

DOI: 10.24850/j-tyca-2020-05-01

Artículos

**Huella hídrica de los cultivos de cebolla (*Allium cepa* L.)
y tomate de cáscara (*Physalis ixocarpa* Brot.) en la
región de Atlixco, Puebla, México**

**Water footprint of onion (*Allium cepa* L.) and husk
tomato (*Physalis ixocarpa* Brot.) crops in the region of
Atlixco, Puebla, Mexico**

Ana María Peñaloza-Sánchez¹, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8090-9086>

Ángel Bustamante-González², ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0727-9505>

Samuel Vargas-López³, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8303-3128>

José Luis Jaramillo-Villanueva⁴, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8179-6351>

Abel Quevedo-Nolasco⁵, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3303-5077>

¹Colegio de Postgraduados Campus Puebla, Puebla, Puebla, México,
anne.penalozas@gmail.com

²Colegio de Postgraduados Campus Puebla, Puebla, Puebla, México,
angelb@colpos.mx

³Colegio de Postgraduados Campus Puebla, Puebla, Puebla, México, svargas@colpos.mx

⁴Colegio de Postgraduados Campus Puebla, Puebla, Puebla, México, jaramillo@colpos.mx

⁵Colegio de Postgraduados Campus Montecillo, Montecillo, Estado de México, México, anolasco@colpos.mx

Autor para correspondencia: Ángel Bustamante-González, angelb@colpos.mx

Resumen

La producción de hortalizas y flores bajo riego en la región de Atlixco, Puebla, demanda altas cantidades de agua; un indicador es su huella hídrica. El objetivo de este estudio fue estimar la huella hídrica de los cultivos de tomate de cáscara, tomatillo o tomate verde (*Physalis ixocarpa* Brot.) y cebolla (*Allium cepa* L.) en la región. Se estimó la huella hídrica de cebolla de primavera-verano (P-V) y otoño-invierno (O-I), y de tomate de cáscara para el ciclo O-I para el año 2017. Las huellas hídricas verde y azul se calcularon con la evapotranspiración estimada con el programa *CROPWAT* versión 8, con información climática e información de rendimiento, prácticas de manejo y desarrollo de los cultivos obtenidos en una encuesta a productores de la región. La huella hídrica gris se estimó con base en el uso de fertilizantes nitrogenados y fosfóricos. La huella hídrica del cultivo de cebolla de P-V fue mayor que la de cebolla de O-I y del tomate de cáscara de O-I, lo que se explica por los cambios climáticos estacionales y los

rendimientos. Se concluyó que los cultivos de cebolla y tomate de cáscara tienen un uso consuntivo de agua alto en la región, ya que el agua incorporada en sus procesos de producción en 2017 fue de 4 876 710.3 m³, lo que representa 5.2% del agua concesionada para todos los usos consuntivos de agua y 6.8% del agua concesionada para la agricultura en la región.

Palabras clave: Atlixco, huella hídrica, cebolla, tomate de cáscara.

Abstract

The production of vegetables and flowers under irrigation in the region of Atlixco, Puebla, requires large quantities of water. An indicator of these water requirements is found in their water footprint. This study aimed to estimate the water footprint of husk or green tomato (*Physalis ixocarpa* Brot.) and onion (*Allium cepa* L.) crops in the region. The water footprint for onion in spring-summer (SP-SU) and husk tomato crops for the A-W cycle were estimated for the year of 2017. Green and blue Water Footprints were calculated from evapotranspiration estimated using the *CROPWAT* version 8 program; together with climate information and yield information, management practices and crop development inferred from interviews with regional producers. The gray water footprint was estimated based on the use of nitrogen and phosphoric fertilizers. The water footprint of the SP-SU onion crop was greater than that of the (A-W) onion and O-I onion and (A-W) husk tomato, which can be explained considering seasonal climatic changes and yields. It was concluded that onion and tomato crops result in a high consumptive use of water in the region, as the water incorporated

into their production processes in 2017 was 4 876 710.3 m³, which represents 5.2% of the water allocated to total water consumption and 6.8% of the water allocated to agriculture in the region.

Keywords: Atlixco, water footprint, onion, husk tomato.

Recibido: 15/08/2019

Aceptado: 20/12/2019

Introducción

El agua es un recurso natural sobre el que se ha generado una alta presión debido a la demanda para uso doméstico, y para producir diversos bienes y servicios en los diferentes sectores económicos. Hay una tendencia hacia una mayor competencia por el recurso agua entre las actividades agropecuarias, y los usos domésticos e industriales (Meinzen-Dick & Appasamy, 2002). En las políticas públicas gubernamentales, la prioridad en el manejo del agua se centra en el abastecimiento humano, particularmente de las grandes ciudades. El crecimiento poblacional y los desarrollos industriales, aunado a los impactos del cambio climático, acentúan el problema de desabasto de agua para la población urbana (McDonald *et al.*, 2011). En cambio, a la

agricultura se le ve como un usuario que obstaculiza el abastecimiento a las grandes ciudades, debido a que es el sector que más agua demanda a nivel mundial, ya que utiliza alrededor de 80 a 90% del consumo mundial de agua (Shiklomanov, 2000; Morison, Baker, Mullineaux, & Davies, 2008). La solución no es dejar de utilizar el agua para la agricultura, ya que ésta cumple la función de proveer de alimentos y materias primas. Se requiere mayor eficiencia en el uso del agua para riego, para generar excedentes transferibles a otros usos económicos o ecológicos (Chukalla, Krol, & Hoekstra, 2015).

