

PROTOCOLOS DE FERTIRRIEGO ECOSOSTENIBLES EN CULTIVO DE MELÓN *en una zona vulnerable a la contaminación por nitratos*

La agricultura necesita adoptar prácticas más respetuosas con el medioambiente. Para ello, se están implementando diferentes protocolos de fertirrigación ecosostenible en parcelas localizadas en zonas vulnerables a la contaminación difusa por nitratos para optimizar el uso del agua y fertilizantes del sistema agrícola; logrando así cumplir el marco legislativo en vigor, evitar procesos de lixiviación que conlleven a la contaminación por nitratos de masas de agua, mejorar la calidad física-química del suelo y maximizar el rendimiento y la calidad de la cosecha.

CRISTINA ROMERO-TRIGUEROS, ESTEBAN VARGAS, NATALIA GARCÍA-FERNÁNDEZ,
MIGUEL ÁNGEL DEL AMOR, M^a PUERTO SÁNCHEZ, EMILIO NICOLÁS
Dpto. Riego, CEBAS-CSIC, Espinardo (Murcia)

Actualmente, los sistemas agrícolas se enfrentan a uno de los principales desafíos a nivel mundial: mantener el suministro de alimentos a través de la producción agrícola bajo los escenarios de escasez hídrica, acentuada por el cambio climático (IPCC, 2021) y de necesidad de reducir el uso de fertilizantes inorgánicos que pueden generar contaminación difusa de las masas de aguas superficiales y subterráneas (Mira-García y col., 2024) si no se hace una adecuada gestión de la fertirrigación. En este sentido, el aumento de la superficie declarada como zona vulnerable a la contaminación difusa

por nitratos de origen agrario (ZVN) es considerado un reto por parte de la Unión Europea en sus políticas medioambientales y agrarias (Directiva 91/676/CE relativa a la *protección de las aguas contra la contaminación producida por NO₃*- y el Pacto Verde o “Green Deal”, en inglés) y, a nivel nacional, se puede considerar un problema generalizado en la mayor parte de las cuencas españolas (RD 47/2022 sobre *protección de las aguas contra la contaminación producida por NO₃*-).

En el caso concreto de la Región de Murcia, la agricultura de regadío es clave en la producción de alimentos (frutas y hortalizas) a nivel europeo y en el desarrollo de la comarca del Campo de

Cartagena y del resto de la región, siendo dicha actividad agrícola el principal sector económico. Sin embargo, gran parte del territorio regional presenta niveles alarmantes de nitratos en sus aguas subterráneas (RD 47/2022) y la capacidad de autorregulación del ecosistema del Mar Menor se ha visto afectada por diferentes factores. Por ello, es indispensable lograr la transformación del sector agrario hacia un nuevo modelo de cultivo que evite la lixiviación de fertilizantes a las masas de agua subterráneas de las masas de agua subterráneas, mejore la calidad y funcionalidad del suelo y suponga una mejora en la comercialización y diferenciación de sus productos en los mercados.



FOTO 1

Parcela experimental del ensayo de melón en momentos fenológicos distintos (fila superior) e instalación de los sensores de humedad del suelo y estación meteorológica (fila inferior).

Para hacer frente a este desafío, en el marco del proyecto de investigación FERTECO (FERTirrigación ECOSostenible en la cuenca vertiente del Mar Menor), financiado por el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico a través de la Fundación Biodiversidad, y coordinado por el CEBAS-CSIC, se contempla la validación e implantación de tratamientos de fertilización relacionados con la economía circular y biosoluciones de origen natural en los principales cultivos hortícolas y leñosos de la cuenca vertiente del Mar Menor (CVMM), área catalogada como zona vulnerable a la contaminación difusa por nitratos de origen agrario (ZVN). Además, se están implementando diferentes tecnologías innovadoras, entre otras: sistemas de monitorización de la humedad, de la conductividad eléctrica (CE) y del contenido de nutrientes a diferentes profundidades del suelo, mejorando así la eficiencia en el uso del agua y de los fertilizantes. El objetivo principal es demostrar que con estrategias de fertirriego ecosostenibles se logra el desarrollo de la actividad agrícola en ZVNs, cumpliendo el exigente marco legislativo (RD

1051/2022 *Nutrición Sostenible en suelos agrarios*, Ley 3/2020 *Recuperación y Protección del Mar Menor*, Medidas cautelares impuestas por CHS en el BOE, 1 de agosto de 2020, núm. 208, etc.) y evitando impactos negativos en la rentabilidad económica de la explotación.

