



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA AGRONÓMICA Y DE MONTES

MÁSTER EN INGENIERÍA DE MONTES



TRABAJO FINAL DE MÁSTER

*“MITIGACIÓN DE LOS EFECTOS MEDIOAMBIENTALES
NEGATIVOS DE LA TÉCNICA DE SOLARIZACIÓN DEL
SUELO EN LOS CULTIVOS INTENSIVOS DE LA
COMARCA DEL CAMPO DE DALÍAS”*

Autora	Laura Rodríguez Navarro
Tutora	Dra. María José Polo Gómez

A mi familia, gracias a quienes soy quien soy y hacia quienes sólo puedo expresar mi sincero agradecimiento por apoyarme durante la etapa académica que hoy culmina.

A mi profesora..., por su acompañamiento, su energía y su apoyo durante esta fase que nos ha unido.

Y al Centro IFAPA La Mojonera (Almería), por permitirme aprender con ellos y llevar a cabo este gran proyecto del que me hicieron participe y me ofrecieron mi primera experiencia de trabajo. Gracias Rafael Joaquín Baeza Cano, Juana Isabel Contreras Paris, Paqui Alonso y José Gabriel López Segura.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	5
2. MATERIALES Y MÉTODOS	7
2.1. Área de estudio	7
2.2. Manejos de la labor de hidratación del suelo	8
2.2.1. Programa de riego	8
2.3. Determinaciones	9
2.5.1. Curvas de ruptura de los lixiviados y aporte de iones desde el suelo	15
2.5.2. Calidad de los lixiviados	16
3. RESULTADOS	19
3.1. Resultados experimentales	19
3.2. Calidad de los lixiviados	30
3.3. Aportes de solutos en los lixiviados para cada tratamiento de hidratación del suelo	31
4. DISCUSIÓN	34
5. CONCLUSIONES	41
6. BIBLIOGRAFÍA	42
ANEXOS	43

RESUMEN

La Comarca del Campo de Dalías (Almería) presenta la mayor concentración de cultivos bajo abrigo de Europa. La principal fuente de agua empleada para el riego y abastecimiento urbano en la comarca procede del sistema de acuíferos Sur de Sierra de Gádor-Campo de Dalías. Los cultivos hortícolas bajo abrigo se caracterizan por presentar elevadas eficiencias en el uso del agua y los fertilizantes. Sin embargo, los acuíferos del sistema presentan importantes problemas: sobreexplotación, salinización y contaminación por nitratos. De igual manera se encuentran afectados los humedales relacionados con los acuíferos superficiales del sistema: Paraje Punta Entinas-Sabinar, Albufera de Adra y Balsa del Sapo.

Durante el periodo inter-cultivos se realiza la solarización, una labor de desinfección, que requiere de importantes consumos de agua. En el caso de que existan niveles elevados de salinidad en el suelo es necesario realizar riegos de lavado, que el agricultor suele hacer coincidir con los riegos de hidratación para la solarización. Estos riegos de lavado, si bien son necesarios, pueden ser altamente contaminantes para los sistemas acuíferos en el caso de que existan niveles elevados de sales fertilizantes en la solución del suelo.

La optimización de las técnicas de hidratación del suelo durante la solarización puede mejorar la eficiencia en el uso del agua y mitigar los posibles efectos contaminantes de estas técnicas.

Con el fin de optimizar el consumo de agua y reducir los efectos contaminantes cuando se practica la técnica de desinfección por solarización se evalúan 3 manejos de la labor de hidratación del suelo: Manejo convencional (MC), Manejo con hidratación fraccionada (MHF) y Manejo con hidratación fraccionada y rehidratación en solarización (MHFR).

Una vez analizada la lixiviación del nitrato, sodio, calcio y potasio; la carga total y dinámica de lavado de solutos; y la calidad de los lixiviados, se recomienda aplicar el manejo con hidratación fraccionada (MHF). Este manejo combina la eficiencia en desinfección y la eficiencia medioambiental, al ser respetuoso con las aguas subterráneas al producir los efectos negativos mínimos al generar unos lixiviados con concentraciones bajas de solutos respecto al resto de manejos ensayados.

Palabras clave: solarización, efectos, solutos, lixiviados, invernadero y desinfección.

1. INTRODUCCIÓN

El agua se ha convertido en uno de los recursos más limitantes para la mayor parte de los regadíos de la Cuenca Mediterránea. Esta limitación es máxima en el sureste de España como consecuencia de la baja pluviometría y la escasa disponibilidad de recursos hídricos superficiales.

La Comarca del Campo de Dalías de la provincia de Almería presenta la mayor concentración de cultivos bajo plástico de Europa. La horticultura intensiva ha convertido una de las zonas más áridas de España, en la huerta tanto de España como de Europa. Estos cultivos se caracterizan por presentar una elevada eficiencia en el uso del agua debido a la tipología del suelo y a la reducción de la demanda evaporativa que se produce en el invernadero (Fernández *et al.*, 2007; Lorenzo *et al.*, 2010). Sin embargo, el déficit y el aumento de coste de los recursos hídricos obliga a maximizar la eficiencia y productividad del agua.

La principal fuente de agua empleada para el riego y el abastecimiento urbano de la comarca, procede del sistema de acuíferos Sur de Sierra de Gádor-Campo Dalías. Este sistema ha resultado afectado en la cantidad y calidad del agua.

El balance hídrico entre los recursos disponibles y las demandas del agua, presenta un importante déficit para los usos de abastecimiento urbano y de riego de los cultivos. La recarga tiene lugar por la infiltración de lluvia, el retorno de riego, la recarga desde ríos, lagos y embalses; y la aportación lateral de otras masas de agua. Por otro lado, la descarga se lleva principalmente por bombeos, así como mediante descarga directa al mar (Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica de las Cuencas Mediterráneas Andaluzas, Ciclo de Planificación Hidrológica 2015/2021). Para paliar el déficit, se han implementado alternativas para obtener nuevas fuentes hídricas como son los trasvases de agua procedentes de otras cuencas, la construcción de desaladoras y la reutilización de aguas residuales urbanas tratadas.

En la actualidad, las aguas subterráneas están expuestas a presiones e impactos, que están ocasionando el continuo deterioro de las mismas. Las presiones significativas de las aguas subterráneas son la contaminación por fuentes difusas agrarias, la contaminación por fuentes puntuales como son los vertidos de aguas residuales urbanas; y las extracciones y derivaciones del agua para la agricultura y el abastecimiento urbano. De igual modo, se identifican algunos impactos significativos como el deterioro de la calidad química como consecuencia de la intrusión marina, la sobreexplotación de los recursos hídricos de las masas subterráneas, la afectación de masas de agua superficiales asociadas a masas subterráneas (Paraje y Reserva

Natural Punta Entinas-Sabinar, Albufera de Adra y Balsa del Sapo), la contaminación por nutrientes, la contaminación química y la contaminación orgánica (Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica de las Cuencas Mediterráneas Andaluzas, Ciclo de Planificación Hidrológica 2015/2021).

En un invernadero, tanto las semillas como las plántulas de hortalizas y frutales pueden ser atacadas por una serie de enemigos naturales tales como los insectos, los hongos, los nematodos, las bacterias y las malezas, pudiendo afectar a los procesos de germinación, crecimiento, desarrollo o en el peor de los casos, pueden incluso causar la muerte de las plántulas.

Para evitar que ocurra lo anterior, se recomienda la desinfección del suelo, generalmente con productos químicos, los cuales son en su mayoría altamente tóxicos para la salud humana y para los animales; además se tratan de contaminantes del agua y del suelo. Del mismo modo, destruyen la flora microbiana benéfica del suelo.

Sin embargo, existe una alternativa a la aplicación de productos químicos para la desinfección del suelo, el tratamiento físico. Entre los tratamientos físicos está la solarización que consiste en la acción benéfica del calor solar (Gómez *et al.*, 2000).

Este método presenta ventajas frente al tratamiento químico puesto que no produce contaminantes, es económico, fácil de llevar a cabo y no presenta ningún riesgo para la salud humana. La solarización es un método de control físico de organismos fitopatógenos del suelo y de malezas, que consiste en un aumento de la temperatura del mismo a niveles mucho más altos que la temperatura exterior mediante la utilización de una lámina de plástico que transmite la radiación solar recibida durante el día y durante la noche impidiendo el paso de la radiación del suelo hacia la atmósfera. Del mismo modo, es un proceso hidrotérmico que requiere de agua para transferir el máximo de calor a los organismos del suelo (Bello *et al.*, 2000).

Durante el periodo inter-cultivos, se realizan las labores de desinfección, mediante solarización o solarización mixta. Estas técnicas requieren de importantes consumos de agua puesto que se debe regar el suelo hasta que alcance la capacidad de campo, reduciendo los índices de eficiencia en el uso del agua alcanzados durante el periodo de cultivo. Cuando existen niveles elevados de salinidad en el suelo, es necesario realizar riegos de lavado, los cuales se hacen coincidir con los riegos de hidratación del suelo. Por otra parte, con un manejo no controlado, el aporte de sales y contaminantes a los acuíferos puede suponer un impacto adicional.

La optimización de las técnicas de hidratación del suelo durante la solarización del mismo puede mejorar la eficiencia en el uso del agua y mitigar los efectos contaminantes de esta técnica. El objetivo de este trabajo es evaluar el lavado de sales y nitratos ocasionado por tratamientos de solarización en suelos de invernadero y, en su caso, establecer recomendaciones. Por ello, con el fin de optimizar el consumo de agua y reducir los efectos contaminantes cuando se practica la técnica de desinfección por solarización se van a evaluar tres manejos habituales de la labor de hidratación del suelo y se van a comparar los aportes lixiviados por los mismos.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Área de estudio

El ensayo se ha desarrollado en dos invernaderos situados en la finca experimental del Centro IFAPA de la Mojonera, ubicado en la provincia de Almería. Estos invernaderos se caracterizan por presentar un suelo enarenado utilizado mayoritariamente en los cultivos de la zona. Se trata de un suelo estratificado con tres horizontes: i) horizonte superior de arena de granulometría 1-5 mm y de 8 cm de espesor, ii) horizonte intermedio de tierra aportada de espesor entre 20 y 30 cm y iii) horizonte inferior de suelo original de textura franco-arenosa y con elevada presencia de elementos gruesos. En la figura 1, se muestra la estructura del suelo para cada invernadero que constituye el área de estudio, indicándose la textura de la tierra aportada que constituye el horizonte intermedio.

Profundidad de cada horizonte	<i>Estructura del suelo en el Invernadero B7</i>	<i>Estructura del suelo en el Invernadero B8</i>
0 - 8 cm	i) Horizonte superior	i) Horizonte superior
20 - 30 cm	ii) Horizonte intermedio: <i>Textura franco-arcillosa</i>	ii) Horizonte intermedio: <i>Textura arcillosa</i>
> 30 cm	iii) Horizonte inferior de suelo original	iii) Horizonte inferior de suelo original

Figura 1. Estructura del suelo en los invernaderos del área de estudio; horizonte superior, textura arenosa, y horizonte inferior, textura franco-arenosa con elementos gruesos.

2.2. Manejos de la labor de hidratación del suelo

Con el fin de optimizar el consumo de agua y reducir los efectos negativos medioambientales cuando se practica la técnica de desinfección por solarización se evalúan tres manejos de la labor de hidratación del suelo en un periodo de tiempo de un mes, desde el 1 de agosto de 2019 hasta el 30 de agosto de 2019. Los manejos que se han simulado en condiciones de campo son:

- *Manejo convencional (MC)*: se reproduce el manejo del agricultor. Este consiste en proporcionar un riego continuo al suelo durante un periodo de tiempo dado. En este caso, se aplica un solo pulso de 5 horas.
- *Manejo con hidratación fraccionada (MHF)*: el agua necesaria para humedecer el perfil del suelo se fracciona en varios riegos de una hora hasta que el suelo alcance el nivel de saturación.
- *Manejo con hidratación fraccionada y rehidratación en solarización (MHFR)*: al inicio de la solarización el perfil del suelo se humedece de igual manera que en el tratamiento anterior. Posteriormente, durante el periodo de solarización se aplicarán varios riegos de rehidratación del suelo, de tal manera el nivel de humedad del suelo se mantenga elevado durante todo el periodo de solarización. En este caso, se aplicaron 2 riegos en los días 12 y 22 tras el primer riego durante el periodo de estudio.

Estos tres manejos de hidratación del suelo para llevar a cabo la solarización, se llevan a cabo en parcelas con tres niveles distintos de salinidad, establecidos en función de la conductividad eléctrica del extracto saturado del suelo (CEes):

- Salinidad baja (S1): CEes < 1,5 dS/m
- Salinidad media (S2): 1,5 < CEes < 2,0 dS/m
- Salinidad alta (S3): CEes > 2,0 dS/m

Así, con este diseño inicial, se obtienen 9 tratamientos ensayados, MC-S1, MC-S2, MC-S3, MHF-S1, MHF-S2, MHF-S3, MHFR-S1, MHFR-S2 y MHFR-S3, con cuatro repeticiones para cada uno de ellos.

2.2.1. Programa de riego

En la tabla 2, se muestra el programa de los riegos realizados para cada uno de los manejos de hidratación del suelo para la técnica de desinfección denominada solarización.

Tabla 2. Programa de riego para los manejos de hidratación del suelo.

<i>Hora (h)</i>	<i>1 agosto 2019</i>	<i>2 agosto 2019</i>
4:00-5:00	MC	MHF
5:00-6:00	MC	MHFR
6:00-7:00	MC	-
7:00-8:00	MC	-
8:00-9:00	MC	-
9:00-10:00	MHF	MHF
10:00-11:00	MHFR	MHFR
11:00-12:00	-	-
12:00-13:00	-	-
13:00-14:00	MHF	MHF
14:00-15:00	MHFR	MHFR

**NOTA:* MC (Manejo convencional), MHF (Manejo con hidratación fraccionada) y MHFR (Manejo con hidratación fraccionada y rehidratación en solarización).

Los riegos de rehidratación para el manejo con hidratación fraccionada y rehidratación en solarización se proporcionan los días 12 y 22 de agosto, suministrando 6 l/m² cada día de los citados en un riego de 1 hora de duración.

Para el manejo convencional (MC) y el manejo con hidratación fraccionada (MHF), el consumo de agua es de 30 l/m². Sin embargo, para el manejo con hidratación fraccionada y rehidratación en solarización (MHFR), el consumo de agua es de 42 l/m².

2.3. Determinaciones

En este epígrafe, se exponen las determinaciones que se han llevado a cabo durante el estudio y la metodología empleada para la instalación de los distintos aparatos de medida. Además, la figura 2 y la figura 3 presentan la instalación de los instrumentos de medida desde distintos puntos de vista.

- **Potencial matricial del agua en el suelo (KPa)**

Se denomina humedad volumétrica del suelo (humedad, a partir de este punto en este trabajo) al volumen de agua por unidad por volumen de suelo.

En este trabajo, la humedad se ha estimado a partir de la medida de potencial matricial del agua en el suelo, utilizando la expresión de la curva característica asociada (relación humedad-

potencial matricial para un suelo dado). Para ello, se instala un tensiómetro digital y un tensiómetro analógico a 15 y 35 cm de distancia en la horizontal al gotero, respectivamente, a una profundidad de 15 cm en cada una de las parcelas del ensayo.

La toma de datos del potencial matricial se realiza a primera y última hora de cada mañana, es decir, a las 8:30 y 13:30 h, respectivamente, durante el periodo de estudio.

Al mismo tiempo, se cuenta con los valores registrados de potencial matricial cada 10 minutos durante el periodo en el que se desarrolla el ensayo, gracias al tensiómetro digital.

