



Recovery and management of saline soils cultivated under cover

Recuperación y manejo de suelos salinos cultivados bajo cubierta

Etcheverry¹, M; Génova¹, L; Calvo¹, L; Etchevers¹, P; Chale¹, W; Ramos¹, F y Andreau¹, R.

¹ Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Universidad Nacional de La Plata. Argentina.

Leopoldo Génova, lgenova@agro.uba.ar

Recibido: 05/12/2018

Aceptado: 22/10/2019

ABSTRACT

Etcheverry, M; Génova, L; Calvo, L; Etchevers, P; Chale, W; Ramos, F y Andreau, R. 2019. Recovery and management of saline soils cultivated under cover. Horticultura Argentina 38 (97): 23 - 38.

The soils cultivated under cover deteriorate due to irrigation with saline waters, excessive fertilization, limited drainage and absence of leaching of salts by rain. The objectives of the work were to forecast leaching water depth, recover a salinized soil by hydro improvement method, maintain the tolerable soil salinity by the lettuce crop applying the leaching requirement and evaluate the saline dynamics of the soil cultivated and irrigated with the Balansal model. In a greenhouse drain tubes were buried at 50 cm spaced every 2 m and 0.2 m³ tanks were installed at the discharge. The leaching water depth was predicted using 6 mathematical models and into basins of 10

m², the initial and residual electrical conductivities of the soil and drained water were measured after applying 3 water depths, totalling 320 mm. The main results were: the predicted leaching water depth averaged 320 mm; the average initial soil salinity of 4.69 dS.m⁻¹ was reduced to 0.81 dS.m⁻¹ after the last leach; the salts decrease of the first leaching with respect to the initial salinity was 74.1%, that of the second leaching was 31% and that of the third leaching was 3.7%; the salinity of the drained water was 0.97 dS.m⁻¹; 0.91 dS.m⁻¹ and 0.88 dS.m⁻¹ after each leach, respectively. With the application of a leaching requirement of 15%, the soil salinity was maintained at 0.87 dS.m⁻¹ and the Balansal model predicted with good adjustment the saline dynamics of the soil during the crop cycle.

Additional Keywords: salinity, leaching heads, leaching requirements, hydrosaline balance.

RESUMEN

Etcheverry, M; Génova, L; Calvo, L; Etchevers, P; Chale, W; Ramos, F y Andreau, R. 2019. Recuperación y manejo

de suelos salinos cultivados bajo cubierta. Horticultura Argentina 38 (97): 23 - 38.

Los suelos cultivados bajo cubierta se deterioran a causa del riego con aguas salinas, fertilización excesiva, drenaje limitado por pérdida de fertilidad física y ausencia de lixiviación de sales por lluvia. Los objetivos del trabajo fueron pronosticar láminas de lavado, recuperar un suelo salinizado mediante hidromejoramiento, mantener la salinidad edáfica tolerante por el cultivo de lechuga mediante la aplicación del requerimiento de lixiviación y evaluar la dinámica salina del suelo cultivado y regado con el modelo Balansal. En un invernáculo se enterraron a 50 cm tubos-dren, espaciados 2 m y tanques de 0,2 m³ ubicados en la descarga de los drenes. Se pronosticaron láminas de lavado aplicando 6 modelos matemáticos. Se midieron las conductividades eléctricas del agua de riego y del agua drenada. En piletas de 10 m² se midieron las conductividades del suelo una vez

aplicadas 3 láminas de lavado. Los principales resultados fueron: las láminas de lavado pronosticadas promediaron 320 mm; la salinidad inicial media del suelo de 4,69 dS.m⁻¹ se redujo a 0,81 dS.m⁻¹ luego del último lavado; la disminución de sales del primer lavado respecto de la salinidad inicial fue del 74,1%, la del segundo lavado del 31% y la del tercer lavado un 3,7%; la salinidad del agua drenada fue de 0,97 dS.m⁻¹, 0,91 dS.m⁻¹ y 0,88 dS.m⁻¹ después de cada lavado, respectivamente. Con la aplicación de un requerimiento de lixiviación del 15 % se mantuvo la salinidad del suelo en 0,87 dS.m⁻¹ y el modelo Balansal pronosticó, con buen ajuste, la dinámica salina del suelo durante el ciclo del cultivo.

Palabras claves adicionales: salinidad, láminas de lavado, requerimiento de lixiviación, balance hidrosalino.

1. Introducción

Entre los partidos de Berazategui, La Plata y F. Varela, que conforman el cinturón hortícola platense (CHP), se cultivan bajo cubierta unas 2.750 ha (López Camelo, 2012), distribuyéndose tres especies principales el total cultivado: tomate (*Lycopersicon esculentum*) (40%), pimiento (*Capsicum annuum*) (24%) y lechuga (*Lactuca sativa*) (13%) (López Camelo, 2007).

El riego en los invernaderos se realiza casi exclusivamente con agua subterránea, proveniente de los acuíferos Puelches y Pampeano, ambos de naturaleza química bicarbonatada sódica, con rangos de conductividad eléctrica -CEa-, como indicador de la salinidad, de 0,8 a 1,5 dS m⁻¹ y relación de adsorción de sodio -RAS- de 4 a 8, como indicador de la sodicidad (Alconada & Minghinelli, 1998), Andreau et al., 2012).

Los suelos cultivados son principalmente Molisoles y Vertisoles, que presentan un horizonte subsuperficial argílico potente, con moderada a baja permeabilidad. Esta característica, agregada al inadecuado manejo de las dosis de riego, que no cumplen con el requerimiento de lixiviación (RL), la carencia de estructuras adecuadas de drenaje y los excesos de fertilizantes, contribuyen a la degradación edáfica en las formas de salinización y sodificación, desbalance de nutrientes y pérdida de la fertilidad física (Andreau et al., 2017) (Alconada, 1996; Alconada & Minghinelli, 1998). Según Marrare et al., (2011) otro factor de deterioro edáfico es la roturación intensa de los suelos, que generan alteraciones físicas.

