irrigations. Roceedings of the 17th World Congress Soil Science, Symposia N°. 34, Abstract vol. III (Symposia 22-36), pp. 1162.
- Cooperband, L. 2000. Sustainable use of by products in land management. (pp. 215-235). En: J.M. Barteks & W.A. Dick (eds.). Land Application products of Agricultural, Industrial and Municipal By-Products. SSSA Book series N° 6, Madison, USA.
- Costa, JL & 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. XIV Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo, Pucón, Chile, 8-12 noviembre, pp. 82.
- Costa, JL & Godz, P. 1999. Aplicación de yeso a un Natracuol del sudeste de la pampa Deprimida. Ciencia del Suelo 17(2): 21-27.
- Davis, R.M., Subbarao, K.V., Raid, R.N., Kurtz, E.A. 1997. Compendium of Lettuce Diseases. APS. Press St. Paul, Minnesota. Pp. 51.
- Defilipis, C., Pariani S., Jimenez A., Bouzo C. 2004. Respuesta al riego de lechuga (*Lactuca sativa* l) cultivada en invernadero. pp. 8.
- Doran, J & Parkin T. 1994. Defining and assessing soil quality. Soil Sci Soc 677: 3-21.
- Dubey SK., Mondal RC. 1994 Effect of amendments and saline irrigation water on soil properties and yields of rice and wheat in a highly sodic soil. J. Agric. Sci. 122: 351-357.
- Eaton F.M. 1949. Significance of carbonates in irrigations waters. Soil Science 69:123-133.

- Emdad, M., Raine S., Smith R & Fardad H. 2004. Effect of water quality on soil structure and infiltration under furrow irrigation. *Plant and Soil* 23(2): 55-60.
- Fernández D. 2000. Necesidades hídricas y programación de riegos en los cultivos hortícolas en invernadero y suelo enarenado de Almería. Tesis de doctorado. España. 115 pp.
- Ferratto, J., Longo, A., Grasso, R., Mondino, M & Muguero, A. 2006. Manual de Producción Hortícola. CERET, CFI, Ministerio de la Producción de La Pampa. pp. 53.
- Gallardo M, Jackson LE, Schullback K, Snyder R, Thompson R & Wyland L. 1996. Production and water use in lettuces under variable water supply. *Irrig. Sci.* 16:125–137
- Gharaibeh MA, Eltaif NI & Shunnar OF. 2009. Leaching and reclamation of calcareous saline-sodic soil by moderately saline and moderate-SAR water using gypsum and calcium chloride. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 172:713-719.
- Ghiberto, P.J.; Pilatti, M.A.; Imhoff, S & de Orellana, J.A. 2007. Hydraulic conductivity of Mollisolls irrigated with sodic-bicarbonated waters in Santa Fe (Argentina). *Agricultural Water Management*; 88: 192-200.
- Ghironi, E., Pechin C & Álvarez, C. 2010. Impacto de la incorporación de azufre y yeso en el suelo sobre la productividad del cultivo protegido de lechuga. Congreso Argentino de Horticultura. Rosario, Argentina. pp. 229.CD.
- Giai Santiago B. & Jorge Tullio. 1990. Características de los principales acuíferos de la Provincia de La Pampa Facultad de Ciencias Humanas UNLPam y Dirección de Aguas de La Pampa, Santa Rosa (LP). 22 pp.
- Granda, F.J.E & López Jacome, C.S. 2009. Estudios de los sistemas de riego localizado por goteo y exudación en el rendimiento del cultivo de lechuga en invernadero. CD
- Gupta, RK., Singh, CP & Abrol IP. 1985. Dissolution of gypsum in alkali soils. *Soil Sci.* 140:382-386.
- Hemphill, D.D. & Jackson, T.L. 1982. Effect of soil Acidity and Nitrogen on Yield and Elemental Concentration of Bush Bean, Carrot, and Lettuce. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 107 (5):740-744.
- Herrick, J & MM Wander. 1998. Relationship between soil organic carbon and soil quality in cropped and rangeland soils: the importance of distribution, composition, and soil biological activity. (pp. 405-425). En: JM Lal; RF Follet & BA Stewart. (eds.). *Soil processes and the carbon cycle*. CRC Press, London.
- Holanda, JS., Vitti, GC., Salviano, AAC., Medeiros, JDF & Amorim JRA. 1998. Alteracoes nas propriedades químicas de um solo aluvial salino-sodico decorrentes da subsolagem e do uso de condicionadores. *Revista Brasileira de Ciencia do Solo*, Campinas, V 22, N° 3, 387-394.

