HUELLA HÍDRICA Y HUELLA DE CARBONO DEL CULTIVO DE ESPINACA EN SISTEMAS HIDROPÓNICOS

WATER FOOTPRINT AND CARBON FOOTPRINT OF SPINACH CULTIVATION IN HYDROPONIC SYSTEMS

Horacio Liñeiro Astiazaran[1], Blanca Elvira López Valenzuela[1]*, Ana Laura Bautista Olivas[2], Clara Rosalia Álvarez Chávez[3], Soila Maribel Gaxiola Camacho[4], Fernando Alberto Valenzuela Escoboza[1] y Mayra Mendoza-Cariño[5]

[1]Universidad Autónoma de Sinaloa, Facultad de Agricultura del Valle del Fuerte, Posgrado en Ciencias Agropecuarias, Juan José Ríos, Sinaloa, México. [2]Universidad de Sonora, Departamento de Agricultura y Ganadería, Hermosillo, Sonora, México. [3]Universidad de Sonora, Departamento de Ciencias Químico-Biológicas, Posgrado en Sustentabilidad, Hermosillo, Sonora, México. [4]Universidad Autónoma de Sinaloa, Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, Posgrado en Ciencias Agropecuarias, Culiacán, Sinaloa, México. [5]Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, Ciudad de México, México.

**Autora de correspondencia* (blancalopezvzla@favf.mx)

RESUMEN

La producción tradicional de alimentos genera impactos ambientales como la huella hídrica (HH) y la huella de carbono (HC). El objetivo del presente estudio fue evaluar la HH y la HC del cultivo de espinaca (*Spinacia oleracea* L.) en los sistemas hidropónicos técnica de la película nutritiva (TPN) e hidroponía profunda (HP), en condiciones de invernadero. La metodología consistió en la germinación del cultivo al aire libre, el trasplante se realizó en los sistemas hidropónicos TPN y HP. El peso fresco promedio se analizó con la prueba *t* de Student para detectar diferencias entre tratamientos. Finalmente, se calcularon las huellas hídricas directa (HH azul) e indirecta (energía eléctrica y de materiales) y de carbono (HC), con base en el análisis de ciclo de vida y la unidad funcional de 1 kg de espinaca. Según la prueba estadística no hubo diferencia entre tratamientos ($p = 0.138$). El sistema TPN tuvo una HH de 1714.18 L kg^{-1}, la HC de 198.94 kg CO_2 eq kg^{-1} y rendimiento promedio de 1.79 kg m^{-2}; el sistema HP tuvo una HH de 222.22 L kg^{-1}, HC de 273.15 kg CO_2 eq kg^{-1} y rendimiento de 2.24 kg m^{-2}. El sistema HP fue la mejor alternativa (en términos de L m^{-2}), aunque la HC fue menor en TPN según los indicadores ambientales evaluados.

Palabras clave: *Spinacia oleracea* L., análisis del ciclo de vida, hidroponía profunda, técnica de la película nutritiva.

SUMMARY

Traditional food production generates environmental impacts such as water footprint (WF) and carbon footprint (CF). The objective of this study was to evaluate the WF and CF of spinach (*Spinacia oleracea* L.) grown in hydroponic systems of nutrient film technique (NFT) and deep water culture (DWC) under greenhouse conditions. The methodology consisted of germination of the crop outdoors, transplantation was performed in the NFT and DWC hydroponic systems. The average fresh weight was analyzed with the Student's *t*-test to detect differences between treatments. Finally, the direct (blue WF), indirect (electrical and material energy), and CF were calculated, based on the life cycle analysis of the functional unit of 1 kg of spinach. According to the statistical test, there was no difference between treatments ($p = 0.138$). The NFT system had a WF of 1714.18 L kg^{-1}, a CF of 198.94 kg CO eq kg^{-1}, and an average yield of 1.79 kg m^{-2}; the DWC system had a WF of 222.22 L kg^{-1}, a CF of 273.15 kg CO_2 eq kg^{-1}, and a yield of 2.24 kg m^{-2}. The DWC system proved to be the best alternative in terms of L m^{-2}, although the CF was lower in NFT according to the environmental indicators evaluated.

Index words: *Spinacia oleracea* L., deep water culture, life cycle analysis, nutrient film technique.

INTRODUCCIÓN

A escala global el sistema agrícola tradicional (ST) incrementó el uso de la tierra con impactos negativos ambientales (Lal, 2020) como la huella hídrica (HH) y la huella del carbono (HC). La HH representa el volumen de agua que se utiliza en la elaboración de un bien o en el suministro de un servicio e incluye, la HH Azul (agua dulce subterránea o superficial), HH Gris (agua dulce que se utiliza para asimilar los contaminantes) y HH Verde (agua de lluvia) (Hoekstra *et al*., 2021). La HC se refiere al impacto ambiental de gases de efecto de invernadero (GEI) antropogénicos, cuya emisión mundial del sector agrícola es de 27 % (Aguilera *et al*., 2020). Los sistemas hidropónicos (SH) son alternativas debido al manejo eficiente de recursos y calidad productiva (Sharma *et al*., 2018); destacan la técnica de película nutritiva (TPN) y de hidroponía profunda (HP). El objetivo del presente estudio fue evaluar la HH y la HC del cultivo de espinaca (*Spinacia oleracea* L.) en los sistemas TPN y HP en condiciones de invernadero para generar conocimiento sobre alternativas agrícolas sustentables.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El estudio se realizó en la Universidad de Sonora, México, ubicada en las coordenadas geográficas 29°00'47'' latitud norte y 111°08'13'' longitud oeste, a 151 msnm. El clima es BW(h') hw (x') (e') con temperatura media anual de 25 °C y precipitación promedio anual de 246.4 mm (García, 2004).