La identificación de indicadores de demanda de agua de los cultivos de riego y de la eficiencia del uso de ésta es importante para la planeación y el manejo de la misma en una cuenca. Un parámetro usual relacionado con la demanda del recurso hídrico en una cuenca es el empleo consuntivo, el cual hace referencia al agua que después de su utilización ya no está disponible para otros fines, porque se evapora o se pierde en el proceso de producción (Perry, 2007). De acuerdo con Burman y Pochop (1994), el término uso consuntivo se originó en el oeste de EUA, e incluye a la evapotranspiración de cultivos y el agua necesaria para la formación del tejido vegetal. Debido a que el uso consuntivo no considera todo el empleo de agua en un proceso de producción de un bien o un servicio, se han propuesto diferentes indicadores aplicables en los ámbitos local, regional, nacional e internacional. Dentro de estos indicadores, uno de los más actuales y utilizados recientemente es el de huella hídrica (HH) (Vanham & Bidoglio, 2013).

La huella hídrica se ha propuesto como un indicador de la sostenibilidad del recurso hídrico (Pellicer-Martínez & Martínez-Paz,

2016). Permite identificar las relaciones de causa-efecto en un nivel socio-ambiental y los impactos sobre el recurso hídrico, al hacer referencia a los hábitos de consumo de los grupos de población. La huella hídrica se refiere al uso del agua y requiere compararse con su disponibilidad. Es de utilidad para la comparación y evaluación más general, que conlleve a la mejor planeación y aprovechamiento de los recursos hídricos, sobre todo en regiones donde la competencia es alta.

El concepto general de huella se refiere a una medida cuantitativa que describe la apropiación humana de los recursos naturales (Hoekstra, Chapagain, Aldaya, & Mekonnen, 2011). Una huella describe cómo, a partir de actividades humanas, se genera un impacto o carga en la sostenibilidad global (Valdivia, Ugaya, & Hildenbrand, 2013). De manera particular, la huella hídrica de un producto se define como el volumen total de agua dulce que se utiliza directa o indirectamente en su producción. Puede aplicarse a diferentes escalas, desde el nivel parcelario hasta países o regiones, para comparar huellas hídricas de productos, o para planificar disminuciones en el consumo de agua (Mekonnen & Hoekstra, 2014). La huella hídrica de un área geográficamente delimitada (provincia, nación, zona de captación, cuenca) es igual a la suma de las huellas hídricas de todos los procesos que se llevan a cabo en esa área en específico (Hoekstra *et al.*, 2011).

Para cuantificar la huella hídrica se considera el volumen de agua dulce consumida y contaminada a lo largo de la cadena de suministro, siguiendo el análisis de ciclo de vida. Se puede calcular para un producto o un proceso de la agricultura, de la industria o del sector de servicios. La huella hídrica tiene tres componentes: la huella hídrica azul (agua azul); verde (agua verde), y gris (agua gris).

La huella hídrica azul se refiere al volumen del agua superficial y subterránea consumida (evaporada) como resultado de la producción de un bien. La huella hídrica verde alude al consumo de agua de lluvia que no se llega a convertir en escorrentía superficial o agua subterránea. La huella hídrica gris de un producto aplica al volumen de agua dulce que se requiere para diluir la carga de contaminantes de acuerdo con las concentraciones en el medio natural y los límites máximos permisibles en la legislación (Hoekstra *et al.*, 2011). Con relación a la huella hídrica gris, el nitrógeno (N) y fósforo (P) son minerales esenciales para la vida y en la agricultura son elementales para la producción (Sutton *et al.*, 2013); sin embargo, el uso excesivo de fertilizantes también ha incrementado la cantidad de N y P hacia los ecosistemas naturales (Bennet, Carpenter, & Caraco, 2001; Vitousek *et al.*, 2009). Todo ello ha repercutido en la pérdida de nutrientes en las tierras de cultivo y consecuentemente en problemas ambientales, como la alteración en la calidad del agua, contaminación de las aguas subterráneas, pérdida de biodiversidad y eutrofización (Obersteiner, Penuelas, Ciais, Van der Velde, & Janssens, 2013). Por ello surge la necesidad de evaluar esos impactos sobre la cantidad y calidad del agua.

La estimación de la huella hídrica para las zonas de regadío del país es útil para evaluar la racionalidad de la producción agrícola de una cuenca o región (Sadras, Grassini, & Steduto, 2011), y compararla con la disponibilidad del recurso hídrico. La huella hídrica debe estimarse por cultivo y ciclo de producción para cada cuenca donde la agricultura de riego demanda cantidades importantes de agua y compite con otros usos sectoriales. En el estado de Puebla, la región de Atlixco posee las características mencionadas, ya que es una zona de producción hortícola

y de flores orientada al mercado nacional e internacional, utiliza agua subterránea y superficial, y enfrenta una competencia por el recurso hídrico con los usos domésticos, industriales y de servicios.

El objetivo de este estudio fue comparar la huella hídrica de los cultivos de tomate de cáscara y cebolla producidos bajo riego en los ciclos de primavera-verano y otoño-invierno en la región de Atlixco, Puebla, así como su comparación con la huella hídrica reportada para estos cultivos en otras localidades. Se seleccionó esta área de estudio por la fuerte competencia entre usos del agua, en particular por la actividad agrícola, donde predomina la producción de hortalizas y flores. Para cada uno de los dos cultivos se cuantificaron los componentes de la huella hídrica: huella verde, azul y gris. La estimación de la evapotranspiración para calcular las huellas hídricas verde y azul se realizaron con el *software CROPWAT* versión 8.0, diseñado por la *Food and Agriculture Organization* (FAO). Los resultados del estudio son un aporte para el análisis regional del recurso hídrico y para la comparación de la eficiencia del uso del agua de los cultivos estudiados, con la de otros cultivos de la región.

Materiales y métodos

Área de estudio

El estudio se realizó en el área de agricultura de riego de cultivos anuales de los municipios de Atlixco y Huaquechula, Puebla, México, en la subcuenca Huaquechula (Figura 1). El área se localiza en el acuífero Atlixco-Izúcar de Matamoros, que subyace a suelos Phaeozem, Leptosol y Planosol, principalmente. El clima es semiseco-semicálido, con lluvias en verano y temperatura media anual de 14 a 19 °C (Conagua, 2016).