- Instituto Nacional de Estadística & Censos. Censo Nacional Agropecuario. 2002. Ministerio de Economía de la República Argentina, Buenos Aires, Argentina. Disponible en: <http://www.indec.mecon.ar/>
- INTA, UNLPam. Inventario de los Recursos Naturales de la Provincia de La Pampa. 1980. 1 Edición. <http://www.lapampa.edu.ar/recursosnaturales/index2/html>.
- INTA, UNLPam. Inventario de los Recursos Naturales de la Provincia de La Pampa. 2004. 2^{da} Edición <http://www.lapampa.edu.ar/recursosnaturales/index2/html>.
- Jalali, M & Ranjbar F. 2009. Effects of sodic water on soil sodicity and nutrient leaching in poultry and sheep manure amended soils. *Jornadas Técnicas*. Mallorca, España. *Geoderma* 153: 194-204
- Lazovich M R, Costa J L & Godz P. 1985. Efecto de enmiendas y lavado sobre el desplazamiento catiónico y sobre la producción de materia seca de un Natracuol, en invernáculo. *Ciencia del Suelo* 3:95-101.
- Lebron I., Suárez DL & Yoshida T. 2002 Gypsum effect on the aggregate size and geometry of three sodic soils under reclamation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66: 92-98.
- Lentz, R., Sojka R. E & Carter D. L. 1996. Furrow Irrigation Water-Quality Effects on Soil Loss and Infiltration. *Soil Science Society American Journal* 60: 238-245.
- Levy, GJ., Mamedov AI & Goldstein D. 2003. Sodicity and water quality effects on slaking of aggregates from semi-arid soils 1. *Soil Sci.* 168(8): 552-562.
- Linares, E. Llambias, EJ & Latorre, CO. 1980. Geología de la Provincia de La Pampa, República Argentina y geomorfología de sus rocas metamórficas y eruptivas. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 35 (1): 87-146.
- Longo, A., Ferratto J., Mondino M & Grasso R. 2005. Incorporación de azufre y yeso en suelo Salino-sódico: su efecto sobre el rendimiento y calidad de lechuga bajo invernáculo. *Ciencias Agrarias* 4(1-2): 32-36.
- López-Aguilar, R., Rodríguez-Quezada, G., Naranjo-Murillo, A., Beltrán-Morales, L, Troyo-Diéguez, E., Casanova-Cruz, A & Peralta-Patrón, O. 2012. Uso de yeso para una agricultura orgánica sustentable en zonas áridas y semiáridas. Vol 37. N°8. pp 594-601.
- Lorda, H., Roberto, Z., Bellini Saibene, Y., Sipowicz, A & Belmonte, M. L. 2008. Descripción de zonas y subzonas agroecológicas RIAP. *Boletín INTA Anguil* pp. 20-22.
- Maas E & Hoffman G. 1977. Crop salt tolerante-current assessment. *J Irrig and drainage, division ASCE* 103(IRZ): 115-134.
- Maas, E. 1984. Crop tolerante. *California Agriculture* 38 (10): 20-21.
- Machado S. 2006. Symposium-analysis of unreplicated experiments. *Crop Sci.* 46: 2474-2475.
- Makoi, JHJR & Verplancke, H. 2010. Effect of gypsum placement on the physical chemical properties of a saline sandy loam soil. *Aust. J. Crop Sci.* 4: 556-563.