Este conjunto de factores de procesos degradativos no ha recibido la atención merecida por parte de la comunidad científica mundial, debido a que la mayoría de los suelos cultivados bajo cubierta son de texturas arenosas o se reemplaza el suelo por sustratos. En la Argentina es escasa la bibliografía referente a estas causas de deterioro edáfico.

En el CHP los métodos más frecuentes de riego en los invernaderos son los surcos y el goteo superficial. Recientemente se está incorporando el goteo subterráneo. Como consecuencia de

Rhodes, Kandaih y Mashali (1992) y por último Grattan (2002), propusieron valores de los parámetros a y b de la ec. 1 para una amplia gama de cultivos. En la Tabla 1 se dan valores de los parámetros a y b para los principales cultivos del CHP.

Tabla 1. Valores de los parámetros a y b para los principales cultivos del Cinturón Hortícola Platense.

Cultivo	a	b (%)
Poroto (<i>Phaseolus vulgaris</i>)	1,00	19,00
Lechuga (<i>Lactuca sativa</i>)	1,30	13,00
Pimiento (<i>Capsicum annuum</i>)	1,50	14,00
Maíz dulce (<i>Zea mays</i>)	1,70	12,00
Repollo (<i>Brassica oleracea capitata</i>)	1,80	9,70
Apio (<i>Apium graveolens</i>)	1,80	4,80
Tomate (<i>Lycopersicon esculentum</i>)	2,50	9,90
Pepino (<i>Cucumis sativus</i>)	2,50	13,00
Brocoli (<i>Brassica oleracea botrytis</i>)	2,80	9,20

Ayers & Westcot (1985) presentaron la clasificación de la tolerancia relativa de los cultivos a las condiciones salinas del suelo (Tabla 2).

Tabla 2. Clasificación de la tolerancia relativa de los cultivos a la salinidad del suelo. Fuente: Ayers & Westcot (1985)

Tipo de cultivos	Salinidad del suelo a partir de la cual comienza la disminución de rendimientos.
Sensibles	< 1,3 dS.m ⁻¹
Moderadamente sensibles	1,3-3 dS.m ⁻¹
Moderadamente tolerantes	3-6 dS.m ⁻¹
Tolerantes	6-10 dS.m ⁻¹

Ayers & Westcot (1985), Maas (1990), Rhodes, Kandaih & Mashali (1992) Maas & Hoffman (1997), Maas & Grattan (1999), Grattan (2002) y Hanson, Grattan & Fulton (2006) fueron estudiando las relaciones entre la salinidad y la producción de los cultivos, como también recopilando y actualizando información sobre dichos temas, posibilitando la confección de tablas con valores de tolerancias salinas de varios cultivos. En la Tabla 3 se presentan los valores de CEe (tolerancia) y CEa correspondientes a los cultivos predominantes en el CHP para no reducir el rendimiento relativo RR por el efecto osmótico.

Tabla 3. Tolerancia salina de los principales cultivos del cinturón hortícola platense para porcentajes de rendimiento relativo del 100, 90, 75, 50 y 0.

Cultivos	Rendimiento relativo (%)									
	100	100	90	90	75	75	50	50	0	0
	CEe	CEa	CEe	CEa	CEe	CEa	CEe	CEa	CEe	CEa
Poroto (<i>Phaseolus lunatus</i>)	1,0	0,7	1,5	1,0	2,3	1,5	3,6	2,4	6,3	4,2
Lechuga (<i>Lactuca sativa</i>)	1,3	0,9	2,1	1,4	3,2	2,1	5,1	3,4	9,0	6,0
Pimiento (<i>Caspicum annum</i>)	1,5	1,0	2,2	1,5	3,3	2,2	5,1	3,4	8,6	5,8
Maiz dulce (<i>Zea mays</i>)	1,7	1,1	2,5	1,7	3,8	2,5	5,9	3,9	10,0	6,7
Repollo (<i>Brassica oleracea capitata</i>)	1,8	1,2	2,8	1,9	4,4	2,9	7	4,6	12,0	8,1
Apio (<i>Apium graveolens</i>)	1,8	1,2	3,4	2,3	5,8	3,9	9,9	6,6	18,0	12,0
Tomate (<i>Lycopersicum esculentum</i>)	2,5	1,7	3,5	2,3	5,0	3,4	7,6	5,0	13,0	8,4
Pepino (<i>Cucumis sativus</i>)	2,5	1,7	3,3	2,2	4,4	2,9	6,3	4,2	10,0	6,8
Brócoli (<i>Brassica oleracea botrytis</i>)	2,8	1,9	3,9	2,6	5,5	3,7	8,2	5,5	14,0	9,1

El riego por surcos saliniza los suelos en superficie (por ascenso capilar y evaporación) y en profundidad, por la cantidad de sales suministrada en cada riego, que generalmente es de dosis excesivas, muy superiores a las láminas netas de reposición adecuadas a las condiciones de cultivo y suelo. A modo de ejemplo, la aplicación de una lámina de 50 mm con agua de CEa=1 dS.m⁻¹, aporta 0,64 g.l⁻¹ de sal, que en un invernáculo de 480 m² significa el agregado de 15,36 kg de sal. Con los riegos por goteo y por aspersión se suministran generalmente menores láminas, lo cual redundará en más bajos aportes salinos. Por otro lado, las diferentes formas de aplicación de agua al suelo en función del método de riego empleado, generan distintas distribuciones de las sales en superficie y en profundidad, como ilustra Lutenberg (2016) en la Figura 2.

