

Ciclo cerrado: aprovechar el drenaje del compost agroindustrial para cultivar hinojo marino (*Crithmum maritimum* L.) en un sistema flotante

Closing the cycle: leverage agroindustrial compost leachate to cultivate sea fennel (*Crithmum maritimum* L.) in a floating system

F. Amoruso^{1*}, A. Signore¹, V.M. Gallegos-Cedillo¹, J. Ochoa¹, C. Egea-Gilabert^{1,2}, P.A. Gómez², F. Orsini³, G. Pennisi³, E. Appollonie³, J.A. Fernández^{1,2}

¹Departamento de Ingeniería Agronómica. Universidad Politécnica de Cartagena. P^o Alfonso XIII, 48, 30203, Cartagena, Murcia, España.

²Instituto de Biotecnología Vegetal. Edificio I+D+I. Universidad Politécnica de Cartagena. Campus Muralla del Mar, 30202, Cartagena, Murcia, España.

³Departamento de Ciencias y Tecnologías Agrarias y Alimentarias. Universidad de Bologna, Italia.

*fabio.amoruso@upct.es

Resumen

El objetivo de este estudio fue producir hinojo marino reduciendo la descarga de nutrientes mediante sistemas de cultivo en cascada (SCC). Los SCC consistían en un cultivo primario de rúcula [*Diplotaxis tenuifolia* (L.) DC] cultivada en dos sustratos de cultivo: compost y turba. El drenaje recogido se utilizó para cultivar hinojo marino (*Crithmum maritimum* L.) en un sistema flotante con los siguientes tratamientos: T1-100% drenaje de turba; T2-100% drenaje de compost; T3-mezcla de drenaje de turba y SN (50%/50%); T4-mezcla de drenaje de compost y SN (50%/50%); T5-100% SN. La reutilización del drenaje de compost como SN produjo un mayor rendimiento, uso eficiente de agua (WUE) y uso eficiente de nitrógeno (NUE) que la reutilización del drenaje de turba. Se necesita más investigación para optimizar el porcentaje de drenaje reutilizado para maximizar el rendimiento y la calidad del hinojo marino en un sistema flotante.

Palabras clave: Rúcula; uso eficiente de agua; economía circular.

Abstract

The objective of this study was to produce sea fennel reducing the nutrients unload by closing the cascade cropping systems (CCS). The CCS consisted of a primary crop of rocket salad [*Diplotaxis tenuifolia* (L.) DC] cultivated in two different growing media: agro-industrial compost and peat. The collected drainage was used to cultivate sea fennel (*Crithmum maritimum* L.) in a floating system with the following treatments: T1 - 100% peat leachate; T2 - 100% compost leachate; T3 - mixture of peat leachate and fresh nutrient solution (NS) (50/50 v/v); T4 - mixture of compost leachate and fresh NS (50/50 v/v); T5-100%fresh NS. Reusing compost drainage at 100% as a NS produced higher yield, water use efficiency (WUE) and nitrogen use efficiency (NUE) than reusing peat drainage. However, further research is needed to optimize the percentage of reused drainage to maximize yield and quality of sea fennel in a floating system.

Keywords: Rocket salad; water use efficiency; circular economy.

1. INTRODUCCIÓN

El agua tiene un papel clave en la producción agrícola y la seguridad alimentaria. Por ello, el reciclaje del agua es un tema muy investigado dentro de la agricultura sostenible. Dentro de estas premisas, los sistemas cerrados de cultivo sin suelo y, en particular, los sistemas de cultivo en cascada (SCC) - los sistemas que recogen el drenaje del cultivo principal para cultivar cultivos secundarios - son de especial interés en entornos naturalmente secos, con escasez de agua y pobres en nutrientes como los de la costa de los países mediterráneos (1). SCC necesita dos características principales para generar circularidad y eficiencia de los recursos: la combinación adecuada de cultivos para reducir los aportes de agua y nutrientes y, en segundo lugar, encontrar un cultivo secundario tolerante a la sal (2). La halófito comestible hinojo marino (*Crithmum maritimum* L.) podría ser un buen candidato como cultivo secundario, ya que se puede cultivar hidropónicamente en una solución de nutrientes salinos, mejorando la calidad del producto crudo y la vida útil después de la cosecha como un vegetal "listo para comer" (3). Por lo tanto, el enfoque clave de este estudio es lograr un uso eficiente del agua y los nutrientes mediante el cierre del sistema de cultivo en cascada utilizando lixiviados de un cultivo primario hecho con ensalada de rúcula cultivada en compost y con hinojo marino como cultivo secundario cultivado en un sistema flotante con estos lixiviados.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Todo el experimento se desarrolló en la Estación Experimental Agroalimentaria de la Universidad Politécnica de Cartagena (UPCT; lat. 37°41' N; long. 0°57' O).