- Marano R P. 2000. Posibles efectos de la calidad de las aguas subterráneas con fines de riego suplementario en suelos de la región centro-este santafesina. Tesis de Ms. Sc. Fac. Cs. Agrarias, Univ. Nac. Cuyo. 135 pp.
- Maroto Borrego, J., Miguel Gómez, A. & C Baixauli Soria. 2000. La lechuga y la Escarola. Fundación Caja Rural Valencia. Ediciones Mundiprensa. España. Pág. 208-214.
- Medina San Juan, J.A. 1993. Salinidad. Riego por Goteo- Teoría y Práctica 3^{er} edición. pp. 151-152.
- Mendoza R E & L A Barberis. 1980. Efecto del agregado de yeso y el lavado a un suelo sódico de la depresión del Río Salado y su repercusión sobre la producción de "Lolium perenne" L. RIA 2: 304:397.
- Metcalf & Eddy. 1995. Ingeniería de las aguas residuales. Tratamiento, vertido y reutilización. 3^{ra} ed. McGraw-Hill. España. Capítulo 8. pp. 478-488.
- Miglianelli, C.H. 1985. Cartografía correspondiente al plan Norte, zona II (Paralelos 35° 30' a 36°, Meridianos 64° a 65°15'). Ministerio de Obras y Servicios Públicos, Administración Provincial del Agua, Dirección de recursos Hídricos. Informe interno. Santa Rosa. CD.
- Minhas, PS., Sharma VK & YP Singh. 1995. Response to paddy and wheat to applied gypsum and FYM on an alkali water irrigated soil. J. Indian Soc. Soil Sci. 43: 452-455.
- Mirábile, C & L. Fornero. 1986. Modelo de Simulación de Balance Salino de un Distrito de Riego. -INCYTH -CRA. Mendoza. Publicado en Mecanismos de Aprovechamiento Hídrico de la Región Andina , Editor Massimo Menenti. 16 pp.
- Munns R., Husain S., Rivelli A.R., James R.A., Condon Tony A.G., Lindsay M.P., Lagudah E.S & D.P Schachtman. 2002. Hare, Avenues for increasing salt tolerance of crops, and the role of physiologically based selection traits. Plant Soil 247: 93-105.
- Murtaza G., Ghafoor A & M Qadir. 2006. Irrigation and soil management strategies for using saline-sodic water in a cottonwheat rotation. Agric. Water Manag. 81: 98-114.
- Nijensohn, L. 1961. Calidad de aguas para riego (pp. 169-205). En: UN de Cuyo, Instituto de Suelos y Riego (Eds.). Primer Curso Nacional de Manejo del Riego. Chacras de Coria, Mendoza: Facultad de Ciencias Agrarias. CD
- Orellana, J. & M.A Pilatti. 1994. La estabilidad de agregados como indicador edáfico de sostenibilidad. Revista Asoc. Arg. Ciencia del Suelo 12-2:75-80.
- Ortega, J.F., De Juan, J.A., Tarjuelo, J.M., Merino, R & M. Valiente. 1999. Modelo de optimización económica del manejo del agua de riego en las explotaciones agrícolas: aplicación a la agricultura de regadío de la provincia de Toledo, INIA, España. Investigación Agraria, Producción y Protección Vegetal 14 (3): 325 -354.
- Oster J D. 1993. Sodic soil reclamation. En: Towards the rational use of high salinity tolerant plants, Vol. I: 485-490.