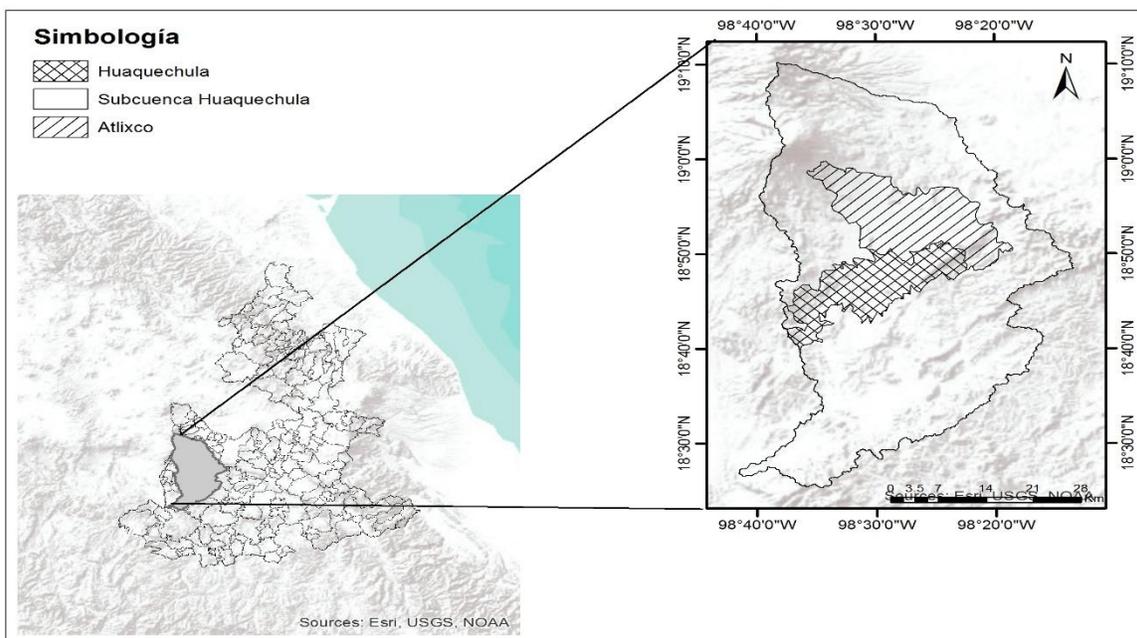


Figura 1. Localización del área de estudio.

Estimación de la huella hídrica

Se estimó la huella hídrica para los cultivos de tomate de cáscara y cebolla. Para el primero se consideró el ciclo otoño-invierno debido a que su producción se concentra en este periodo. Para el cultivo de cebolla se estimó para el ciclo de primavera-verano y para otoño-invierno. En el año agrícola de 2017, para el ciclo de primavera-verano, se sembraron 234.3 ha de cebolla; para el ciclo otoño-invierno se sembraron 460 ha de cebolla y 290 ha de tomate de cáscara (SIAP, 2017). La huella hídrica se estimó con el método propuesto por Hoekstra *et al.* (2011):

$$HH = HH_{\text{verde}} + HH_{\text{azul}} + HH_{\text{gris}} \quad (1)$$

Donde HH es la huella hídrica total del cultivo en $\text{m}^3 \text{t}^{-1}$; HH_{verde} , la huella hídrica verde; HH_{azul} , la huella hídrica azul, y HH_{gris} es la huella hídrica gris, todas en $\text{m}^3 \text{t}^{-1}$.

La huella hídrica verde se estimó como:

$$HH_{\text{verde}} = \frac{UAC_{\text{verde}}}{Y} \quad (2)$$

$$UAC_{\text{verde}} = 10 \times \sum_{d=1}^{l_{gp}} ET_{c \text{ verde}} \quad (3)$$

$$ET_{c\text{verde}} = K_c \cdot ET_o \quad (4)$$

Donde UAC_{verde} es uso de agua del cultivo que se asocia con la precipitación en $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$; Y , el rendimiento del cultivo en t ha^{-1} ; $ET_{c\text{verde}}$, la evapotranspiración del cultivo relacionada con la precipitación efectiva; ET_o , la evapotranspiración de referencia; K_c , un coeficiente asociado con el desarrollo del cultivo; Σ , el ciclo de crecimiento del cultivo desde la siembra (día 1) hasta la cosecha (lgp), y 10 es un factor de conversión de unidades.

La huella hídrica azul se estimó como:

$$HH_{\text{azul}} = \frac{UAC_{\text{azul}}}{Y} \quad (5)$$

$$UAC_{\text{azul}} = 10 \times \sum_{d=1}^{\text{lgp}} ET_{c\text{azul}} \quad (6)$$

Donde UAC_{azul} es el uso de agua del cultivo de fuentes superficiales o subterráneas (riego) y $ET_{c\text{azul}}$ es la evapotranspiración del cultivo que se relaciona con la disponibilidad de agua de riego.

Para estimar la UAC_{verde} y UAC_{azul} se estimó la ET_c y la precipitación efectiva (P_e) con el programa *CROPWAT* versión 8.0 (FAO, 1996). La ET_o es estimada con el método de Penman-Monteith, mientras que la P_e con el método USDA-SC, para intervalos de 10 días. $ET_{c\text{verde}}$ se estimó de los valores obtenidos con *CROPWAT*, como lo establece Renderos (2014):

$$ET_{c\text{verde}} = \text{mín}(ET_c, P_e) \quad (7)$$

Para el periodo de cultivo se sumaron los valores de ET_c o P_e de periodos de 10 días, dependiendo de cuál de ellos fuera menor.