2.1 Material vegetal y condiciones de crecimiento de la rúcula

Las plántulas de rúcula [*Diplotaxis tenuifolia* (L.) DC.], cv. 'Apollo' se trasplantaron en canaletas metálicas (3 marzo 2022), rellenos de turba o de un compost agroindustrial como medio de cultivo. Después del trasplante, se aplicó diariamente solución nutritiva (SN) con la siguiente composición: 7,2 mM NO₃⁻, 4,8 mM NH₄⁺, 2 mM H₂PO₄⁻, 2,5 mM SO₄²⁻, 6 mM K⁺, 1,9 mM Ca²⁺ y 1,5 mM Mg²⁺ más una solución comercial de microelementos Nutromix® (2 mg L⁻¹) y Sequestrene® G100 Syngenta (un quelato de hierro al 6% - 1,5 mg L⁻¹). Además, los lixiviados de cada medio de cultivo se recogieron en tanques separados y se midieron.

2.2 Material vegetal y condiciones de crecimiento de hinojo marino

El experimento se realizó del 4 de mayo (siembra) al 18 de julio (cosecha). La siembra de hinojo marino (*Crithmum maritimum* L.) se realizó de forma manual en bandejas de poliestireno rellenas de turba, y colocadas en mesa de flotación lleno de agua de lluvia con una CE de 0,52 dS·m⁻¹. Un mes después de la siembra, las mesas se llenaron con 230 litros de SN. Los tratamientos fueron los siguientes: T1 - 100% drenaje de turba; T2 - 100% drenaje de compost; T3 - mezcla de drenaje de turba y SN (50%/50%); T4 - mezcla de drenaje de compost y SN (50%/50%); T5 - 100% SN cuya concentración fue 0.6 de la utilizada en el cultivo de rúcula. La cosecha se realizó cuando las plantas alcanzaron la etapa de 10-12 hojas verdaderas.

2.3 Diseño experimental y análisis estadístico

En el invernadero se utilizó un diseño de bloques completos aleatorizados con tres repeticiones (mesas de flotación). Cada mesa tenía tres bandejas flotantes de 60 cm × 41 cm. Se realizó un análisis de la varianza (ANOVA unidireccional). Los datos se analizaron con Statgraphics Centurion 19 (The Plains, VA, EE.UU.). La separación de medias se realizó mediante la prueba de Tukey a $P \leq 0,05$.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Durante el experimento, ambos medios de cultivo tuvieron un contenido de agua relativamente alto, confirmado por un potencial mátrico del agua similar (entre 1 y 5 kPa). Por lo