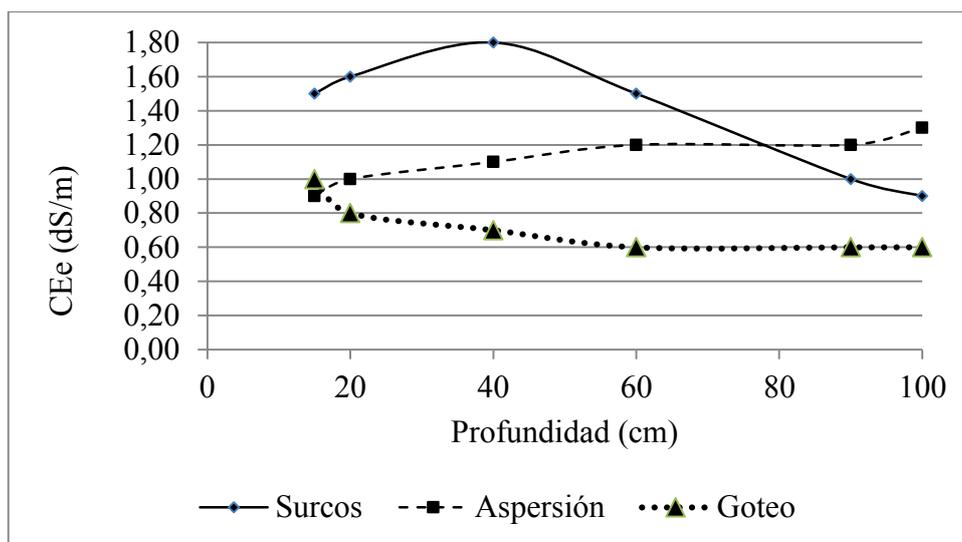


Figura 2. Distribución de la salinidad en el perfil del suelo de un cultivo de maíz dulce regado por surcos, aspersión y goteo.

Camp *et al.*, (1998), Rivera *et al.*, (2004), del Amor & del Amor (2007); Génova *et al.*, (2014) informaron que los rendimientos de los cultivos con RGS son mayores o iguales a los obtenidos por otros métodos de riego.

La mayor eficiencia de aplicación (relación entre la lámina media de agua almacenada en la zona de raíces del cultivo y la lámina derivada) y la ubicación profunda del bulbo húmedo en el RGS podrían incidir favorablemente en la reducción de la salinidad y sodicidad del suelo causada por el RG (Andreau *et al.*, 2012), debido a que, al derivar menores láminas de riego, el aporte salino disminuye, aunque Hanson & May (2004) alertan que el desarrollo del bulbo húmedo más profundo provoca una acumulación de sales por encima de la cinta de riego que debería ser lixiviada periódicamente.

Pérez *et al.*, (2011) plantearon la posibilidad de instalar drenes para mejorar la relación aire-agua del suelo, aumentar el volumen de suelo a explorar por las raíces, incrementar la actividad microbiana y lavar sales y sustancias tóxicas. Estudiando las condiciones salinas de algunos suelos de invernáculos, Andreau *et al.*, (2012) reportaron, en puntos diferentes del CHP con el mismo uso del suelo, salinidades de 5,3, 8,7 y 5,8 dS.m⁻¹ para 7, 14 y 21 años de cultivos sucesivos, respectivamente y salinidades de 8,43, 4,92 y 3,64 dS.m⁻¹ en 10, 16 y 20 años de sucesión de cultivos, respectivamente.

La práctica más habitual para recuperar suelos salinos es el hidromejoramiento, que consiste en el lavado del perfil del suelo en la zona de raíces mediante la aplicación de agua, que diluye y arrastra en profundidad del exceso de sales solubles (Bower *et al.*, 1968). El lavado de las sales solubles con aguas de baja salinidad y la construcción de obras de drenaje contribuyen a la rehabilitación del suelo (Richards, 1980). Las principales condiciones que favorecen el lavado son la alta drenabilidad de los suelos, la lejanía del nivel freático y/o la existencia de sistemas de drenaje en buen estado de funcionamiento (Halitim *et al.*, 1995).

Los modelos de estimación de láminas de lavado consideran principalmente la salinidad del agua de riego (CE_a), la profundidad, textura y salinidades inicial (S_i) y residual objetivo (S_o) del perfil de suelo a lavar (del Amor & del Amor, 1973; Sejas *et al.*, 1979; Ortega Escobar, 1982 y Palacios Vélez, 1983).

La literatura internacional ofrece numerosos modelos de balance hídrico salino en base a la ecuación de transporte de Richards, con gran rigurosidad teórica del fenómeno, pero por lo general se caracterizan por ser de muy difícil aplicación dada la diversidad y complejidad de datos que requieren para su correcto funcionamiento, los cuales no siempre están disponibles o son fáciles de medir en nuestro país. Tal es el caso de reconocidos modelos como el Swap, Swapsalt, Swatre, Biwasa, UnSatChem y otros. El modelo Balansal, desarrollado por Mirábile & Fornero (1986), requiere datos de habitual disponibilidad y ha sido validado tanto en zonas áridas, donde se riega integralmente como en zonas húmedas bajo riego complementario (Mirábile, Génova & Monteleone, 2007).

Los objetivos de este trabajo fueron a) pronosticar láminas de lavado, b) lavar el suelo para disminuir la salinidad actual hasta valores que no reduzcan el rendimiento de los cultivos más comunes en el CHP, c) aplicar requerimientos de lixiviación para mantener la salinidad del suelo y d) simular la dinámica hidrosalina del suelo regado con el modelo Balansal.

2. Materiales y métodos

Para el conjunto de ensayos se utilizó un invernáculo de madera con 12 años de cultivos regados y fertilizados, perteneciente a la Estación Experimental J. Hirschhorn EEJH, ubicada en la localidad de Los Hornos, Partido de La Plata, dentro del CHP, con tubos de drenaje de PVC ranurado a 50 cm de profundidad y descarga en tanques de 0,2 m³.

Se construyeron en el suelo 3 piletas de 10 m² cada una donde se aplicaron 3 láminas con un intervalo semanal, midiendo la CE_{ex} después de cada lavado y la CE_d (conductividad eléctrica del agua de drenaje) después de cada lavado.