Estrategias de fertirriego ecosostenibles para un cultivo de melón

En este artículo se muestran algunos de los resultados obtenidos de un ensayo concreto llevado a cabo en un ciclo de cultivo de melón. El ensayo consistió en evaluar los efectos de diferentes estrategias de fertirriego (manejo de cultivo ecológico frente a un tratamiento convencional) a nivel fisiológico, agronómico y ambiental, evaluando el aprovechamiento del nitrógeno a nivel de sistema agrario. La parcela experimental se ubicó en un área denominada “zona 2” de la CVMM en la cual está permitido el uso de nitrógeno inorgánico de síntesis, aunque bajo prescripción técnica avalada por un operador agroambiental (Artículo 46 de la Ley 3/2020 *de recuperación y protección del Mar*

Menor) dentro del municipio de Torre Pacheco (Murcia) (37°47'36.6"N 0°54'29.6"W) y a unos 7.500 m de la línea de costa del Mar Menor.

El día de plantación del cultivo de melón, variedad ‘Galia’, fue el 18 de abril de 2024 y se recolectó en dos momentos: el 3 de julio de 2024 y el 22 de julio de 2024. Por consiguiente, la duración del ciclo de cultivo fue de aproximadamente 11 semanas para el primer corte (76 días) y 14 semanas para el segundo corte (95 días) (**Foto 1**).

La parcela se subdividió en cuatro sectores de aproximadamente 1 ha cada uno para los cuales se diseñaron diferentes estrategias de fertilización aplicadas mediante el sistema de riego por goteo, sin exceder el máximo de unidades fertilizantes de nitrógeno por hectárea permitido (170 UF/ha):

- Protocolo convencional, considerado como el tratamiento Control (Tratamiento 0). La cantidad de N-P-K fue de 140,1 - 51,8 - 142,5 UF/Ha, respectivamente. El N fue aplicado en forma de N_{nitrato} (71,2 UF/Ha), de N_{amoniaco} (68,2 UF/Ha) y N_{orgánico} (0,7 UF/Ha).