Recibido: 29 de junio de 2024
Aceptado: 07 de mayo de 2025

DOI: https://doi.org/10.35196/rfm.2025.2.163

Etapa I. Desarrollo del cultivo de espinaca con las técnicas TPN y HP

La semilla (marca Rancho los Molinos®) se sembró en octubre 07 de 2022 en charolas germinadoras de poliestireno (32.5 × 29 cm) en sustrato de peat moss marca Premier®. El cultivo creció al aire libre bajo sombra parcial (32 °C y 55 % de humedad relativa) y riego diario (250 mL de agua) hasta la formación de hojas verdaderas. El 01 de noviembre, se trasplantaron 15 plantas en cada una de las dos bandejas para HP. En TPN se emplearon dos tubos de PVC con 18 plantas en total repitiéndose esa disposición en otro sistema similar. La densidad de siembra fue distinta por la capacidad de los sistemas. El cultivo se desarrolló en invernadero (malla antiáfida 300 µm) después del trasplante en ambos sistemas, se aplicó solución nutritiva (70.72 g L^{-1} de fertilizante: 9-7-37 relación N-P_2O_5-K_2O, 123 g L^{-1} de Ca $(NO_3)_2$ y 57.36 g L^{-1} de $MgSO_4$ (marca Hort Americas®) y 40 mL L^{-1} de insecticida orgánico Neem con jabón potásico cada cinco días.

Los sistemas hidropónicos (SH) se establecieron en un diseño experimental completamente al azar, con dos tratamientos (HP y TPN), considerando a cada planta como una unidad experimental. Para calcular el peso fresco, se agruparon los datos de 30 y 36 plantas, respectivamente, según cada tratamiento. El peso fresco se analizó estadísticamente con la pueba *t* de Student ($p \leq 0.05$). El programa empleado fue minitab versión 18.1 (2017). El análisis metodológico se enfocó en comparar los índices de sustentabilidad ambiental (HH, HC) y los sistemas hidropónicos de riego utilizados (HP, TPN).

Cada sistema TPN contó con un tinaco de 250 L (Rotoplas®) y una bomba sumergible de 800 L h^{1} (Airon®) para la recirculación del agua durante 24 horas. El tinaco se conectó a dos tubos de PVC (10.16 cm × 3 m) con una separación de 16 cm entre ellos. En cada tubo se colocaron nueve plántulas, con una distancia de 24 cm entre sí, sumando un total de 18 plantas en 1.09 m² (Figura 1).

En el sistema HP, cada experimento utilizó un recipiente de polietileno de 200 L con 130 L de solución nutritiva. Se colocó una placa de poliestireno expandido como base (7.62 × 4.45 cm, 0.59 m²) y espuma fenólica con 15 plántulas. La oxigenación se realizó en ciclos de 5 h activas, seguidas de 1 h de descanso, reguladas por una bomba aireadora (ELITE 800®) y un temporizador (Steren®) (Figura 1). Para la evaluación, se estimó el peso promedio de las plantas (Ec. 1) y el rendimiento agrícola (Y) (Ec. 2). En el Cuadro 1 se consignan todas las ecuaciones utilizadas, así como las variables registradas.

Etapa II. Huella hídrica del cultivo de espinaca

La HH_{total} (L kg^{-1}) integró la HH directa y HH indirecta del cultivo tradicional (Hoekstra *et al*. (2021) (Ec. 3-5). Debido a los límites de este trabajo, el cálculo de la $HH_{directa}$ excluyó a HH_{verde} y HH_{gris}; la $HH_{directa}$ solo consideró la HH_{azul} (Ec. 6). Por la falta de información para México, la estimación de la HH de energía eléctrica (HH_{ee}) (Ec. 7) se valoró con 56.78 L kW h^{-1} (valor promedio de nucleoeléctricas y termoeléctricas de EUA (Dieter *et al*., 2018), ya que 3.58 y 81.24 % de la energía producida en México proviene de esas fuentes, respectivamente (Ramos-Gutiérrez y Montenegro-Fragoso, 2012). Con esos datos y el uso de la regla de proporción se determinó la HH_{ee} en 48.16 L kWh^{-1} para México. La bomba sumergible del TPN consumió 0.03 kWh, cuyo valor se multiplicó por el número de días desde el trasplante (90) y por 24 h que funcionó la bomba; en la HP, la bomba aireadora gastó 0.002 kWh por 1800 h (20 h d^{-1}). El material usado se pesó en balanza digital (Marca Ohus Defender 3000, Parsippany, New Jersey, EUA), se calculó la HH de los materiales (Ec. 8 y 9) y la HH_{total} de los sistemas (Ec. 3).

Etapa III. Huella de carbono del cultivo de espinaca

La HC se calculó con el análisis de ciclo de vida (ACV) (Aristizábal *et al*., 2020), que considera la carga ambiental del cultivo (germinación-cosecha) (Figura 2) (Ec. 10). Se estimaron: HC_t (Ec. 11), HC_e (emisiones del consumo y distribución de energía eléctrica del equipo) (Ec. 12), HC_m (emisión indirecta con y sin vida útil generada en el uso del material) (Ec. 13 y 14), la HC_{mSF} valoró la HC de los materiales (excluyó el F_{vu}) y la HC_{final} (Ec. 10).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Desarrollo y rendimiento del cultivo de espinaca

Para cada tratamiento de TPN y HP se colectaron 36 y 30 plantas (2.18 y 1.18 m^2, respectivamente). El peso fresco promedio por planta fue mayor en TPN que en HP (108.2 y 88.1 g/planta). Kumar *et al*. (2023) reportaron 52.1 ± 3.4, 31.4 ± 2.5 y 28.5 ± 2.5 g/planta (var. Delta) en TPN en invernadero con el mismo tratamiento nutritivo, a cielo abierto y cuarto de cultivo en India. Esos valores fueron menores que en este estudio, atribuible al sustrato, suministro nutritivo (10-12 días) y tiempo de cosecha (35 días). El resultado de la prueba *t* de Student indicó que no hubo diferencia significativa entre tratamientos ($p = 0.138$).