Posteriormente se realizó un ensayo de riego aplicando láminas que incluyeron el requerimiento de lixiviación RL de un cultivo de lechuga tipo mantecosa variedad Amarillo, con una densidad de 8 plantas.m².

Se establecieron la capacidad de campo (Wc) con el método de Richards (1948) y las humedades actuales Wact por gravimetría, antes de iniciar los ensayos, la densidad aparente (dap) con el cilindro densitométrico y la conductividad eléctrica del extracto de saturación del suelo (CE_{ex}) por conductimetría, indicando la salinidad inicial (Si).

Se calcularon las láminas netas de reposición con la ec. 1 y los intervalos de riego con la ec. 2.

$$dn = (Wc - Wm) \text{dap} \text{Ur} \text{D} \text{ (ec. 1) donde:}$$

dn= lámina neta de reposición, en mm.

Ur= umbral crítico = umbral de riego.

D= profundidad efectiva de raíces, en dm.

Ir = dn Etc⁻¹ (ec. 2) donde Ir = intervalo de riego, en días.

Etc= evapotranspiración de la lechuga, en mm.d⁻¹

La Etc se estimó decádicamente con el Programa Cropwat (FAO, 2018) con datos meteorológicos provenientes de la estación Davis existente en la EEJH.

También se midió la conductividad eléctrica del agua de riego (CEa) por conductivimetría y se calcularon dos requerimientos de lixiviación RL, que constituyeron los tratamientos de riego, T1: RL para riego con frecuencia normal, calculado con la ec. 3 y T2: RL para riego continuo o muy frecuente, calculado con la ec. 4 (Ayers & Westcot, 1985).

$$RL = (CEa) (5 CEE - CEa)^{-1} \text{ (ec. 3) donde:}$$

CEE = tolerancia salina de la lechuga sin disminuir rendimiento. (RR=100%)

RL= requerimiento de lixiviación.

$$RL = CEa (2 CEE \text{ máx})^{-1} \text{ (ec. 4) donde:}$$

CEE_{max}= salinidad del suelo asociada a la máxima reducción de rendimientos, o sea rendimiento relativo RR = 0

Las láminas de riego se calcularon con la ec. 5, incorporando a la lámina neta, el RL.

$$dr = dn (1 - RL)^{-1} \text{ (ec. 5) donde:}$$

dr= lámina de riego a aplicar, en mm.

Se instalaron cintas de goteo Aqua-TTraxx® de 16 mm de diámetro, con emisores espaciados 0,1 m y caudal unitario de 0,0012 m³. h⁻¹.

Para pronosticar láminas de lavado se utilizaron los modelos matemáticos de Sejas, dado por Sejas *et al.*, (1979); de Rozov, de Kovda y de Volobuev, reportados por del Amor y del Amor, (1973); de Panin y de Safanov, reportados por González G. *et al.*, (1985). La mayoría de los modelos consideran la salinidad inicial del suelo Si, la salinidad final del suelo deseada So y la salinidad del agua con que se lavará el suelo. Las ecuaciones utilizadas fueron:

Ec. de Rozov: $M = Wc - Wact + n Wc$ (ec. 6) donde:

M=cantidad de agua en $m^3 ha^{-1}$, Wc en $m^3 ha^{-1}$, Wact antes de lavar, en $m^3 ha^{-1}$, n=coeficiente entre 0,5 y 2 en función de la salinidad y la textura del suelo.

Ec. de Kovda: $y = n_1 n_2 n_3 400 x + /-100$ (ec. 7) donde:

y=lamina de lavado, en mm, x=So en 2 m del perfil, en %, n_1 =coeficiente dependiente de la textura del suelo, entre 0,5 y 2,0, n_2 =coeficiente dependiente de la profundidad de la capa freática entre 1,0 y 3,0, n_3 =coeficiente dependiente de la CE_a , entre 1,0 y 3,0.

Ec. de Volobuev: $N = K \log (Si/So)a$ (ec. 8) donde:

N=dosis de lavado, en $m^3 ha^{-1}$, Si en % o $t ha^{-1}$, So en % o $t ha^{-1}$, K=coeficiente de proporcionalidad, usando $m^3 ha^{-1}$ es 10.000, a=parámetro dependiente de la Si y su proporción de cloruros.

Ec. de Panin: $Qa = \psi \ln (Si/So)$ (ec. 9) donde:

Qa=lámina de lavado, en cm, Ψ =volumen poroso del suelo, en cm, Si en %, So en %.

Ec. de Sejas: $L=9 P^{0,75}(70-CE_a/CE_i-CE_a)^{0,39}\log(CE_i/CE_f)$ (ec. 10) donde: L=lámina de lavado, en cm, P=profundidad de lavado en cm, CE_a en $dS m^{-1}$, CE_i =conductividad eléctrica inicial del suelo, en $dS m^{-1}$, CE_f =conductividad eléctrica final del suelo, en $dS m^{-1}$.

Ec. de Safanov: $Q=v(100/a)^{1/b}((Si/So)/Si)^{1/b}$ (ec. 11) donde: Q=lámina de lavado, en cm, V=volumen poroso del suelo, en cm, a y b= parámetros $a=70$ y $b=0,97$, Si en %, So en %.

El cultivo de lechuga se regó según las láminas calculadas con las láminas netas de reposición incrementadas por el RL de los tratamientos y se extrajeron muestras de suelo para monitorear la salinidad después de cada riego. Por último, se corrió el modelo Balansal (Mirabile & Fornero, 1986) con los datos de las láminas de riego aplicadas, las salinidades iniciales del suelo y del agua de riego y la fracción de lixiviación correspondiente a la textura del suelo FL= 0,6.