- Pereira, L.S.; Valero, J.A.; Picornell, M.R & Tarjuelo, J.M. El riego y sus tecnologías. Albacete, España: CREA-UCLM. 2010. 296 pp.
- Perrett, JJ & J Higgins. 2006. A Method for Analyzing Unreplicated Agricultural Experiments. Published in Crop Sci. 46:2482–2485.
- Perroux, KM & I White. 1988. Designs for disc permeameters. Soil Sci. Soc. Am. J. 52: 1205-1215.
- Pilatti, M A; De Orellana, J; Del Carmen Imhoff, S & Pires Da Silva, A. 2012. Actualización de los límites críticos del intervalo hídrico óptimo. Ciencia del suelo [online]., vol. 30, N°1, pp. 09-21. ISSN 1850-2067.
- Pilatti, M.A.; Imhoff, S.; Ghiberto, P & Marano, R.P. 2006. Changes in some physical properties of mollisols induced by supplemental irrigation. Geoderma; 133: 431-443.
- Pilatti, M.A.; Marano, R & de Orellana, J.A. 2004. Riego suplementario con aguas bicarbonatadas sódicas en Molisoles de Santa Fe. Sodificación y alcalinización. Agrochimica, 48 (5-6): 233-248.
- Pizarro, F. 1985. Drenaje Agrícola y Recuperación de Suelos Salinos. Ed. Agrícola Española S.A., 2° Ed., Madrid. 542 pp.
- Pla Sentis, Y. 1979. Calidad y Uso de agua para riego. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo. VI Coloquio de Suelos, 42 pp. Colombia.
- Prieto D. & Angueira C, 1996. Calidad de agua para riego, módulo II. Curso a distancia Métodos de Riego. INTA, Buenos Aires. 94 pp.
- Qadir, M., AS Qureshi & SAM Cheraghi. 2008. Extent and characterization of salt affected soils in Iran and strategies for their amelioration and management. Land Deg. Dev. 19: 214-227.
- Quiroga A., D. Funaro, E. Noellemeyer & N. Peinemann. 2005. Barley yield response to soil organic matter and texture in the Pampas of Argentina. Soil & Tillage Research. 90-(1): 63-68.
- Raza ZI, Rafiq, MS & A Rauf. 2001. Gypsum application in slots for reclamation of saline-sodic soils. Int. J. Agric. Biol. 3: 281-285.
- Rhoades, J. D. 1972. Quality of water for irrigation. Soil Sci. 113: 277-284.
- Richards, L. A. 1954. Diagnóstico y rehabilitación de suelos salinos y sódicos. Manual de agricultura N° 60. Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de América. 171 pp.
- Richards, L. A. 1980. Diagnóstico y rehabilitación de suelos salinos y sódicos. 6ed. México. 172 pp.
- Roberto, Z. & Martínez Uncal, M.C. 2012. “Bases para el ordenamiento territorial”. Publicación técnica N° 87. Ed. INTA Anguil. <http://inta.gob.ar/documentos/bases-para-el-ordenamiento-territorial>. Fecha de acceso: 11 de abril del 2013.

- Rodrigues da Silveira K., Rosas Ribeiro M., Bezerra de Oliveira L., Heck R.J & R Rodrigues da Silveira. 2008 Gypsum-saturated water to reclaim alluvial saline sodic and sodic soils. *Sci. Agric.* 65: 69-76.
- Rotondo, R., Firpo, I.T., Ferreras, L., Toresani, S., Fernández, S. & E Gómez. 2009. Efecto de la aplicación de enmiendas orgánicas y fertilizante nitrogenado sobre propiedades edáficas y productividad en cultivos hortícolas. *Horticultura Argentina* 28(66): 18-25
- Ruiz, M. & J.Paolini 1999. Efectos de la composición del agua de riego sobre el contenido y la distribución de la materia orgánica en entisoles. XIV Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo, Pucón, Chile, pp. 210.
- Sariam R.K., Rao K.V & G.C Srivastava. 2002. Differential response of wheat genotypes to long term salinity stress in relation to oxidative stress, antioxidant activity and osmolyte concentration, *Plant Sci.* 163: 1037–1046.
- SAS Institute, Inc. 2004. SAS/STAT® 9.1 User's Guide. Cary, NC: SAS Institute Inc. 5136 pp.
- Shainberg, I & Letey, J. 1984. Response of soils to sodic and saline conditions. *Hilgardia* 52: 1–57.
- Schollenberger, C.J & Simon, R.H. 1945. Determination of Exchange capacity and exchangeable bases in soil. Amonium acetate Method. *Soil Science.* Vol. 59, pp. 13-24.
- Sonnevelt, C. 1998. Efectos de la salinidad en los cultivos sin suelo. En: Mejora la eficiencia del uso del agua en cultivos protegidos. Fernández, M., Lorenzo, P., Cuadrado, I.M. (Eds). Dirección General de Investigación y Formación de Agraria, Hortiment, FIAPA, Cajamar. Almeria: 149-168.
- Suárez, D.L. 1981. Relation between pHc and Sodium Adsorption Ratio (SAR) and an Alternative Method of Estimating SAR of Soil or Drainage Waters. *Soil Sc. Soc. of Am J.* 45(3): 469-475.
- Tarchitzky,J., Golobati, Y., Keren,R & Chen, Y. 1999. Wastewater Effects on Montmorillonite Suspensions and Hydraulic Properties of Sandy Soils Published in *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63:554-560.
- Tejera N.A., Soussi M & Lluch C. 2006. Physiological and nutritional indicators of. Tolerance to salinity in chickpea plants growing under symbiotic conditions, *Environ. Exp. Bot.* 58: 17–24).
- Toogood J A & R R Cairns (Eds.). 1978. Solonetzic soils technology and management. Bull. B-78-1, Univ. Alberta, Edmonton Canadá, Second Edition. Reprint Number 546.
- Thornthwaite C.W. 1948. An approach toward a rational classification of climate. *Geogr. Rev.* 38, 55-94.
- USSL Staff (1954) Diagnosis and Improvement of Saline and Alkali Soil, Agriculture Handbook 60. Richards, LA. CD