- **Temperatura ambiental (°C)**

La temperatura ambiental es la temperatura del aire en el interior de los invernaderos.

Se instala en cada uno de los invernaderos un termómetro analógico para tomar a primera y última hora de la mañana, es decir, a las 8:30 y 13:30 h, la temperatura ambiente.

Además, los valores de la temperatura media diaria, la temperatura máxima diaria y la temperatura mínima diaria se adquieren del controlador del clima de ambos invernaderos.

- **Temperatura del suelo (°C)**

Conocer la temperatura del suelo es importante, debido a que esta influye en los procesos biológicos y químicos que tienen lugar en el suelo.

En cada parcela, se instalan dos sondas de temperatura (de la marca Watermark) a 15 y 35 cm de distancia al gotero, y a 10 cm de profundidad en ambos casos.

Los datos de temperatura del suelo se toman cada 30 min durante el periodo de tiempo en el que se desarrolla el estudio. Por lo tanto, cada día se obtienen 48 lecturas de temperatura del suelo en cada repetición.

- **Conductividad eléctrica del suelo, CEes (dS/m)**

La salinidad de un suelo se refiere a la cantidad de sales presentes en solución y puede ser estimada indirectamente mediante la medición de la conductividad eléctrica en el extracto de saturación del suelo.

La conductividad eléctrica del extracto saturado del suelo se determinó al inicio y final del ensayo a 15 y 35 cm de distancia al gotero. Las muestras se extraen retirando la capa de arena, muestreando los primeros 15-20 cm y posteriormente son analizadas en el laboratorio.

- **Punto de saturación, P. Sat (%)**

La cantidad máxima de agua de un suelo dado se denomina punto de saturación y ocurre cuando el total del espacio poroso del suelo está ocupado por agua. Se define como el cociente de la masa de agua entre la masa de suelo seco.

Del mismo modo que la conductividad eléctrica, el punto de saturación se obtiene a partir del análisis de las muestras de suelo del extracto saturado recogidas al inicio y final del ensayo.

- **Volumen de lixiviados (I)**

El volumen de lixiviados es la cantidad de líquido resultante en el proceso de percolación del agua a través del suelo.

Cada repetición cuenta con un lisímetro de drenaje de dimensiones de 1m x 1m de superficie. Se encuentra instalado a 0,5 m de profundidad, por debajo de la zona radicular.

El volumen de lixiviados se recoge diariamente. En dicho volumen, además, se ha determinado la concentración de los iones NO_3^- , Ca^{2+} , Na^+ y K^+ , su conductividad eléctrica y su pH, para cada una de las muestras.

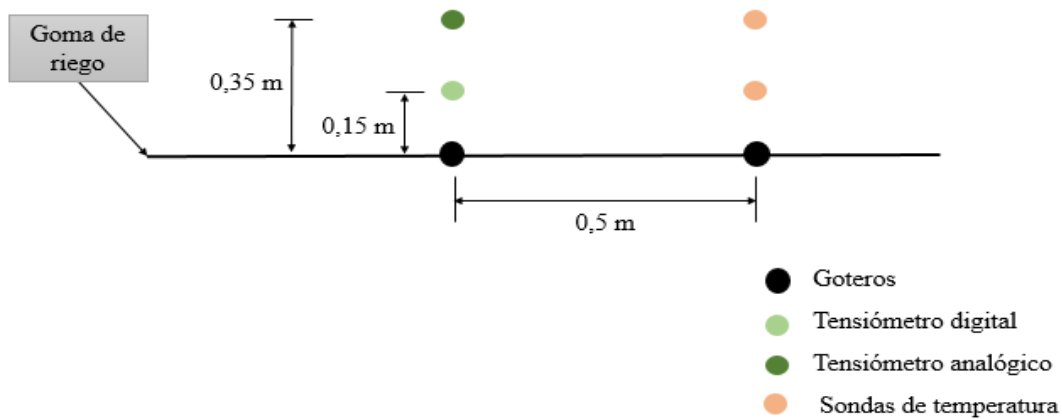


Figura 2. Esquema de la instalación de los instrumentos de medida (vista planta).

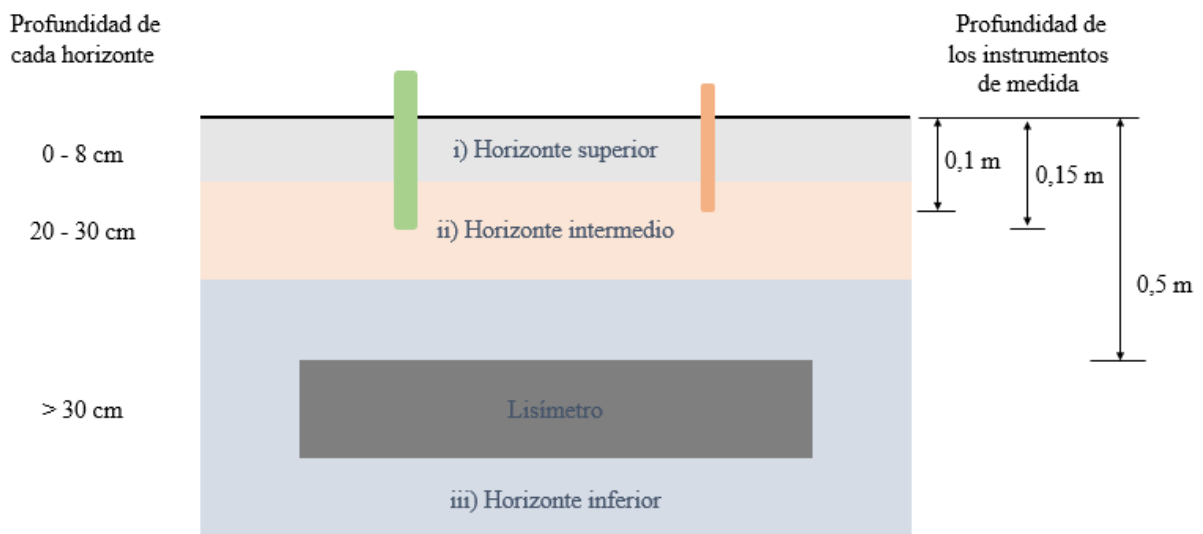


Figura 3. Esquema de la instalación de los instrumentos de medida (vista alzado).

2.4. Otros datos de interés

Para llevar a cabo los balances de agua y de sales, y otros análisis experimentales, es necesario conocer, además, la siguiente información.

- **Densidad aparente del suelo, ρ_a (kg/m^3)**

La densidad aparente del suelo es un buen indicador de importantes características del suelo, tales como la porosidad, grado de aireación y capacidad de drenaje. En un determinado suelo, el valor bajo de densidad aparente implica que el suelo es poroso, se encuentra bien drenado y con buen drenaje.

Se expresa como el cociente entre la masa de suelo y el volumen de suelo aparente, es decir, el volumen que ocupan los sólidos y el espacio poroso del mismo.

Los valores de densidad aparente del suelo son conocidos gracias a estudios realizados previamente a este, aplicando la función de pedotransferencia de Rawls y Brakensiek proporcionados por el Centro IFAPA La Mojonera.

En la tabla 3 se muestran los valores de densidad aparente de cada muestra en función de la profundidad de recogida del invernadero 7.

Tabla 3. Valores de densidad aparente para el suelo del invernadero 7. Fuente: Centro IFAPA de La Mojonera.

<i>Cota de profundidad, Z (cm)</i>	<i>Densidad aparente, ρ_a (g/cm^3)</i>
31,90	1,0535
29,40	1,0415
26,50	0,9747
24,20	1,1125
21,70	1,2662
19,20	0,8223
16,70	0,7621
13,75	1,3410
9,75	1,4068
5,75	1,3823
2,75	1,3071

0,75	1,0399
------	--------

Del mismo modo, en la tabla 4 se muestran los valores de densidad aparente de las distintas muestras de suelo del invernadero 8.

Tabla 4. Valores de densidad aparente para el suelo del invernadero 8. Fuente: Centro IFAPA de La Mojonera.

<i>Cota de profundidad, Z (cm)</i>	<i>Densidad aparente, ρ_a (g/cm³)</i>
21,95	1,2592
16,9	1,3066
13,5	1,2524
10,4	1,1641
6,7	1,3055
2,6	1,2740
0,25	0,9101

Realizando un promedio, la densidad aparente de los suelos se estiman como 1,1181 g/cm³ y 1,2509 g/cm³ para los invernaderos 7 y 8, respectivamente.

- **Porosidad del suelo, n**

El espacio poroso del suelo se refiere al volumen de suelo no ocupado por sólidos. Dentro del espacio poroso se pueden distinguir los macroporos y los microporos donde agua, nutrientes, aire y gases pueden circular o retenerse. Los macroporos son responsables del drenaje y la aireación del suelo, y constituyen el espacio donde se forman las raíces. Los microporos retienen agua, parte de la cual está disponible para las plantas.

Al igual que la densidad aparente, los datos de porosidad del suelo son acreditados por ensayos realizados previamente a este trabajo. Se obtienen aplicando la función de pedotransferencia de Rawls y Brakensiek, siendo aportados por el Centro IFAPA La Mojonera. En la tabla 5 y la tabla 6, se muestran los valores de porosidad del suelo del invernadero 7 y 8, respectivamente.

Tabla 5. Valores de porosidad del suelo para el invernadero 7. Fuente: Centro IFAPA de La Mojonera.

<i>Cota de profundidad, Z (cm)</i>	<i>Porosidad, n</i>
31,90	0,4509
29,40	0,4368
26,50	0,4385
24,20	0,3910
21,70	0,3755
19,20	0,5056
16,70	0,4595
13,75	0,4784
9,75	0,4676
5,75	0,4780
2,75	0,5041
0,75	0,5848

Tabla 6. Valores de porosidad del suelo para el invernadero 8. Fuente: Centro IFAPA de La Mojonera.

<i>Cota de profundidad, Z (cm)</i>	<i>Porosidad, n</i>
21,95	0,3374
16,9	0,2391
13,5	0,4152
10,4	0,4840
6,7	0,4301
2,6	0,4212
0,25	0,5365

Finalmente, la porosidad se ha estimado como promedio de los valores obtenidos de ambos suelos, y son respectivamente para los invernaderos 7 y 8, 0,4585 y 0,3624.

2.5. Evaluación de la dinámica de lavado de iones

2.5.1. *Curvas de ruptura de los lixiviados y aporte de iones desde el suelo*

La importancia del control de la contaminación por nitratos ha aumentado perceptiblemente en las últimas décadas debido al impacto en la salud humana y en el medio ambiente. Por ello, se hacen grandes esfuerzos en disminuir las concentraciones de estos solutos en las aguas subterráneas para satisfacer los niveles rigurosamente bajos permitidos en la descarga.

Las curvas de ruptura son una representación de la dinámica de lixiviación de sustancias desde el suelo que nos permite conocer el comportamiento de lavado de los solutos bajo varios escenarios de estudio, en este caso, distintos tratamientos de hidratación del suelo para el proceso de solarización del mismo. Dichas curvas representan la concentración de la sustancia en estudio en el lixiviado frente al volumen acumulado del mismo en el tiempo, y es habitual expresar este como “número de volúmenes de poros”, es decir, múltiplo del volumen asociado a la porosidad del suelo. Así, es posible comparar la dinámica de lavado en suelos con diferente valor de porosidad. En este trabajo se ha obtenido estas curvas para los iones analizados mediante el siguiente procedimiento de cálculo:

- 1) Se calcula un volumen de poros, sabiendo que n es la porosidad del suelo, aplicando la siguiente expresión:

$$V_{\text{poros}} = V_{\text{muestra}} \times n \quad (1)$$

Se define un volumen de poros como el volumen de todos los poros del volumen de control sobre el que hacemos el balance de agua, de masa de soluto, etc.

- 2) Transformar el volumen de lixiviado en su equivalente expresado como número de volúmenes de poros:

$$V_{\text{lix } 1}, V_{\text{lix } 2}, V_{\text{lix } 3}, \dots, V_{\text{lix } m} \rightarrow N_{\text{lix } 1}, N_{\text{lix } 2}, N_{\text{lix } 3}, \dots, N_{\text{lix } m}$$

Para llevar a cabo dicha transformación es necesario dividir el volumen de lixiviado entre el volumen de poros, es decir, se realiza el cociente de $V_{\text{lix } m}$ entre V_{poros} .

- 3) Representar para cada soluto en los lixiviados, la concentración de soluto frente al número de volúmenes de poros acumulados, para cada caso en estudio.

Además de las curvas de ruptura, se han obtenido sus equivalentes expresadas como masa de soluto lixiviada desde el suelo acumulada desde el inicio del periodo. Para ello, en estas curvas de aporte, se ha representado en cada caso esta masa frente al número de volúmenes de poros acumulados.

Como el medio poroso es heterogéneo en las distintas repeticiones que se han llevado a cabo para los tres manejos de hidratación del suelo, se han representado estas curvas de aporte de forma adimensional. Para ello, a partir de lo observado en las curvas de lavado, se ha tomado como valor de referencia la masa de soluto acumulada para un número de volúmenes de poros igual a 0,1 ($M_{0,1}$), calculando este valor a partir de la curva de tendencia ajustada a la serie de datos de masa de soluto acumulada, en cada caso.

Una vez que se obtiene el valor de referencia en cada repetición de los diferentes manejos y para cada soluto objeto de estudio, se dividen las series de datos de masa de soluto acumulada entre el valor de referencia. De esta manera, se obtienen unas nuevas series de datos ajustadas de masa de soluto acumulada (M^*).

Este ajuste también nos permitirá estudiar la posibilidad de agrupar todas las repeticiones por nivel de salinidad y tipo de manejo de hidratación del suelo.

2.5.2. Calidad de los lixiviados

En función de la calidad de los lixiviados, la contaminación del agua subterránea se irá modificando en mayor o menor medida la calidad natural de la misma. En este sentido, se pueden considerar tres supuestos de introducción de agentes contaminantes a partir de la superficie del terreno: a) por lixiviado de residuos depositados en superficie ya se de manera voluntaria o accidentalmente; b) por lavado de fertilizantes y otros productos empleados en las actividades agrícolas; y c) por flujo inducido de aguas superficiales contaminadas hacia un pozo de explotación debido a un bombeo excesivo (Heredia, 2006).

A falta de otras referencias específicas y como criterio de clasificación estándar, la calidad de los lixiviados obtenidos se ha realizado teniendo en cuenta la clasificación de calidad del agua de lavado o de riego, siguiendo dos parámetros. El primer parámetro, es la salinidad generalmente es expresada en conductividad eléctrica. Las unidades de la conductividad eléctrica pueden ser dS/m o $\mu\text{moh/cm}$.

El segundo parámetro es el contenido en el catión sodio. La aplicación continuada de una determinada agua de riego, genera una solución del suelo en equilibrio con la composición

química de esa agua. El porcentaje de sodio intercambiable que existirá en el suelo, está gobernado por la Relación de Adsorción de Sodio (RAS) del agua de riego y será mayor cuando la sodicidad del agua sea alta en comparación con su contenido en los cationes Ca y Mg.

La ecuación X es la fórmula de RAS:

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

Donde los valores de los cationes Ca^{2+} , Mg^{2+} y Na^+ se expresan en meq/l.

Al no disponerse de la medición directa de la concentración del catión Mg^{2+} presente en los lixiviados, se ha realizado una estimación indirecta de dicho valor realizando la comprobación del análisis de agua aplicando las siguientes expresiones:

$$\Sigma \text{ Cationes} = \Sigma \text{ Aniones} \quad (3)$$

$$CE = \frac{\Sigma \text{ Cationes}}{10} \quad (4)$$

Siendo CE , la conductividad eléctrica (dS/m); $\Sigma \text{ Cationes}$, las concentraciones de los cationes Na^+ , K^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+} en meq/l; y $\Sigma \text{ Aniones}$, las concentraciones de los aniones CO_3^{2-} , HCO_3^- , SO_4^{2-} , etc. expresadas en meq/l.