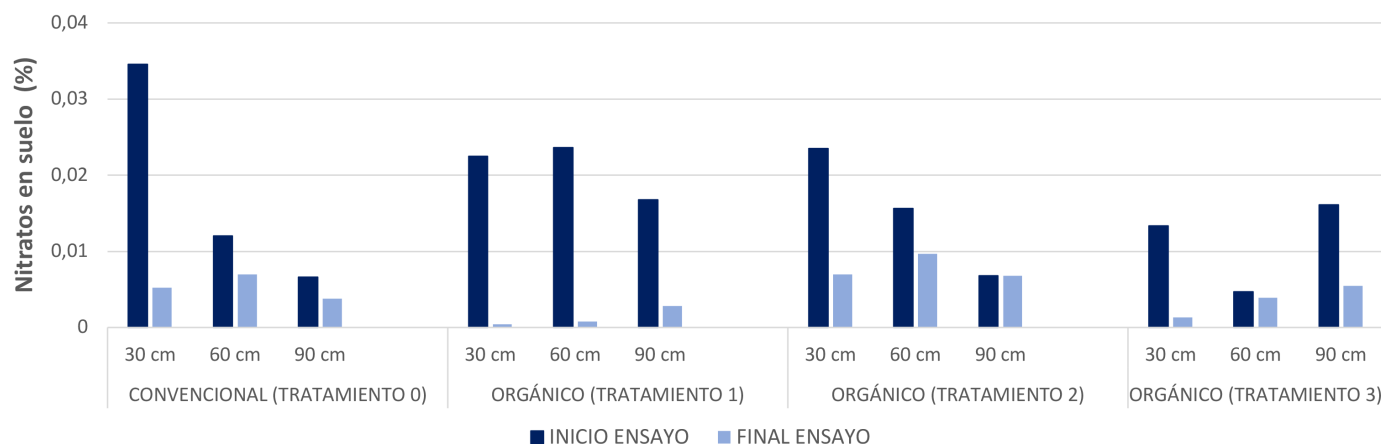


GRÁFICO 1

Contenido de nitrato (%) a diferentes profundidades del suelo (30, 60 y 90 cm) al inicio y al final del ensayo para cada uno de los cuatro tratamientos estudiados.

- Protocolo orgánico caracterizado por su baja dosis de N (Tratamiento 1) dado que el suelo de su sector presentó inicialmente, a lo largo del perfil de 0 a 90 cm de profundidad, niveles de N acumulado más elevados que el resto de sectores. La cantidad de N-P-K aplicada fue de 5,2-2,8-2,2 UF/Ha, respectivamente.
- Protocolo orgánico con abonado de fondo (Tratamiento 2). La cantidad de N-P-K aplicada fue de 28,6-91,7-90,6 UF/Ha, respectivamente.
- Protocolo orgánico con dosis de N más elevada que los dos anteriores (Tratamiento 3). La cantidad de N-P-K aplicada fue de 68,3-0-57,7 UF/Ha, respectivamente.

Asimismo, en cada uno de los 4 sectores se midió en continuo la humedad del suelo, mediante sensores de contenido volumétrico de agua (CVA), a dos profundidades: 25 cm (zona de máxima actividad radicular) y 90 cm (para control de drenaje en profundidad). También se ubicó una estación meteorológica (37°47'35.84"N 0°54'32.24"O) equipada con veleta, anemómetro, pluviómetro, radiación, humedad relativa y temperatura (**Foto 1**).

A lo largo del ciclo de cultivo se evaluaron, entre otros variables, el estado hídrico, salino y nutricional

del suelo, el intercambio gaseoso (fotosíntesis y conductancia estomática) y contenido nutricional a nivel foliar, el desarrollo radicular, así como la producción y diferentes parámetros que definen la calidad de la cosecha. La hipótesis de partida fue que los protocolos en ecológico minimizarían los riesgos de lixiviación de N a capas más profundas del suelo y que el tratamiento convencional con nitrato inorgánico de síntesis obtendría la mayor producción.

Efectos de las estrategias en el estado hídrico, salino y nutricional del suelo del cultivo de melón

En primer lugar, se determinó la calidad físico-química del agua de riego dado que es un factor crucial en la agricultura e influye directamente en el crecimiento y desarrollo de los

cultivos. En este ensayo, el agua de riego presentó una conductividad eléctrica (CEa) media de 3,53 dS/m, superior al valor máximo recomendado (3 dS/m, según Ayers y Westcot, 1985). Esto fue debido principalmente a que los niveles de Na y Cl⁻ también fueron elevados, aunque dentro de los rangos considerados como normales. Además, la relación de adsorción de sodio (RAS) fue también ligeramente elevada, de 6,37 meq/l. Sin embargo, según el diagrama de estabilidad estructural de los suelos que estima si la capacidad de infiltración puede verse reducida en función de la CEa y RAS del agua de riego (FAO, 1989), el suelo del ensayo no presentaría problemas relacionados con su permeabilidad. Asimismo, algunos elementos químicos como el K, el Mg y el anión NO₃⁻ se encontraron por encima de los valores estimados como normales.

TABLA 1

Valores medios de fotosíntesis neta (F_n), conductancia estomática (g_s) y eficiencia en el uso del agua intrínseca (EUA_i) para el tratamiento convencional control (O) y los tratamientos orgánicos (1, 2 y 3) medidos durante el ciclo de cultivo.