tanto, la fracción de lixiviación durante todo el período de crecimiento fue de 0,18 en el compost y de 0,21 en la turba. La composición química de estos lixiviados se muestra en la Tabla 1, donde se puede observar que no hubo diferencias significativas en la concentración iónica, pH y CE entre los lixiviados. La relación nitrato/amonio alcanzó valores superiores a 1,5 en T3 y T5, significativamente superiores al resto de tratamientos, mientras la relación cloruro/nitrato mostró el valor más alto en T1, siendo este tratamiento significativamente superior a T3, T4 y T5. T4 mostró una relación entre 2 y 3, mientras que T3 y T5 tuvieron valores entre 1 y 2. En presencia de altas concentraciones de cloruro, la captación de nitrato podría ser inhibida debido a la interacción de transporte iónico entre estos iones (4). La CE aumentó en todos los tratamientos al final del experimento con respecto a los valores iniciales. Además, este parámetro podría verse afectado como consecuencia de la solubilización de sales debida a las variaciones de pH. La mayor producción de hinojo marino se obtuvo en T3 ($0,7 \text{ kg m}^{-2}$), mientras que la menor se encontró en T1 ($0,2 \text{ kg m}^{-2}$). Las plantas cultivadas en lixiviado de compost (T2) incrementaron el rendimiento en un 137% respecto a las cultivadas en lixiviado de turba (T1). El número de hojas por planta en T5 fue el doble que en T1, mientras que T2, T3 y T4 produjeron, en promedio, seis hojas, sin diferencias significativas entre ellos. El área foliar máxima fue de $211 \text{ mm}^2 \text{ planta}^{-1}$ en T3, la cual fue 258% mayor que T1, 87% y 128% mayor que T2 y T4, respectivamente, mientras que T5 disminuyó 29% con respecto a T3. En este trabajo, el rendimiento y el área foliar tienen una estrecha correlación positiva, ya que los tratamientos con mayor LA tuvieron mayor rendimiento. En promedio, el SLA en T3 fue 138% mayor que en el resto de los tratamientos y es un buen indicador del rendimiento de la planta (5). En cuanto a los parámetros radiculares volumen radicular, el T2 presentó el valor más bajo (147% inferior al T4), probablemente debido a la mayor presencia de sales (CE) en la solución nutritiva en comparación con los otros tratamientos, ya que las raíces son la primera parte de la planta que se encuentra con la salinidad y, por lo tanto, se ven afectadas de forma más marcada por las condiciones mencionadas (6). Se observaron algunas diferencias en cuanto al contenido de iones en las hojas de hinojo marino. T1 tenían el menor contenido de N (NO_3^- y NH_4^+), y el mayor contenido de Cl^- y Na^+ (Tabla 2). En consecuencia, la relación $\text{Cl}^-/\text{NO}_3^-$ alcanzó el valor más alto en T1. Los mayores contenidos de nitratos en las hojas de hinojo marino se encontraron en T5 y T3, pero fueron muy inferiores al máximo legislado en la UE (Reglamento (CE) n° 1258/2011 de la Comisión) para otras hortalizas de hoja. El contenido de Cl^- fue mayor que el de Na^+ en todos los tratamientos, lo que indica un mecanismo regulador para retener el Na^+ lejos de las hojas de las plantas de hinojo marino (3). En este estudio, la relación K^+/Na^+ osciló entre 1,9 y 4,2 cercano al valor de 3 a 4 que se considera el más adecuado en especies halófitas para la retención normal de proteínas durante el crecimiento (Guil et al., 1997), evitando los efectos de la toxicidad por Na^+ (7). WUE tuvo el valor más alto en T3, con un incremento del 240% respecto a T1. Además, el valor de T3 fue un 64% y un 59% superior al de T4 y T5, respectivamente. Además, las plantas cultivadas en T2 produjeron un WUE significativamente mayor que T1. En cuanto a la NUE, los valores más altos se obtuvieron en T3 y T5, que tenían el mayor contenido inicial de N (NO_3^- y NH_4^+) en la NS, mientras que T1 tuvo el valor más bajo, lo que coincide con los resultados obtenidos en otras especies cultivadas en sistemas flotantes (8).

4. CONCLUSIONES

El uso de un SCC que recoja el drenaje de un cultivo de cohetes para cultivar hinojo marino en un sistema flotante puede generar circularidad y eficiencia de los recursos, logrando beneficios ecosistémicos, logrando beneficios ecosistémicos y reduciendo la contaminación ambiental aguas abajo. Estos prometedores resultados ponen de relieve que es necesario seguir investigando para optimizar la producción de hinojo marino en sistema flotante reutilizando el lixiviado de un cultivo anterior.

5. AGRADECIMIENTOS

Esta investigación se enmarca en el proyecto Agricultura urbana innovadora para una producción sostenible (Proyecto PID2020-114410RB-I00) financiado por MCIN /AEI /10.13039 /501100011033. Esta investigación ha recibido financiación externa a través de una ayuda posdoctoral Margarita Salas del Ministerio de Universidades y de la Unión Europea.

6. REFERENCIAS

1. Santos MG, Moreira GS, Pereira R, Carvalho SMP. Assessing the potential use of drainage from open soilless production systems: A case study from an agronomic and ecotoxicological perspective. *Agric Water Manag.* 2022 Nov 1;273.
2. Katsoulas N, Stanghellini C. Modelling crop transpiration in greenhouses: Different models for different applications. Vol. 9, *Agronomy*. MDPI AG; 2019.
3. Amoruso F, Signore A, Gómez PA, Martínez-Ballesta MC, Giménez A, Franco JA, et al. Effect of Saline-Nutrient Solution on Yield, Quality, and Shelf-Life of Sea Fennel (*Crithmum maritimum* L.) Plants. *Horticulturae*. 2022;8(2).
4. Aslam M, Huffaker RC, Rains DW. Early Effects of Salinity on Nitrate Assimilation in Barley Seedlings' NO₃-uptake was determined at 2-h intervals in light [Internet]. Vol. 76, *Plant Physiol*. 1984. Available from: <https://academic.oup.com/plphys/article/76/2/321/6084390>
5. Gallegos-Cedillo VM, Diáñez F, Nájera C, Santos M. Plant agronomic features can predict quality and field performance: a bibliometric analysis. Vol. 11, *Agronomy*. MDPI; 2021.
6. Ben Hamed K, Castagna A, Salem E, Ranieri A, Abdelly C. Sea fennel (*Crithmum maritimum* L.) under salinity conditions: A comparison of leaf and root antioxidant responses. *Plant Growth Regul.* 2007 Dec;53(3):185-94.
7. Flowers TJ, Munns R, Colmer TD. Sodium chloride toxicity and the cellular basis of salt tolerance in halophytes. Vol. 115, *Annals of Botany*. Oxford University Press; 2015. p. 419-31.
8. Miceli A, Moncada A, Sabatino L, Vetrano F. Effect of gibberellic acid on growth, yield, and quality of leaf lettuce and rocket grown in a floating system. *Agronomy*. 2019 Jul 16;9(7).