Acharya *et al.* (2021) reportaron en India 55.56 ± 5.9, 49.53 ± 4 y 48.14 ± 5.5 g/planta con similar manejo nutritivo en TPN, sin circulación de agua y en suelo a cielo abierto, respectivamente. Dichos valores fueron menores que en este estudio: 48.6 % en TPN, 43.78 % en SH sin circulación

Figura 1. Sistemas hidropónicos TPN (izquierda) y HP (derecha).

de agua *vs*. HP, 55.5 % suelo *vs*. TPN y, 45.36 % suelo *vs*. HP. Las diferencias se asociaron con el reemplazo nutritivo, tiempo de maduración y cosecha: 68 en TPN, 76 en SH sin circulación de agua y 91 días en suelo. En el cultivo de espinaca en Turquía en SH flotante en invernadero, se lograron pesos menores con dosis nutricional completa, media y nula (3.05, 2.89 y 1.47 g/planta, respectivamente) (Öztekin *et al*., 2018); el contraste que se presentó con este trabajo se asoció con el cultivar miniatura Aletta F_1 y tiempo de cosecha (59 días) del experimento.

Los rendimientos obtenidos en el presente estudio fueron 1.79 y 2.24 kg m^{-2} en TPN y HP, éste fue 20.1 % mayor. Los rendimientos aquí obtenidos fueron mayores que aquellos reportados por Alberici *et al*. (2008) y Cocetta *et al*. (2007), cuyos cultivos se desarrollaron en SH flotantes en invernadero en Italia, con nutrición distinta: 0.83 a 1.748 kg m^{-2} y 1.13 a 1.5 kg m^{-2}, respectivamente; ésto se atribuyó al tiempo de cosecha de ambos estudios (< 40 días). Öztekin *et al.* (2018) obtuvieron 1.46 kg m^{-2} y Ranawade *et al*. (2017), 0.93 kg m^{-2} en espinaca var. All Green cultivada en SH. Dichos valores fueron menores que los obtenidos en este trabajo, lo que se vinculó con los sustratos, tratamiento nutritivo y tiempo de cosecha (59 y 60 días, respectivamente). Acharya *et al.* (2021) obtuvieron 3.43 kg m^{-2} con TPN y 2.69 kg m^{-2} en SH sin circulación de agua, por lo que la productividad de este estudio fue 47.81 (TPN) y 16.73 % (HP) menor comparado con los anteriores, lo que se relacionó con el mayor número de plántulas por m^2 del estudio.

Huella hídrica del cultivo de espinaca en los sistemas TPN y HP

La $HH_{directas}$ de HP (67.67 L kg^{-1}) fue más eficiente que TPN (84.63 L kg^{-1}), ya que necesitó 20 % menos agua (Cuadro 2). Mekonnen y Hoekstra (2011) reportaron una $HH_{directa}$ de la espinaca en ST de 132 L kg^{-1} (HH_{azul} = 14 L kg^{-1} y HH_{verde} = 118 L kg^{-1}); en este estudio, la $HH_{directa}$ fue menor, ya que solo se utilizó agua de pozo para todo el ciclo productivo. Fulton *et al.* (2019) reportaron una HH de espinaca en ST en 5 L kg^{-1} y de 1 L kg^{-1} en lechuga (EUA), sin especificar el cálculo. Kim y Kim (2019) indicaron una $HH_{directa}$ de espinaca en ST de 930 L kg^{-1} (930 m^3 t^{-1}); es decir, 3.2 veces mayor que la $HH_{directa}$ promedio de otras hortalizas 287 L kg^{-1} (287 m^3 t^{-1}) como el ajo, cebolla, pimiento y rábano.

El cultivo de lechuga en ST (India) con tratamiento nutritivo indicó 77, 38 y 26 L kg^{-1} con riego de agua de uso corriente, residual y piscícola, respectivamente (Biswas *et al*., 2023). El primer valor se acercó a la HH del TPN de este trabajo; los otros fueron menores y se asociaron con el control de condiciones microclimáticas, el tipo de agua y riego. Platis *et al*. (2021) y Torrellas *et al*. (2012) estimaron la HH_{azul} para el tomate cultivado en SH en Grecia y España (> 50 L kg^{-1} y de 28.8 L kg^{-1}, respectivamente), aunque el segundo se produjo en invernadero tipo multi-túnel en invierno. Las HH de lechuga se aproximan a las de este estudio (Cuadro 2); aquellas de tomate fueron menores.

Son escasos los estudios sobre $HH_{energía}$ y HH_m del cultivo de espinaca en SH. El principal aporte a la HH_{total} fue de la $HH_{energía}$ (TPN 93.37 % y HP 59.11 %), cuya diferencia entre sistemas fue de 91.79 % (Cuadro 3). En la HH_m se estimó una 'HH de inversión' en el establecimiento de infraestructura