En la tabla 7 y figura 4, se muestran las clasificaciones de las aguas de riego o de lavado y el monograma según las normas Riverside USDA.

Tabla 7. Clasificaciones de las aguas según las normas Riverside USDA.

<i>TIPOS</i>	<i>CALIDAD Y NORMAS DE USOS</i>
C ₁	Agua de baja salinidad, apta para el riego en todos los casos. Pueden existir problemas sólo en suelos de muy baja permeabilidad.
C ₂	Agua de salinidad media, apta para el riego. En ciertos casos puede ser necesario emplear volúmenes de agua en exceso y utilizar cultivos tolerantes a la salinidad.
C ₃	Agua de salinidad alta que puede utilizarse para el riego de suelos con buen drenaje, empleando volúmenes de agua en exceso para lavar el suelo y utilizando cultivos muy tolerantes a la salinidad.
C ₄	Agua de salinidad muy alta que en muchos casos no es apta para el riego. Solo debe usarse en suelos muy permeables y con buen drenaje, empleando volúmenes en exceso para lavar las sales del suelo y utilizando cultivos muy tolerantes a la salinidad.

- C₅ Agua de salinidad excesiva, que sólo debe emplearse en casos muy contados, extremando todas las precauciones anteriormente citadas.
- C₆ Agua de salinidad excesiva, no aconsejable para riego.
- S₁ Agua con bajo contenido en sodio, apta para el riego en la mayoría de los casos. Sin embargo, pueden presentarse problemas con cultivos muy sensibles al sodio.
- S₂ Agua con contenido medio en sodio, por lo tanto, con cierto peligro de acumulación de sodio en el suelo, especialmente en suelos de textura fina (arcillosos y franco-arcillosos) y de baja permeabilidad. Deben vigilarse las condiciones físicas del suelo y especialmente el nivel de sodio cambiante del suelo, corrigiendo su concentración cuando sea necesario.
- S₃ Agua con alto contenido en sodio y gran peligro de acumulación de sodio en el suelo. Son aconsejables aportaciones de materia orgánica y empleo de enmiendas de yeso para corregir el posible exceso de sodio en el suelo. También se requiere un buen drenaje y el empleo de volúmenes copiosos de riego.
- S₄ Agua con contenido muy alto de sodio. No es aconsejable para el riego en general, excepto en caso de baja salinidad y tomando las precauciones anteriormente citadas.

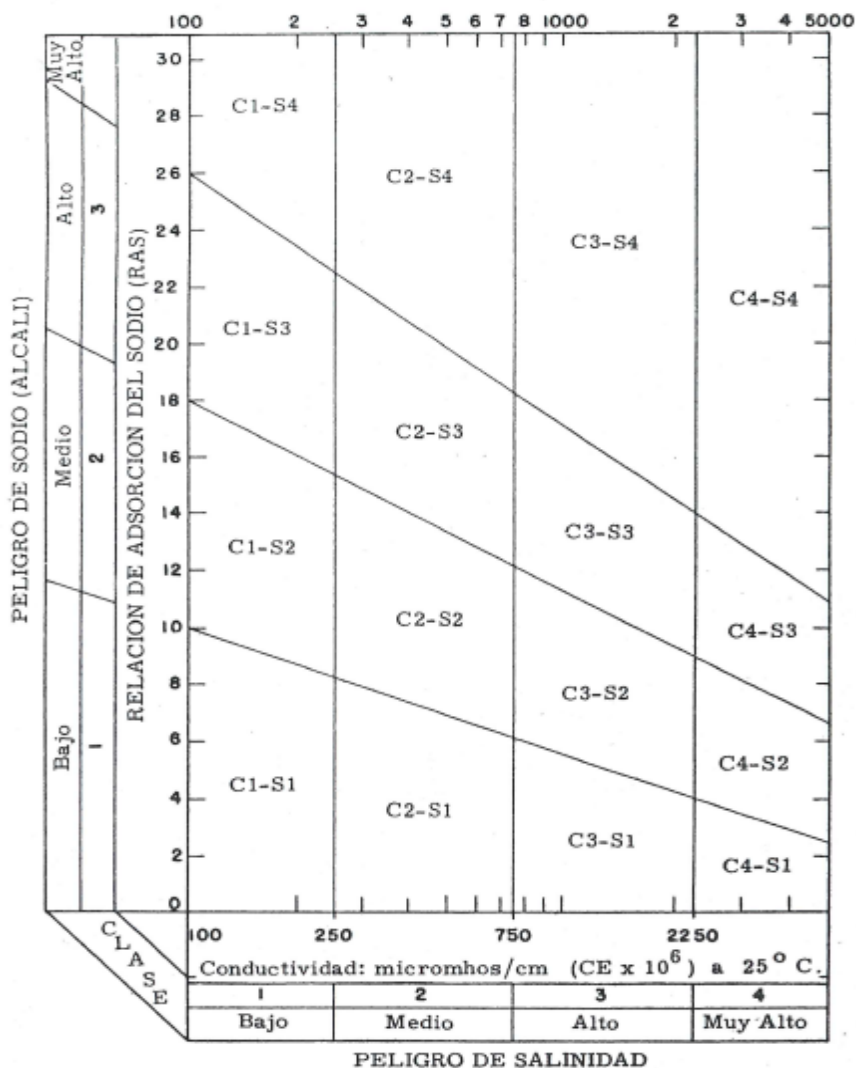


Figura 4. Monograma para la clasificación de aguas de riego según las normas Riverside USDA.

3. RESULTADOS

3.1. Resultados experimentales

Se midió la conductividad eléctrica de los lixiviados, como indicador global del contenido de solutos a considerar en la elección del manejo de hidratación del suelo adecuado, con el fin de evitar un posible aumento de la salinidad de las aguas drenadas que posteriormente serán parte de las aguas subterráneas. La conductividad eléctrica es un indicador de la carga de solutos presente en el agua drenada. Cuanto mayor sea el valor de conductividad eléctrica, mayor será la carga de solutos presente en los lixiviados. La carga de solutos en el agua lixiviada, depende del manejo de hidratación y del valor inicial de conductividad eléctrica del suelo. De manera general, la carga de solutos es mayor cuanto mayor es la salinidad inicial del suelo como se muestra en la figura 5.

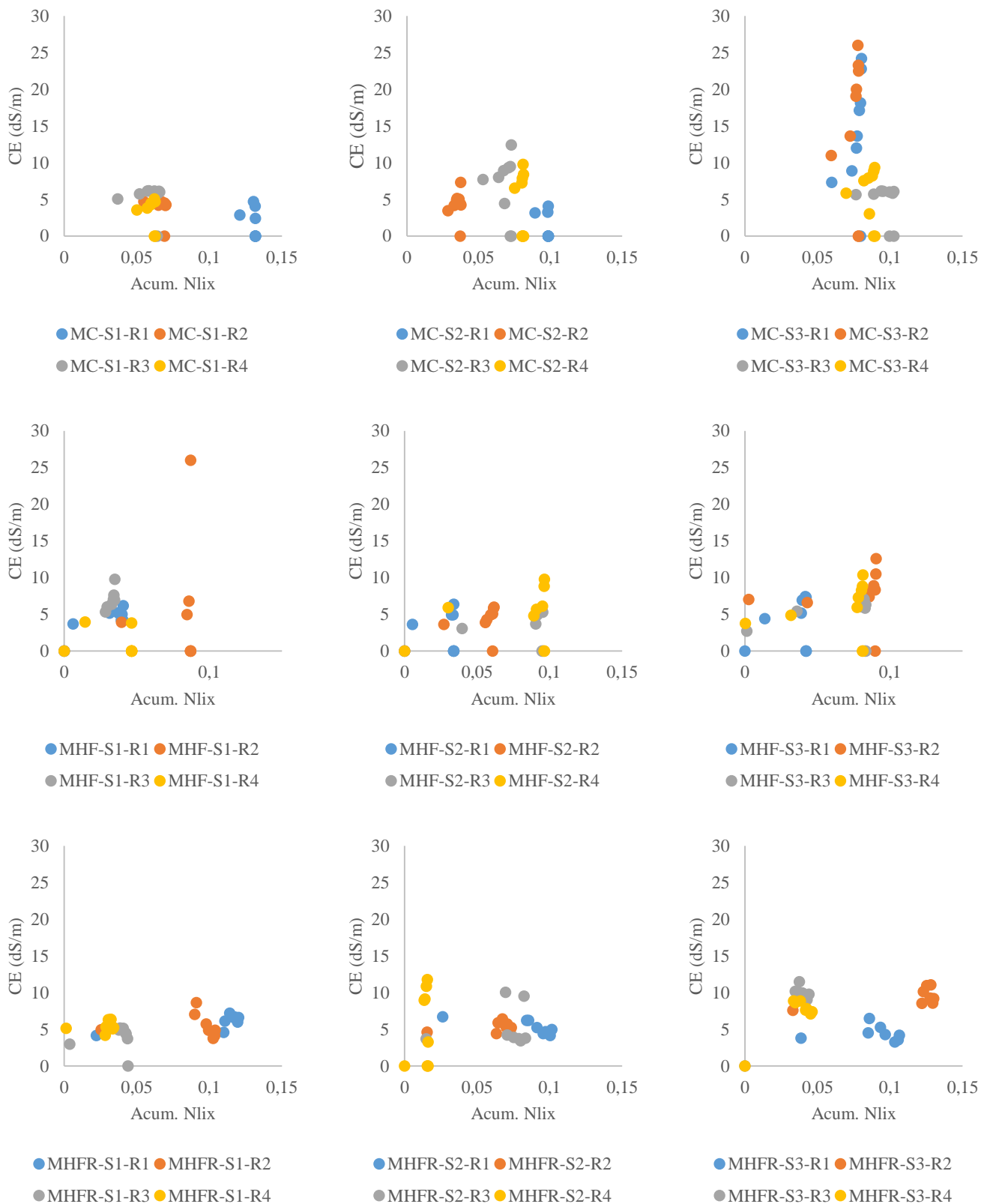


Figura 5. Variación de la CE en los lixiviados durante el ensayo para cada tratamiento.
 Leyenda: MC, Manejo convencional; MHF, Manejo con hidratación fraccionada; MHFR, Manejo con hidratación fraccionada y rehidratación en solarización; S1, Salinidad baja; S2, Salinidad media; S3, Salinidad alta; y R_i, repetición del ensayo.

En el manejo convencional (MC), la amplitud de lavado para la salinidad baja (S1) es de 5 hasta 6 dS/m. En la salinidad media (S2), la descarga varía desde 4 hasta 10 dS/m. Finalmente para la salinidad alta (S3) es de 5 hasta 25 dS/m.

En el caso del manejo con hidratación fraccionada (MHF), la amplitud de lavado varía de 5 a 10 dS/m cuando la salinidad inicial del suelo es baja; de 6 a 10 dS/m para una salinidad inicial media; y de 8 hasta 12 dS/m cuando la salinidad inicial del suelo es alta.

Finalmente, en el manejo con hidratación fraccionada y rehidratación en solarización (MHFR), la amplitud de lavado oscila de 5 a 9 dS/m, entre 6 y 12 dS/m y de 6 a 11 dS/m cuando el nivel de salinidad inicial del suelo es bajo, medio y alto, respectivamente.

A igual volumen de agua de riego empleada en el manejo convencional y en el manejo con hidratación fraccionada, el MHF presenta una menor amplitud de lavado que el MC. Por otra parte, las amplitudes de lavado son similares entre el MHF y el MHFR, a pesar de que a este último se le ha aplicado un volumen mayor de agua en el riego.

3.1.1. Lixiviación de nitratos.

En la figura 6, se muestra para cada manejo, el valor de concentración de nitrato en los lixiviados frente al volumen recogido de los mismos, expresado este como número de volúmenes de poros para facilitar la comparación entre tratamientos.

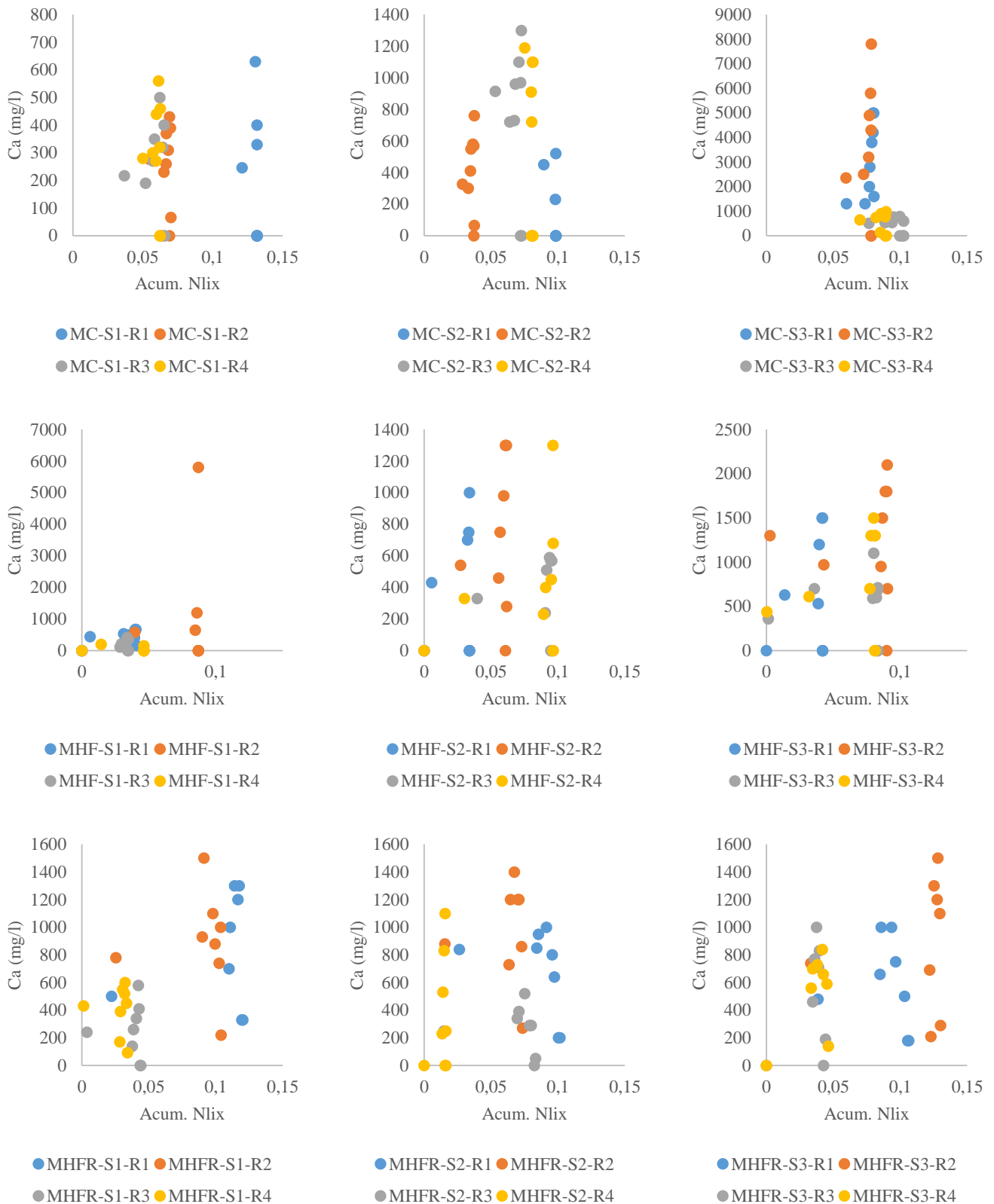


Figura 6. Variación del nitrato en los lixiviados durante el ensayo para cada tratamiento.
 Leyenda: MC, Manejo convencional; MHF, Manejo con hidratación fraccionada; MHFR, Manejo con hidratación fraccionada y rehidratación en solarización; S1, Salinidad baja; S2, Salinidad media; S3, Salinidad alta; y R_i, repetición del ensayo.

