

Huella hídrica de la producción de lechuga en sistemas acuapónico e hidropónico

Ana Laura Bautista-Olivas¹
Mayra Mendoza-Cariño^{2,§}
Clara Rosalía Álvarez Chávez¹
Ángel Carlos Sánchez Mexía¹

1 Departamento de Agricultura y Ganadería-Universidad de Sonora. Carretera Bahía de Kino km 21, Hermosillo, Sonora, México. AP. 305. (ana.bautista@unison.mx; clara.alvarez@unison.mx; angel.mexia@unison.mx).

2 Facultad de Estudios Superiores Zaragoza-Universidad Nacional Autónoma de México. Batalla 5 de mayo s/n, esquina Fuerte de Loreto, Col. Ejército de Oriente, Iztapalapa, Ciudad de México, México. CP. 09230.

Autora para correspondencia: mayra.mendoza@zaragoza.unam.mx

Resumen

La agricultura sostenible permite el uso eficiente de los recursos naturales, particularmente del agua. El objetivo de este trabajo fue comparar la huella hídrica del cultivo de lechuga (*Lactuca sativa* L.) en dos sistemas de producción: acuapónico e hidropónico, para conocer su impacto en los recursos hídricos. Ambos sistemas productivos se establecieron en una casa sombra en el estado de Sonora, México. El experimento se realizó del 20 de mayo al 29 de julio de 2020. La estimación de la HH_{total} se calculó mediante la suma de las huellas hídricas azules, consumo de lámina de agua en el desarrollo del cultivo) y de los insumos y materiales utilizados en cada sistema (con base en información de la literatura científica). Los resultados indicaron un peso promedio de lechuga cosechada de 0.056 kg (± 0.005 kg) en el sistema acuapónico y de 0.097 kg (± 0.007 kg) en el sistema hidropónico. El análisis estadístico se evaluó con la prueba t de student con un nivel de significancia de 5%. Las HHA estimadas fueron 0.2941 y 0.1721 $m^3 kg^{-1}$, las HH_{total} fueron 2.6841 $m^3 kg^{-1}$ y de 0.1821 $m^3 kg^{-1}$ para los sistema acuapónico y sistema hidropónico, respectivamente, para 19 plantas en cada sistema. Los valores de las HH_{total} fueron elevados ya que representan la suma de las huellas hídricas azules y de la $HH_{insumos\ y\ materiales}$. Los resultados de esta investigación confirmaron la hipótesis planteada, al registrar una mayor huella hídrica el sistema acuapónico. Sin embargo, es conveniente generar mayor conocimiento en el tema.

Palabras clave:

cuarto de cultivo, sistema NTF, técnicas agrícolas sustentables, tilapia.



Introducción

La huella hídrica (HH) es un indicador del volumen total de agua dulce que se emplea directa e indirectamente para producir un bien o servicio (Oltra y Melgarejo, 2020) y expresa la presión y los impactos ambientales que las actividades productivas ejercen sobre los recursos hídricos. La HH es una herramienta para la conservación de la biodiversidad y de análisis para la sostenibilidad (Shi *et al.*, 2017) impulsada por la creciente demanda, escasez y degradación de la calidad del agua.

La HH del sector agrícola establece lineamientos para el uso y la gestión integral del agua (Zárate *et al.*, 2017), en la política pública y en la investigación científica. La HH agrícola representa 86% de la HH de la humanidad (Hoekstra y Chapagain, 2008) y mide la HH de la cadena de suministro del producto: cultivo, procesamiento, fabricación, transporte y venta del producto (Martínez, 2013).

La HH se integra por la HH azul (HHA) que es el volumen de agua dulce para el riego del cultivo, se asocia con el déficit y la calidad hídrica; la HH verde (HHV) es el volumen de lluvia que las plantas almacenan y consumen (evapotranspiración), por lo que es aprovechado por el cultivo, la HH gris (HHG) es el volumen de agua necesario para diluir los contaminantes (agroquímicos) hasta que sean inofensivos (Hoekstra y Mekonnen, 2011), solo considera el flujo de residuos del contaminante más crítico a cuerpos hídricos, y valora parte de los agroquímicos empleados (Hoekstra *et al.*, 2011).

Los sistemas acuapónicos (SA) e hidropónicos (SH) representan nuevas formas productivas con un impacto ambiental menor (Wilson, 2018). El SA combina la acuicultura con la hidroponía y tiene ventajas (bajos costos operativos, menor uso de agroquímicos, reúso del agua en el sistema y productividad vegetal con valor agregado) sobre los sistemas agrícolas tradicionales (SAT), aunque presenta limitaciones (depende de la electricidad para el funcionamiento de las bombas de agua y de aireación y la complejidad ecológica que arriesga el sistema ante cualquier fallo (como la densidad correcta de microorganismos, peces y plantas).

Por su parte, el SH de hortalizas utiliza dos técnicas: raíz flotante y NFT (Nutrient Film Technique) por sus siglas en inglés: en la primera, la hortaliza crece directamente sobre el agua, con la solución nutritiva disuelta en ella y sin sustrato, con la técnica NFT la planta crece sobre una lámina de agua en continuo movimiento enriquecida con soluciones nutritivas. El SH requiere 82 veces más energía que un SAT, pero 92% menos de agua y produce 11 veces más rendimiento por área (Barbosa *et al.*, 2015).

La lechuga es una hortaliza popular a escala mundial, México fue el noveno productor en 2019 y 2020 (SADER, 2019) con 516 000 y 539 000 t, respectivamente (SIAP, 2021). En 2019 Baja California, Puebla y Sonora fueron los estados con mayor superficie cosechada, pero Sonora tuvo el mayor rendimiento (SIAP, 2019). En 2017, este cultivo se convirtió en uno de los principales productos agrícolas de exportación de Sonora con 10 241 t (SAGARHPA, 2018).