	CONVENCIONAL (TRATAMIENTO 0) $N_{inorg\ síntesis}$	ORGÁNICO (TRATAMIENTO 1) $< N_{org}$	ORGÁNICO (TRATAMIENTO 2) Abonado fondo	ORGÁNICO (TRATAMIENTO 3) $< N_{org}$
F_n ($\mu\text{molCO}_2/\text{m}^2\cdot\text{s}$)	12,5 $\pm$ 5,4	14,8 $\pm$ 5,4	15,4 $\pm$ 4,6	15,4 $\pm$ 6,1
g_s ($\text{molH}_2\text{O}/\text{m}^2\cdot\text{s}$)	0,14 $\pm$ 0,06	0,14 $\pm$ 0,06	0,17 $\pm$ 0,05	0,16 $\pm$ 0,09
EUA_i ($\mu\text{molCO}_2/\text{molH}_2\text{O}$)	91,1 $\pm$ 22,5	108,7 $\pm$ 32,4	93,3 $\pm$ 16,5	105,5 $\pm$ 26,7

TABLA 2
Producción total y clasificada según calibres procedente del primer corte cosechado para todos los tratamientos de fertirrigación aplicados.

1 ^{ER} CORTE	CONVENCIONAL TRATAMIENTO 0) $N_{\text{inorg síntesis}}$	ORGÁNICO (TRATAMIENTO 1) $< N_{\text{org}}$	ORGÁNICO (TRATAMIENTO 2) Abonado fondo	ORGÁNICO (TRATAMIENTO 3) $> N_{\text{org}}$
Producción total (Kg/Ha)	16.291,9	15.446,4	19.925,0	19.190,0
Calibre >7 (> 700 g)	13.033,5	14.365,5	16.936,7	14.392,0
Calibre <7 (< 700 g)	3.258,4 (20%*)	1.081,0 (7%*)	2.988,3 (15%*)	4.798,0 (25%*)
*% respecto a la producción total				

A continuación, para estudiar los cambios producidos por los tratamientos de fertirriego en la calidad físico-química del suelo, se determinaron varios parámetros como son la conductividad eléctrica del suelo (CE_s), el pH y los nitratos (NO_3^-) a diferentes profundidades del suelo, al inicio y al final del ciclo de cultivo.

Los resultados obtenidos de CE_s , que es un indicador clave para evaluar la salinidad y el contenido de nutrientes solubles en el suelo, mostraron que hubo una disminución significativa de los valores de CE_s registrados al final del ciclo vegetativo respecto a los valores medidos al inicio del ensayo, y se observó en todos los tratamientos aplicados y a todas las profundidades evaluadas (20, 30, 60 y 90 cm), a pesar de la elevada CE del agua de riego. Este descenso indicó una reducción en la acumulación de sales solubles en el suelo y, por consiguiente, que durante el desarrollo del cultivo no se aplicó una cantidad de fertilizante superior a la que pudo ser absorbida (Grabowska *et al.*, 2020). La mayor disminución de CE_s se observó a la profundidad de 20 cm en todos los tratamientos (reducciones del 77, 68, 49 y 74% en los tratamientos 0, 1, 2 y 3, respectivamente, desde el inicio hasta el final del ensayo). Por otro lado, el tratamiento orgánico 3 fue el que presentó los valores de CE_s más bajos al final del ensayo, oscilando entre 0,5-0,7 dS/m en todas las profundidades estudiadas.

Es importante destacar que, al comparar los niveles de nitratos medidos al final del ciclo de cultivo respecto a

los del inicio del ensayo, se encontró el hecho favorable de que, disminuyeron significativamente en todos los tratamientos, incluido el convencional, y a todas las profundidades, principalmente en las capas más superficiales (a 30 cm), independientemente del tratamiento. Asimismo, el tratamiento 1 (protocolo orgánico con menos UF de N) fue el que obtuvo porcentajes de reducción más altos que el resto en todas las profundidades (98,2; 96,6; 83,4% a 30, 60 y 90 cm, respectivamente) (**Gráfico 1**).