La dinámica de lavado del nitrato se presenta en cada uno de los manejos de hidratación del suelo en la técnica de solarización y en función de la salinidad inicial del suelo. Las concentraciones medidas de nitrato en el manejo convencional oscilan para S1 de 400 a 600 mg/l, para S2 de 550 a 1300 mg/l; y para S3 de 1000 a 6000 mg/l.

En el manejo con hidratación fraccionada, la concentración medida de nitrato fluctúa entre 900 y 1000 mg/l cuando se parte de un suelo con un nivel de salinidad bajo; entre 600 y 1300 mg/l cuando la salinidad del suelo inicial es medio; y entre 600 y 2100 mg/l partiendo de que el suelo inicialmente presentaba un nivel de salinidad alto.

Finalmente, en el manejo con hidratación fraccionada y rehidratación en solarización, las concentraciones de nitrato son más similares a pesar de las condiciones iniciales de salinidad del suelo. Cuando la salinidad inicial del suelo es baja, la concentración de nitrato varía entre 600 y 1500 mg/l. Para un nivel medio de salinidad inicial, la concentración de nitrato fluctúa entre 600 y 1400. En el último nivel de salinidad inicial (S3), la concentración de nitrato cambia entre 1000 hasta 1500 mg/l.

En los manejos, las diferencias en la amplitud de lavado son insignificantes cuando la salinidad inicial del suelo es baja o media, sin embargo, estas diferencias se hacen más notables cuando la salinidad inicial del suelo es alta, identificándose las mayores concentraciones en el manejo convencional. Esto podría deberse a las condiciones de saturación del suelo en cada manejo, que pueden ralentizar la acumulación de nitratos en los casos con más riegos.

3.1.2. Lixiviación de calcio.

La dinámica de lavado del calcio se muestra en la figura 7. Como se puede observar, dicha dinámica de lavado es similar a la dinámica de lavado del nitrato, aunque la amplitud de lavado es menor para este soluto puesto que las concentraciones de calcio son menores que las de nitrato.

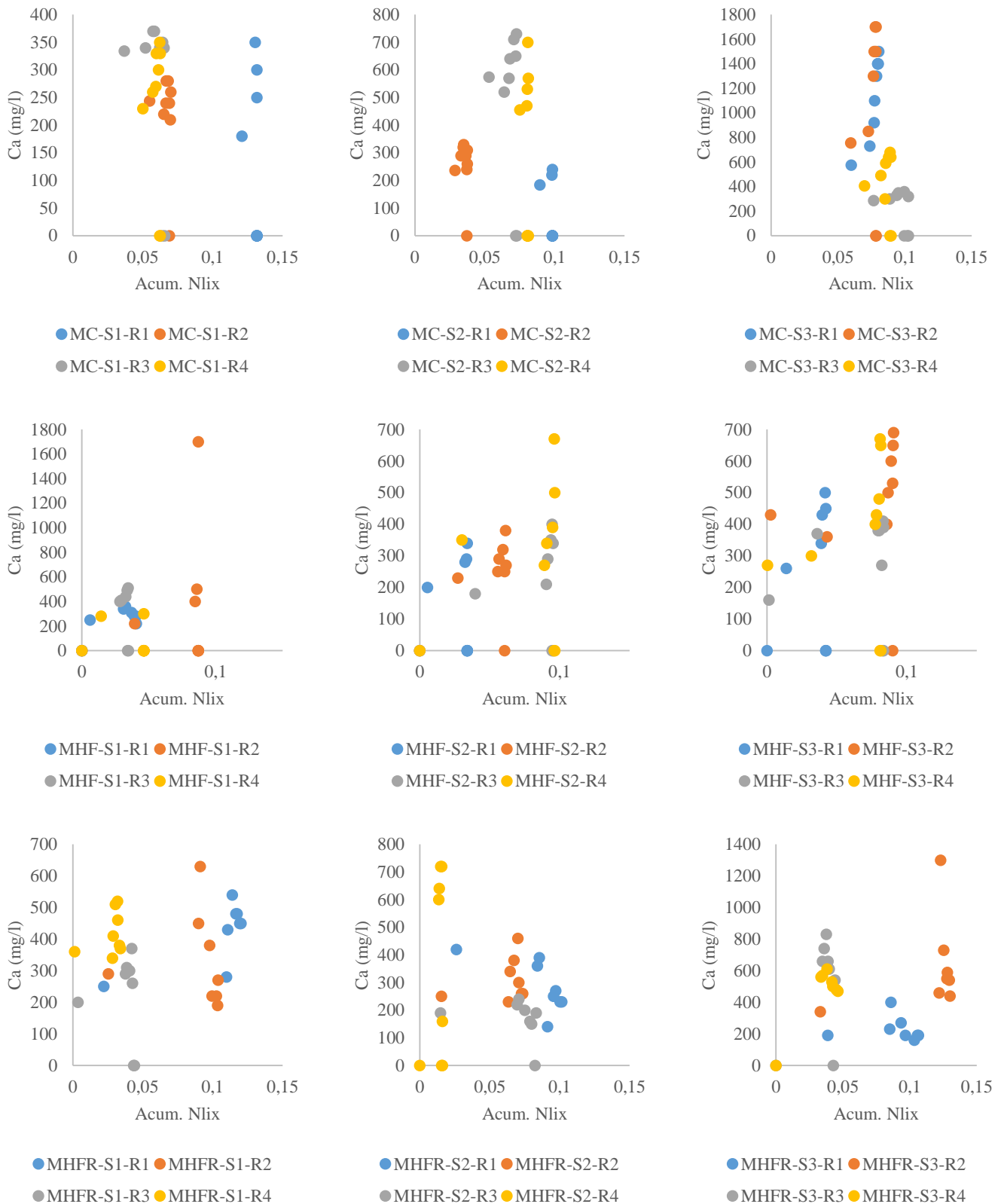


Figura 7. Variación del calcio en los lixiviados durante el ensayo para cada tratamiento.
 Leyenda: MC, Manejo convencional; MHF, Manejo con hidratación fraccionada; MHFR, Manejo con hidratación fraccionada y rehidratación en solarización; S1, Salinidad baja; S2, Salinidad media; S3, Salinidad alta; y R_i, repetición del ensayo.

La amplitud de lavado en el manejo convencional es de 290 a 360 mg/l, de 250 a 700 mg/l y de 400 a 1700 mg/l para las distintas condiciones de salinidad inicial del suelo respectivamente.

En el manejo con hidratación fraccionada, la concentración medida de calcio fluctúa entre 400 y 600 mg/l cuando se parte de un suelo con un nivel de salinidad bajo; entre 350 y 700 mg/l cuando el nivel de salinidad del suelo inicial es medio, y entre 400 y 700 mg/l partiendo de que el suelo inicialmente presentaba un nivel de salinidad alto.

Por último, en el manejo con hidratación fraccionada y rehidratación en solarización, cuando la salinidad inicial del suelo es baja, la concentración de calcio cambia entre 400 y 600 mg/l. Para un nivel medio de salinidad inicial, la concentración de nitrato fluctúa entre 300 y 700. En el último nivel de salinidad inicial (S3), la concentración de nitrato oscila entre 400 hasta 800 mg/l.

En este caso, los lixiviados que presentan mayor concentración de calcio son los aportados por el manejo convencional cuando las condiciones iniciales del suelo se caracterizan por presentar un nivel de salinidad alto. Para el resto de niveles de salinidad, las concentraciones de calcio en el agua drenada son similares, indistintamente del manejo de hidratación del suelo.

3.1.3. Lixiviación de sodio.

Como se expone en la figura 8, del mismo modo que el calcio, el sodio presenta una dinámica de lavado similar al resto de solutos estudiados.

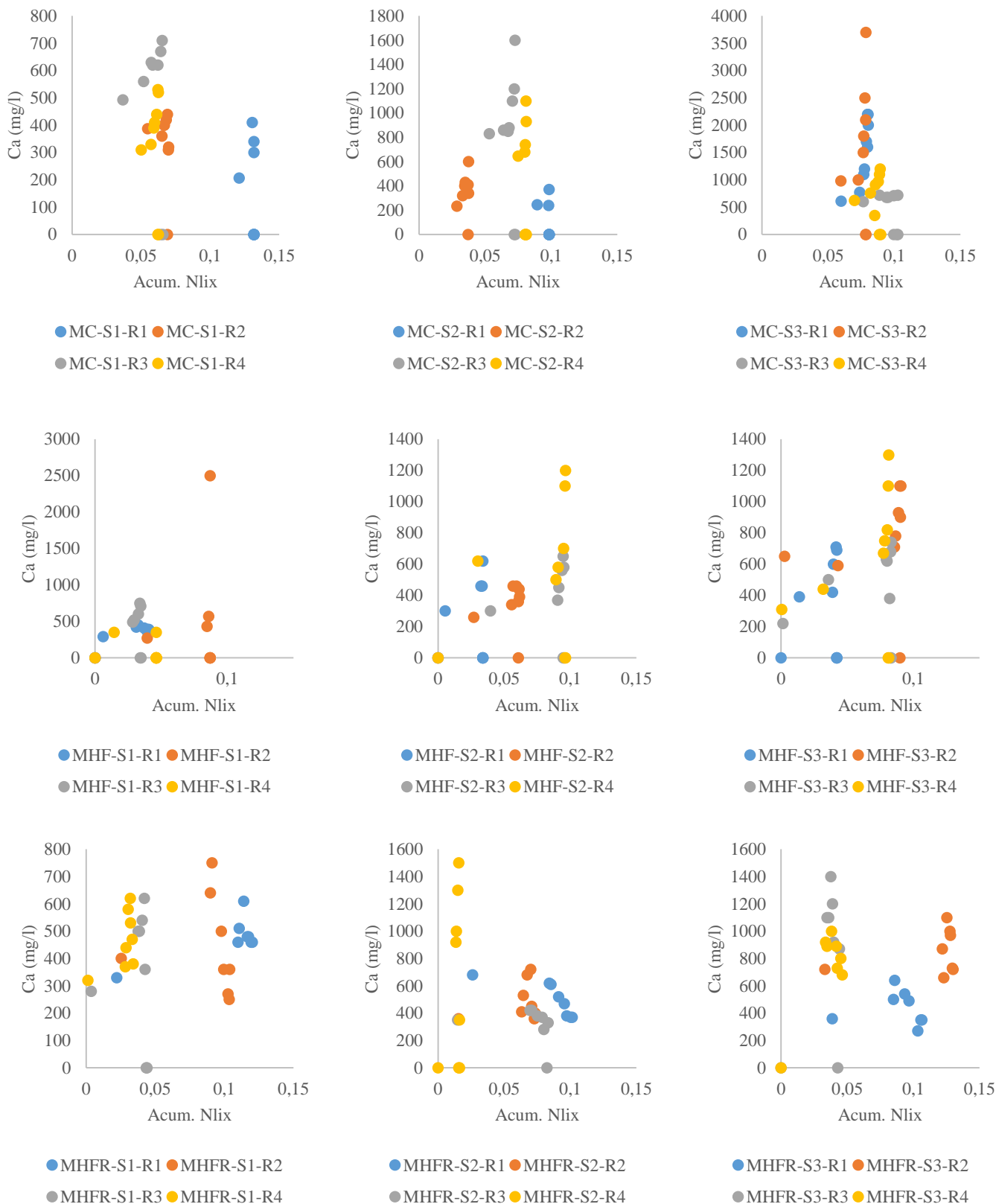


Figura 8. Variación del sodio en los lixiviados durante el ensayo para cada tratamiento.
 Leyenda: MC, Manejo convencional; MHF, Manejo con hidratación fraccionada; MHFR, Manejo con hidratación fraccionada y rehidratación en solarización; S1, Salinidad baja; S2, Salinidad media; S3, Salinidad alta; y R_i, repetición del ensayo.

De igual modo que en los casos anteriores, los lixiviados que mayor concentración de sodio presentan son los recogidos en el manejo convencional cuando el nivel de salinidad inicial del suelo es alto. Para el manejo convencional, las concentraciones medidas de sodio oscilan para S1 de 400 a 700 mg/l, para S2 de 400 a 1200 mg/l; y para S3 de 700 a 2500 mg/l.

Respecto al manejo con hidratación fraccionada, la concentración de sodio fluctúa entre 500 y 800 mg/l cuando se parte de un suelo con un nivel de salinidad bajo; entre 500 y 1200 mg/l cuando la salinidad del suelo inicial es medio; y entre 800 y 1200 mg/l partiendo de que el suelo inicialmente presentaba un nivel de salinidad alto.

En último lugar, las concentraciones de sodio en el manejo con hidratación fraccionada y rehidratación en solarización, fluctúan cuando la salinidad inicial del suelo es baja (S1) entre 500 y 800 mg/l. Cuando el suelo inicialmente presenta un nivel medio de salinidad (S2), la concentración de sodio oscila entre 400 y 1400. Finalmente, cuando el nivel de salinidad inicial es alto (S3), la concentración de sodio cambia entre 600 hasta 1400 mg/l.

3.1.4. Lixiviación de potasio.

En último lugar, en la figura 9 se expone la dinámica de lavado del potasio en cada uno de los tratamientos ensayados, con las diferentes condiciones iniciales de salinidad en el suelo. La dinámica de lavado del potasio es similar al resto de dinámicas de lavado de los otros solutos.