- Van Wambeke, A. & C. O. Scoppa. 1976. Los regímenes hídricos y térmicos de los suelos argentinos calculados sobre la base de los registros climáticos. IDIA Supl. N° 33: 388-401.
- Vázquez, M., Gelati P & Millán G. 2006a. Sustentabilidad del riego complementario en suelos Udipsamanet típico y Hapludol éntico de la Prov. de Buenos Aires, Argentina. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental 10(3): 593-603.
- Vázquez, M., Millán G & P Gelati. 2006b. Efecto del riego complementario sobre la salinidad y sodicidad de diferentes suelos del NO y Centro-E de la provincia de Buenos Aires, Argentina. Rev. Fac. Agron.106 (1): 57-67.
- Vázquez, M., Millán G & Gelati P. 2008. Evaluación del efecto del riego complementario en un suelo Udipsament Típico mediante ensayo de simulación. Revista de la Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo 26(2): 195-203.
- Walker, DJ & MP Bernal. 2008. The effect of olive mill waste compost and poultry manure on the availability and plant uptake of nutrients in a highly saline soil. Bioresour. Technol. 99: 396-403.
- Wilcox L.V. 1948. The quality of water for irrigation. US Dto of Agric. Tech Bull. N° 962: 1-40.
- Wilson, M., Quintero C., Boschetti N., Benavídez R & W Mancuso. 2000. Evaluación de atributos del suelo para su utilización como indicadores de calidad y sostenibilidad en Entre Ríos. Revista Facultad de Agronomía UBA 20(1): 23-30.
- Wilson, M.G., Zino, L., Cerana, J., Boschetti, N. & C. Quintero. 2004. Efecto del agregado de yeso sobre las características físicas y químicas de un suelo degradado por el uso arrocero. XIX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Paraná, Entre Ríos. CD.
- Zhilong B., Tadashi I & Yutaka S. 2003. Effects of sodium sulfate and sodium bicarbonate on the growth, gas exchange and mineral composition of lettuce. Scientia Horticulturae 99: 215-224.

Modelo reducido con interacción como término de error

----- Cosecha=1 -----

The GLM Procedure

Class Level Information

Class	Levels	Values
trt	4	Dr ED En Tt
Anios	2	2 4

Number of Observations Read	32
Number of Observations Used	32

Dependent Variable: Rendimiento

Tests of Hypotheses Using the Type III MS for trt*Anios as an Error Term

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
trt	3	2.81025000	0.93675000	5.10	0.1069
Anios	1	2.42000000	2.42000000	13.18	0.0360
trt*Años	3	0.55085000	0.18361667	0.68	0.5724
Error	24	6.47230000	0.26967917		
Corrected Total	31	12.25340000			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	Rendimiento Mean
0.471796	18.59647	0.519306	2.792500

Dependent Variable: Peso

Tests of Hypotheses Using the Type III MS for trt*Anios as an Error Term

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
trt	3	0.28832707	0.09610902	2.75	0.2140
Años	1	0.40537880	0.40537880	11.60	0.0423
trt*Años	3	0.10480078	0.03493359	0.12	0.9489
Error	24	7.12709418	0.29696226		
Corrected Total	31	7.92560084			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	Peso Mean
0.100750	57.34699	0.544942	0.950255