Tabla 1. Concentración iónica (mM), pH y CE (dS m⁻¹) en cada tratamiento de hinojo marino al inicio del experimento.

Ion (mM)	T1	T2	T3	T4	T5
NO ₃ ⁻	1.6 ± 0.3 b	1.9 ± 0.3 b	3.6 ± 0.1 a	2.2 ± 0.4 b	4.2 ± 0.2 a
NH ₄ ⁺	1.8 ± 0.5 b	1.6 ± 0.2 b	2.2 ± 0.2 a	1.7 ± 0.2 b	2.3 ± 0.5 a
PO ₄ ⁻	0.9 ± 0.3 b	0.6 ± 0.2 b	1.4 ± 0.4 a	0.8 ± 0.1 b	1.7 ± 0.2 a
K ⁺	0.7 ± 0.4 b	1.3 ± 0.4 b	2.4 ± 0.2 ab	1.7 ± 0.2 b	3.3 ± 0.2 a
Ca ²⁺	0.8 ± 0.3 b	1.1 ± 0.1 b	1.6 ± 0.3 ab	1.3 ± 0.1 a	2.0 ± 0.3 a
Mg ²⁺	0.4 ± 0.3 b	0.4 ± 0.4 b	1.3 ± 0.3 a	0.7 ± 0.1 b	1.7 ± 0.5 a
Cl ⁻	6.3 ± 0.2 a	6.5 ± 0.1 a	5.3 ± 0.3 ab	6.2 ± 0.8 a	4.8 ± 0.6 b
Na ⁺	5.1 ± 0.2 a	6.7 ± 0.1 a	4.9 ± 0.2 a	6.3 ± 0.2 a	4.7 ± 1.1 a
SO ₄ ²⁻	2.1 ± 0.3 a	2.0 ± 0.3 a	2.1 ± 0.1 a	2.1 ± 0.2 a	2.2 ± 0.5 a
pH	7.9 ± 0.3 a	7.7 ± 0.1 a	6.9 ± 0.1 a	7.3 ± 0.1 a	7.0 ± 0.2 a
EC (dS m ⁻¹)	2.9 ± 0.2 a	3.2 ± 0.4 a	3.1 ± 0.2 a	3.4 ± 0.1 a	3.5 ± 0.4 a

Todos los datos representan el valor medio ± SE (n = 3). Letras distintas en las filas indican diferencias significativas entre tratamientos P ≤ 0,05.

Tabla 2. Contenido de iones (NO₃⁻, NH₄⁺, K⁺, Cl⁻, Na⁺) (mg kg⁻¹ FW) y ratios Cl⁻/NO₃⁻ and K⁺/Na⁺ en la cosecha en hojas de *C. maritimum* cultivadas bajo diferentes tratamientos.

Ion	T1	T2	T3	T4	T5
NO ₃ ⁻	36.9 ± 0.2 c	33.5 ± 0.1 c	161.8 ± 42.3 b	41.0 ± 1.7 c	214.9 ± 13.2 a
NH ₄ ⁺	31.8 ± 3.2 e	131.1 ± 24.0 d	597.7 ± 18.1 b	274.3 ± 12.5 c	697.0 ± 14.4 a
K ⁺	6629.2 ± 33.3 b	6707.5 ± 27.0 b	4669.2 ± 57.9 c	7712.6 ± 13.6 a	6737.4 ± 79.2 b
Cl ⁻	8141.9 ± 119.8 a	6234.3 ± 15.9 c	6129.9 ± 30.0 c	7610.9 ± 31.0 b	5801.2 ± 30.6 d
Na ⁺	2812.7 ± 15.6 a	1829.5 ± 31.1 c	2475.0 ± 35.6 b	2390.5 ± 33.4 b	1606.0 ± 23.9 d
Cl ⁻ /NO ₃ ⁻	220.1 ± 4.6 a	188.9 ± 1.3 b	38.1 ± 12.6 c	185.6 ± 7.2 b	27.0 ± 1.8 c
K ⁺ /Na ⁺	2.4 ± 0.1 d	3.7 ± 0.1 b	1.9 ± 0.05 e	3.2 ± 0.1 c	4.2 ± 0.1 a

Values are the mean ± SE (n = 3). Different letters indicate statistically significant differences at P ≤ 0.001.