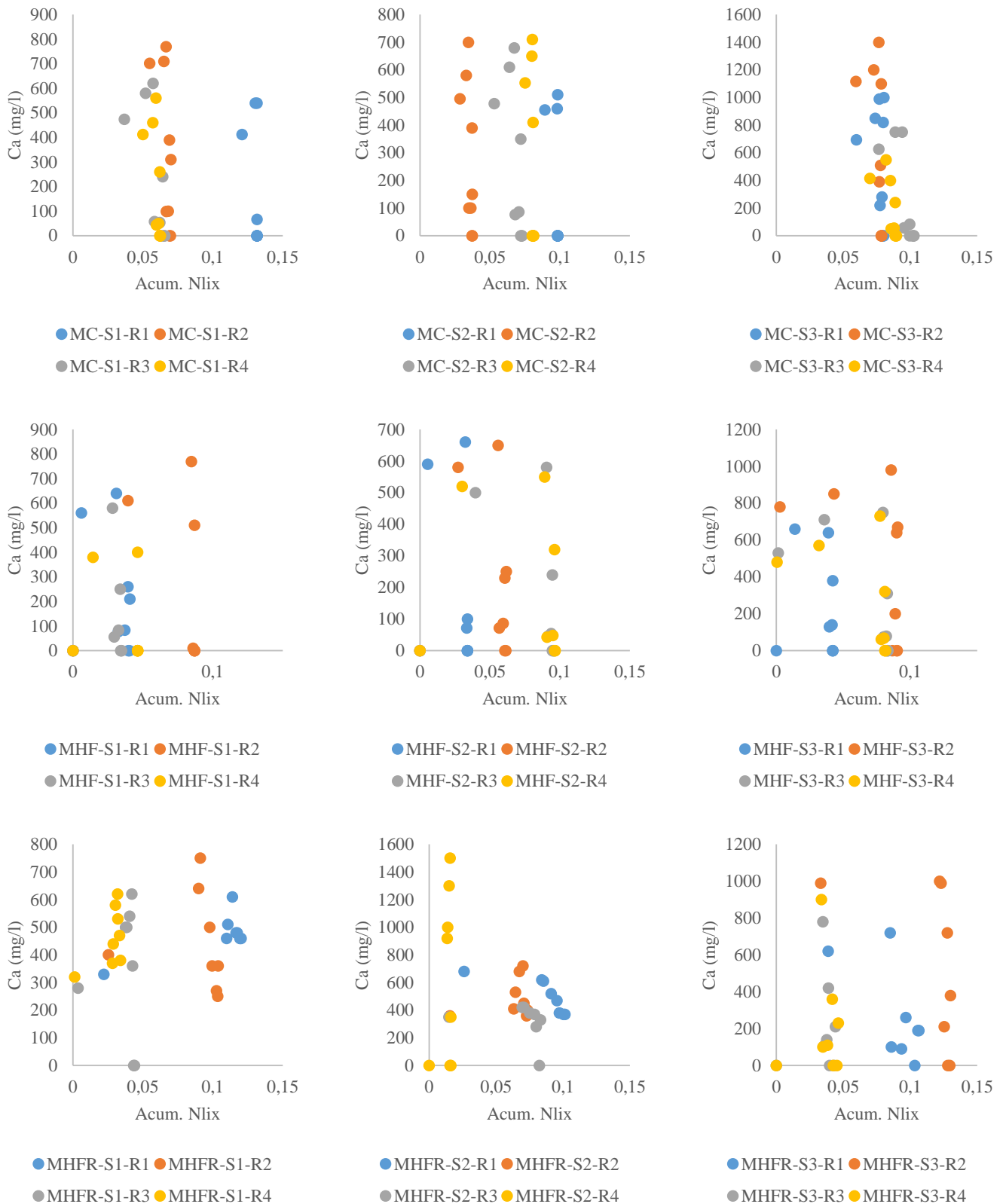


Figura 9. Variación del potasio en los lixiviados durante el ensayo para cada tratamiento.
 Leyenda: MC, Manejo convencional; MHF, Manejo con hidratación fraccionada; MHFR, Manejo con hidratación fraccionada y rehidratación en solarización; S1, Salinidad baja; S2, Salinidad media; S3, Salinidad alta; y R_i, repetición del ensayo.

La amplitud de lavado del potasio en el manejo convencional es de 550 a 800 mg/l, de 500 a 700 mg/l y de 800 a 1400 mg/l para las distintas condiciones de salinidad inicial del suelo, S1, S2 y S3 respectivamente.

En el manejo con hidratación fraccionada, la amplitud de lavado del potasio fluctúa entre 400 y 800 mg/l cuando se parte de un suelo con un nivel de salinidad bajo; entre 250 y 680 mg/l cuando el nivel de salinidad del suelo inicial es medio; y entre 400 y 700 mg/l partiendo de que el suelo inicialmente presentaba un nivel de salinidad alto.

Por último, en el manejo con hidratación fraccionada y rehidratación en solarización, cuando la salinidad inicial del suelo es baja (S1), la amplitud de lavado del potasio cambia entre 600 y 780 mg/l. Para un nivel medio de salinidad inicial (S2), la concentración medida de potasio fluctúa entre 400 y 1500. En el último nivel de salinidad inicial (S3), la concentración de potasio oscila entre 300 hasta 1000 mg/l.

3.1.5. Resumen final.

Finalmente, para concluir con el apartado de la dinámica de lavado de los solutos se resumen a continuación los resultados obtenidos. La dinámica de lavado de los solutos es común en los tratamientos de hidratación del suelo, diferenciándose en la amplitud de lavado de los mismos. También, existen algunas repeticiones que presentan un comportamiento que difiere del conjunto del ensayo.

El soluto que presenta mayor concentración en los lixiviados es el nitrato. El segundo lugar, el soluto que abunda en los lixiviados es el sodio; el tercero es el potasio; y el elemento que presenta menor concentración en los lixiviados es el calcio.

Además, se observa cómo las diferencias entre los tratamientos son mayores en función del estado inicial de salinidad del suelo. Los tres manejos ensayados de hidratación del suelo presentan concentraciones de solutos similares cuando la salinidad inicial del suelo es baja o media, sin embargo, cuando la condición inicial de salinidad es alta, se recogen las concentraciones más elevadas de solutos en el agua drenada del manejo convencional. Por otro lado, el manejo con hidratación fraccionada y el manejo con hidratación fraccionada y rehidratación presentan una concentración similar de solutos, encontrado ligeramente superior la presente en el MHFR, siendo por lo tanto el MHF el manejo en el que se recogen unos lixiviados con menor concentración de solutos.

Las repeticiones llevadas a cabo en cada manejo de hidratación del suelo ensayado y para cada estado inicial de salinidad del suelo, reproducen la variabilidad existente en las características de las parcelas, probablemente a nivel de porosidad local y de distribución inicial de sales y nutrientes, por lo tanto, es difícil a priori determinar un patrón de comportamiento en la dinámica de lavado de los solutos común a las repeticiones de un mismo caso. Para facilitar la interpretación de los resultados obtenidos, y con el fin de hallar un modelo de comportamiento común o poder identificar las diferencias en las dinámicas de lavado, se realiza una adimensionalización de los aportes acumulados de los solutos objetos de estudio en los lixiviados. Dichos resultados se exponen en el apartado 3.3.

3.2. Calidad de los lixiviados

La calidad de los lixiviados de manera puntual, es decir, cuando se analiza cada muestra de lixiviado, de manera general presenta una clasificación de S1-C4. Esto quiere decir que los valores de RAS oscilan entre 0 y 10, mientras que presentan una conductividad eléctrica superior a 2250 micromhos/cm (2,25 dS/m). Desde el punto de vista del SAR se trata de agua con bajo contenido en sodio, que resultaría apta para el riego en la mayoría de los casos en cuanto a este criterio. Sin embargo, presenta una salinidad muy alta no siendo apta para el riego. En este caso, el factor limitante para su empleo en agua de riego es la salinidad, no encontrándose diferencias entre los distintos manejos de hidratación del suelo.

Analizando la calidad de los lixiviados de manera acumulada, ésta varía en función del manejo de hidratación del suelo y del tiempo que ha transcurrido desde que empezó el ensayo y por lo tanto del volumen de agua drenada. La calidad de los lixiviados desde el punto de vista de salinidad no varía durante todo el ensayo ni según el manejo ensayado, puesto que presenta una clasificación C4. Sin embargo, desde el punto de vista del contenido de sodio (RAS), encontramos que varía desde S1 hasta S2 en los tres manejos ensayados. Esto quiere decir, que a medida que aumenta el volumen de agua lixiviada, lo hace la concentración de sodio, empeorando la calidad de la misma, limitando su uso para riego debido al peligro que conlleva la acumulación de este elemento en el suelo si se empleara.

Finalmente, la calidad de los lixiviados una vez que ha finalizado el ensayo no depende del manejo de hidratación del suelo, debido a que las diferencias que se observan son poco significativas. La clasificación final de los lixiviados es C4 en términos de salinidad y S1 o S2 por parte del RAS.

Un patrón común en los tratamientos, esperable, es que cuanto mayor sea la salinidad inicial del suelo, la calidad de los lixiviados es peor. Este hecho se debe a que el suelo presenta una elevada concentración de sales y con los riegos se produce un lavado parcial de las mismas, transportando dichas sales en los lixiviados. En el apartado siguiente se analiza el aporte total de cada ion asociado a cada caso en estudio.

3.3. Aportes de solutos en los lixiviados para cada tratamiento de hidratación del suelo

En este epígrafe, se exponen los aportes de solutos en los lixiviados para cada manejo de hidratación del suelo que se ha ensayado dentro de este estudio. Además, aparece junto a los gráficos, los valores que ha tomado el valor de referencia ($M_{0,1}$) para cada una de las repeticiones en la tabla contigua a cada figura.

3.3.1 Aporte de nitratos

El aporte en masa de nitrato en las repeticiones, llevadas a cabo para simular tres manejos de hidratación del suelo partiendo de distintas condiciones iniciales de salinidad, se puede observar en la figura 10. Los aportes de nitrato son diferentes según el tratamiento y las condiciones iniciales de salinidad.

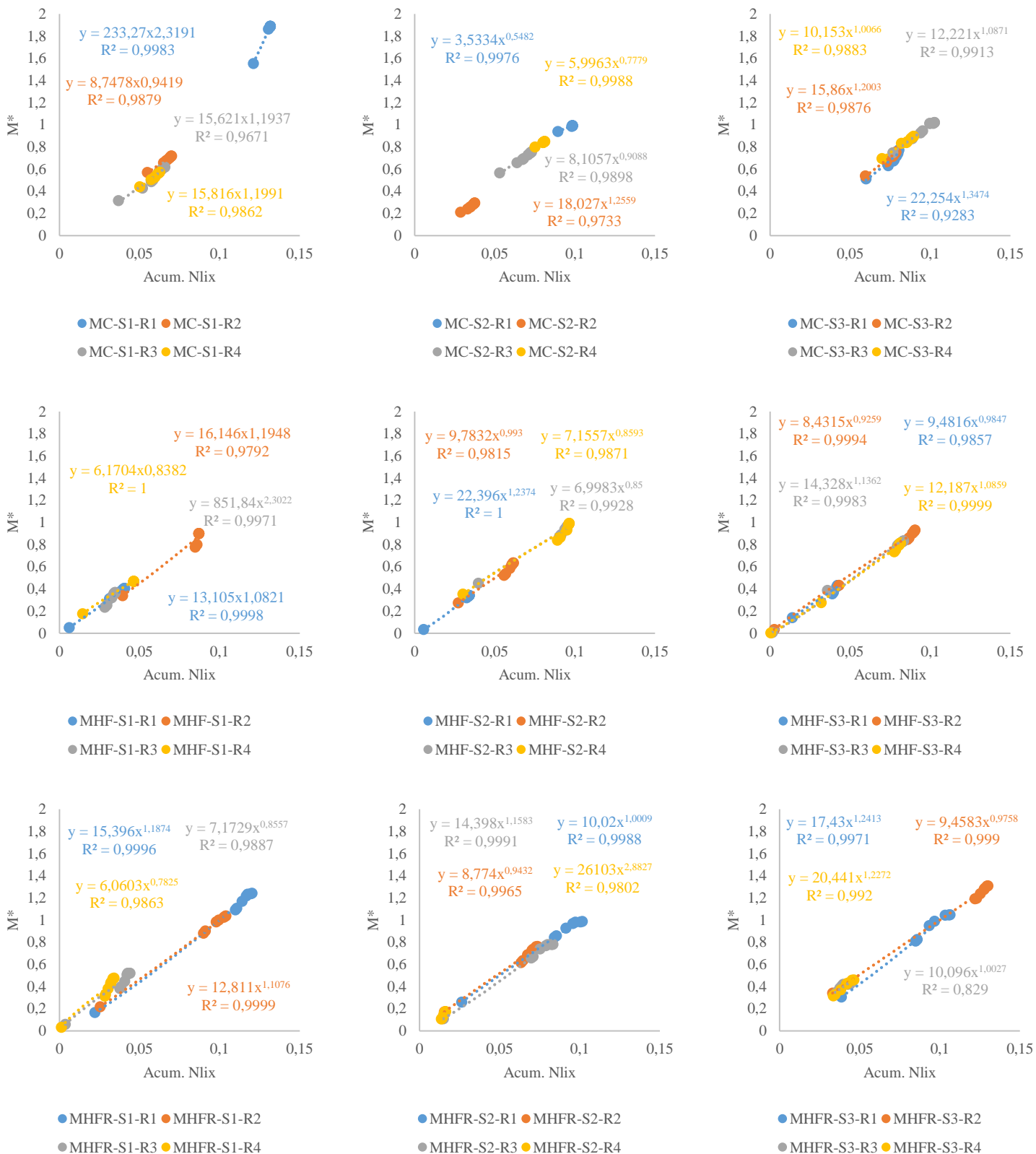


Figura 10. Aportes de nitrato en los lixiviados durante el ensayo para cada tratamiento.
 Leyenda: MC, Manejo convencional; MHF, Manejo con hidratación fraccionada; MHFR, Manejo con hidratación fraccionada y rehidratación en solarización; S1, Salinidad baja; S2, Salinidad media; S3, Salinidad alta; y R_i, repetición del ensayo.

Tabla 8. Valores de referencia ($M_{0,1}$) de nitrato para cada repetición del ensayo en g/m^2 .

		S1	S2	S3
MC	R1	4,39	9,81	34,77
	R2	6,08	10,08	59,53
	R3	4,58	15,48	9,49
	R4	5,77	20,20	11,80
MHF	R1	9,28	11,95	11,17
	R2	12,17	9,63	17,79
	R3	3,04	6,64	14,59
	R4	3,74	6,41	15,97
MHFR	R1	12,01	15,29	10,99
	R2	16,38	14,24	13,03
	R3	3,37	7,77	11,01
	R4	3,73	6,66	13,65

En el manejo convencional, el aporte de nitrato (expresado como M^* en esta sección) en el caso de estudio S1, es de 0,8. Sin embargo, existe una repetición en la que tiene lugar un aporte mayor alcanzando un valor de 1,9. Para S2, encontramos que en función de la repetición se ha producido un aporte u otro. Por ello, existe un abanico en valores de aportes siendo el valor mínimo de 0,3 y el máximo de 1. Finalmente, para un nivel alto de salinidad inicial en el suelo (S3), los resultados de las distintas repeticiones se encuentran más localizados en 0,8, aunque dicho valor puede cambiar puesto que se halla en una repetición un valor máximo de 1.

Las diferentes repeticiones en las que se ha aplicado el manejo con hidratación fraccionada muestran un patrón común en lo que se refiere a aportes de nitrato, independientemente de la condición inicial de salinidad en el suelo. Cuando inicialmente el suelo presenta un nivel de salinidad bajo, el aporte de nitrato es de entre 0,4 y 0,5, aunque es posible que se alcance un aporte máximo de 0,9. Para la siguiente condición inicial de salinidad (S2), el aporte máximo es de 1, sin embargo, es posible que el aporte sea de entre 0,4 y 0,6 debido a lo recogido en otras repeticiones. En el último supuesto de salinidad inicial del suelo (S3), la masa aportada de soluto es de 0,8, aunque puede incrementarse hasta 0,95.

Por último, en el caso del manejo con hidratación fraccionada y con rehidratación, las aportaciones de nitrato son muy diversas variando incluso dentro de la misma condición inicial de salinidad de suelo. En el caso de estudio S1, el aporte de nitrato oscila de 0,5 hasta 1,2; cuando es S2, los aportes oscilan entre 0,2 y 1; y cuando se trata de S3, fluctúan entre 0,5 hasta 1,3.

El resto de aportes de solutos en los lixiviados para los manejos ensayados presentan una dinámica similar, variando únicamente el aporte máximo de soluto en función del manejo de hidratación del suelo aplicado y del estado inicial de salinidad en el suelo; además de los valores

de $M_{0,1}$ empleados en la adimensionalización de los aportes de solutos en los lixiviados. Las gráficas en las que se muestran los aportes totales de calcio, sodio y potasio se muestran en el Anexo 1. Junto a las gráficas, se adjunta la tabla correspondiente que recoge el valor de referencia tomado para estandarizar cada repetición en forma adimensional en cada caso experimental.

3.3.2. Resumen final.

Una característica común al comportamiento de los solutos estudiados en este trabajo es que la mayor descarga de masa tiene lugar en los primeros días en los que se lleva a cabo la solarización, es decir, cuando aún el volumen de lixiviados es reducido. Posteriormente a estos días, un incremento en volumen de lixiviados, origina un pequeño incremento en el aumento del aporte de solutos. Se puede decir, por lo tanto, que la mayor parte del drenaje ocurre durante los primeros días inmediatos al riego.