3. Resultados y discusión:

3.1. Pronóstico de láminas de lavado:

Los datos utilizados para el pronóstico de láminas de lavado fueron: $CE_a= 0,80 dS.m^{-1}$, profundidad del lavado= 40 cm, Wc= 28%, Wact= 14 %, $dap= 1,1 g.cm^{-3}$, Si= 4,69 $dS.m^{-1}$, So= 1,0 $dS.m^{-1}$, volumen poroso: 58 cm. En la Tabla 4 se presentan los valores pronosticados por los modelos utilizados, aceptando el promedio (320 mm) como valor a aplicar. La desviación standard es de 37,92 y el coeficiente de variación del 11,86%

Tabla 4. Valores de láminas de lavado calculados con los 6 modelos.

Modelo	Lámina (mm)
Kovda	327
Panin	359
Rozov	247
Safanov	335
Sejas	328
Volovuyev	322

3.2. Lavado de las sales del suelo:

Siguiendo las recomendaciones de Ortega Escobar (1982), Palacios Vélez (1983) y González González (1985) y considerando que la literatura sobre experiencias de lavados (Gardner & Brooks, 1957), del Amor & del Amor, 1973), Sejas *et al.*, (1979) aconseja fraccionar la lámina total de lavado, sobre todo en suelos arcillosos, debido a que la efectividad del lavado es muy superior en las primeras aplicaciones y va decreciendo con la derivación de láminas sucesivas, se asumió lavar el suelo derivando una lámina total de 320 mm, fraccionada en 3 dosis (120, 100 y 100 mm). En la Fig. 3 se observa la salinidad previa y posterior a cada lavado en los 3 sitios experimentales.

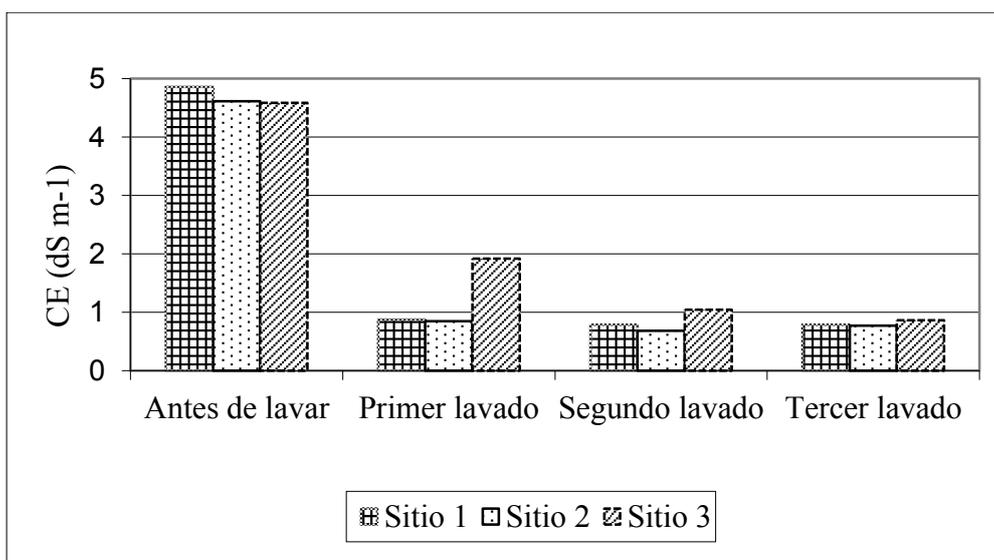


Figura 3. Salinidad del suelo de cada sitio previa y posterior a cada lavado.

En la Figura 4 se pueden observar los promedios de las salinidades del suelo de las tres piletas de lavado, el inicial y los posteriores a cada lavado. Las reducciones de la salinidad inicial fueron del 74,1% con el primer lavado, del 31% con el segundo lavado y del 3,7% con el tercer lavado, alcanzándose una salinidad residual final de $CE_e = 0,81 \text{ dS.m}^{-1}$, resultando menor que la tolerancia salina del poroto ($CE_e = 1,0 \text{ dS.m}^{-1}$) para no reducir su rendimiento, que es el cultivo más sensible a las sales entre los de mayor presencia en el CHP.

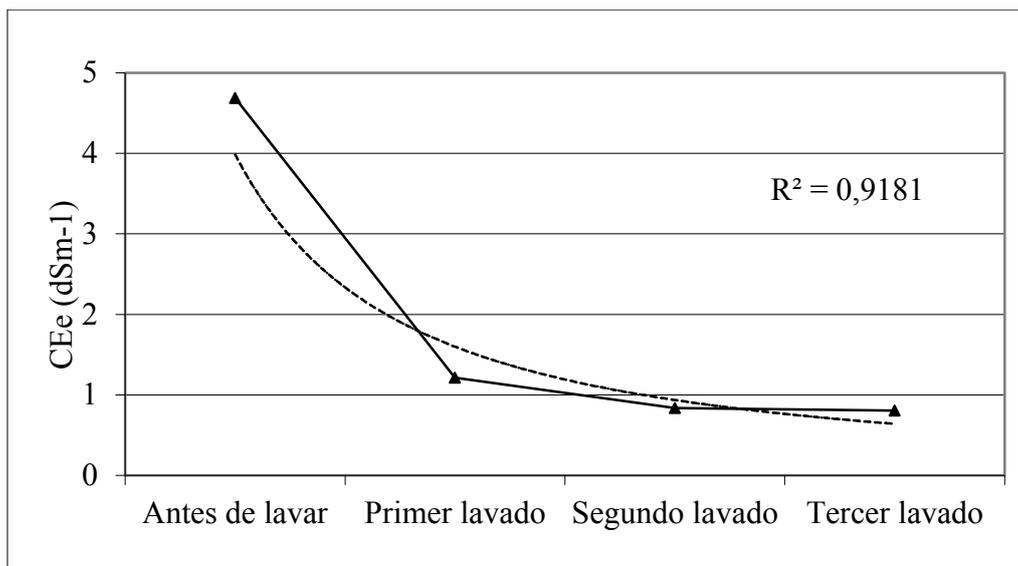


Figura 4. Salinidades del suelo promedio de las tres piletas de lavado, inicial y posteriores a cada lavado.