Dependent Variable: Conductividad

Tests of Hypotheses Using the Type III MS for trt*Anios as an Error Term

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
trt	3	6.00518437	2.00172812	1.26	0.4266
Años	1	0.45362813	0.45362813	0.29	0.6300
trt*Años	3	4.76148438	1.58716146	3.68	0.0259

Error	24	10.33782500	0.43074271
Corrected Total	31	21.55812188	

R-Square	Coeff Var	Root MSE	Conductividad Mean
0.520467	25.30656	0.656310	2.593438

Dependent Variable: pH

Tests of Hypotheses Using the Type III MS for trt*Años as an Error Term

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
trt	3	0.13703750	0.04567917	0.22	0.8776
Años	1	0.05951250	0.05951250	0.29	0.6299
trt*Años	3	0.62413750	0.20804583	10.96	0.0001
Error	24	0.45570000	0.01898750		
Corrected Total	31	1.27638750			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	pH Mean
0.642977	1.559540	0.137795	8.835625

Least Squares Means

trt	Rendimiento		Conductividad	
	LSMEAN	Peso LSMEAN	LSMEAN	pH LSMEAN
Dr	2.65375000	0.96911678	2.56250000	8.84625000
ED	3.11875000	0.86276760	3.14125000	8.76125000
En	3.02125000	0.87126119	2.73250000	8.79875000
Tt	2.37625000	1.09787292	1.93750000	8.93625000

Años	Rendimiento		Conductividad	
	LSMEAN	Peso LSMEAN	LSMEAN	pH LSMEAN
B1	3.06750000	0.83770203	2.47437500	8.79250000
B2	2.51750000	1.06280722	2.71250000	8.87875000

The GLM Procedure

Class Level Information

Class	Levels	Values
trt	4	Dr ED En Tt
Anios	2	2 4

Data for Analysis of Rendimiento Peso

Number of Observations Read	32
Number of Observations Used	32

Data for Analysis of Conductividad pH

Number of Observations Read	32
Number of Observations Used	16

NOTE: Variables in each group are consistent with respect to the presence or absence of missing values.

Dependent Variable: Rendimiento

Tests of Hypotheses Using the Type III MS for trt*Anios as an Error Term

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
trt	3	12.27552500	4.09184167	6.28	0.0827
Años	1	1.14761250	1.14761250	1.76	0.2763
trt*Años	3	1.95336250	0.65112083	0.62	0.6067
Error	24	25.06010000	1.04417083		
Corrected Total	31	40.43660000			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	Rendimiento Mean
0.380262	30.41211	1.021847	3.360000

Dependent Variable: Peso

Tests of Hypotheses Using the Type III MS for trt*Anios as an Error Term

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
trt	3	0.05069986	0.01689995	1.96	0.2976
Años	1	0.03729571	0.03729571	4.32	0.1292
trata*Años	3	0.02590427	0.00863476	1.80	0.1740
Error	24	0.11507739	0.00479489		
Corrected Total	31	0.22897723			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	Peso Mean
0.497429	25.76011	0.069245	0.268808

Least Squares Means

Rendimiento		
trt	LSMEAN	Peso LSMEAN
Dr	3.39125000	0.28747851
ED	3.52750000	0.29472319
En	4.12250000	0.29300806
Tt	2.39875000	0.20002098

Rendimiento		
Años	LSMEAN	Peso LSMEAN
B1	3.17062500	0.23466840
B2	3.54937500	0.30294697

Dependent Variable: Conductividad

Tests of Hypotheses Using the Type III MS for trt*Años as an Error Term

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
trt	3	0.09631875	0.03210625	0.71	0.6081
Años	1	0.13140625	0.13140625	2.90	0.1872
trt*Años	3	0.13596875	0.04532292	0.47	0.7095
Error	8	0.76645000	0.09580625		
Corrected Total	15	1.13014375			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	Conductividad Mean
0.321812	33.75878	0.309526	0.916875

Dependent Variable: pH

Tests of Hypotheses Using the Type III MS for trt*Años as an Error Term

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
trt	3	0.10176875	0.03392292	0.38	0.7738
Años	1	0.04100625	0.04100625	0.46	0.5447
trt*Años	3	0.26516875	0.08838958	2.06	0.1845
Error	8	0.34375000	0.04296875		
Corrected Total	15	0.75169375			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	pH Mean
0.542699	2.509743	0.207289	8.259375