El objetivo de la investigación fue estimar la huella hídrica del cultivo de lechuga (*Lactuca sativa* L.) en los sistemas acuapónico e hidropónico para determinar el impacto sobre los recursos hídricos, en comparación con el sistema convencional de producción y, generar conocimiento en el tema. La hipótesis fue que el sistema acuapónico tiene mayor huella hídrica que el sistema hidropónico.

Materiales y métodos

El estudio se realizó en el vivero del Departamento de Agricultura y Ganadería de la Universidad de Sonora, México, en las coordenadas geográficas 29° 00' 47" latitud norte y 111° 08' 13" longitud oeste, a una altitud 151 m. El clima de la región es BW(h') hw (x') (e') caracterizado por una temperatura media anual de 25 °C y una precipitación anual de 246.4 mm (García, 2004). El experimento se realizó de 20 de mayo a 29 de julio de 2020 y comprendió las siguientes etapas.

Etapa I: establecimiento de los sistemas acuapónico e hidropónico

El trabajo se realizó en una casa sombra cubierta con una malla tejida de 20 x 10 hilos en 1 cm² (300 micras) de color cristal. En el suelo del interior de la casa se hicieron dos agujeros, de 70 cm de diámetro y 80 cm de profundidad. En cada uno de ellos, se introdujo un tinaco Rotoplas[®] de 250 L de capacidad, uno para el SA y otro para el SH. El suelo alrededor de los tinacos se cubrió de grava blanca, a fin de reflejar los rayos y evitar la absorción de calor. Para el reciclamiento del agua se empleó en cada uno de los sistemas productivos, una bomba Airon[®] de 800 L h⁻¹ y un blower de 1 HP monofásico 110 V y 11.6 A.

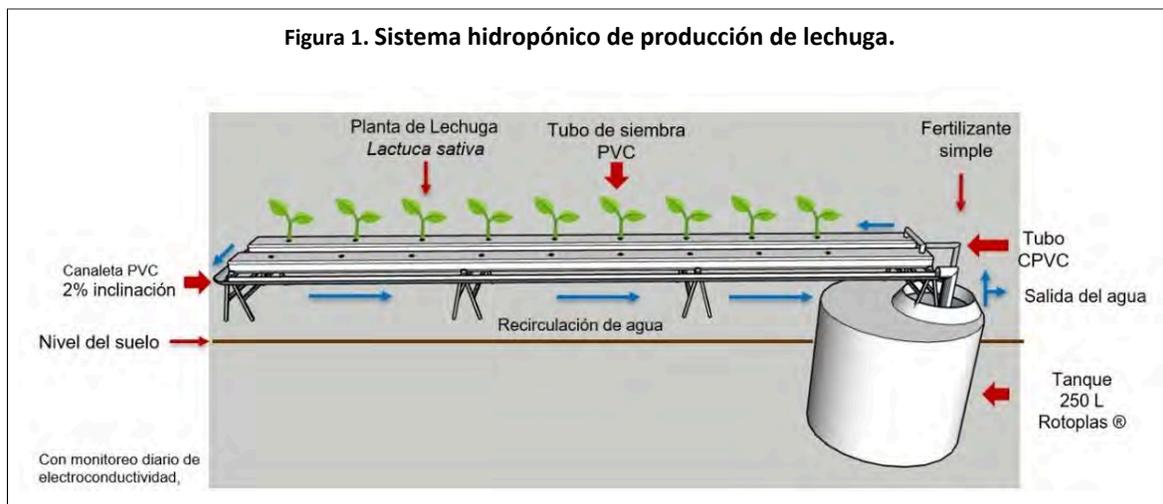
En el SA se colocó un biofiltro elaborado con 1 m de material de polietileno de alta densidad (HDPE), corrugado, cortado en trozos y almacenado en una cubeta de 20 L. Luego, se integraron los microorganismos nitrificantes y el 20 de mayo inició el reciclamiento del agua. Las concentraciones (ppm) de amoníaco (NH₃), nitritos (NO₂⁻) y nitratos (NO₃⁻) se midieron diariamente (por triplicado) con un kit API máster kit test según el instructivo del kit, a partir de muestras de 5 ml.