Cuadro 1. Ecuaciones matemáticas utilizadas en la metodología

Ecuación	Variable
Etapa I: Desarrollo del cultivo de espinaca con las técnicas TPN y HP	
1. $P_X = \sum_{i=1}^{n} \left(\frac{p(i)}{n}\right) /1000$	Px = peso fresco promedio de la planta de espinaca (kg), *p* = peso fresco individual de cada planta (g), *n* = número total de plantas en los sistemas: TPN (36) y HP (30), A_t = área agrícola total (m^2), Y = rendimiento agrícola (kg m^{-2}).
2. $Y = \frac{Px}{At}$	
Etapa II: Cálculo de la huella hídrica	
3. $HH_{total} = HH_{directa} + HH_{indirecta}$	A_g = gasto de agua en lámina (m) desde la siembra hasta el trasplante (medido con vaso graduado 500 mL), A_{et} = agua evapotranspirada (m) valorada mediante la diferencia de agua de producción disponible A_p (m) y el agua sobrante en los contenedores al momento del trasplante en TPN y HP, Y = rendimiento agrícola (kg m^{-2}), $HH_{energía}$ = HH de la energía del equipo eléctrico usado en los SH (L kg^{-1}), HH_{ee} = volumen hídrico utilizado para generar un kW h en México (L kW h^{-1}), KU = consumo total de kW h usados por equipo (con base en datos del fabricante, número de días y h de uso del equipo), P_x = peso promedio de la planta de espinaca (kg), HH_m = HH de los materiales con vida útil (L kg^{-1}), HH_{mSF} = HH de los materiales sin vida útil (L kg^{-1}), HH_i = HH de insumos empleados en cada sistema (L kg^{-1}), valores obtenidos de la literatura científica, pk = peso de los materiales (kg), F_{vu} = factor de vida útil (unidimensional) que relaciona dicha propiedad de cada material desde la germinación hasta la cosecha, *n* = 5 (número de materiales).
4. $HH_{directa} = HH_{verde} + HH_{gris} + HH_{azul}$	
5. $HH_{indirecta} = HH_{energía} + HH_{materiales}$	
6. $HH_{azul} = \frac{(A_g + A_{et} + A_p)}{Y}$	
7. $HH_{energía} = \frac{HHee \times KU}{Px}$	
8. $HH_m = \sum_{z=1}^{5} \left(\left(\frac{HH_{i(z) \times pk}}{P_x}\right) \times F_{vu}\right)$	
9. $HH_{mSF} = \sum_{z=1}^{5} \left(\frac{HH_{i(z) \times pk}}{P_x}\right)$	
Etapa III. Huella de carbono del cultivo de espinaca	
10. $HC_f = HC_t + HC_e + HC_m$	HC_f = HC final (kg CO_2 eq kg^{-1}), HC_t = HC relativa al transporte de los materiales utilizados (kg CO_2 eq kg^{-1}), HC_e = HC de la energía empleada (kg CO_2 eq kg^{-1}), HC_m = HC de los materiales empleados (kg CO_2 eq kg^{-1}), HC_t = HC de transporte generada por el uso de gasolina del automóvil (kg CO_2 eq kg^{-1}), d = distancia recorrida del almacén al sitio experimental (km), t = número de días de recorrido (45), R_{aj} = rendimiento ajustado del vehículo (km L^{-1}), datos de marca Volkswagen modelo Gol y año 2019 (kg CO_2 eq L^{-1}) (INECC, 2023), FE_g = factor de emisión (FE) por litro de gasolina en México (2.32 kg CO_2 eq L^{-1}) (INECC, 2014), P_x = peso fresco promedio de la planta (kg), HC_e = HC de generación de energía (kg CO_2 eq kg^{-1}), KU = cantidad total de kW h utilizados por el equipo eléctrico, FE_{se} = factor de emisión del sistema eléctrico nacional (0.435 kg CO_2 eq kWh^{-1}, año 2022) (CRE, 2023), HC_m = suma de la HC del uso de materiales (kg CO_2 eq kg^{-1}), HC_i = HC de insumos (kg CO_2 eq kg^{-1}); F_{vu} = factor de vida útil (unidimensional), Pk = peso de los materiales (kg), *n* = 4 número de materiales.
11. $HC_t \frac{\frac{d \times t}{Raj} \times FEg}{P_x}$	
12. $HC_e = \left(\frac{KU \times FE_{se}}{P_x}\right)$	
13. $HC_m = \sum_{z=1}^{4} \left[\left(\frac{HC_{i(z) \times pk}}{P_x}\right) \times F_{vu}\right]$	
14. $HH_{mSF} = \sum_{i=1}^{4} \left(\frac{HC_{i(z) \times pk}}{P_x}\right)$	

HC, huella de carbono, HH: huella hídrica.

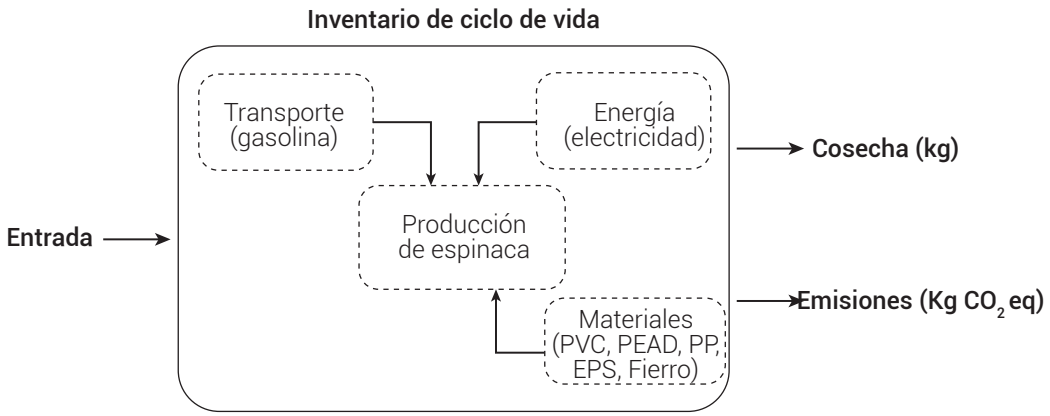

Figura 2. Análisis de ciclo de vida (ACV) en los sistemas hidropónicos TPN y HP para la producción de espinaca.

Cuadro 2. Huella hídrica directa de producción en los sistemas hidropónicos TPN y HP.