ET_{azul} se obtuvo de las estimaciones de *CROPWAT* como (Renderos, 2014; Novoa, Rojas, Arumí, Ulloa, & Urrutia, 2016):

$$ET_{\text{azul}} (\text{mm } 10 \text{ días}^{-1}) = \text{requerimiento de riego} (\text{mm } 10 \text{ días}^{-1}) \quad (8)$$

Requerimiento de riego ($\text{mm } 10 \text{ días}^{-1}$) = ET_c ($\text{mm } 10 \text{ días}^{-1}$) - P_e ($\text{mm } 10 \text{ días}^{-1}$)

$$ET_{\text{azul}} = \text{máx}(ET_c - P_e) \quad (9)$$

Por lo que se sumaron las diferencias de $ET_c - P_e$ que tuvieron valores positivos.

Se utilizó información de temperatura máxima y mínima, humedad relativa y velocidad del viento de la estación climatológica de la ciudad de Puebla, de la base de datos de *CLIMWAT*; se seleccionó tal estación porque fue la estación de *CLIMWAT* más cercana al área de estudio. La información de la fenología del cultivo, duración del ciclo del cultivo y prácticas de manejo se obtuvo a través de una encuesta aplicada a 31 productores del área de estudio. Para el cultivo de cebolla, el ciclo de cultivo de primavera-verano fue de 97 días (del 7 de abril al 30 de julio)

y el de otoño-invierno fue de también de 97 (del 2 de agosto al 24 de noviembre). El ciclo del cultivo de tomate de cáscara de otoño-invierno fue de 95 días (del 20 de julio al 30 de octubre).

La huella hídrica gris se estimó con base en el uso de fertilizantes en la zona de estudio con la siguiente ecuación (Renderos, 2004):

$$HH_{\text{gris}} = \frac{T_a \cdot \alpha}{(C_{\text{máx}} - C_{\text{nat}}) \cdot Y} \quad (10)$$

En donde HH_{gris} es la huella hídrica gris en $\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$; T_a , la tasa de aplicación de fertilizante en kg ha^{-1} ; α , la fracción de fertilizante que se infiltra (exportada) a los cuerpos de agua; $C_{\text{máx}}$, la máxima concentración aceptable en unidades de masa por volumen; C_{nat} , la concentración natural en unidades de masa por volumen, y Y es el rendimiento del cultivo en t ha^{-1} .

La tasa de aplicación de fertilizantes se obtuvo directamente en las parcelas, a través de cuestionarios aplicados a los 31 productores encuestados. Las dosis promedio de fertilización nitrogenada utilizadas para la estimación fueron de 137.4 kg ha^{-1} y 105 kg ha^{-1} para los cultivos de cebolla y tomate de cáscara, respectivamente; mientras que las dosis promedio de fósforo aplicadas fueron de 77.9 y 36 kg ha^{-1} , respectivamente. Estos valores se convirtieron a su contenido de N y P.

La fracción de fertilizante exportado (α) a cuerpos de agua usada fue de 0.1 para nitrógeno, asumiendo que en promedio un 10% de la cantidad de fertilizante nitrogenado aplicado se pierde por lixiviación (Mekonnen & Hoekstra, 2010; Franke, Boyacioglu, & Hoekstra, 2013).

Para fósforo, se utilizó un valor de α de 0.3, considerando el valor promedio de lixiviación reportado por Franke *et al.* (2013). Se usó un valor de $C_{m\acute{a}x}$ de 0.006 para nitrógeno y de 0.03 para fósforo, de acuerdo con la Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996 (DOF, 1996). Debido a la falta de información, la concentración de nitrógeno natural y de fósforo natural de los cuerpos de agua receptores (C_{nat}) se asumió como cero (Mekonnen & Hoekstra, 2010; Renderos, 2014).

Resultados

Características de los sistemas de cultivo

Los productores de cebolla y tomate de cáscara tienen superficies de tierra de menos de 1 ha. Para el tomate de cáscara se registró un rendimiento promedio para el ciclo otoño-invierno de 16.2 t ha⁻¹. Para el cultivo de cebolla se registró un rendimiento promedio para el ciclo primavera-verano de 7.7 y 20.4 t ha⁻¹ para el ciclo otoño-invierno. Las fuentes de agua para riego son corrientes superficiales y, principalmente, de agua subterránea extraída de pozos. El sistema de

riego predominante es por gravedad, a través de canales de riego. La mayoría de los productores considera que la calidad del agua que usa para el riego es buena. El costo promedio para regar la parcela es de \$171 pesos por hora de riego. El caudal de riego se determinó de 44 290 l/s⁻¹, con una frecuencia de riego de siete días por mes, durante cada ciclo de cultivo de 96 días en promedio; se destinan alrededor de cuatro horas en cada sesión de riego.

Precipitación efectiva y evapotranspiración (ET_o)

La ET_o promedio obtenida con *CROPWAT* para el año 2017, con el método de Penman-Monteith, fue de 4.1 mm día⁻¹. La mayor ET_o se presentó en los meses de mayor temperatura, que corresponden al periodo de marzo a mayo. El periodo con mayor precipitación efectiva fue en el ciclo de verano, durante los meses de junio a septiembre (de 124.7 a 110 mm). Esto significa que la fracción de agua aprovechada por las plantas fue mayor durante los meses de verano y da idea de las condiciones benignas de la región para la producción agrícola en el periodo de mayo a octubre, cuando la P_e es mayor que la ET_o (Figura 2).