La Tabla 5 presenta los valores de la CE del agua drenada, recolectada en los tanques, mostrando una marcada tendencia decreciente con los lavados, con valores finales cercanos a la salinidad del agua de riego.

Tabla 5. Salinidad del agua de drenaje colectada en los tanques.

Lámina (mm)	Tanque	CEd (dS m ⁻¹)	CEd media (dS m ⁻¹)
120	1	0,93	
120	2	0,97	
120	3	1,00	0,97
100	1	0,90	
100	2	0,91	
100	3	0,91	0,91
100	1	0,88	
100	2	0,88	
100	3	0,89	0,88

La Fig. 5 muestra la relación entre las salinidades residuales del suelo y del agua de drenaje después del suministro de las láminas de lavado, encontrándose una muy alta correlación entre dichos valores ($r^2=0,99$).

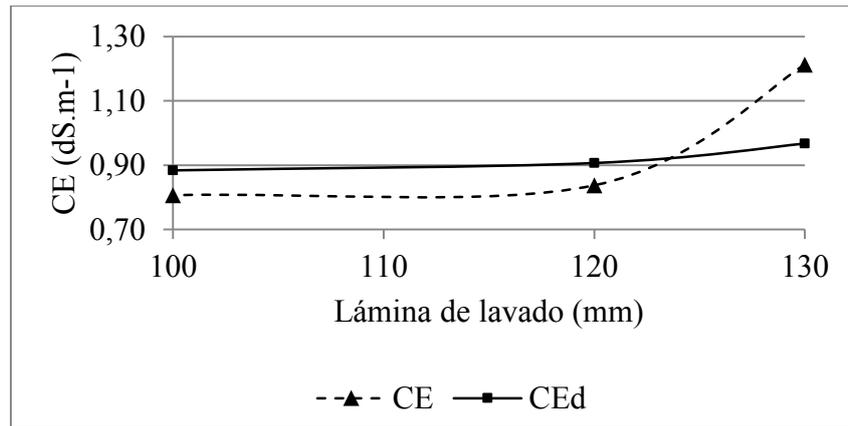


Figura 5. Impacto de las láminas de lavado en la salinidad del suelo (CEex) y del agua drenada (CEd).

3.3. Requerimiento de lixiviación:

La Tabla 6 muestra los valores porcentuales del requerimiento de lixiviación calculados para los principales cultivos del CHP, asociados a sus tolerancias salinas para riegos de frecuencia normal, sin disminución de rendimientos (tratamiento T1) y para riegos continuos o muy frecuentes (tratamiento T2).

Tabla 6. Requerimientos de lixiviación de los principales cultivos del CHP.

Cultivo	CEa	CEemax	CEe	T1	T2	T1	T2
	dS.m ⁻¹	dS.m ⁻¹	dS.m ⁻¹	RL1	RL2	RL1	RL2
						%	%
Poroto	0,85	6,3	1,0	0,0675	0,2048	6,75	20,48
Lechuga	0,85	9,0	1,3	0,0472	0,1504	4,72	15,04
Pimiento	0,85	8,6	1,5	0,0494	0,1278	4,94	12,78
Maíz dulce	0,85	10,0	1,7	0,0425	0,1111	4,25	11,11
Repollo	0,85	12,0	1,8	0,0354	0,1043	3,54	10,43
Apio	0,85	18,0	1,8	0,0236	0,1043	2,36	10,43
Tomate	0,85	13,0	2,5	0,0327	0,0730	3,27	7,30
Pepino	0,85	10,0	2,5	0,0425	0,0730	4,25	7,30
Brócoli	0,85	14,0	2,8	0,0304	0,0646	3,04	6,46

Referencias: T1= tratamiento 1, riego con frecuencia normal; T2= tratamiento 2, riego muy frecuente; RL1= requerimiento de lixiviación para el T1; RL2= requerimiento de lixiviación para el T2.

En la Tabla 7 constan las láminas de riego aplicadas al cultivo de lechuga que agrega a la lámina neta que satisface la demanda evapotranspirativa, la lámina correspondiente al requerimiento de lixiviación para los tratamientos.

Tabla 7. Láminas de riego de la lechuga incluyendo el requerimiento de lixiviación.

Riegos	Lámina	T1	T2	Lámina de riego	
	neta	(1-RL1)	(1-RL2)	T1	T2
	dn			dr1	dr2
	mm			mm	mm
1	30,00	0,953	0,850	31,5	35,3
2	28,00	0,951	0,872	29,5	32,1
3	32,00	0,958	0,889	33,4	36,0

3.4. Modelo de predicción de la dinámica hidrosalina Balansal:

La Tabla 8 presenta la planilla de salida del Modelo Balansal para el tratamiento de riego T1. Con una C_{Ee} inicial del suelo de 0,85 dS.m⁻¹ y una salinidad del suelo objetivo C_{Ee}*= 0,85 dS.m⁻¹, que indica que la propuesta es no variar la salinidad edáfica con los riegos con agua de C_{Ea}= 0,80 dS.m⁻¹ y un coeficiente de eficiencia del lavado f= 0,6, el modelo simuló cambios de la C_{Ee} después de los riegos de las láminas netas, alcanzando una salinidad final del suelo de 0,92 dS.m⁻¹, pronosticando que la lámina total de riego necesaria para lograr la C_{Ee}* debió haber sido de 132 mm, frente a los 94,4 mm aplicados. Tabla 8. Planilla de salida del modelo Balansal.

Tabla 8. Planilla de salida del modelo Balansal.