Proceso	TPN		HP	
	Lámina (m)	HH_{azul} (m^3 kg^{-1})	Lámina (m)	HH_{azul} (m^3 kg^{-1})
Volumen agua de riego en germinación (A_g)	0.0014	0.0008	0.0014	0.0006
Volumen agua evapotranspirada (A_{et})	0.0200	0.0112	0.0200	0.0089
Volumen de agua de producción (A_p)	0.1300	0.0727	0.1300	0.0581
Total		0.0846		0.0677
$HH_{directa\ azul}$		84.63 L kg^{-1}		67.67 L kg^{-1}

Cuadro 3. Huella hídrica de energía en los sistemas hidropónicos TPN y HP.

Equipo eléctrico	HH_{ee} (L kW h^{-1})	C (kW h)	Tiempo (h)	KU (kWh)	VC (L)	$HH_{energía}$ (L kg^{-1})
BE (TPN)	48.16	0.03	2160	64.8	3120.77	1600.39
BA (HP)	48.16	0.002	1800	3.6	173.38	131.35

C: consumo eléctrico del equipo, BA: bomba aireadora, BE: bomba eléctrica, HH_{ee}: huella hídrica para producir un kWh para México [Dato adaptado con información de USGS (2019) y CFE (2021)], KU: kWh total utilizados por equipo, VC: volumen de agua consumido.

de los sistemas (incluyeron la vida útil de los materiales), la HH_{mSF} en TPN fue de 2542.94 L kg^{-1} y en HP 909.69 L kg^{-1}; no obstante, los materiales se utilizarán en más ciclos productivos, por lo que al evaluar el F_{vu}, la HH_m disminuyó (TPN 29.16 L kg^{-1} y HP 23.20 L kg^{-1}) (Cuadro 4).

La HC_t fue mayor en HP (271.34 kg CO_2 eq kg^{-1}), con una diferencia entre sistemas de 32.31 % (Cuadro 5). La $HC_{energía}$ se asoció con el uso del equipo eléctrico (Cuadro 6), tiempo de operación y consumo energético: 14.46 (TPN) y 1.19 (HP) kg CO_2 eq kg^{-1}, respectivamente. La HC_m fue mayor en TPN que en HP (0.81 *vs.* 0.62 kg CO_2 eq kg^{-1}) (Cuadro 7), la relación se mantuvo en la HC_{SF} (28.39 *vs.* 22.58 kg CO_2 eq kg^{-1}) con la exclusión del F_{VU}. Las HC_m fueron menores que las HC_{mSF} en ambos sistemas: 2.85 (TPN) y 2.74 % (HP) de éstas. La HC_{final} fue mayor en HP que en NTF (273.15 *vs.*198.94 kg CO_2 eq kg^{-1}) con F_{VU}, pero menor cuando se excluyó (295.11 *vs.* 226.53 kg CO_2 eq kg^{-1}).

Según Salís-Rufí *et al.* (2020), la HC del cultivo de espinaca

Cuadro 4. Huella hídrica de los materiales en los sistemas hidropónicos TPN y HP.

Material	Huella hídrica		Vida útil		Fvu	TPN				HP			
	HH_i	Fuente	A	Fuente		P	VC	HH_m	HH_{mSF}	P	VC	HH_m	HH_{mSF}
	(L kg^{-1})					(kg)	(L)	(L kg^{-1})		(kg)	(L)	(L kg^{-1})	
PVC	16.51	Wang *et al.* (2019)	5	Zaman y Newman (2021)	0.049	8.10	133.74	3.36	68.58	0.08	1.32	0.05	1.00
EM	705.18	Kluender (2013)	40	Hernández (2019)	0.006	5.25	3702.20	11.39	1898.56	N/A	N/A	N/A	N/A
F	0.18	Tolón *et al.* (2013)	N/A	Tolón *et al.* (2013)	N/A	0.19	0.03	0.02	0.02	0.19	0.03	0.02	0.02
TPEAD	123.45	Haghighi *et al.* (2018)	10	Sendanayake (2016)	0.025	7.90	975.26	12.50	500.13	9.25	1141.91	21.63	864.43
CPP	590.00	Korol *et al.* (2019)	10	Sendanayake (2016)	0.025	0.25	147.50	1.89	75.64	0.09	53.10	1.01	40.20
EPS	26.67	Hidalgo-Crespo *et al. (2022)*	2	*in situ*	0.123	N/A	N/A	N/A	N/A	0.20	5.33	0.50	4.04
$HH_{material}$								29.16	2542.94			23.20	909.69
HH_{total}								1714.18	4227.96			222.22	1108.71

A: años, CPP: canastillas de polipropileno, EM: estructura metálica, EPS: poliestireno expandido, F: fertilizante, F_{VU}: factor de vida útil, HH_i: huella hídrica de insumos con datos obtenidos de la literatura, HH_m: huella hídrica que incluyó la vida útil de materiales, HH_{mSF}: huella hídrica que excluyó factor de vida útil de materiales, N/A: no aplica, P: peso, PVC: tubería de policloruro de vinilo, TPEAD: tanque de polietileno de alta densidad, VC: volumen de agua consumido.

Cuadro 5. Huella de carbono del transporte en sistemas hidropónicos TPN y HP.

Transporte	FE_g † (kg CO_2 eq L^{-1})	R_{aj} † (km L^{-1})	D (km)	V (L)	Emisiones (kg CO_2 eq)	HC_t TPN (kg CO_2 eq kg^{-1})	HC_t HP (kg CO_2 eq kg^{-1})
Automóvil	2.322	13.42	2070	154.25	358.16	183.67	271.34

†D: distancia, FE_g: factor de emisión de la gasolina, HC_t: huella de carbono del transporte, R_{aj}: rendimiento ajustado del vehículo, V: volumen de gasolina consumida. †(INECC, 2014).

Cuadro 6. Huella de carbono de energía en los sistemas hidropónicos TPN y HP.