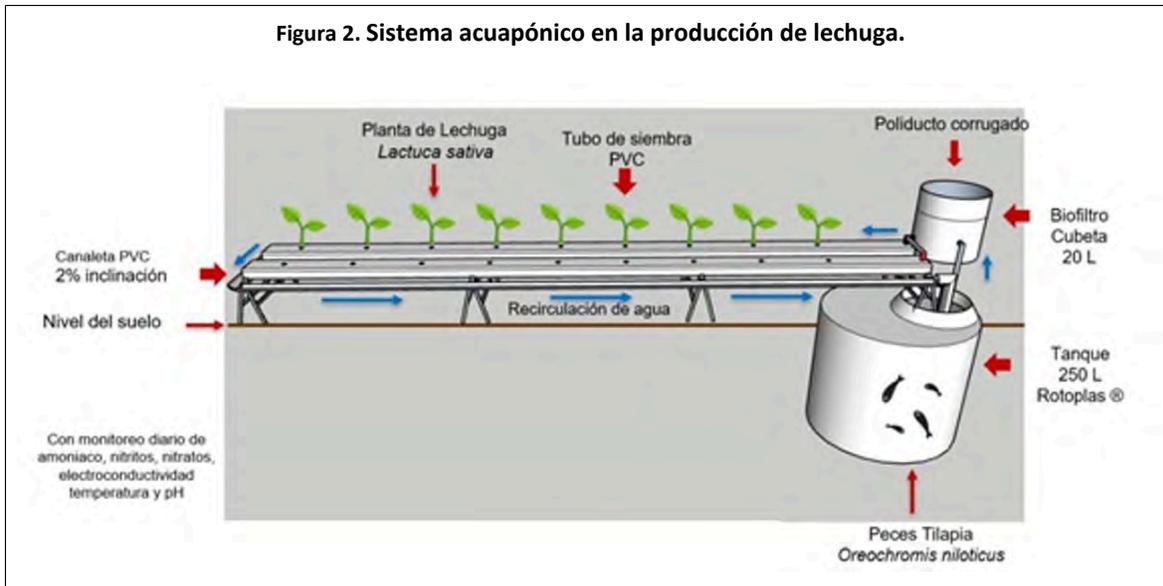
Una vez determinada la madurez del biofiltro con la presencia de las bacterias nitrificantes, se introdujeron en el tinaco tres tilapias del Nilo (*Oreochromis niloticus* L.) con un peso inicial de 500 g cada una, mismas que se alimentaron con croquetas comerciales para peces en desarrollo 3.5 mm (marca Nutripec) enriquecidas con proteínas (32%) y grasas (6%).

Etapa II: desarrollo y rendimiento del cultivo de lechuga

Esta etapa inició el 20 de mayo de 2020. La germinación de la semilla se desarrolló en un cuarto de cultivo agrícola bajo condiciones ambientales controladas: temperatura de 25 °C, humedad relativa de 51% (medido con un termohigrómetro marca Taylor), iluminación artificial provista por una lámpara hortícola de colores azul (470 nm) y rojo (625 nm) de 1.2 m de longitud, marca Arize[™] life.

La semilla se sembró en un sustrato de lana de roca en una charola extra rígida plana con un área de 55 x 28 cm (marca GLL, modelo CH00). Las semillas se hidrataron con un riego dosificado de 2.47 L en total, durante los siguientes 37 días (tiempo necesario para la germinación) a partir de la siembra. El 26 de junio se trasplantaron 19 plántulas de lechuga a los tubos de PVC de cada uno de los sistemas. La infraestructura de los SA y SH tuvieron las dimensiones 3 x 0.5 m, el área de cultivo fue de 1.5 m² (Figuras 1 y 2).





Durante el desarrollo del cultivo en el SH se empleó un fertilizante hidropónico de la marca Hort Americas (9-7-37 relación N-P₂O₅-K₂O) y ácido nítrico (HNO₃ al 3%) para mantener el pH en un rango de 6.5-7.6 que es un intervalo adecuado (entre 6.5 y 8.5) según Somerville *et al.* (2022). La cosecha de lechuga se efectuó el 29 de julio de 2020. En la producción de los SA y SH se consideró el peso de las plantas (kg) y el rendimiento (kg m⁻²). Cuyos valores promedio se compararon con la prueba estadística t de *student* con un nivel de significancia de 5%, en el programa Excel de Windows, Versión 10.

Etapa III: huella hídrica del cultivo de lechuga en los sistemas acuapónico e hidropónico

La HH total se calculó con el enfoque 'Step-wise accumulative', esto significa que la HH de un producto se determinó según las HH de los insumos de cada actividad de la producción, más la HH del proceso completo (Hoekstra *et al.*, 2011). Por ello, las HH del cultivo de lechuga en los SA y SH se determinaron:

$$HH_{total} = HH_{instalación} + HH_{producción}$$

1). Para obtener el impacto ambiental expresado en la HH_{instalación}, previamente se realizó un listado de todos los insumos y materiales utilizados en cada sistema. Los cuales, se pesaron con una balanza digital de la marca Ohaus defender 3000 (sensibilidad 58 - 0.09 kg). La HH_{instalación} se calculó con la ecuación 2.

$$HH_{instalación} = \sum \left[\left(\frac{HH_{insumos\ y\ materiales} \cdot p}{producción} \right) * F_{vu} \right]$$

2). Donde: la HH_{insumos y materiales} (m³ kg⁻¹) se refiere a la HH de los insumos y materiales usados en cada sistema (valores consultados en la literatura científica); p= es el peso (kg) de los materiales; producción= es el peso total de las lechugas; y F_{vu}= (unidimensional) es el factor de vida útil de los materiales (como tubería de PVC y tinaco de HDPE), que relaciona su vida útil (o tiempo de servicio) con el periodo del cultivo desde el trasplante hasta la cosecha (34 días). Así, se obtuvo la HH_{instalación} relativa al ciclo del cultivo de lechuga.

La HH_{producción} incluye los volúmenes de agua de: lluvia a campo abierto, agua contaminada en el proceso productivo y aquellos utilizados por el cultivo (ecuación 3):

$$HH_{producción} = HHV + HHG + HHA$$

3). Donde: HHV= huella hídrica verde; HHG= huella hídrica gris; y HHA= huella hídrica azul. Sin embargo, en el cálculo de la $HH_{producción}$ del presente estudio se excluyeron la HHV (se careció de lluvia que trascendiera la casa sombra) y la HHG (sin evaluaciones de las HH de agroquímicos al inicio y final del experimento).

Por ello, la $HH_{producción}$ en este estudio fue similar a la HHA. La cual, se valoró para sistemas no convencionales según la ecuación 4:

$$HHA = \frac{AG+AC+AA}{Y}$$

4). Donde: HHA= es la HH azul: acuapónico e hidropónico; AG= agua para la germinación; AC= es el agua circulante en el sistema; AA= es el agua agregada (lámina de riego, m); (= es la masa producida por superficie (kg m^{-2}). Una vez obtenidas las $HH_{insumos \text{ y materiales}}$ y la $HH_{producción}$ (= HHA), se calculó la HH_{total} con la ecuación 1.