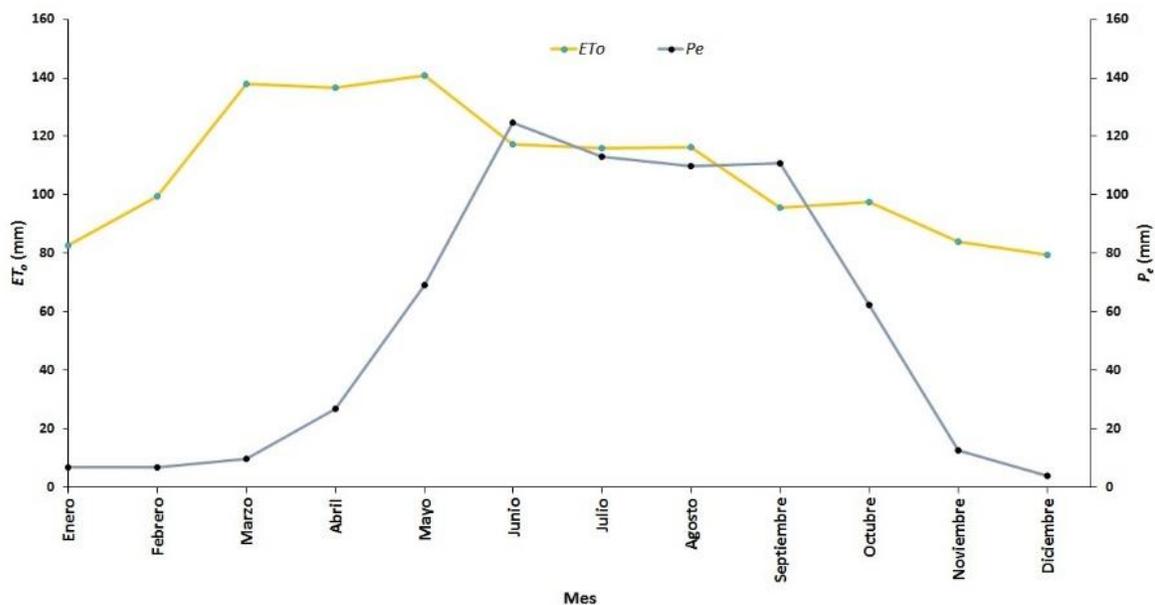


Figura 2. Precipitación efectiva (P_e) y evapotranspiración de referencia (ET_o).

Huella hídrica de los cultivos de cebolla y tomate de cáscara

La huella hídrica verde para el cultivo de cebolla de otoño-invierno fue de $176.4 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$; la huella hídrica azul de $53 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$, y la huella hídrica gris de $20.1 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$. La huella hídrica total fue de $249.7 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$.

Para el cultivo de cebolla del ciclo primavera-verano, la huella hídrica verde fue de $293.3 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$; la huella hídrica azul de $263 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$, y

la huella hídrica gris de $22.9 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$. La huella hídrica total fue de $578.7 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$.

Para el cultivo de tomate de cáscara se estimó una huella verde de $165.8 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$; una huella hídrica azul de $21.9 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$, y una huella hídrica gris de $8.6 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$. La huella hídrica total fue de $196.3 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$.

De acuerdo con las huellas hídricas estimadas, el cultivo de tomate de cáscara tiene la huella hídrica total menor (Figura 3). El cultivo de cebolla de primavera-verano fue el que incorporó la mayor cantidad de agua en su proceso de producción; mientras que el cultivo de cebolla de otoño-invierno tuvo una huella hídrica total intermedia.

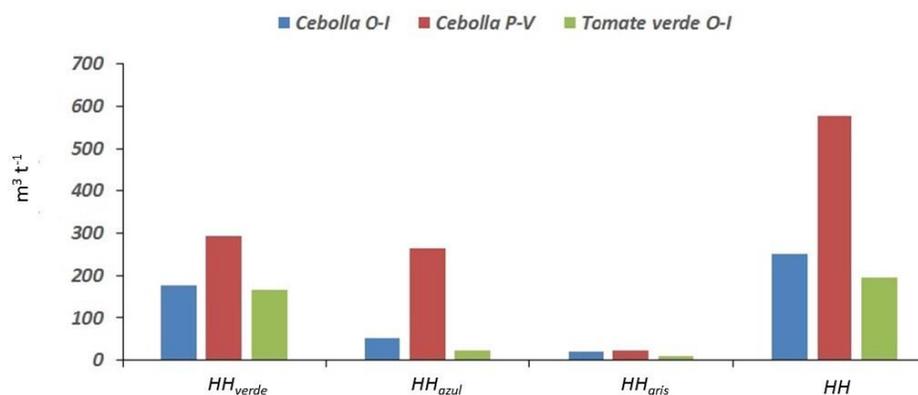


Figura 3. Huella hídrica de los cultivos de cebolla y tomate de cáscara en la región de Atlixco, Puebla.

Implicaciones regionales de las huellas hídricas estimadas sobre el recurso hídrico

De acuerdo con la producción regional de los cultivos de cebolla y tomate de cáscara y con los resultados de sus huellas hídricas, los cultivos tienen un impacto importante en el uso de los recursos hídricos regionales (Tabla 1).

Tabla 1. Impacto de la huella hídrica de los cultivos de cebolla y tomate de cáscara sobre el recurso hídrico regional.

	Cebolla P-V	Cebolla O-I	Tomate de cáscara O-I	Total
Producción (t)*	3 584.8	8 418.0	3 567.0	
Superficie cosechada (ha)*	234.3	460.0	290.0	
HH total (m ³ t ⁻¹)	578.7	249.7	196.3	
Agua total incorporada** (m ³)	2 074 336.4	2 102 104.9	700 269.0	
Agua total incorporada (hm ³)	2.1	2.1	0.7	
% del volumen total	2.2	2.2	0.8	5.2

concesionado***

% del volumen

concesionado para uso agrícola	2.9	2.9	1.0	6.8
-----------------------------------	-----	-----	-----	-----

*Datos del cierre agrícola 2017 del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP, 2017).