Least Squares Means

Conductividad		
trt	LSMEAN	pH LSMEAN
Dr	0.84750000	8.23750000
ED	0.94750000	8.27250000
En	0.84250000	8.15250000
Tt	1.03000000	8.37500000

Conductividad			
Años	LSMEAN	pH	LSMEAN
2	1.00750000	8.20875000	
4	0.82625000	8.31000000	

Modelo reducido con interacción como término de error

----- Cosecha=3 -----

The GLM Procedure

Class Level Information

Class	Levels	Values
trt	4	Dr ED En Tt
Anios	2	2 4

Data for Analysis of Rendimiento Peso

Number of Observations Read	32
Number of Observations Used	32

Data for Analysis of Conductividad pH

Number of Observations Read	32
Number of Observations Used	16

Dependent Variable: Rendimiento

Tests of Hypotheses Using the Type III MS for trt*Anios as an Error Term

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
trt	3	0.31687500	0.10562500	0.23	0.8719
Años	1	4.06125000	4.06125000	8.78	0.0594
trt*Anios	3	1.38842500	0.46280833	5.13	0.0070
Error	24	2.16600000	0.09025000		
Corrected Total	31	7.93255000			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	Rendimiento Mean
0.726948	13.30012	0.300416	2.258750

Dependent Variable: Peso

Tests of Hypotheses Using the Type III MS for trt*Anios as an Error Term

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
trt	3	0.00230463	0.00076821	0.44	0.7391
Años	1	0.02312299	0.02312299	13.35	0.0354
trt*Anios	3	0.00519443	0.00173148	2.19	0.1152
Error	24	0.01895929	0.00078997		
Corrected Total	31	0.04958135			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	Peso Mean
0.617612	15.40968	0.028106	0.182395

Least Squares Means

Rendimiento		
trt	LSMEAN	Peso LSMEAN
Dr	2.19125000	0.17535548
ED	2.38875000	0.19625839
En	2.31750000	0.17558837
Tt	2.13750000	0.18237589

Rendimiento		
Años	LSMEAN	Peso LSMEAN
B1	1.90250000	0.15551343
B2	2.61500000	0.20927563

Dependent Variable: Conductividad

Tests of Hypotheses Using the Type III MS for trt*Años as an Error Term

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
trt	3	0.25022500	0.08340833	2.21	0.2654
Años	1	0.20702500	0.20702500	5.50	0.1008
trt*Años	3	0.11302500	0.03767500	1.05	0.4207
Error	8	0.28610000	0.03576250		
Corrected Total	15	0.85637500			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	Conductividad Mean
0.665917	28.92692	0.189110	0.653750

Dependent Variable: pH

Tests of Hypotheses Using the Type III MS for trt*Años as an Error Term

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
trt	3	0.05147500	0.01715833	0.94	0.5205
Años	1	0.07290000	0.07290000	3.98	0.1399
trt*Años	3	0.05490000	0.01830000	0.37	0.7780
Error	8	0.39730000	0.04966250		
Corrected Total	15	0.57657500			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	pH Mean
0.310931	2.681316	0.222851	8.311250

Least Squares Means

Conductividad		
trt	LSMEAN	pH LSMEAN
Dr	0.78250000	8.35500000
ED	0.53250000	8.32500000
En	0.77500000	8.21500000
Tt	0.52500000	8.35000000

Conductividad		
Años	LSMEAN	pH LSMEAN
B1	0.5400000	8.24375000
B2	0.7675000	8.37875000

Modelo reducido con interacción como término de error

----- Cosecha=4 -----

The GLM Procedure

Class Level Information

Class	Levels	Values
trt	4	Dr ED En Tt
Años	2	2 4

Data for Analysis of Rendimiento Peso

Number of Observations Read	32
Number of Observations Used	32

Data for Analysis of Conductividad pH

Number of Observations Read	32
Number of Observations Used	24

NOTE: Variables in each group are consistent with respect to the presence or absence of missing values.