Resultados y discusión

Desarrollo y rendimiento del cultivo de lechuga (etapa II)

En cada sistema productivo se recolectaron 12 cabezas de lechuga por m^2 de siembra, el rendimiento obtenido fue el doble en comparación con el SAT, donde se producen de seis a ocho lechugas en 1 m^2 debido a los espacios entre los canales de riego. El peso total del cultivo (en $1.5 \text{ m}^2 = 19$ cabezas de lechuga) fue de 1.08 kg en el SA y 1.85 kg en el SH, mientras que los pesos promedios de las plantas fueron 0.056 kg (± 0.005) y 0.097 kg (± 0.007), respectivamente.

La prueba t de student mostró diferencia significativa ($p \leq 0.05$) entre los pesos promedios registrados en cada sistema. Los rendimientos fueron de 0.72 y 1.23 kg m^{-2} en los SA y SH, respectivamente, lo que representó un mayor rendimiento (58.37%) en el SH que en el SA. El SH produjo plantas con mayor peso que el SA (97 y 56 g planta^{-1}), contrario a lo reportado por Delaide *et al.* (2016), quienes señalaron mayor peso en las plantas del SA que aquellas del SH.

Eso se atribuyó a que este estudio se efectuó en condiciones de temperatura ambiente (30 a 40 °C) y del agua elevadas (30 y 37 °C), superiores a los rangos manejados por Delaide *et al.* (2016) y los sugeridos por Portillo *et al.* (2020) para el desarrollo óptimo del cultivo (15 a 20 °C). Se estimó, que la elevada temperatura del agua en el SA afectó el metabolismo de los peces y redujo su tasa de alimentación, lo que aportó menor cantidad de nutrientes para el crecimiento y producción de plantas en el SA con respecto al SH.

Monsees *et al.* (2019) registraron un rendimiento 32% menor al valor promedio debido a la temperatura del agua (29 °C): reportaron diferencias en el peso de la lechuga, en el número de hojas y en el área foliar de las cabezas entre el SH y el SA. Lennard y Ward (2019) destacaron que las altas temperaturas ($> 2 \text{ }^\circ\text{C}$) y los sistemas NFT presentan bajos niveles de oxígeno disuelto en el agua ($< 5 \text{ ppm}$), lo que afecta la alimentación de las tilapias ya que éstos dejan de comer y de producir compuestos nitrogenados (necesarios para el desarrollo de las lechugas). Por ello, se estimó que la temperatura hídrica registrada en el presente estudio (30 y 37 °C) fue un factor limitante en el rendimiento de absorción nutrimental de las plantas.

En este estudio se detectó una concentración de nitratos de 80 ppm. El NO_3 es el producto final de la oxidación del amonio por las bacterias nitrificantes y es menos tóxico que el NO_2 y el amonio que arriesgan la salud, la sobrevivencia y el desempeño zootécnico de los peces (González *et al.*, 2021). Aunque el NO_3 está presente en bajos niveles en los SA porque es la principal fuente de N de las plantas, Kubitza (2017) sugiere cantidades entre 100 y 200 mg L^{-1} para el crecimiento óptimo de la tilapia.

Flores-Aguilar *et al.* (2020) sugieren recambiar el agua para eliminar los nutrientes en exceso, evitar la toxicidad y arriesgar la salud de las bacterias nitrificantes y de las tilapias (Valenzuela *et al.*, 2017). Somerville *et al.* (2022) señaló que los parámetros de calidad del agua recomendados

en los SA para el óptimo desarrollo de los peces son: nitrógeno amoniacal total $< 2 \text{ mg L}^{-1}$ (=1 ppm), nitrito $< 1 \text{ mg L}^{-1}$, oxígeno disuelto $> 4 \text{ mg L}^{-1}$, pH entre 6.5 y 8.5, temperaturas del agua óptima 27-30 °C y vital 14-36 °C.

En el desarrollo del cultivo se agregaron 0.0675 m³ de agua en ambos sistemas: en el SA fue para disminuir el contenido de nitratos y en el SH fue para contrarrestar el aumento generado en la conductividad eléctrica (2.9 dS m⁻¹) y así, evitar condiciones adversas en el cultivo de la lechuga ya que las raíces dejan de absorber macro y micronutrientes cuando el agua tiene alto contenido de sales minerales (Monsees *et al.*, 2019).

Huella hídrica del cultivo de lechuga en los sistemas acuapónico e hidropónico (etapa III)

La HH_{producción} (=HHA) del SA (0.2941 m³ kg⁻¹) fue superior que aquella del SH (0.1721 m³ kg⁻¹) (Cuadro 1), las HH_{insumos y materiales} (sin considerar el F_{vu}) guardaron la misma relación (8.1429 y 1.98 m³ kg⁻¹, respectivamente) (Cuadro 2). Las HH_{insumos y materiales} se consideraron como las 'huellas hídricas de inversión' del establecimiento de la infraestructura para los S y SH, cuyos valores incluyeron toda la vida útil de los insumos y materiales. En dichos casos, la HH_{total} del cultivo de lechuga en el SA fue de 8.437 m³ kg⁻¹ y en el SH, de 2.15 m³ kg⁻¹. No obstante, los materiales e insumos se utilizarán en más ciclos productivos, por lo que, al considerar el F_{vu}, la HH_{total} del SA fue de 2.6841 m³ kg⁻¹ y en el SH de 0.1821 m³ kg⁻¹ (Cuadro 2).