** Agua total incorporada en la producción regional de cebolla y tomate de cáscara.

*** Considerando un volumen total concesionado de 93.4 hm³ y 76.4% (71.4 hm³) asignado al uso agrícola (REPDA, 2016).

Discusión

Las huellas hídricas verde y azul estimadas fueron las que más contribuyeron en la huella hídrica total para el cultivo de cebolla. Sus valores fueron mayores a los promedios internacionales reportados por Mekonnen y Hoekstra (2010), mientras que el de la huella gris fue menor. Los autores consideran que la huella hídrica se subestimó debido a que sólo se consideró el uso de fertilizantes y no el de pesticidas.

La huella hídrica total del cultivo de cebolla del ciclo de primavera-verano fue alta (578.65 m³ t⁻¹), comparada con la huella hídrica total obtenida para el ciclo de otoño-invierno (249.7 m³ t⁻¹). También es mayor a la reportada por Ríos-Flores, Jacinto-Soto, Torres-Moreno y

Torres-Moreno (2017) para este cultivo ($115 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$) en el ciclo otoño-invierno para la región de Delicias, Chihuahua, México. Comparando datos reportados en el ámbito internacional, las estimaciones para el ciclo de primavera-verano son similares a las reportadas por Castañeda y Ramírez (2016) para Colombia ($505.1 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$). Las estimaciones para el ciclo otoño-invierno son comparables con la huella hídrica total reportada por Mallma y Mejía (2015) para Perú, y los promedios internacionales reportados por Mekonnen y Hoekstra (2010) ($272 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$). No se tiene un referente estatal o regional de comparación. Las diferencias entre los ciclos de producción y entre regiones se asocian principalmente con diferencias de clima y rendimientos debido a que bajos rendimientos de los cultivos y alta evapotranspiración resultan en una huella hídrica más alta (Hoekstra & Chapagain, 2007).

La ET_o estimada (4.1 mm día^{-1}) es típica de regiones de clima templado (Allen, Pereira, Raes, & Smith, 2006). Los datos de evapotranspiración de referencia (ET_o) y de precipitación efectiva (P_e) para la región de estudio indican condiciones de disponibilidad de agua verde para la producción de cultivos en el periodo de junio a septiembre debido a que la P_e es mayor que la ET_o . El cultivo de cebolla en la región utiliza una cantidad alta de agua verde tanto en el ciclo primavera-verano como en el de otoño-invierno. Sin embargo, el requerimiento de agua azul es mucho mayor en primavera-verano, lo que se explica por las temperaturas mayores de este periodo de crecimiento de los cultivos. La diferencia notable en la huella hídrica del cultivo de cebolla para los dos ciclos de cultivos —para los cuales la temperatura y precipitación son variables climáticas determinantes de la diferencia de condiciones del crecimiento del cultivo— puede dar una idea de que una

condición de cambio climático, con temperaturas mayores y precipitaciones menores, llevaría a una huella hídrica verde menor del cultivo y a aumentar la necesidad de agua de riego, incrementando su huella hídrica azul.

El rendimiento de los cultivos afecta la eficiencia del uso del agua y, por lo tanto, a la huella hídrica. El rendimiento estimado para el cultivo de cebolla para primavera-verano (7.69 t ha^{-1}) es bajo, comparado con el estimado en este ciclo para el estado de Puebla (21.2 t ha^{-1}) y el promedio nacional (33.6 t ha^{-1}) (SIAP, 2018). Consideramos que éste es un factor clave en la eficiencia del uso del agua y explica la huella hídrica alta estimada. En cambio, el rendimiento para el cultivo de cebolla del ciclo de otoño-invierno (20.4 t ha^{-1}) es mayor al rendimiento promedio estatal (16.0 t ha^{-1}) y similar al rendimiento promedio nacional (21.2 t ha^{-1}) (SIAP, 2019). Los resultados indican mayor eficiencia en el uso del agua para este ciclo, con una huella hídrica menor.

El cultivo de tomate de cáscara para el ciclo otoño-invierno tuvo una huella hídrica total ($196.32 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$) menor a la huella hídrica total del cultivo de cebolla tanto de primavera-verano como de otoño-invierno, lo que indica mayor eficiencia en el uso de agua, como alternativa de cultivo. Se tiene poca información sobre la huella hídrica del cultivo de tomate de cáscara. Una comparación indirecta se puede hacer de las ET_c obtenidas en este estudio, con la reportada para un estudio que se realizó en Chapingo, México, por López, Arteaga, Vázquez, López, y Sánchez (2010). En dicho estudio se obtuvo un valor de ET_c para el periodo de cultivo de 300.2 mm, mientras que los autores referidos informan un valor de ET_c para tomate de cáscara de 243 mm.

Debe considerarse el hecho de que en este estudio se realizó una estimación con datos climáticos, mientras que los autores estimaron la ET_c a partir de datos de potencial mátrico del suelo. Otra posible comparación es con los valores reportados para cultivos hortícolas hecha por Mekonnen y Hoekstra (2010). Ellos reportan valores de 194, 43, 85 y 322 $m^3 t^{-1}$ para las huellas hídricas verde, azul, gris y total, respectivamente, para cultivos hortícolas. En tal estudio se obtuvieron valores de 165.75, 21.95, 8.63 y 196.32 $m^3 t^{-1}$ para las huellas hídricas verde, azul, gris y total, respectivamente. Las huellas hídricas parciales y la total son menores a los valores promedio reportados por los autores mencionados. Ello se explica porque en el presente estudio se contabilizó el uso de fertilizante nitrogenado y fosfórico; no se incluyó el uso de pesticidas.