Equipo eléctrico	FE_{se} (kg CO_2 eq kW h^{-1})	C (kWh)	Tiempo (h)	KU (kW h)	E (kg CO_2 eq)	HC_e (kg CO_2 eq kg^{-1})
BE (TPN)	0.435	0.03	2160	64.8	28.19	14.46
BA (HP)	0.435	0.002	1800	3.6	1.57	1.19

BA: bomba de aire, BE: bomba eléctrica, C: consumo eléctrico del equipo, E: emisión, FE_{se}: factor de emisión del sistema eléctrico nacional (CRE, 2023), HC_e: huella de carbono por consumo eléctrico, KU: kWh total utilizados.

Cuadro 7. Huella de carbono de los materiales en los sistemas hidropónicos TPN y HP.

HC			Vida útil		Fvu	TPN				HP			
Material	HC_i ††	Fuente	A	Fuente		P†	E¶	HC_m ††	HC_{mSF} ††	P†	E¶	HC_m ††	HC_{mSF} ††
PVC	2.16	EPA (2015)	5	Zaman y Newman (2021)	0.049	8.10	17.50	0.44	8.97	0.08	0.17	0.01	0.13
EM	2.46	Burchart-Korol (2013)	40	Hernández (2019)	0.006	5.25	12.92	0.04	6.62	N/A	N/A	N/A	N/A
TPEAD	3.11	EPA (2015)	10	Sendanayake (2016)	0.025	7.90	24.57	0.32	12.60	9.25	28.77	0.54	21.79
CPP	1.58	Alsabri and Al-Ghambdi (2020)	10	Sendanayake (2016)	0.025	0.25	0.40	0.01	0.20	0.09	0.14	0.00	0.11
EPS	3.66	Hidalgo-Crespo *et al*. (2022)	2	*In situ*	0.123	N/A	N/A	N/A	N/A	0.20	0.73	0.07	0.55
HCm								0.81	28.39			0.62	22.58
HC_{final}								198.94	226.52			273.1	295.11

A: años, CPP. canastillas de polipropileno, EM: estructura metálica, EPS: poliestireno expandido, F. fertilizante, F_{VU}: factor de vida útil, HC_f: huella de carbono final, HC_i: huella de carbono de insumos datos obtenidos de la literatura, HC_m: huella de carbono que incluyó la vida útil de materiales, HC_{mSF}: huella de carbono que excluyó factor de vida útil de materiales, N/A: no aplica, P. peso, PVC: tubería de policloruro de vinilo, TPEAD: tanque de polietileno de alta densidad. †kg, †† kg CO_2 eq kg^{-1}, ¶kg CO_2 eq.

en SH en invernadero (España), generó emisiones menores (6.84 ± 1.83 kg CO_2 eq kg^{-1}) con respecto al presente estudio, eso se explica debido a que en aquel estudio se incluyeron emisiones de extracciones de materias primas y se excluyeron las de materiales; también, influyó la HC_t de éstos. Los estudios de HC en cultivo de lechuga en TPN en España señalaron 0.11 kg CO_2 eq kg^{-1}, lo que se asoció con la infraestructura del sistema de riego (40.3 %) y la continua operación de bombas eléctricas (29 %) (Martínez-Maté *et al*., 2018). La HC_{final} de la cadena productiva se valoró en 0.48-17.8 kg CO_2 eq kg^{-1} en Sudáfrica en SH, 0.15 en Gran Bretaña y en 10 kg CO_2eq kg^{-1} para ST en los Estados

Unidos de América (Casey *et al*., 2022). La diferencia de valores contra los resultados de este estudio se atribuyó al uso de energías renovables en el SH e insumos de electricidad 100 % renovables en ambos sistemas.

La HC_{final} del tomate (var. Alma Bella e Idoll) en SH en Grecia estimada con el ACV: ± 0.1 kg CO_2 eq kg^{-1} (Platis *et al*., 2021) fue menor en comparación con este estudio, lo que se vinculó con las HC_e y HC_m que solo consideraron el uso de paneles solares y el periodo productivo. Martin-Gorriz *et al*. (2021) y Torellas *et al*. (2012) señalaron HC de 0.24 y 0.25 kg CO_2 eq kg^{-1} en SH (España), respectivamente, en invernadero multi-túnel, sin calefacción y uso de energías renovables. Las HC en ST fueron 0.031 kg CO_2 eq kg^{-1} para monocultivos de espinaca (var. Nueva Zelanda) (Brasil); 0.82 kg CO_2eq kg^{-1} de col (var. Top Bunch) – espinaca, para un año agrícola (un ciclo para col y cinco para espinaca), y 0.030 kg CO_2 eq kg^{-1} en sistema intercalado, lo que redujo en 64 % la HC en el sistema intercalado *vs*. monocultivo (Pereira *et al*., 2022). Al comparar ese estudio con el presente (273.15 en TPN y 198.94 kg CO_2 eq kg^{-1} en HP), aquellas HC son menores pese a que evaluaron HC_t (transporte de plántulas y fertilizantes), HC_m (generada en la germinación, combustible, agroquímicos y sistema de riego) y HC_e (riego); la HC_e fue el elemento de mayor aporte en la HC del SH, en contraste con el ST.

CONCLUSIONES

Las huellas hídricas y de carbono del cultivo de espinaca en sistemas hidropónicos en invernadero se estimaron en 1714.18 L kg^{-1} y 198.94 kg CO_2 eq kg^{-1} en TPN y 222.22 L kg^{-1} y 273.15 kg CO_2 eq kg^{-1} en HP, respectivamente. El principal aporte en la huella hídrica calculada con factor de vida útil de materiales fue la energía consumida (93.37 % en TPN y 59.11 % en HP), en la que se excluyó dicho factor, fue la huella hídrica de materiales (60.15 % en TPN y 82.05 % en HP). La mayor contribución de emisiones estimada con factor de vida útil fue en la huella de carbono de transporte, en contraste con la que excluyó el factor (92.32 *vs*. 81.08 en TPN y 99.34 *vs*. 91.95 % en HP). La HP tuvo mayor rendimiento y menor consumo energético y HH comparados con TPN.