Cuadro 1. Huella hídrica azul de los sistemas acuapónico e hidropónico.

Proceso	Lámina (m)	HHA SA (m ³ kg ⁻¹)	Lámina (m)	HHA SH (m ³ kg ⁻¹)
Etapas de germinación	0.0008	0.001111	0.0008	0.00065
Desarrollo de cultivo	0.045	0.0625	0.045	0.0365
Agua recirculante en el sistema	0.166	0.2305	0.166	0.1349
HHA		0.2941		0.1721

HHA= huella hídrica azul; SA= sistema acuapónico; SH= sistema hidropónico.

Cuadro 2. Huella hídrica de los insumos y materiales de los sistemas acuapónico e hidropónico.

Material	Huella hídrica		Vida útil	F _{vu}	Sistema acuapónico*				Sistema hidropónico*				
	(m ³ kg ⁻¹)	Fuente			Material	VC (m ³)	HH sin F _{vu}	HH con F _{vu}	Material [†]	VC (m ³)	HH sin F _{vu}	HH con F _{vu}	
			años	Fuente	(kg)	(m ³ kg ⁻¹)	(m ³ kg ⁻¹)	(kg)	(m ³ kg ⁻¹)	(m ³ kg ⁻¹)	(m ³ kg ⁻¹)		
Alimento de peces	2.25	(Pérez-Rincón <i>et al.</i> , 2017)	NA		1.14	2.56	2.38	2.38	NA	NA	NA	NA	
Cubeta y biofiltro (HDPE)	0.12 ^s	(Haghighi <i>et al.</i> , 2018)	10	(Sendanayake, 2016)	0.0066	2	0.24	0.23	0	NA	NA	NA	NA
Estructuras metálicas	0.7	(Kluender, 2013)	40	(Hernández, 2019)	0.0016	6.9	4.86	4.5	0.01	3.6	2.53	1.37	0
Fertilizante	0.00018	(Tolón <i>et al.</i> , 2013)	NA		NA	NA	NA	NA	0.19	0.034	1.85	0.18	

E⁻⁰⁵

Material	Huella hídrica		Vida útil		F _{VU}	Sistema acuapónico*				Sistema hidropónico*			
	(m ³ kg ⁻¹)	Fuente	años	Fuente		Material (kg)	VC (m ³)	HH sin	HH con	Material [†] (kg)	VC (m ³)	HH sin	HH con
								F _{VU}	F _{VU}			F _{VU}	F _{VU}
							(m ³ kg ⁻¹)				(m ³ kg ⁻¹)		
Manguera inyección de aire (HDPE)	0.12 [§]	(Haghighi <i>et al.</i> , 2018)	10	(Sendanayake, 2016)	0.0066	0.06	0	0.01	0	0.06	0	0	0
PVC	0.01	(Wang <i>et al.</i> , 2019)	5	(Zaman y Newman, 2021)	0.0132	8.2	0.13	0.13	0	8.2	0.13	0.07	0
Tanque polietileno 250 L (HDPE)	0.12 [§]	(Haghighi <i>et al.</i> , 2018)	10	(Sendanayake, 2016)	0.0066	7.9	0.97	0.9	0.01	7.9	0.97	0.53	0
HH _{insumos y materiales}								8.14	2.39			1.98	0.01
HH total								8.43	2.68			2.15	0.1821

F_{VU}= factor de vida útil (adimensional); HH con F_{VU}= huella hídrica calculada con factor de vida útil; HH sin F_{VU}= huella hídrica calculada sin factor de vida útil; NA= no aplica; VC= volumen calculado; [§]= la estimación de la huella hídrica por kg consideró la producción total de 1.07 y 1.85 kg para el sistema acuapónico e hidropónico, respectivamente; [§]= valor promedio de datos globales; [†]= peso del material utilizado.

El tema de HH de cultivos de lechuga en SA y SH está en desarrollo, por lo que existe poca literatura científica que permita comparar los resultados obtenidos en este trabajo. Algunas tesis de grado como la de Blandón y Benavides (2020), registran la HH del SA (NFT) de 6.77 L (0.0067 m³) y la HH con SAT (un riego diario) de 63 L (0.063 m³), en ambos casos para producir una planta de lechuga en un ciclo de 30 días. Los mismos autores señalaron que en el SA, el peso de la lechuga fue diferente: la variedad Auvona se tasó entre 45.4 y 54.06 g, la variedad Batavia, entre 22.26 y 43.86 g, sin reporte del peso de la lechuga en SAT.

Con base en los datos anteriores, si se considera un peso promedio de la variedad Auvona de 49.73 g y de 33.06 g para la variedad Batavia, un kg se conforma por 20 y 30 cabezas de lechuga, respectivamente. Si dichas cantidades se multiplican por la HH que se obtuvo en ese estudio (6.77 L), se generan HH de 135.4 L kg⁻¹ (0.1354 m³ kg⁻¹) y 203.1 L kg⁻¹ (0.2031 m³ kg⁻¹), correspondientemente. Lo que significa, que la HH_{total} obtenida en este estudio (2.6841 m³ kg⁻¹) es 19.82 y 13.22 veces mayor (Cuadro 3).

Cuadro 3
Huella hídrica del cultivo de lechuga en sistemas acuapónico, hidropónico y tradicional.