El agua incorporada en el proceso de producción de los cultivos de cebolla y tomate de cáscara tiene importancia en el uso de agua regional, ya que representa 5.22% del volumen concesionado para todos los usos, y 6.83% del concesionado para uso agrícola. El mayor impacto lo tiene el cultivo de cebolla. Para una región con una creciente presión de demanda de agua para uso doméstico, industrial y recreativo, hacer más eficiente la agricultura de riego es necesario para disminuir la presión sobre el recurso hídrico, principalmente del agua extraída del acuífero Atlixco-Izúcar de Matamoros.

Conclusiones

El cultivo de cebolla (*Allium cepa* L.) del ciclo primavera-verano tuvo una huella hídrica alta en la región de Atlixco, Puebla, en comparación con los valores estimados para otras regiones de México y del mundo, y está asociada con un alto requerimiento de agua azul, por las condiciones de temperatura y precipitación. El cultivo de cebolla (*Allium cepa* L.) del ciclo otoño-invierno tuvo una huella hídrica menor a la del ciclo primavera-verano y similar a la reportada como promedio mundial para el cultivo. La temperatura de la región durante los meses del ciclo de cultivo se relaciona con la evapotranspiración y determina el valor de la huella hídrica total. El cultivo de tomate de cáscara (*Physalis ixocarpa* Brot.) del ciclo otoño-invierno tuvo una huella hídrica menor que la del cultivo de cebolla tanto para primavera-verano como para otoño-invierno y es menor a la reportada como valor promedio para los cultivos hortícolas.

Los cultivos de cebolla (*Allium cepa* L.) y tomate de cáscara (*Physalis ixocarpa* Brot.), en la región de Atlixco, Puebla, incorporan a su proceso productivo 5.5 hm³ por año agrícola, lo que representa 5.22% del agua concesionada para todos los usos consuntivos y 6.83% de la concesionada para uso agrícola.

Referencias

Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (2006). *Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los*

- requerimientos de agua de los cultivos*. Recuperado de <http://www.fao.org/3/a-x0490s.pdf>
- Bennet, E. M., Carpenter, S. R., & Caraco, N. F. (2001). Human impact on erodible phosphorus and eutrophication: A global perspective. *Bioscience* 51, 227-234. DOI: [Doi.org/10.1641/0006-3568\(2001\)051\[0227:HIOEPA\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2001)051[0227:HIOEPA]2.0.CO;2)
- Burman, R., & Pochop, L. O. (1994). *Evaporation, evapotranspiration and climatic data*. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier.
- Castañeda, J. C., & Ramírez, J. A. (2016). *Evaluación del uso y gestión del recurso hídrico para el cultivo de cebolla de bulbo en la finca Buena Vista de la Vereda de Flores-Cundinamarca* (tesis de licenciatura). Universidad de la Salle, Bogotá, Colombia. Recuperado de https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_ambiental_sanitaria/433/
- Chukalla, A. D., Krol, M. S., & Hoekstra, A. Y. (2015). Green and blue water footprint reduction in irrigated agriculture: Effect of irrigation techniques, irrigation strategies and mulching. *Hydrology and Earth System Sciences*, 19, 4877-4891. DOI: [10.5194/hess-19-4877-2015](https://doi.org/10.5194/hess-19-4877-2015).
- Conagua, Comisión Nacional del Agua. (2016). *Programas contra contingencias hidráulicas por organismos de cuencas para las principales ciudades del país (etapa 2)*. Recuperado de http://viveatoyac.org.mx/images/ZONA_URBANA_ATLIXCO__PUE.pdf
- DOF, Diario Oficial de la Federación. (1996). *Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996, que establece los límites máximos*

permisibles de contaminación en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. Ciudad de México, México: Diario Oficial de la Federación.

FAO, Food and Agriculture Organization. (1996). *CROPWAT: A computer program for irrigation planning and management.* Rome, Italy: Food and Agriculture Organization.

Franke, N. A., Boyacioglu, H., & Hoekstra, A. Y. (2013). *Grey water footprint accounting.* TIER 1 supporting guidelines. Recuperado de https://waterfootprint.org/media/downloads/Report65-GreyWaterFootprint-Guidelines_1.pdf

Hoekstra, A. Y., & Chapagain, A. K. (2007). Water footprints of nations: Water use by people as a function of their consumption pattern. *Water Resources Management*, 21(1), 35-48. DOI 10.1007/s11269-006-9039-x

Hoekstra, A. Y., Chapagain, A. K., Aldaya, M. M., & Mekonnen, M. M. (2011). *Water Footprint Assessment Manual. Setting the Global Standard.* Recuperado de https://waterfootprint.org/media/downloads/TheWaterFootprintAssessmentManual_2.pdf

López, R., Arteaga, R., Vázquez, M. A., López, I. L., & Sánchez, C. I. (2010). Evapotranspiración del cultivo de tomate de cáscara (*Physalis ixocarpa* Brot.) estimada mediante el potencial mátrico del suelo. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 33(2), 157-168. Recuperado de <https://www.revistafitotecniamexicana.org/documentos/33-2/9a.pdf>

- López-López, R., Arteaga-Ramírez, R., Vázquez-Peña, M. A., López-Cruz I. L., & Sánchez-Cohen, I. (2009). Producción de tomate de cáscara (*Physalis ixocarpa* Brot.) basado en láminas de riego y acolchado plástico. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 15(1), 83-89. Recuperado de <http://www.scielo.org.mx/pdf/rcsh/v15n1/v15n1a12.pdf>
- Mallma, T., & Mejía, J. A. (2015). Huella hídrica de productos agrícolas producidas en la Sierra Central y comercializados en Lima. *Apuntes de Ciencia & Sociedad*, 5(1), 128-134. DOI: <http://dx.doi.org/10.18259/acs.2015020>.
- McDonald, R. I., Green, P., Balk, D., Fekete, B. M., Revenga, C., Todd, M., & Montgomery, M. (2011). Urban growth, climate change, and freshwater availability. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 108(15), 6312-6317. DOI: [Doi.org/10.1073/pnas.1011615108](https://doi.org/10.1073/pnas.1011615108)
- Meinzen-Dick, R., & Appasamy, A. (2002). Urbanization and intersectoral competition for water. In: *Finding the source: The linkages between population and water* (pp. 27-51). Recuperado de <https://www.wilsoncenter.org/sites/default/files/media/documents/publication/popwawa3.pdf>
- Mekonnen, M. M., & Hoekstra, A. Y. (2010). *The green, blue and grey water footprint of crops and derived crop products. Volume 1: Main report*. Recuperado de <https://waterfootprint.org/media/downloads/Report47-WaterFootprintCrops-Vol1.pdf>