Por otro lado, en cuanto a los datos de CVA medidos en continuo por los sensores de humedad del suelo, se emplearon para ajustar los riegos (que fueron cada vez más frecuentes y cortos) con el objeto de mantener la humedad del suelo de la capa más superficial a capacidad de campo y asegurar que no hubiera percolación a

capas más profundas del suelo donde no hay actividad radicular.

El sensor de CVA instalado a 25 cm de profundidad del suelo detectó los episodios de fertirrigación durante el ciclo de cultivo, y su CVA estuvo comprendido entre 35 y 44%. Por el contrario, el sensor instalado a 90 cm de profundidad no detectó dichos eventos de riegos, mostrando valores que fluctuaban entre el 23 y 28%.

Por consiguiente, se puede concluir que la programación de fertirriego llevada a cabo durante el ensayo no dio lugar a eventos de drenaje y lixiviación de sales y nutrientes.

Efectos de las estrategias en el estado hídrico y nutricional de la planta y en su desarrollo radicular

El estado hídrico de las plantas se evaluó mediante la medida del in-



tercambio gaseoso foliar, que es fundamental para comprender cómo las plantas interactúan con su entorno y optimizan su crecimiento. En concreto, se determinaron, mediante un equipo portátil de fotosíntesis (LI-COR 6400), dos parámetros clave en tres momentos fenológicos distintos del ciclo de cultivo: la fotosíntesis neta (F_n) y la conductancia estomática (g_s) y se calculó también la eficiencia en el uso del agua intrínseca ($EUA_i = F_n/g_s$).

Los valores medios obtenidos indicaron que las plantas del tratamiento 0 (control) presentaron los niveles más bajos de EUA_i debido a una baja capacidad fotosintética, respecto al resto de tratamientos. Por el contrario, el tratamiento orgánico 2 fue el que mostró valores más altos de F_n y g_s , sugiriendo que sus plantas mantuvieron un buen estado hídrico durante el ciclo (Tabla 1).

Respecto al estado nutricional de las plantas, los niveles de macro y micronutrientes estuvieron en todos los casos dentro de los valores recomendados. Cabe destacar que la concentración de nitratos varió significativamente dependiendo de la estrategia de fertirriego: el tratamiento 0 fue el que más nitratos foliares presentó (1,22%) frente al resto de tratamientos (0,48; 1,04 y

TABLA 3

Parámetros de calidad de los frutos del primer corte para los tratamientos de fertirrigación aplicados

	CONVENCIONAL TRATAMIENTO 0) N_{inorg} síntesis	ORGÁNICO (TRATAMIENTO 1) $< N_{org}$	ORGÁNICO (TRATAMIENTO 2) Abonado fondo	ORGÁNICO (TRATAMIENTO 3) $> N_{org}$
Peso fruto (g)	971,3 ± 162,4	1099,0 ± 164,9	1006,6 ± 155,0	899,4 ± 196,0
Perímetro (cm)	39,2 ± 2,3	41,0 ± 1,9	38,9 ± 2,0	40,9 ± 29,9
Dureza (% DFT)	92,3 ± 4,6	88,9 ± 5,1	90,1 ± 6,7	94,0 ± 5,7
Índice Madurez	6,2 ± 1,3	5,7 ± 1,2	6,7 ± 1,0	7,1 ± 0,9

0,24% para los tratamientos 1, 2 y 3, respectivamente).

Por otro lado, también se determinó si las estrategias de fertirriego afectaron al desarrollo radicular, que tienen una relación directa con su capacidad para absorber nutrientes y agua del suelo. Para ello, se extrajeron raíces completas a las que se les determinó su peso fresco y seco, así como su longitud. El tratamiento orgánico 2 de nuevo destacó por presentar las raíces de mayor longitud (valor medio de 57,80 cm) y de mayor peso (valor promedio de 48,96 g y 7,29 g para el peso fresco y el peso seco, respectivamente).