Sistema de producción	País	HHA	HHG	HHV	HHT	Fuente
SA/I	India	0.038				(Biswas <i>et al.</i> , 2023)
SA/ Var. Auvona	Nicaragua	0.213				(Blandón y Benavides, 2020)
SA/Var. Impulsora	Nicaragua	0.0948				(Blando y Benavides, 2020)
SH/tamaño Baby	Chile	0.017	0.0008	0	0.018	(Caro, 2014)

Sistema de producción	País	HH (m ³ kg ⁻¹)				Fuente
		HHA	HHG	HHV	HHT	
SAT/agua corriente/l	India	0.077				(Biswas <i>et al.</i> , 2023)
SAT/agua residual/l	India	0.026				(Biswas <i>et al.</i> , 2023)
SAT	Malasia	0.0511		0.1865	0.2376	(Harun y Hanafiah, 2018)
SAT		0.1332	0.0758	0.028	0.237	(Mekonnen y Hoekstra, 2011)
SAT/verano	Sudáfrica	0.0313				(le Roux <i>et al.</i> , 2018)
SAT/otoño	Sudáfrica	0.0512				(le Roux <i>et al.</i> , 2018)
SAT/invierno	Sudáfrica	0.0926				(le Roux <i>et al.</i> , 2018)
SAT/primavera	Sudáfrica	0.0562				(le Roux <i>et al.</i> , 2018)
SAT	Colombia	0.0884	0.0815	0.105	0.2749	(Orjuela y Vargas, 2016)

SA= sistema acuapónico; SH= sistema hidropónico; SAT= sistema agrícola tradicional.

Esto se atribuyó a que en este estudio se consideró la $HH_{\text{insumos y materiales}}$, mientras que Blandón y Benavides (2020) no especificaron el procedimiento para calcular la HH. La HH de la variedad Auvona del SAT fue menor que las HH obtenidas en este estudio (HHA del SA= $0.2941 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$, HHA del SH= $0.1721 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$), mientras que la HH de la variedad Batavia fue mayor que la HHA del SH, pero menor que la HHA del SA.

Por otro lado, Caro (2014) determinó la HH_{total} de $18 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$ ($0.018 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$) de la variedad Levistro (Rijk Zwaan) tamaño 'baby' producida en SH en invernadero (HHA= 95.4%, HHG= 4.6%) al comparar la HH_{total} de esa investigación con la propia ($0.01821 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$), se observó que aquella fue 10 veces menor. La autora resaltó que, los valores obtenidos están subestimados debido a omisiones de consumos de agua que generarían un incremento en la HH (en las plantaciones en vivero y $HH_{\text{insumos y materiales}}$ entre otros). Sin embargo, la HHA ($0.017 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$) que reporta Caro (2014) es similar a la de este estudio ($0.1721 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$).

En tanto que, Biswas *et al.* (2023) determinaron la HH del cultivo de lechuga bajo SA y en SAT. En el SA la HH fue de $38 \text{ cm}^3 \text{ g}^{-1}$ ($0.038 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$), que fue 70 veces menor que la HH_{total} de este estudio ($2.6841 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$), en el SAT, las HH con manejo de agua corriente y de agua residual fueron 0.077 y $0.026 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$, respectivamente. Los autores indicaron que las HH reportadas representan la medida del volumen total de agua requerida para producir un cultivo, sin especificar si los valores corresponden solamente a la HHA.

Otras investigaciones en SAT como la de Orjuela y Vargas (2016), señalaron una HH_{total} de $274.9 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$ ($0.2749 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$) para la lechuga (38.2% HHV, 32.2% HHA y 29.6% HHG) (Cuadro 3). La HH_{total} de este estudio fue 9.8 veces mayor que la anterior, así como 3.3 y 1.9 veces superior con respecto a la HHA del SA y SH, respectivamente. Eso se atribuyó a que la $HH_{\text{insumos y materiales}}$ de este estudio representó 89% de la HH_{total} en el SA y 52.5% del SH. Por su parte, Orjuela y Vargas (2016) solo contemplaron la HH de insumos (= HHG; relacionada con la contaminación de los agroquímicos) y no consideraron la HH de materiales.

Autores como Harun y Hanafiah (2018) determinaron en SAT de lechuga una HH_{total} $0.2376 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ y una HHA de $0.0511 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$: la HH_{total} de ese estudio es 11 veces inferior en contraste con la HH_{total} de esta investigación, así como las HHA del SA y del SH (5.7 y 3.37 veces, respectivamente). Por su parte, le Roux *et al.* (2018) reportaron las HHA en SAT con valores extremos de 0.0313

(verano) y $0.0926 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ (invierno) (Cuadro 3), las HHA son inferiores que las correspondientes a este estudio.

Al comparar la HH_{total} del SA y del SH obtenidas en este trabajo con los estudios anteriores, se halló que éstas indicaron valores inferiores con respecto al presente estudio, en el que se utilizó el enfoque 'Step-wise accumulative' y que integró la $HH_{\text{insumos y materiales}}$ en el cálculo de la HH_{total} . Aunque algunas de esas investigaciones incluyeron la HH_{insumos} (agroquímicos), excluyeron el cálculo de las $HH_{\text{materiales}}$ requeridos en las instalaciones de los SA y SH. Las que, al contemplarse en este trabajo, elevaron sustancialmente la HH_{total} de los SA y SH ya que constituyeron 89 y 52.5% (respectivamente) de su valor. Bautista *et al.* (2020); Hoekstra y Mekonnen (2011) registraron una HH para esta hortaliza en el SAT, de $237 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$ ($0.237 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$), que es considerado como el valor promedio global (Water Footprint Network, 2016).