Estación Experimental J. Hirschhorn. Los Hornos, Pdo. de La Plata

Cultivo: lechuga

Tipo de suelo: Fco-arcilloso

Est. Meteorológica Los Hornos

W_{fc}= 123 mm

C_{Ee}= 0,85 dS/m

f= 0,6

C_{Ea}= 0,8 dS/m

C_{Ee}*= 0,85 dS/m

Número	Et.	Pp.	Riego	C _{Ea}	C _{Ee}	Cambio	Riego*	DL	R	W
de riego	(mm)	(mm)	(mm)	(dS/m)	(dS/m)	(dS/m)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
1	0	0	31,5	0,8	0,743	-0,057	0	0	32	123
2	30	0	29,5	0,8	0,839	0,096	52	22	0	123
3	28	0	33,4	0,8	0,92	0,081	93	64	5	123
	32	0	0	0,8	0,92	0	132	100		91
Totales	90		94,4			0,12				

Referencias

- Wfc = humedad del suelo a capacidad de campo.
 CEe = salinidad del suelo.
 CEa = salinidad del agua.
 f = factor de eficiencia del lavado.
 CEe* = salinidad del suelo objetivo. (es la CEe que se desea alcanzar)
 Et. = evapotranspiración del cultivo
 Pp. = precipitación.
 Riego = láminas de riego aplicadas.
 Riego* = láminas de riego necesarias para alcanzar la CEe*
 DL = láminas de percolación necesarias para obtener la CEe*
 R = percolación operada.
 W = humedad del suelo.

La Tabla 9 muestra las salinidades simuladas con Balansal y las medidas en las muestras de suelo después de cada riego, para ambos tratamientos. Los altos coeficientes de determinación calculados con los valores de salinidades medidas y simuladas mediante la función del coeficiente de correlación operado con el programa Excel, para T1 un $r^2 = 0,99$ y para T2 un $r^2 = 0,93$, evidencian la bondad de ajuste del modelo.

Tabla 9. Valores de salinidad del suelo simulada por el modelo Balansal y medida en muestras de suelo.

T1	T1	T2	T2
CEe simulada	CEe medida	CEe simulada	CEe medida
0,743	0,800	0,737	0,800
0,839	0,840	0,830	0,861
0,920	0,890	0,899	0,880
0,920	0,891	0,899	0,870

4. Conclusiones:

Las láminas de lavado pronosticadas con los 6 modelos utilizados promediaron 320 mm. Asumiendo recomendaciones de varios investigadores, se lavó el suelo con una lámina total de 320 mm, fraccionada en 3 aplicaciones, resultando que la salinidad inicial CEe = 4,69 dS.m⁻¹ se redujo a 0,81 dS.m⁻¹ luego del tercer lavado, alcanzando una salinidad tolerable por los cultivos sin decremento del rendimiento por efecto osmótico. La disminución de sales del primer lavado respecto de la salinidad inicial fue del 74,1%, la del segundo lavado del 31% y la del tercer lavado un 3,7%. La salinidad del agua drenada fue de 0,97 dS.m⁻¹, 0,91 dS.m⁻¹ y 0,88 dS.m⁻¹ después de cada lavado, siendo este último cercano a la CEa.

Las láminas totales de riego aplicadas para los tratamientos incluyendo los requerimientos de lixiviación fueron para T1 = 94,4 mm y para T2 = 103,4 mm, no siendo significativa la diferencia de su impacto en el mantenimiento de la salinidad del suelo, cuyos valores finales fueron para T1 = 0,89 dS.m⁻¹ y para T2 = 0,87 dS.m⁻¹. El modelo Balansal simuló la variación

de la salinidad edáfica durante los riegos y el valor de la C_{Ee} final, con alto grado de correlación con los datos de C_{Ee} medidos después de cada riego.

Los resultados de esta investigación permiten recomendar la instalación de tubos dren en los invernáculos con suelos que presenten horizontes de alto contenido argílico, para lavar el suelo cuando su salinidad supera las tolerancias salinas de los cultivos para no reducir sus rendimientos potenciales y para mantener sin cambios la salinidad del suelo, derivando en los riegos láminas calculadas para cumplir con el requisito de lixiviación, sobre todo cuando las salinidades de las aguas de riego superen los 1,5 dS.m⁻¹.

5. Bibliografía

- Ayers, R. S. & Westcot, D. W. 1985 Water quality for agriculture. FAO, Irrigation and Drainage Paper N° 29 rev 1. Roma.
- Alconada M. 1996. Deterioro fisico-químico de un Vertisol con cultivos protegidos en el partido de La Plata. XIII Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo. Aguas de Lindoia, SP, Brasil.
- 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. XVI° Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Carlos Paz, 4-7 de mayo, p. 229:230.
- Alconada M.; Zembo, J. & Mórtola N. 2000. Influencia cualitativa del riego con aguas subterráneas en suelos con producciones intensivas a campo y en invernaderos. 1st Joint World Congress on Groundwater ALHSUD-AIH.
- Andreau R.; Etchevers P.; Chale W. & Génova L. 2012. Riego por goteo superficial y subterráneo de tomate cultivado bajo cubierta: distribución de la humedad edáfica y rendimiento cuali-cuantitativo. VI Jor. de Riego y Fertirriego. FCA, UN Cuyo. Mendoza.
- Andreau R.; Calvo L.; Chale W.; Etcheverry M.; Etchevers P. & Génova L. 2017. Recuperación de un suelo salinizado bajo cubierta para la producción de lechuga regada por goteo. V Reunión de la Red Argentina de Salinidad. 2. Área temática: Manejo y recuperación de suelos salinos y sódicos. Pp 132-139. ISBN 978-987-42-5601-0. 4-6 de octubre de 2017. V. Mercedes, San Luís.
- Bower C, G Ogata & J Tucker. 1968. Sodium hazard of irrigation waters as influenced by leaching fraction and by precipitation or solution of calcium carbonate. Soil Sci. 106:29-34.
- Camp, C. 1998. Subsurface drip irrigation: a review. Trans. of the ASAE (41:5:1353-1367)
- Del Amor M. & F. del Amor. 2007. Response of tomato plants to irrigation under surface or subsurface drip irrigation. Journal of Applied Horticulture, 9(2): 97-100. FAO-UNESCO. 1973. Irrigation, Drainage and Salinity. Kovda, V; Hagan, R. & C. van den Berg eds. Ed. Hutchinson, London.
- Gardner, W. & R. Brooks. 1957. A descriptive theory of leaching. Soil Sci. 83:295-304.
- Génova L.; Andreau R.; Etchevers P.; Zabala S.M.; Chale W.; Etcheverry M.; Romay C. & Salgado H. 2014. Respuesta productiva del tomate (*Solanum lycopersicum* L.) bajo cubierta a la distribución de la humedad generada por riego por goteo subterráneo y superficial. Rev. Facultad de Agronomía, La Plata. Vol. 112 (1):18-26.
- Glenn, E. P., Brown, J.J. & Blumwald, E. 1999. Salt tolerance and crop potential