BIBLIOGRAFÍA

Acharya S., K. Kumar, N. Sharma, V. K. Tiwari and O. P. Chaurasia (2021) Yield and quality attributes of lettuce and spinach grown in different hydroponic systems. *Journal of Soil and Water Conservation* 20:342-349, https://doi.org/10.5958/2455-7145.2021.00043.6

Aguilera E., P. Piñero, J. Infante A., M. González M., L. Lassaletta y A. Sanz C. (2020) Emisiones de Gases de Efecto Invernadero en el Sistema Agroalimentario y Huella de Carbono de la Alimentación en España. Real Academia de Ingeniería. Madrid, España. 109 p.

Alberici A., E. Quattrini, M. Penati, L. L. Martinetti, P.M. Gallina and M. Schiavi (2008) Effect of the reduction of nutrient solution concentration on leafy vegetables quality grown in floating system. *Acta Horticulturae* 801:1167-1176, https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2008.801.142

Alsabri A. and S. Al-Ghamdi (2020) Carbon footprint and embodied energy of PVC, PE, and PP piping: Perspective on environmental performance. *Energy Reports* 6:364-370, https://doi.org/10.1016/j.egyr.2020.11.173

Aristizábal A. C. E., J. L. González M. y J. C. Gutiérrez C (2020) Análisis del ciclo de vida y cálculo de la huella de carbono para un proceso de reciclaje de botellas PET en Medellín (ANT). *Revista Producción + Limpia* 15:7-24, https://doi.org/10.22507/pml.v15n1a1

Biswas A., S. Duary, A. Islam and S. Bhattacharjee (2023) Water footprint and productivity of lettuce with non-conventional water resources. *Biological Forum* 15:1-4.

Burchart-Korol D. (2013) Life cycle assessment of steel production in Poland: a case study, *Journal of Cleaner Production* 54:235-243, https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.04.031

Casey L., B. Freeman, K. Francis, G. Brychkova, P. Mckeown, C. Spillane, … and D. Styles (2022) Comparative environmental footprints of lettuce supplied by hydroponic controlled-environment agriculture and field-based supply chains. *Journal of Cleaner Production* 369:133214, https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133214

CFE, Comisión Federal de Electricidad (2021) Generación de energía de la CFE con base en tecnologías limpias. Ciudad de México, México. https://app.cfe.mx/Aplicaciones/OTROS/Boletines/boletin?i=2383#:~:text=Las%20inyecciones%20a%20la%20red%20de%20la%20generaci%C3%B3n%20propia%20de,de%20generaci%C3%B3n%20de%2098%2C635%20GWh (Mayo 2025).

Cocetta G., E. Quattrini, M. Schiavi, L. Martinetti, A. Spinardi and A. Ferrante (2007) Nitrate and sucrose content in fresh-cut leaves of spinach plants grown in floating system. *Agricultural Medicine* 137:79-85.

CRE, Comisión Reguladora de Energía (2023) Factor de emisión del Sistema Eléctrico Nacional. Comisión Reguladora de Energía - Gobierno de México. Ciudad de México, México. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/806468/4_-Aviso_FE_2022__1_(Agosto 2023)

Dieter C. A., M. A. Maupin, R. R. Caldwell, M. A. Harris, T. I. Ivahnenko, J. K. Lovelace, … and K. S. Linsey (2018) Estimated use of water in the United States in 2015. Circular 1441. US Geological Survey. Reston, Virginia, USA. 65 p, https://doi.org/10.3133/cir1441

EPA, Environmental Protection Agency (2015) WARM and Plastics. Environmental Protection Agency. Washington, D. C. USA. https://archive.epa.gov/epawaste/conserve/tools/warm/pdfs/Plastics.pdf (Mayo 2025).

Fulton J., M. Norton, and F. Shilling (2019) Water-indexed benefits and impacts of California almonds. *Ecological Indicators* 96:711-717, https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.12.063

García E. (2004) Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen. Instituto de Geografía, UNAM. México, D.F. 97 p.

Haghighi E., K. Madani and A. Y. Hoekstra (2018) The water footprint of water conservation using shade balls in California. *Nature Sustainability* 1:358-360, https://doi.org/10.1038/s41893-018-0092-2

Hernández M. S. (2019) Degradación y Durabilidad de Materiales y Componentes Constructivos. UNAM. México, D. F. 206 p.

Hidalgo-Crespo J., M. Soto, J. L. Amaya-Riva and M. Santos-Méndez (2022) Carbon and water footprint for the recycling process of expanded polystyrene (EPS) post-consumer waste. *Procedia CIRP* 105:452-457, https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.02.075

Hoekstra A., A. Chapagain, M. Aldaya y M. Mekonnen (2021) Manual de Evaluación de la Huella Hídrica. Establecimiento del Estándar Mundial. AENOR. Madrid, España. 244 p.

INECC, Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (2014) Factores de emisión para los diferentes tipos de combustibles fósiles y alternativos que se consumen en México. Convenio INECC/A1-008/2014. INECC. Ciudad de México, México. 46 p.

INECC, Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (2023) Portal de Indicadores de Eficiencia Energética y Emisiones Vehiculares. INECC. Ciudad de México, México. https://ecovehiculos.inecc.gob.mx/ (Abril 2023).