Al contrastar esa HH con la HHA del SA ($0.2941 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$) y del SH ($0.1721 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$) de este trabajo, se encontró que éstas son 1.24 veces mayor y 0.726 veces menor que la primera, correspondientemente. La HHA del SA es menor con respecto a la HHA de otras hortalizas del SAT, como la espinaca ($0.014 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$), el brócoli ($0.021 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$) y la cebolla ($0.044 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$) (Mekonnen y Hoekstra, 2011).

Conclusiones

En esta investigación se determinó la huella hídrica del cultivo de lechuga (*Lactuca sativa* L.) en los sistemas acuapónico e hidropónico. Los resultados confirmaron la hipótesis planteada, al registrar una mayor huella hídrica en el sistema acuapónico. Las huellas hídricas estimadas fueron mayores en comparación con estudios similares, lo que se justifica con la inclusión de las huellas hídricas de materiales e insumos utilizados en la construcción de los sistemas, como parte de la cadena del proceso productivo del cultivo. Este estudio contribuyó con la generación de conocimiento en el tema, mismo que es escaso a escala global.

Agradecimientos

A la MC Karla Patricia García, por su guía para el establecimiento del cuarto de cultivo y en los procesos de siembra. A la Universidad de Sonora por el aporte económico al proyecto y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, por el apoyo financiero al estudiante del proyecto (CVU 1069430).

Bibliografía

- 1 Barbosa, G.; Gadelha, F.; Kublik, N.; Proctor, A.; Reichelm, L.; Weissinger, E.; Wohlleb, G. and Halden, R. 2015. Comparison of land, water, and energy requirements of lettuce grown using hydroponic vs conventional agricultural methods. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 12:6879-6891.
- 2 Bautista, D.; Otazo, E.; Román, A.; Pavón, N. y Prieto, F. 2020. La huella hídrica de diferentes cultivos: un panorama global. *Revista Latinoamericana el Ambiente y las Ciencias*. 11(28):419-422.
- 3 Biswas, A.; Duary S.; Islam, A. and Bhattacharjee, S. 2023. water footprint and productivity of lettuce with non-conventional water resources biological forum an international journal. 15(4):01-04.
- 4 Blandón, E. E. y Benavidez, L. E. 2020. Evaluación de dos variedades de *Lactuca sativa* bajo condiciones de acuaponía con las técnicas de canaleta, NFT horizontal vertical. Tesis de licenciatura. Universidad Católica del Trópico Seco. Nicaragua.
- 5 Caro, L. N. 2014. Estimación de la huella hídrica de la producción de lechugas 'baby' bajo sistema hidropónico. Tesis de licenciatura. Universidad de Chile, Chile.

- 6 Delaide, B.; Goddek, S.; Gott, J.; Soyeurt, H. and Jijakli, M. 2016. Lettuce (*Lactuca sativa* L. var. Sucrine) growth performance in complemented aquaponic solution outperforms hydroponics. *Water*. 8(10):467-473.
- 7 Flores-Aguilar, P.; García-Trejo, J. y Martínez-Guido, S. 2020. Acuaponía: una alternativa versátil e integral en la producción de alimentos para el entorno mexicano. *Digital Ciencia@UAQRO*. 14(1):43-53.
- 8 García, E. 2004. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. México, DF. Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).
- 9 González, O.; González, L.; Comolli, J.; Santinón, J.; Agüero, C. y Roux, J. 2021. Parámetros productivos de dos especies de peces autóctonos (*Piaractus mesopotamicus* y *Prochilodus lineatus*) en un sistema acuapónico con lechuga (*Lactuca sativa* sp). *Agrotecnia*. 31:43-55. 10.30972/agr.0315815.
- 10 Haghighi, E.; Madani, K. and Hoekstra, A. 2018. The water footprint of water conservation using shade balls in California. *Nature Sustainability*. 1:358-360. 10.1038/s41893-018-0092-2.
- 11 Harun, S. N. and Hanafiah, M. M. 2018. Blue a green water use of cultivating selected crops in Malaysia. *AIP Conference Proceedings*. 10.1063/1.5027942.
- 12 Hernández, S. 2019. Degradación y durabilidad de materiales y componentes constructivos. México, DF. Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).
- 13 Hoekstra, A. Y. and Chapagain, A. K. 2008. *Globalization of water: sharing the planet's freshwater resources*. Oxford, UK. Willey-Blackwell.
- 14 Hoekstra, A. Y. and Mekonnen, M. M. 2011. *Global water scarcity: monthly blue water footprint compared to blue water availability for the world's major river basins*. Delft, The Netherlands: UNESCO-IHE.
- 15 Hoekstra, A. Y.; Chapagain, A.; Aldaya, M. and Mekonnen, M. 2011. *The water footprint assessment manual. Setting the global standard*. London, UK. Earthscan. 228 p.
- 16 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. 10.5703/jpur.03.1.08.
- 17 Kubitzka, F. 2017. pH da agua regula excrecao e toxidez de amonia. *Revista Panorama de Aquicultura*. 27(160):14-23.
- 18 Le Roux, B.; Van der Laan, M.; Vahrmeijer, T.; Annandale, J. G. and Bristow, K. L. 2018. Water footprints of vegetable crop wastage along the supply chain in Gauteng, South Africa., *Water* . 10:539-545. <https://doi.org/10.3390/w10050539>.
- 19 Lennard, W. and Ward. J.2019. A comparison of plant growth rates between an NFT hydroponic system and an NFT Aquaponic System. *Horticulturae*. 5(2):27-34. <https://doi.org/10.3390/horticulturae5020027>.
- 20 Martínez, Y. R. 2013. La Acuaponía como alternativa de producción agropecuaria sostenible ¿Una posibilidad para tener en casa? *REDICINAYSA*. 2(5):16-23.
- 21 Mekonnen, M. and Hoekstra, A. 2011. The green, blue and grey water footprint of crops and derived crop products *Hydrol. Earth Syst. Sci*. 15:1577-1600. 10.5194/hess-15-1577-2011.
- 22 Monsees, H.; Suhl, J.; Maurice, P.; Kloas, W.; Dannehl, D. and Würtz, S. 2019. Lettuce (*Lactuca sativa*, variety Salanova) production in decoupled aquaponic systems: Same yield and similar quality as in conventional hydroponic systems but drastically reduced greenhouse gas emissions by saving inorganic fertilizer. *PLoS One*. 14(6).
- 23 Oltra, M. y Melgarejo, J. 2020. Huella hídrica y sostenibilidad de los recursos hídricos en la provincia de Alicante. *El agua en la provincia de alicante*. Alicante, España. Diputación Provincial de Alicante Universidad de Alicante.