Comparando los distintos manejos de hidratación del suelo, el manejo de hidratación fraccionada es el tratamiento que presenta menores descargas de masa de solutos, por lo tanto, será el que menos contribuya a la contaminación de las aguas subterráneas por aporte de solutos en las aguas lixiviadas. En el resto de manejos, las diferencias en los valores de descarga máxima son menores, registrándose diferencias en función del soluto y de la condición inicial de salinidad del suelo. En el MHFR, se produce una menor descarga de solutos cuando el nivel de salinidad inicial del suelo es bajo, sin embargo, cuando la salinidad inicial del suelo es alta, es en el MC donde se registran los menores aportes de solutos. Es en la condición de salinidad inicial media, donde no se identifican diferencias significativas entre el MHFR y el MC.

Distinguiendo los aportes de solutos en función de la condición de salinidad del suelo, se observa que no existen diferencias entre ellos cuando se aplica el mismo manejo. Es decir, se producen aportes de solutos similares independientemente de la condición inicial de salinidad del suelo. Solamente se observan diferencias poco significativas.

4. DISCUSIÓN

A la hora de llevar a cabo el proceso de solarización, es necesario seleccionar el manejo de hidratación del suelo que cumpla con los siguientes requisitos:

- Temperatura alcanzada en el suelo
- Reducción de la salinidad del suelo después de la aplicación de los riegos de hidratación.
- Volumen mínimo de agua empleado en llevar a cabo los riegos de hidratación.

- Volumen mínimo de lixiviados generados una vez que ha finalizado el tratamiento de solarización.
- Aportes de solutos mínimos desde el suelo tratado hacia capas más profundas y los acuíferos.

Además de estos criterios, es imprescindible que el manejo de hidratación seleccionado tenga una influencia mínima en la contaminación de las aguas subterráneas, para ello se han llevado a cabo los distintos análisis que se han presentado anteriormente y a continuación, de manera total en cada manejo de hidratación del suelo.

La temperatura no se ha visto afectada por el tratamiento de hidratación. Del mismo modo, la salinidad del suelo se ha visto reducida después de los riegos de hidratación en todos los manejos aplicados.

El volumen de agua aportado en los riegos de hidratación del suelo ha variado según el manejo, puesto que en el manejo convencional y en el manejo con hidratación fraccionada se ha consumido un total de 30 l/m², mientras que en el manejo con hidratación fraccionada y rehidratación se usan 42 l/m². En este aspecto, los más adecuados son el MC y el MHF. La tabla 9 recoge, por otra parte, los volúmenes totales lixiviados en cada caso de estudio junto con los aportes totales de solutos asociados a dichos lixiviados.

Tabla 9. Valores medios de los volúmenes totales lixiviados y aportes totales de solutos en cada caso de estudio.

<i>Tratamiento-Salinidad</i>	<i>Vlix. (l/m²)</i>	<i>NO₃⁻</i>	<i>Ca²⁺</i>	<i>Na⁺</i>	<i>K⁺</i>
		<i>M (g/m²)</i>	<i>M (g/m²)</i>	<i>M (g/m²)</i>	<i>M (g/m²)</i>
<i>MC-S1</i>	17,37 ± 8,79	4,70 ± 2,48	4,11 ± 1,29	5,72 ± 1,39	8,43 ± 3,99
<i>MC-S2</i>	14,77 ± 5,81	10,39 ± 5,87	5,17 ± 2,46	7,18 ± 4,07	7,26 ± 2,59
<i>MC-S3</i>	17,81 ± 1,08	23,05 ± 16,63	9,77 ± 4,39	13,48 ± 3,71	12,88 ± 5,67
<i>MHF-S1</i>	10,43 ± 3,83	4,40 ± 4,51	3,50 ± 1,27	4,19 ± 1,35	5,65 ± 3,42
<i>MHF-S2</i>	15,32 ± 7,95	5,74 ± 1,12	3,91 ± 2,24	6,53 ± 4,41	8,19 ± 3,72
<i>MHF-S3</i>	15,44 ± 5,34	11,64 ± 4,93	5,70 ± 2,16	9,00 ± 3,81	11,08 ± 4,40
<i>MHFR-S1</i>	14,62 ± 6,73	8,86 ± 8,24	4,83 ± 2,38	6,94 ± 3,58	6,94 ± 3,58
<i>MHFR-S2</i>	13,63 ± 7,09	8,30 ± 6,01	3,96 ± 1,76	6,91 ± 3,19	6,91 ± 3,19
<i>MHFR-S3</i>	15,89 ± 6,62	9,89 ± 5,61	6,66 ± 2,71	11,99 ± 5,19	11,82 ± 7,45

Como se ha justificado previamente, la variabilidad de los suelos estudiados dificulta el estudio de una dinámica común de aporte. Por ello, se presentan a continuación los resultados del apartado 3.3 para cada soluto agrupados por tratamiento.

En la figura 11, se presentan los aportes de masa de nitrato en los lixiviados de manera adimensional frente al volumen de lixiviados expresado como número de volúmenes de poros, agrupando cada salinidad en un mismo tratamiento y, asimismo, agrupando todos los tratamientos en una única figura.

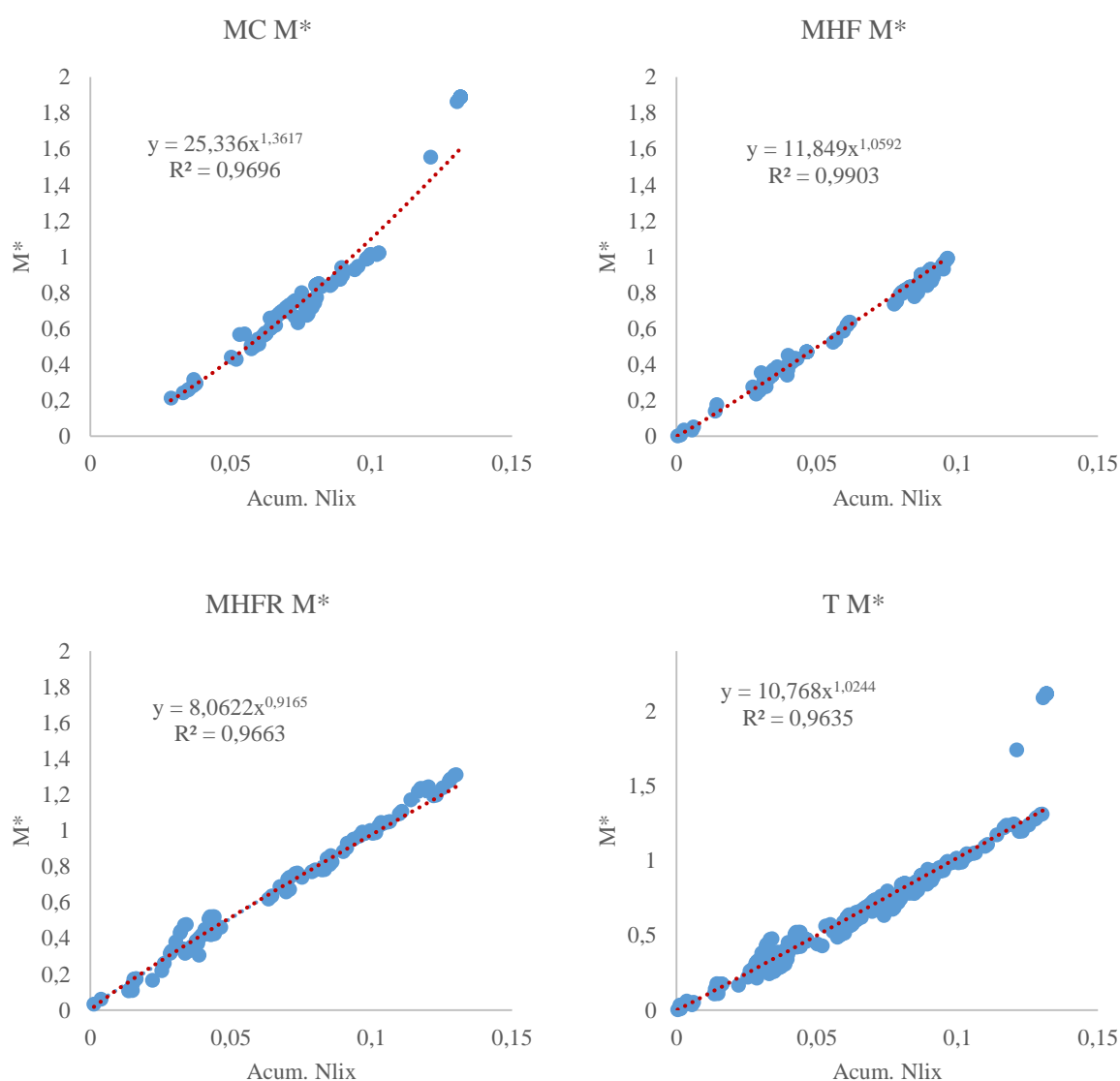


Figura 11. Aportes de masa de nitrato en los lixiviados de manera adimensional para cada tratamiento y en el conjunto del ensayo. Leyenda: MC, Manejo convencional; MHF, Manejo con hidratación fraccionada; MHFR, Manejo con hidratación fraccionada y rehidratación en solarización; y T, Todos los manejos ensayados.

El manejo convencional y el manejo con hidratación fraccionada presentan un aporte total de nitrato de 1 junto con un volumen de lixiviados de 0,1. Sin embargo, en el manejo convencional cabe la posibilidad de que estos valores puedan aumentar al existir ciertos valores que no presentan la misma tendencia que el conjunto. Por otro lado, en el manejo con hidratación fraccionada y rehidratación en solarización se aporta un total de 1,3 de nitrato y un volumen de 0,13, registrándose los peores resultados en este tratamiento. Además, el manejo con hidratación fraccionada y rehidratación en solarización genera un mayor volumen de lixiviados debido a los riegos extras que se le proporcionan durante el ensayo, quedando descartado como el recomendado al consumirse mayor cantidad de agua y, en consecuencia, generar un mayor volumen de lixiviados.

Los tres manejos aplicados presentan la misma dinámica, aunque algunos puntos tengan un comportamiento inusual respecto al resto. Por tanto, se puede observar cómo, a efectos de la dinámica de aporte, las diferentes curvas ajustadas pueden agruparse en una única curva sin perder representatividad de forma significativa. No obstante, el intervalo de número de volúmenes de poros lixiviados correspondiente al tratamiento MHF es más estrecho, como se ha comentado. Esto sugiere que las principales diferencias entre casos en estudio se deben a, por un lado, la salinidad inicial del suelo que como es de esperar incide en el aporte total de cada soluto asociado a los lixiviados y, por otro lado, la dinámica de transporte del agua, que está relacionada directamente con el manejo. Según esto, el manejo MHF sería el tratamiento recomendado para minimizar el impacto sobre los acuíferos garantizando la eficacia de la solarización.

En el análisis del resto de solutos, pueden corroborarse estas conclusiones, si bien con algún matiz en cuanto a la bondad de las curvas ajustadas conjuntamente en cada caso. Los aportes de masa de sodio se pueden observar en la figura 12, frente al volumen de lixiviados expresado como número de volúmenes de poros.

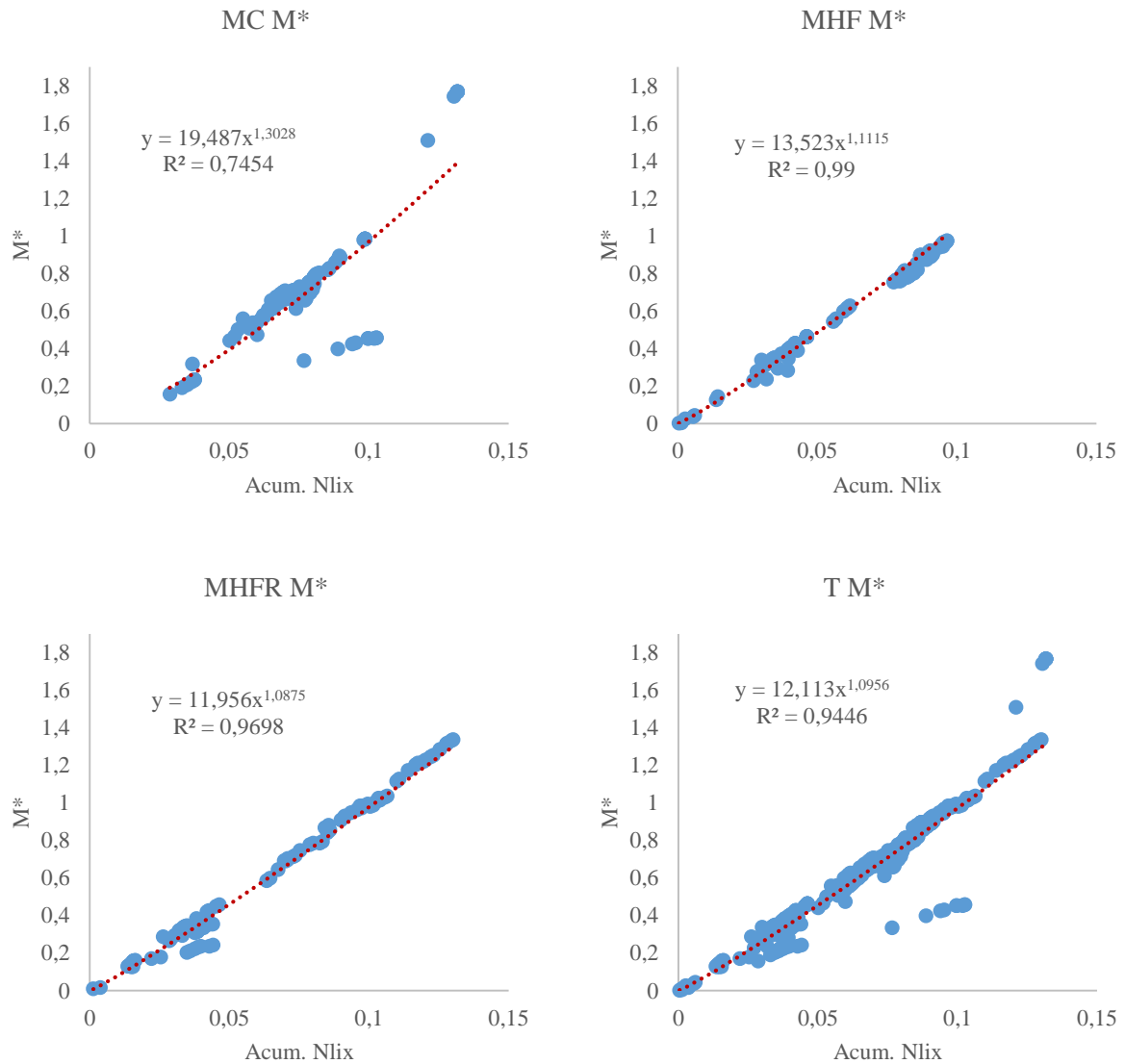


Figura 12. Aportes de masa de sodio en los lixiviados de manera adimensional para cada tratamiento y en el conjunto del ensayo. Leyenda: MC, Manejo convencional; MHF, Manejo con hidratación fraccionada; MHFR, Manejo con hidratación fraccionada y rehidratación en solarización; y T, Todos los manejos ensayados.