Efectos de dichas estrategias en la producción y en la calidad de la cosecha

Considerando sólo la producción del primer corte, que en el contexto del

ensayo fue la mejor valorada económicamente, en el cual se recolectaron frutos de categoría I con calibre por encima de 700 g (Calibres ≥ 7), los resultados fueron los siguientes:

Los tratamientos que dieron lugar a producciones comerciales más elevadas fueron, en primer lugar, el tratamiento orgánico 2 y, en segundo lugar, el orgánico 3. Por el contrario, y a diferencia de la hipótesis inicial, uno de los tratamientos con la producción más baja fue el convencional 0, junto con tratamiento orgánico 1 que también fue el que presentó el porcentaje más bajo (7%) de frutos con calibre por debajo de 700 g (Calibre < 7) de todos los tratamientos, a pesar de las pocas UF de N aplicadas (Tabla 2).

Asimismo, una muestra representativa de los frutos recolectados fue sometida a un estudio de calidad en laboratorio mediante la determinación de distintos parámetros que estiman tanto la calidad externa como interna de los frutos, como por ejemplo: el peso del fruto, el perímetro ecuatorial, la dureza, el contenido de sólidos solubles (CSS, °Brix), la acidez titulable (AT, %) y el índice de madurez (IM = CSS/AT).

En el primer corte (Tabla 3), momento en el que también se valora la precocidad de la cosecha, los frutos del tratamiento orgánico 3 lograron el mayor IM (valor medio de 7,11) y dureza (94% DFT), sin embargo, fueron los de menor peso unitario (valor medio: 899,4 g). Por el contrario, fueron los frutos del tratamiento orgánico 1 los que menores niveles de IM (5,68) y dureza (88,86% DFT) presentaron, pero más peso unitario



A MODO DE CONCLUSIÓN

En general, todos los tratamientos de fertirriego aplicados cumplieron con el marco legislativo en vigor. Además, i) no dieron lugar a procesos de lixiviación y drenaje que conllevaran a la contaminación por nitratos de origen agrario de las masas de agua subterráneas, ii) mejoraron la calidad física-química del suelo desde el punto de vista agroambiental, y iii) obtuvieron producciones y calidades de fruto dentro de la normalidad considerando la demanda del mercado en la campaña correspondiente.

(1099,0 g). En general, los frutos del tratamiento orgánico 2 fueron los que presentaron valores más equilibrados de todos los parámetros de calidad y, además, en el segundo corte (datos no mostrados), los que tuvieron el mayor IM, dureza y peso unitario. El protocolo basado en fertilización convencional (tratamiento 0), además de no incrementar la producción frente al resto de protocolos orgánicos, tampoco mejoró el índice de madurez de sus frutos.

Agradecimientos

Esta investigación fue financiada por la CARM a través de la convocatoria de Ayudas a Proyectos para la Generación de Nuevo Liderazgo Científico “Jóvenes Líderes en Investigación”, incluidas en el Programa Regional de Fomento de la Investigación Científica y Técnica (Plan de Actuación 2022) de la Fundación Séneca-Agencia de Ciencia y Tecnología de la Región de Murcia (Proyecto AGRI-SEN 21962/JLI/22), por el MITECO a través de la convocatoria de proyectos estratégicos orientados a la transición ecológica y a la transición digital, del Plan Estatal de Investigación Científica, Técnica y de Innovación para el período 2021-2023 (Proyecto TED2021-130501B-I00) y a través de la Fundación Biodiversidad y la convocatoria de subvenciones para la restauración y mejora ambiental en el ámbito agrícola, para contribuir a la recuperación de la funcionalidad ecológica del mar menor (Proyecto FERTECO) y por el MICIU a través del proyecto “ThinkInAzul”: Estrategia Conjunta de Investigación e Innovación en Ciencias Marinas para abordar de forma sostenible los nuevos desafíos en la Monitorización y Observación Marino-Marítimas, el Cambio Climático, la Acuicultura y otros Sectores de la Economía Azul. Los autores también agradecen el apoyo de la Fundación Séneca (19903/GERM/15).

Bibliografía

Queda a disposición del lector interesado en el correo electrónico: cromero@cebas.csic.es


HEROGRAMA[®]
ESPECIALES



POTENCIA LA RAÍZ DE TU CULTIVO