Kim I. and K. S. Kim (2019) Estimation of water footprint for major agricultural and livestock products in Korea. *Sustainability* 11:2980, https://doi.org/10.3390/su11102980

Kluender E. (2013) Quantification of water footprint: calculating the amount of water needed to produce steel. *The Journal of Purdue Undergraduate Research* 3:50-57, https://doi.org/10.5703/jpur.03.1.08

Korol J., A. Hejna, D. Burchart-Korol, B. Chmielnicki and K. Wypiór (2019) Water footprint assessment of selected polymers, polymer blends, composites, and biocomposites for industrial application. *Polymers* 11:1791, https://doi.org/10.3390/polym11111791

Kumar K., K. Kumari, S. Acharya, T. Tsewang, A. Mishra, A. Verma and O. P. Chaurasia (2023) Evaluation of spinach and lettuce production (growth, morphological characteristics, biomass yield, and nutritional quality) in NFT hydroponic system in greenhouse, room, and open environment at Leh, India. *European Chemical Bulletin* 12:5421-5435, https://doi.org/10.31838/ecb/2023.12.5.419

Lal R. (2020) Food security impacts of the "4 per Thousand" initiative. *Geoderma* 374:114427, https://doi.org/10.1016/j.geoderma,2020.114427

Martínez-Maté M Á., B. Martín-Górriz y J. F. Maestre-Valero (2018) Análisis energético y de emisiones de gases de efecto invernadero de dos sistemas de producción de lechuga. *In:* Proceedings of the 6th Workshop on Agri-Food Research–WiA.17. Universidad Politécnica de Cartagena, 7-8 mayo 2017. Murcia, España. pp:176-179, https://doi.org/10.31428/10317/11082

Martin-Gorriz B., J. F. Maestre-Valero, B. Gallego-Elvira, P. Marín-Membrive, P. Terrero and V. Martínez-Alvarez (2021) Recycling drainage effluents using reverse osmosis powered by photovoltaic solar energy in hydroponic tomato production: environmental footprint analysis. *Journal of Environmental Management* 297:113326, https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113326

Mekonnen M. M. and A. Y. Hoekstra (2011) The green, blue and grey water footprint of crops and derived crop products. *Hydrology and Earth System Sciences* 15:1577-1600, https://doi.org/10.5194/hess-15-1577-2011

Öztekin G. B., T. Uludağ and Y. Tüzel (2018) Growing spinach (*Spinacia oleracea* L.) in a floating system with different concentrations of nutrient solution. *Applied Ecology and Environmental Research* 16:3333-3350, https://doi.org/10.15666/aeer/1603_33333350

Pereira B. J., A. B. C. Fihlo, N. La Scala and E. B. de Figueiredo (2022) Greenhouse gas emissions and carbon footprint of collard greens, spinach and chicory production systems in Southeast of Brazil. *Frontiers in Plant Science* 13:1015307, https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1015307

Platis D. P., A. P. Mamolos, K. L. Kalburtji, G. C. Menexes, C. D. Anagnostopoulos and A. Tsaboula (2021) Analysis of energy and carbon and blue water footprints in agriculture: a case study of tomato cultivation systems. *Euro-Mediterranean Journal for Environmental Integration* 6:12, https://doi.org/10.1007/s41207-020-00225-4

Ramos-Gutiérrez L. J. y M. Montenegro-Fragoso (2012) La generación de energía eléctrica en México. *Tecnología y Ciencias del Agua* 3:197-211.

Ranawade P. S., S. D. Tidke and A. K. Kate (2017) Comparative cultivation and biochemical analysis of spinacia oleraceae grown in aquaponics, hydroponics and field conditions. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences* 6:1007-1013, https://doi.org/10.20546/ijcmas.2017.604.124

Salís-Rufí M., A. Petit-Boix, G. Villalba, M. Ercilla-Montserrat, D. Sanjuan-Delmás, F. Parada, … and X. Gabarrell (2020) Identifying eco-efficient year-round crop combinations for rooftop greenhouse agriculture. *International Journal of Life Cycle Assessment* 25:564-576, https://doi.org/10.1007/s11367-019-01724-5

Sendanayake S. (2016) Life cycle analysis of ferrocement rainwater tanks in Sri Lanka: a comparison with RCC and HDPE tanks. *International Journal of Advances in Engineering Research* 12:30-42.

Sharma N., S. Acharya, K. Kumar, N. Singh and O. P. Chaurasia (2018) Hydroponics as an advanced technique for vegetable production: an overview. *Journal of Soil and Water Conservation* 17:364-371, https://doi.org/10.5958/2455-7145.2018.00056.5

Tolón B. A., X. B. Lastra y V. J. Fernández M. (2013) Huella hídrica y sostenibilidad del uso de los recursos hídricos. Aplicación al Poniente Almeriense. *Revista Electrónic@ de Medio Ambiente* 14:56-86.

Torrellas M., A. Antón, J. C. López, E. J. Baeza, J. Pérez P., P. Muñoz and J. I. Montero (2012) LCA of a tomato crop in a multi-tunnel greenhouse in Almeria. *The International Journal of Life Cycle Assessment* 17:863-875, https://doi.org/10.1007/s11367-012-0409-8

USGS, United States Geological Survey (2019) Thermoelectric power water use. United States Geological Survey, US Department of the Interior. Reston, Virginia, USA. https://www.usgs.gov/mission-areas/water-resources/science/thermoelectric-power-water-use#:~:text=On%20average%2C%2015%20gallons%20(gal,Sources%2FUsage%3A%20Public%20Domain (May 2025).

Wang F., S. Wang, Z. Li, H. You, K. Aviso, R. Tan and X. Jia (2019) Water footprint sustainability assessment for the chemical sector at the regional level. *Resources, Conservation and Recycling* 142:69-77, https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.11.009

Zaman A. and P. Newman (2021) Plastics: are they part of the zero-waste agenda or the toxic-waste agenda? *Sustainable Earth* 4:4, https://doi.org/10.1186/s42055-021-00043-8