En el caso del sodio, los resultados muestran un comportamiento similar al nitrato, llegando incluso a coincidir la masa aportada total y el volumen de lixiviados en cada tratamiento. Sin embargo, en este caso en el manejo convencional, encontramos que existe un número mayor de puntos que no presentan la misma dinámica del conjunto, empeorando su efectividad. Se dice que empeora su efectividad debido a que existe el riesgo de que dicho manejo pueda aportar el valor máximo de sodio y producir el valor máximo de lixiviados que se muestra en la figura.

En la figura 13, se presentan los aportes de masa de calcio en los lixiviados de manera adimensional frente al volumen de lixiviados expresado como número de volúmenes de poros.

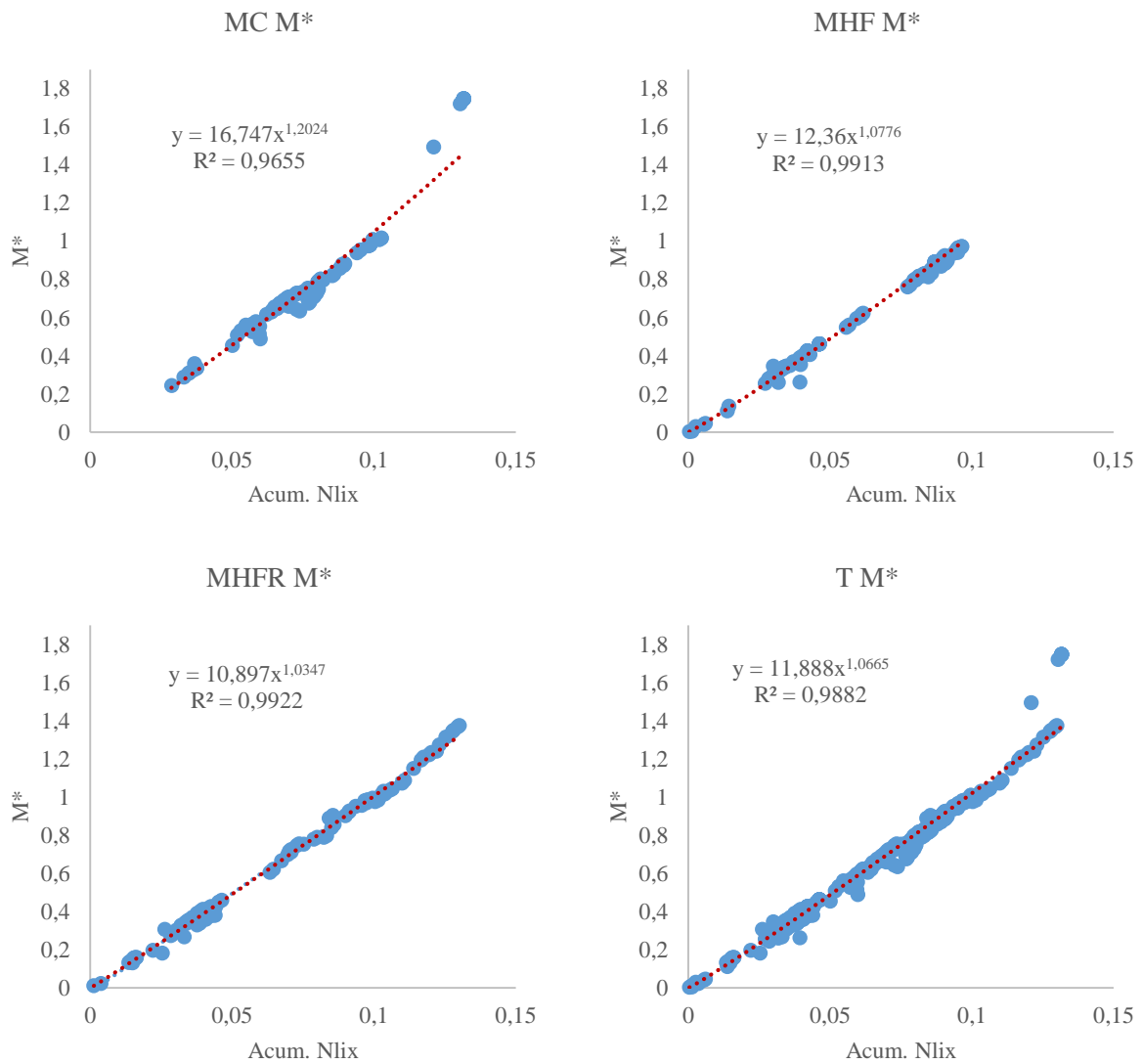


Figura 13. Aportes de masa de calcio en los lixiviados de manera adimensional para cada tratamiento y en el conjunto del ensayo. Leyenda: MC, Manejo convencional; MHF, Manejo con hidratación fraccionada; MHFR, Manejo con hidratación fraccionada y rehidratación en solarización; y T, Todos los manejos ensayados.

El manejo convencional genera un volumen de lixiviado de 0,11 y un aporte de calcio de 1,05; el manejo con hidratación fraccionada presenta un aporte total de calcio de 0,95 junto con un volumen de lixiviado de 0,09; y finalmente el manejo con hidratación fraccionada y rehidratación en solarización genera un aporte de calcio de 1,4 y un volumen de lixiviado de 0,13.

Los aportes de masa de potasio se pueden observar en la figura 14, frente al volumen de lixiviados expresado como número de volúmenes de poros.

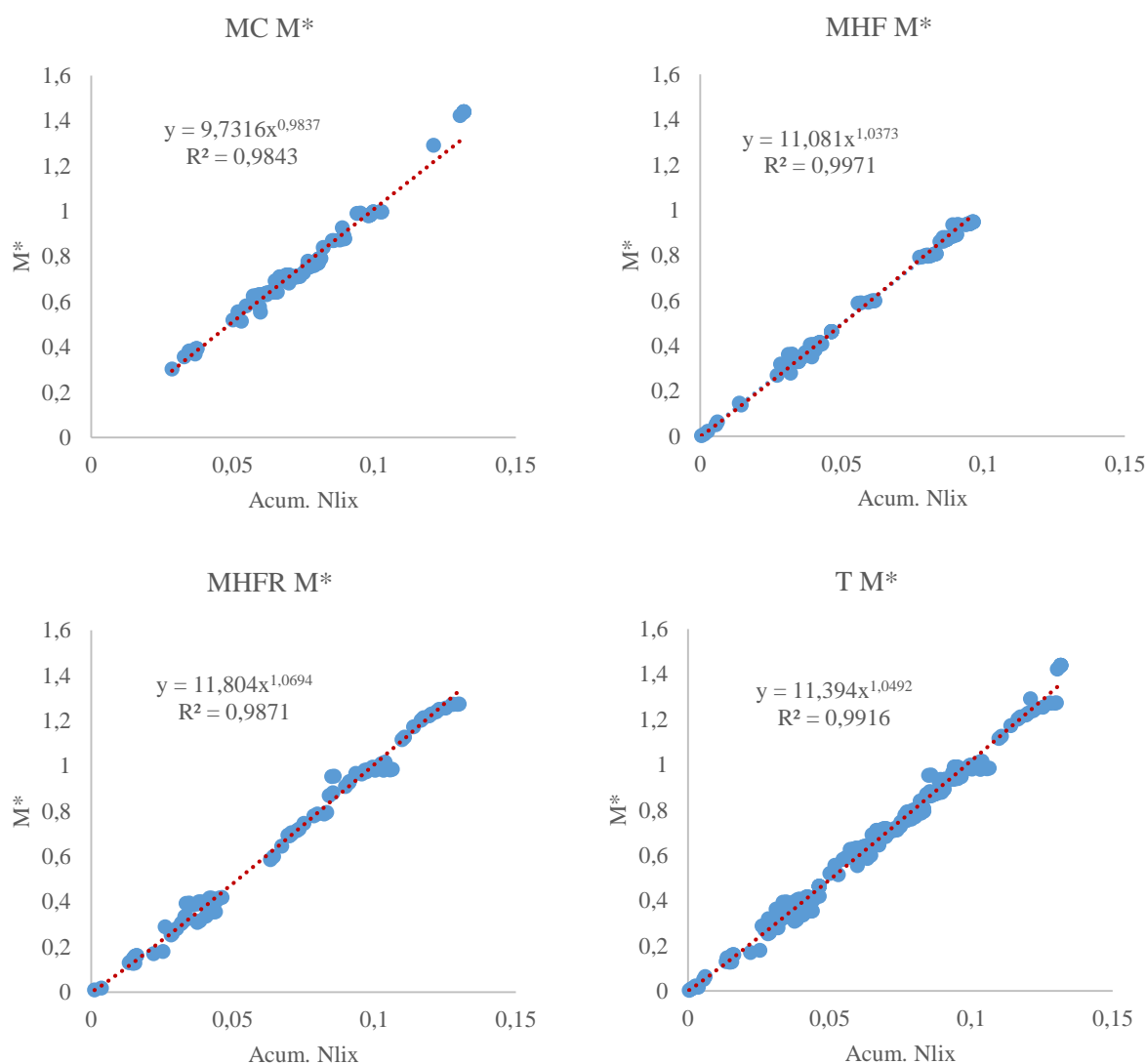


Figura 14. Aportes de masa de potasio en los lixiviados de manera adimensional para cada tratamiento y en el conjunto del ensayo. Leyenda: MC, Manejo convencional; MHF, Manejo con hidratación fraccionada; MHFR, Manejo con hidratación fraccionada y rehidratación en solarización; y T, Todos los manejos ensayados.

Finalmente, en el caso del potasio, el manejo convencional genera un aporte de 1 y un volumen de lixiviado de 0,1; el manejo con hidratación fraccionada presenta un aporte total de 0,95 junto con un volumen de lixiviado de 0,1; y finalmente el manejo con hidratación fraccionada y rehidratación en solarización genera un aporte de 1,25 y un volumen de lixiviado de 0,13.

A modo de resumen, se incluyen en la tabla 10 las curvas potenciales obtenidas para la representación estandarizada (adimensional) de la dinámica de aporte de solutos con los lixiviados en cada tratamiento.

Tabla 10. Curvas potenciales para cada representación estandarizada de la dinámica de aporte de solutos con los lixiviados, siendo X el número de volúmenes de poros de cada suelo e Y es M* utilizando el M_{0,1} que corresponde a cada suelo.

<i>Sustancia</i>	<i>MC</i>	<i>MHF</i>	<i>MHFR</i>	<i>T</i>
<i>Nitrato</i>	$y = 25,3355 x^{1,3617}$ $R^2 = 0,9696$	$y = 11,849 x^{1,0592}$ $R^2 = 0,9903$	$y = 8,0622 x^{0,9165}$ $R^2 = 0,9663$	$y = 10,7677 x^{1,0244}$ $R^2 = 0,9635$
<i>Sodio</i>	$y = 19,4867 x^{1,3028}$ $R^2 = 0,9696$	$y = 13,5232 x^{1,3617}$ $R^2 = 0,9900$	$y = 11,9559 x^{1,0875}$ $R^2 = 0,9696$	$y = 12,1135 x^{1,0956}$ $R^2 = 0,9446$
<i>Calcio</i>	$y = 16,747 x^{1,2024}$ $R^2 = 0,9655$	$y = 12,3595 x^{1,0776}$ $R^2 = 0,9913$	$y = 10,8972 x^{1,0347}$ $R^2 = 0,9922$	$y = 11,8881 x^{1,0665}$ $R^2 = 0,9882$
<i>Potasio</i>	$y = 9,7316 x^{0,9837}$ $R^2 = 0,9843$	$y = 11,0806 x^{1,0373}$ $R^2 = 0,9971$	$y = 11,8036 x^{1,0694}$ $R^2 = 0,9871$	$y = 11,3937 x^{1,0492}$ $R^2 = 0,9916$

5. CONCLUSIONES

Conjuntamente, los mayores aportes de masa de los solutos a los lixiviados tienen lugar en el primer lavado del suelo. A medida que se va produciendo el lavado del suelo, dichos aportes son reducidos.

La calidad de los lixiviados es similar para los tres manejos de hidratación del suelo, clasificándose, según la valoración de las normas de Riverside, entre S1-C4 y S2-C4. De esta manera, los lixiviados no serán aptos para el riego según el criterio de salinidad y por el riesgo que supone la acumulación de sodio en el suelo, especialmente en los de textura fina como son los presentes en el horizonte intermedio de los suelos en los que se han aplicado los tratamientos.

Los lixiviados generados en los manejos de hidratación del suelo aplicados presentan una mayor concentración de nitratos, lo que queda justificado por las labores agrícolas que se realizan durante el ciclo del cultivo. Además, actualmente, el principal problema que presentan las masas subterráneas y superficiales es la contaminación por aportes de nitratos provenientes de la actividad agrícola.

Los manejos de hidratación del suelo para la labor de desinfección presentan aportes totales de solutos similares cuando la salinidad del suelo es baja. A medida que la salinidad de este aumenta, se hacen detectables las diferencias entre los manejos aplicados.

Los manejos en los que se lleva a cabo la hidratación del suelo de manera fraccionada, es decir, el manejo con hidratación fraccionada y el manejo con hidratación fraccionada y rehidratación en solarización, son los que resultan menos contaminantes que el manejo convencional, puesto que generan un volumen total de lixiviados menor, a portando por lo tanto una menor cantidad de solutos.

A pesar de que en el manejo con hidratación fraccionada y rehidratación en solarización consume un mayor volumen de agua, no genera un volumen de lixiviados mayor que el resto de tratamientos en los que el aporte de agua es menor.

La dinámica de aporte de solutos es similar en los tres manejos de hidratación del suelo ensayados puesto que pueden agruparse sus curvas ajustadas en una única sin perder representatividad.

Puesto que el objetivo es reducir los efectos medioambientales negativos de la labor de desinfección del suelo denominada solarización, además de cumplir adecuadamente sus funciones, se recomienda aplicar el manejo con hidratación fraccionada. Esto se debe a que se trata de un manejo que combina la eficiencia en desinfección y la eficiencia medioambiental, al ser respetuosa con las aguas subterráneas al producir los efectos negativos mínimos al generar unos lixiviados con concentraciones bajas de solutos respecto al resto de manejos ensayados.

6. BIBLIOGRAFÍA

Bello, A., López-Pérez, J.A., Díaz-Viruliche, L., 2000. Biofumigación y solarización como alternativas al bromuro de metilo. Memorias del Simposium Internacional de la Fresa, Zamora, México, 24-50.

Carsel, R.F., Parrish, R.S., 1988. Developing joint probability distributions of soil water retention characteristics. *Water Resour. Res.*, 24, 755-769.

Fernández, M.D., González, A.M., Carreño, J., Pérez, C., Bonachela, S., 2007. Analysis of on-farm irrigation performance in mediterranean greenhouses. *Agr. Water Manage*, 89, 251-260.

Gómez, L., Guerra, D., Jaramillo-Noreña, J.E., Bernal-Estrada, J.A., 2000. Uso de la solarización como tratamiento de desinfección de suelo para semilleros de frutales y hortalizas en clima frío moderado. Memorias: Tercer seminario de frutales de clima frío moderado. Centro Tecnológico de Frutales CDTF, Malizales, Colombia, 105-111.

Hargreaves, G.H., Samani, Z.A., (1985). Reference crop evapotranspiration from temperature. Applied engineering in agriculture, 1(2), 96-99.

Heredia, O.S., 2006. El agua de Riego: Criterios de Interpretación. Efectos sobre el suelo y la producción. Universidad de Buenos Aires, 75-99.

Hillel, D., 1998. Environmental soil physics. Part III. The liquid phase, 260-273.

Lorenzo, P., Sánchez-Guerrero, M.C., Medrano, E., Alonso, F.J., Pérez, J., Baeza, E., López, J.C., Montero, J.I., 2010. Manejo del clima en el invernadero mediterráneo. Instituto de Investigación y Formación Agraria y Pesquera. Junta de Andalucía.