- Mekonnen, M. M., & Hoekstra, A. Y. (2014). Water footprint benchmarks for crop production: A first global assessment. *Ecological Indicators*, 46, 214-223. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.06.013>
- Morison, J. I. L., Baker, N. R., Mullineaux, P. M., & Davies, W. J. (2008). Improving water use in crop production. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 363, 639-658. DOI: 10.1098/rstb.2007.2175
- Novoa, V., Rojas, O., Arumí, J. L., Ulloa, C., & Urrutia, R. (2016). Variabilidad de la huella hídrica del cultivo de cereales, río Cachapoal, Chile. *Tecnología y ciencias del agua*, 7(2), 35-50. Recuperado de <http://revistatyca.org.mx/ojs/index.php/tyca/article/view/1138>
- Obersteiner, M., Penuelas, J., Ciais, P., Van der Velde, M., & Janssens, I. A. (2013). The phosphorus trilemma. *Nature Geoscience*, 6(11), 897-898. DOI: 10.1038/ngeo1990
- Pellicer-Martínez, F., & Martínez-Paz, J. M. (2016). The water footprint as an indicator of environmental sustainability in water use at the river basin level. *Science of the Total Environment*, 571(15), 561-574. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.07.022
- Perry, C. (2007). Efficient irrigation; inefficient communication; flawed recommendations. *Irrigation and Drainage*, 56, 367-378. DOI: 10.1002/ird
- Renderos, R. (2014). *Huella hídrica del cultivo de caña de azúcar*. Recuperado de

https://www.researchgate.net/publication/303939723_Huella_Hidrica_del_Cultivo_de_Cana_de_Azucar

REPDA, Registro Público de Derechos de Agua. (2016). *Base de datos de títulos y permisos de aguas nacionales y sus bienes públicos inherentes*. Recuperado de

<https://app.conagua.gob.mx/repda.aspx>

Ríos-Flores, J. L., Jacinto-Soto, R., Torres-Moreno, M. A., & Torres-Moreno, M. (2017). Huella hídrica del cultivo de cebolla producida en el DR005, Delicias, Chihuahua. En: Pérez, F., Figueroa, E., Godínez, L., & Salazar, R. (eds.). *Ciencias de la Economía y Agronomía. Handbook T-I*. -©ECORFAN. Recuperado de https://www.ecorfan.org/handbooks/Ciencias%20de%20la%20Economía%20y%20Agronomía%20T-I/HCEA_TI_2.pdf

Sadras, V. O., Grassini, P., & Steduto, P. (2011). Status of water use efficiency of main crops. In: *SOLAW Background Thematic Report-TR07* (pp. 41). Recuperado de http://www.fao.org/fileadmin/templates/solaw/files/thematic_reports/TR_07_web.pdf

Shiklomanov, I. A. (2000). Appraisal and assessment of world water resources. *Water International*, 25(1), 11-32. DOI: [Doi.org/10.1080/02508060008686794](https://doi.org/10.1080/02508060008686794)

SIAP, Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. (2017). *Cierre estadístico de la producción agrícola 2017*. Recuperado de <https://www.gob.mx/siap/articulos/cierre-estadistico-de-la-produccion-agricola-2017?idiom=es>

- SIAP, Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. (2018). *Avance de siembras y cosechas resumen por cultivo, Puebla, Otoño-Invierno*. Recuperado de http://infosiap.siap.gob.mx:8080/agricola_siap_gobmx/ResumenDelegacion.do
- SIAP, Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. (2019). *Avance de siembras y cosechas resumen nacional por estado*. Recuperado de http://infosiap.siap.gob.mx:8080/agricola_siap_gobmx/AvanceNacionalCultivo.do
- Sutton, M. A., Bleeker, A., Howard, C. M., Bekunda, M., Grizzetti, B., de Vries, W., Van Grinsven, H. J. M., Abrol, Y. P., Adhya, T. K., & Billen, G. (2013). *Our nutrient World: The challenge to produce more food and energy with less pollution*. Recuperado de <http://nora.nerc.ac.uk/id/eprint/500700/>
- Valdivia, S., Ugaya, C. M. L., & Hildenbrand, J. (2013). A UNEP/SETAC approach towards a life cycle sustainability assessment. Our contribution to Rio+20. *International Journal Life Cycle Assess*, 18(9), 1673-1685. DOI: [Doi.org/10.1007/s11367-012-0529-1](https://doi.org/10.1007/s11367-012-0529-1)
- Vanham, D., & Bidoglio, G. (2013). A review on the indicator water footprint for the EU28. *Ecological Indicators*, 26, 61-75. DOI: [Doi.org/10.1016/j.ecolind.2012.10.021](https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2012.10.021)
- Vitousek, P. M., Naylor, R., Crews, T., David, M. B., Drinkwater, L. E., Holland, E., Johnes, P. J., Katzenberger, J., Martinelli, L. A., Matson, P. A., Nziguheba, G., Ojima, D., Palm, C. A., Robertson, G. P., Sanchez, P. A., Townsend, A. R., & Zhang, F. S. (2009).

Nutrient imbalances in agricultural development. *Science*, 324,
1519-1520. DOI: 10.1126/science.1170261