Dependent Variable: Rendimiento

Tests of Hypotheses Using the Type III MS for trt*Anios as an Error Term

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
trt	3	0.37202500	0.12400833	0.27	0.8441
Anios	1	0.02761250	0.02761250	0.06	0.8218
trt*Anios	3	1.37341250	0.45780417	3.49	0.0312
Error	24	3.14810000	0.13117083		
Corrected Total	31	4.92115000			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	Rendimiento Mean
0.360292	31.32326	0.362175	1.156250

Dependent Variable: Peso

Tests of Hypotheses Using the Type III MS for trt*Anios as an Error Term

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
trt	3	0.00135151	0.00045050	0.39	0.7700
Anios	1	0.00005658	0.00005658	0.05	0.8390
trt*Anios	3	0.00346348	0.00115449	1.36	0.2775
Error	24	0.02030693	0.00084612		
Corrected Total	31	0.02517850			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	Peso Mean
0.193481	28.50000	0.029088	0.102064

Least Squares Means

Rendimiento		
trt	LSMEAN	Peso LSMEAN
Dr	1.05500000	0.09388636
ED	1.15750000	0.09918803
En	1.33125000	0.11163462
Tt	1.08125000	0.10354618

Rendimiento		
Anios	LSMEAN	Peso LSMEAN
B1	1.12687500	0.10073410
B2	1.18562500	0.10339350

Dependent Variable: Conductividad

Tests of Hypotheses Using the Type III MS for trt*Anios as an Error Term

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
trt	3	0.08997117	0.02999039	1.67	0.3427
Anios	1	0.04301067	0.04301067	2.39	0.2199
trt*Anios	3	0.05401933	0.01800644	1.56	0.2372
Error	16	0.18432267	0.01152017		
Corrected Total	23	0.37132383			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	Conductividad Mean
0.503607	19.91010	0.107332	0.539083

Dependent Variable: pH

Tests of Hypotheses Using the Type III MS for trt*Anios as an Error Term

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
trt	3	0.26147917	0.08715972	0.50	0.7107
Anios	1	0.03603750	0.03603750	0.20	0.6816
trt*Anios	3	0.52784583	0.17594861	1.42	0.2733
Error	16	1.98093333	0.12380833		
Corrected Total	23	2.80629583			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	pH Mean
0.294111	4.203663	0.351864	8.370417

Least Squares Means

Conductividad		
trt	LSMEAN	pH LSMEAN
Dr	0.55850000	8.48333333
ED	0.54450000	8.46333333
En	0.61116667	8.29000000
Tt	0.44216667	8.24500000

Conductividad		
Anios	LSMEAN	pH LSMEAN
B1	0.49675000	8.40916667
B2	0.58141667	8.33166667

Paisaje:

Es una planicie de relieve subnormal, con gradiente del 0 %. Pequeñas depresiones y lagunas salinizadas se encuentran dispersas en toda el área. Material parental: sedimentos de origen eólico y textura franco arenosa sobre el manto de tosca. Éste aflora o se encuentra a cualquier profundidad, haciéndolo generalmente entre los 0,60 y 1,20 m. No es posible hacer relaciones con el microrelieve.

Suelo:

Descripción de Horizontes:

- Ap 0-0,12 m; pardo grisáceo (10YR 5/2) en seco, pardo grisáceo muy oscuro (10YR 3/2) en húmedo; franco arenoso fino; bloques subangulares medios moderados; suelto, friable, no plástico, no adhesivo; pH 6,2; límite inferior abrupto, suave; raíces abundantes.
- A12 0,12-0,27 m; pardo grisáceo (10YR 5/2) en seco y pardo oscuro (10YR 3/3) en húmedo; franco arenoso muy fino; bloques subangulares medios moderados; suelto, friable, no plástico, no adhesivo; pH 6,9; límite inferior claro y suave; raíces abundantes.
- AC 0,37-0,65 m; gris a gris claro (10YR 6/1) en seco y pardo amarillento oscuro (10YR 4/4) en húmedo; franco arenoso muy fino; ligeramente estructurado en bloques débiles; no plástico, no adhesivo; pH 6,8; discordancia abrupta hacia la tosca.
- IIR + 0,50 m; tosca. (Inventario de recursos naturales de la provincia de La Pampa, 1980).