Plan Hidrológico. Demarcación Hidrográfica de las Cuencas Mediterráneas Andaluzas. Ciclo de Planificación Hidrológica 2015/2021. Apéndice I: Fichas de caracterización adicional de las masas de agua subterránea, 27-31.

Plan Hidrológico. Demarcación Hidrográfica de las Cuencas Mediterráneas Andaluzas. Ciclo de Planificación Hidrológica 2015/2021. Apéndice VII.3: Presiones e impactos en las masas de agua subterránea.

Van Genuchten, M.T., 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Sci. Soc. Am. J., 44, 892-898.

Zhang, Y., Schaap, M., 2017. Vadose Zone Problem: Parameter Estimation Pedotransfer Using Functions and Inverse Modeling. The University of Arizona.

<http://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/propiedades-del-suelo/propiedades-fisicas/es/>

ANEXOS

ANEXO 1. Aportes totales de sodio, calcio y potasio en los lixiviados para cada tratamiento de hidratación del suelo.

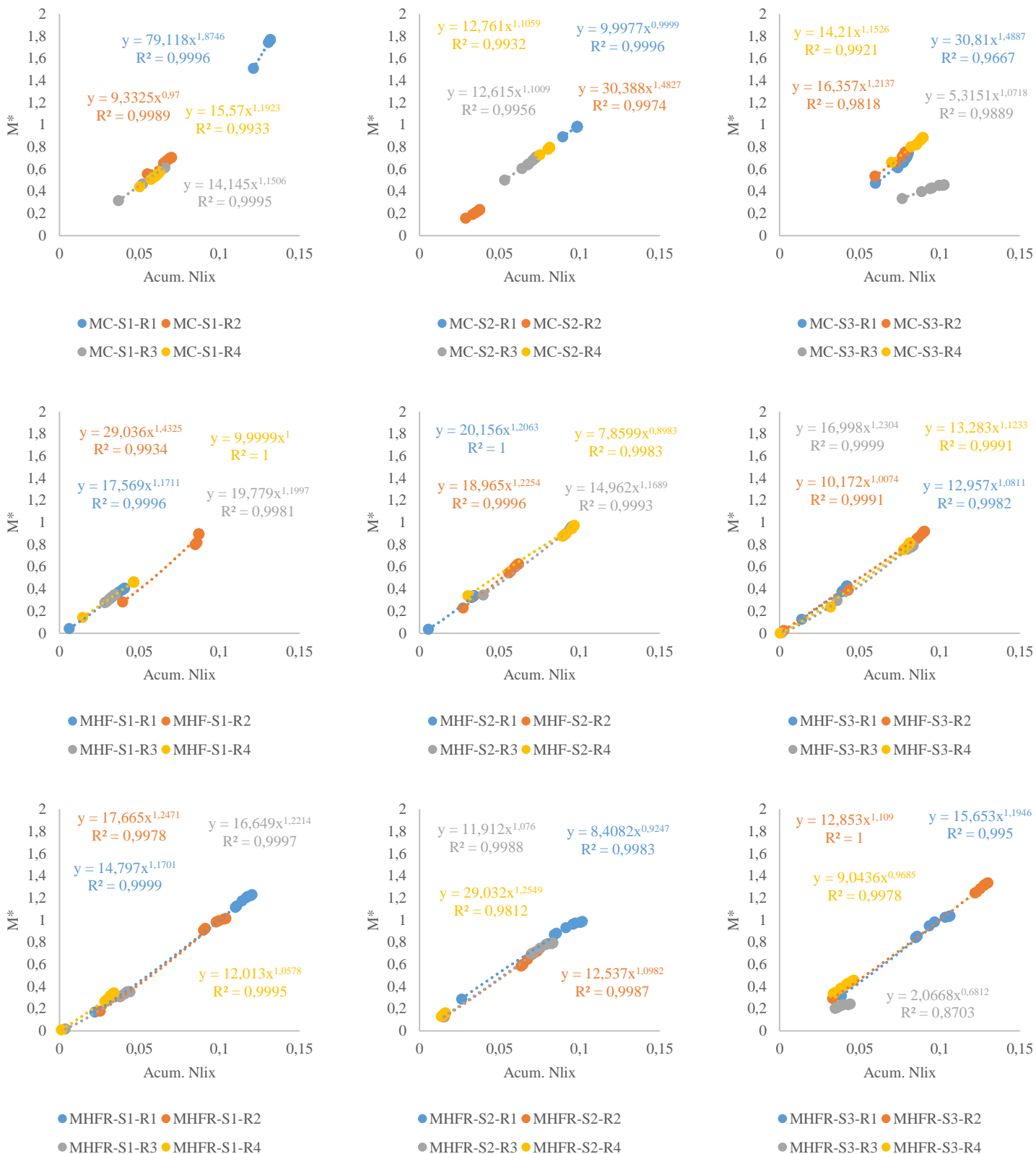


Figura 15. Aportes de sodio en los lixiviados durante el ensayo para cada tratamiento.
 Leyenda: MC, Manejo convencional; MHF, Manejo con hidratación fraccionada; MHFR, Manejo con hidratación fraccionada y rehidratación en solarización; S1, Salinidad baja; S2, Salinidad media; S3, Salinidad alta; y R_i , repetición del ensayo.

Tabla 11. Valores de referencia, $M_{0,1}$, de sodio (g/m^2) para cada repetición del ensayo.

		S1	S2	S3
MC	R1	3,7950	5,6203	17,6965
	R2	8,7124	9,7038	24,8978
	R3	10,3394	15,9250	24,8978
	R4	6,3684	12,0652	11,9013
MHF	R1	7,2039	7,8847	7,6915
	R2	6,8063	5,5882	11,8660
	R3	11,5400	7,9147	13,6127
	R4	8,0238	12,6303	13,5141
MHFR	R1	7,7326	11,2066	7,9760
	R2	10,2511	7,7990	14,7150
	R3	13,3724	9,3264	42,782
	R4	8,9686	21,7860	21,0350

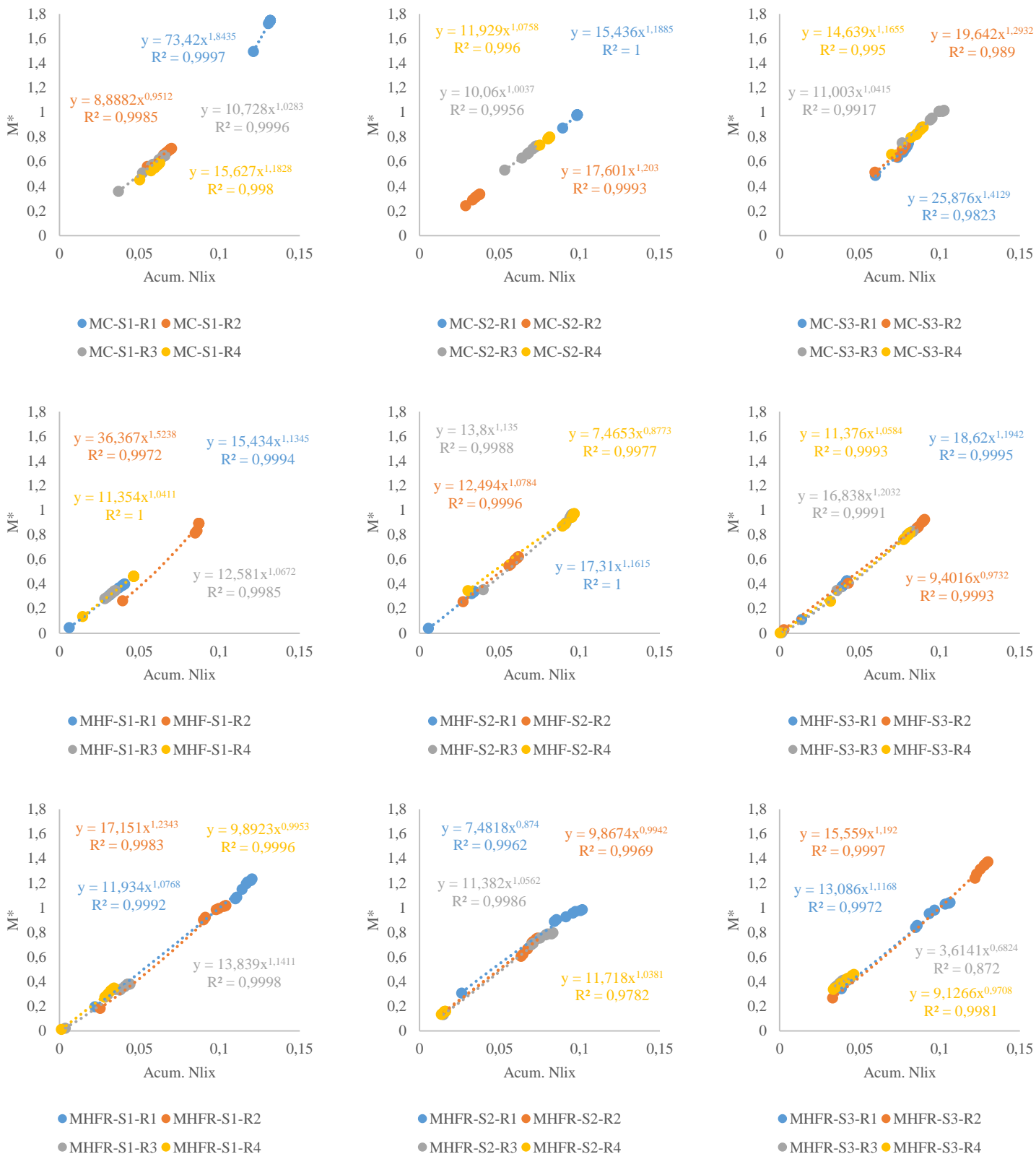


Figura 16. Aportes de calcio en los lixiviados durante el ensayo para cada tratamiento.
 Leyenda: MC, Manejo convencional; MHF, Manejo con hidratación fraccionada; MHFR, Manejo con hidratación fraccionada y rehidratación en solarización; S1, Salinidad baja; S2, Salinidad media; S3, Salinidad alta; y R_i, repetición del ensayo.

Tabla 12. Valores de referencia, $M_{0,1}$, de calcio (g/m^2) para cada repetición del ensayo.

		S1	S2	S3
MC	R1	3,3381	4,3094	16,0784
	R2	5,4410	6,3551	20,0135
	R3	6,1977	10,3804	5,2732
	R4	4,5920	8,4106	7,8094
MHF	R1	5,8729	4,8484	5,8016
	R2	5,9531	4,4173	6,9568
	R3	9,2587	4,6140	8,5068
	R4	6,7307	6,9719	8,3638
MHFR	R1	5,0760	6,4866	3,8837
	R2	7,2944	4,4497	7,6107
	R3	7,3235	4,8773	14,7658
	R4	8,0572	13,8933	12,7975

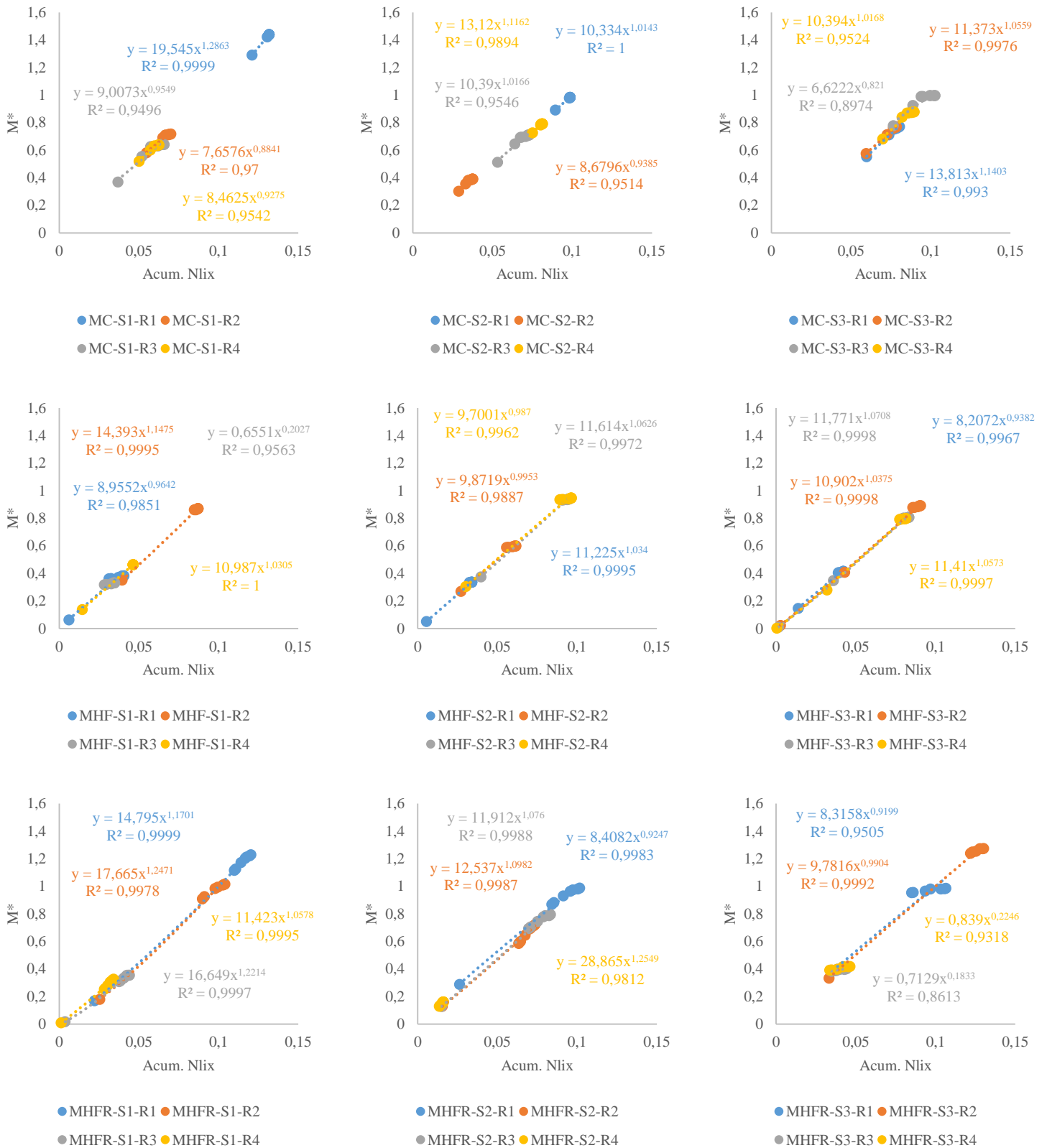


Figura 17. Aportes de potasio en los lixiviados durante el ensayo para cada tratamiento.
 Leyenda: MC, Manejo convencional; MHF, Manejo con hidratación fraccionada; MHFR, Manejo con hidratación fraccionada y rehidratación en solarización; S1, Salinidad baja; S2, Salinidad media; S3, Salinidad alta; y R_i, repetición del ensayo.

Tabla 13. Valores de referencia, $M_{0,1}$, de potasio (g/m^2) para cada repetición del ensayo.

		S1	S2	S3
MC	R1	8,8502	10,4510	17,1985
	R2	15,1467	10,7330	26,4040
	R3	8,5492	8,9477	11,1709
	R4	7,1976	10,3398	7,6980
MHF	R1	9,7230	11,3730	11,2310
	R2	12,3810	10,5680	16,1330
	R3	11,8200	12,1100	16,5980
	R4	9,0232	11,7940	14,8610
MHFR	R1	7,7339	11,2066	10,8922
	R2	10,2511	7,7990	17,7776
	R3	13,3824	9,3264	16,1630
	R4	9,4314	21,9116	17,6610