- of halophytes. *Crit. Rev. Plant Sci.* 18:227-255.
- González González, R. Ortega Escobar M. Ramírez Ayala C. & Rone Puello J. 1985. Establecimiento de relaciones funcionales entre láminas de lavado, sales desplazadas y sales residuales en suelos los salinos. Colegio de Postgraduados, Chapingo, México.
- Grattan, S. 2002. Irrigation water salinity and crop production. Division of Agriculture and Natural Resources, University of California. Publication 8066.
- Greenway, H. & Munns, R. 1980. Mechanisms of salt tolerance in non-halophytes. *Ann. Rev. Plant Physiol.* 31:149-190.
- Hanson, B. & D. May. 2004. Effect of subsurface drip irrigation on processing tomato yield, water table depth, soil salinity, and profitability. *Agricultural Water Management*, 68(1):1-17.
- Hanson, B. R; Grattan, S. R. & Fulton, A. 2006. Agricultural salinity and drainage. Division of Agriculture and Natural Resources Publication 3375 University of California Irrigation Program University of California, Davis.
- Halitim, A. Tesseier D. & Robert M. 1995. Influence of SAR and salt concentration on dispersión, swelling and hydraulic conductivity of clay minerals. *Actas del 15 th World Congress of Soil Science*. México. Vol 2b:230-231.
- López Camelo, A. 2007. Situación de los cultivos protegidos en la Argentina. En: 1er. Simposio Internacional de Cultivos Protegidos, La Plata, Argentina. Septiembre 25-28, 2007.
- López Camelo, A. 2012. La utilización del Google Earth para el relevamiento de la superficie bajo cubierta en el Gran Buenos Aires. *Rev. Horticultura Argentina* 31(76): pp 22.
- Lutenberg, O. 2016. La salinidad y su influencia en suelos y cultivos. Ministerio de Relaciones Exteriores-Mashav. Estado de Israel.
- Maas, E.V. 1984. Salt Tolerance of plants. En: *The handbook of plant Science in Agriculture*, (ed. RB Christie), CRC Press, Boca Raton, Florida.
- Maas, E. 1990. Crop salt tolerance. *Manuals and Reports on Engineering Practice No. 71*. Am. Soc. Civil Engineers, New York. USA. pp. 262-304.
- Maas, E. V. & Hoffman G. J. 1977. Crop salt tolerance: Current assessment. *J Irrig Drain E-ASCE* 103: 115-134.
- Maas E. V. & S. R. Grattan. 1999. Crop yields as affected by salinity. In R. W. Skaggs and J. van Schilfgaarde, eds., *Agricultural Drainage*. Agron. Monograph 38. ASA, CSSA, SSSA, Madison, WI.
- Mirábile, C. & L. Fornero. 1986. Modelo de simulación de balance salino de un Distrito de riego. Mecanismos de aprovechamiento hídrico de la Región Andina. INCYTH-CRA. M. Menenti ed. Mendoza. 19 pp.
- Mirábile, C.; Génova L. & Monteleone J. 2007. Validación del modelo Balansal en suelos con riego complementario en la Pampa Húmeda. Comisión Riego y Drenaje. Congreso Nacional del Agua 2007. Tucumán, 15 al 18 de mayo de 2007. 16 pp.
- Marrare, A.; Draghi L.; Palancar T.; Andreau R.; Martínez S.; Sarli G. & Cerisola C. 2011. Fertilidad física de un suelo bajo invernadero: evaluación y manejo. *Hortic. Arg.* 30.
- Ortega Escobar, M. 1982. Curso de salinidad. Colegio de Postgraduados, Chapingo, México.
- Palacios Vélez O. 1983. Apuntes sobre algunos problemas de drenaje y ensalitramiento de terrenos agrícolas. *RyD. Serie N°14*. Colegio de Postgraduados. Chapingo, México.
- Pérez, R.; Sánchez, M.; Rodríguez, J.; Guevara, M.; Mompíé, E.; Arrebató, M. & López, L. 2011. Principales beneficios que se alcanzan con la

- práctica adecuada del drenaje agrícola. *Cultivos Tropicales*, 32(2):52-60.
- Programa Cropwat-FAO. 2018. En www.fao.org.
- Richards, LA. 1948. Porous plate apparatus for measuring moisture retention and transmission by soil. *Soil Science* 66(2):105-110
- Richards, L. A. 1980. Diagnóstico y rehabilitación de suelos salinos y sódicos. Limusa. México,
- Rivera, G.; Estrada J.; Orona, C. & Sánchez, I. 2004. Producción de alfalfa con riego por goteo subsuperficial. Inst. Nac. de Invest. Folleto Científico N° 13. Durango. México. 48 pp.
- Rohades, J. D., Kandiah A. & Mashali A.M. 1992. The use of saline water for crop production. FAO, Irrigation and Drainage Paper N° 48. Roma.
- Sejas, J.; Aceves Navarro, E. & Palacios Vélez, O. 1979. Comportamiento físico y químico de suelos ensalitrados sometidos a lavado con diluciones graduales. *Agrociencia* 38:35-52. Chapingo, México.
- Horticultura Argentina es licenciado bajo Licencia Creative Commons Atribución-No Comercial 2.5 Argentina.