- 24 Orjuela, M. A. y Vargas, D. F. 2016. Estrategias para el uso eficiente del agua a partir de la estimación de huella hídrica en cultivos de lechuga (*Lactuca sativa*) y brócoli (*Brassica*) para una finca de diez hectáreas en mosquera cundinamarca. Tesis de Licenciatura. Universidad de La Salle, Colombia.
- 25 Pérez-Rincón, M.; Hurtado, I.; Restrepo, S.; Bonilla, S.; Calderón, H. and Ramírez, A. 2017. Water footprint measure method for tilapia, cachama and trout production: study cases to Valle del Cauca (Colombia). *Ingeniería y competitividad*. 19(2):115-126. <https://doi.org/10.25100/iyc.v19i2.5298>
- 26 Portillo, A.; Muñoz, C.; López, D.; Pinto, F.; Cristancho, H.; Gironza, M.; García, M.; Gil, R. y Echavarría, V. 2020. Catálogo de identidad 2019. Bogotá, Colombia: SWISSAID.
- 27 SADER. 2019. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. Conozcamos un poco más sobre la lechuga. Gobierno de México. México, DF.
- 28 SAGARHPA. 2018. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Recursos Hidráulicos, Pesca y Acuicultura. En 2017 aumentaron las exportaciones agrícolas de Sonora 22%. Gobierno de México.
- 29 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(2):30-42.
- 30 SIAP. 2019. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Avance de Siembras y Cosechas. Resumen por estado. <http://infosiap.siap.gob.mx:8080/agricola-siap-gobmx/ResumenProducto.do>.
- 31 SIAP. 2020. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Al alza, producción y exportación de lechuga mexicana. <https://www.gob.mx/agricultura/prensa/al-alza-produccion-y-exportacion-de-lechuga-mexicana?idiom=es>.
- 32 Shi, R.; Ukaew, S.; Archer, D.; Hee, J.; Pearlson, M.; Lewis, K. and Shonnard, D. 2017. Life cycle water footprint analysis for rapeseed derived jet fuel in north dakota. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*. 5(5):3845-3854.
- 33 Somerville, C.; Cohen, M.; Pantanella, E.; Stankus, A. y Lovatelli, A. 2022. Producción de alimentos en acuaponía en pequeña escala. Cultivo integral de peces y plantas. FAO. Documento técnico de pesca y acuicultura 589. FAO, Roma. 10.4060/i4021es.
- 34 Tolón, A.; Lastra, X. y Fernández, V. 2013. Huella hídrica y sostenibilidad del uso de los recursos hídricos. Aplicación al Poniente Almeriense. *Revista Electrónica@ de Medio Ambiente*. 14(1):56#86.
- 35 Valenzuela, R.; Martínez, P. y Arévalo, J. 2017. Evaluación preliminar de un sistema de recirculación de aguas para un prototipo implementado en la producción de tilapia roja (*Oreochromis* sp.). *Ingeniería y Región*. 18(2):25-33. <https://doi.org/10.25054/22161325.1737>.
- 36 Wang, F.; Wang, S.; Li, Z.; You, H.; Aviso, K. B.; Tan, R. R. and Jia, X. 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>.
- 37 Water foodprint network. 2016. Global average water footprint.
- 38 Wilson, A. 2018. Los hidropónicos: guía suprema de los hidropónicos para salvar tiempo y dinero. Barcelona, España. BABELCUBE-Books.
- 39 Zaman, A. and Newman, P. 2021. Plastics: are they part of the zero-waste agenda or the toxic-waste agenda? *Sustain Earth*.4. <https://doi.org/10.1186/s42055-021-00043-8>.
- 40 Zárate, E.; Fernández, A. y Kiuper, D. 2017. Guía metodológica para la evaluación de la huella hídrica en una cuenca hidrográfica. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA). San José, Costa Rica.

Huella hídrica de la producción de lechuga en sistemas acuapónico e hidropónico

Journal Information
Journal ID (publisher-id): remexca
Title: Revista mexicana de ciencias agrícolas
Abbreviated Title: Rev. Mex. Cienc. Agríc
ISSN (print): 2007-0934
Publisher: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias

Article/Issue Information
Date received: 01 January 2024
Date accepted: 01 March 2024
Publication date: 14 May 2024
Publication date: Apr-May 2024
Volume: 15
Issue: 3
Electronic Location Identifier: e3304
DOI: 10.29312/remexca.v15i3.3304
Funded by: Universidad de Sonora
Funded by: Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología
Award ID: CVU 1069430

Categories

Subject: Artículo

Palabras clave:

Palabras clave:

cuarto de cultivo

sistema NTF

técnicas agrícolas sustentables

tilapia

Counts

Figures: 2

Tables: 3

Equations: 4

References: 40

Pages: 0