



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS PUEBLA

POSTGRADO EN ESTRATEGIAS PARA EL DESARROLLO AGRÍCOLA REGIONAL

**HUELLA HÍDRICA DE LOS CULTIVOS DE CEBOLLA (*Allium cepa* L.) Y
TOMATE DE CÁSCARA (*Physalis ixocarpa* Brot.) BAJO RIEGO EN LA
REGIÓN DE ATLIXCO, PUEBLA, MÉXICO**

ANA MARÍA PEÑALOZA SÁNCHEZ

TESIS

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRA EN CIENCIAS

Puebla, Puebla
2019



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS
CAMPECHE-CÓRDOBA-MONTECILLO-PUEBLA-SAN LUIS POTOSÍ-TABASCO-VERACRUZ

SUBDIRECCIÓN DE EDUCACIÓN
CAMPUS PUEBLA

CAMPUE- 43-2-03

CARTA DE CONSENTIMIENTO DE USO DE LOS DERECHOS DE AUTOR Y DE LAS REGALÍAS COMERCIALES DE PRODUCTOS DE INVESTIGACIÓN

En adición al beneficio ético, moral y académico que he obtenido durante mis estudios en el Colegio de Postgraduados, la que suscribe **Ana María Peñaloza Sánchez**, alumna de esta Institución, estoy de acuerdo en ser partícipe de las regalías económicas y/o académicas, de procedencia nacional e internacional, que se deriven del trabajo de investigación que realicé en esta Institución, bajo la dirección del Profesor **Dr. Angel Bustamante González**, por lo que otorgo los derechos de autor de mi tesis **Huella Hídrica de los cultivos de cebolla (*Allium cepa* L.) y tomate de cáscara (*Physalis ixocarpa* Brot.) bajo riego en la región de Atlixco, Puebla, México**, y de los productos de dicha investigación al Colegio de Postgraduados. Las patentes y secretos industriales que se puedan derivar serán registrados a nombre del Colegio de Postgraduados y las regalías económicas que se deriven serán distribuidas entre la Institución, el Consejero o Director de Tesis y la que suscribe, de acuerdo a las negociaciones entre las tres partes, por ello me comprometo a no realizar ninguna acción que dañe el proceso de explotación comercial de dichos productos a favor de esta Institución.

Puebla, Puebla, 9 de julio del 2019.

Ana María Peñaloza Sánchez

Vo. Bo. Profesor Consejero o Director de Tesis
Dr. Angel Bustamante González

La presente tesis, titulada: **Huella hídrica de los cultivos de cebolla (*Allium cepa* L.) y tomate de cáscara (*Physalis ixocarpa* Brot.) bajo riego en la región de Atlixco, Puebla, México**, realizada por la alumna: **Ana María Peñaloza Sánchez**, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRA EN CIENCIAS

ESTRATEGIAS PARA EL DESARROLLO AGRÍCOLA REGIONAL

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO: 
DR. ANGEL BUSTAMANTE GONZÁLEZ

ASESOR: 
DR. SAMUEL VARGAS LÓPEZ

ASESOR: 
DR. JOSÉ LUIS JARAMILLO VILLANUEVA

ASESOR: 
DR. ABEL QUEVEDO NOLASCO

Puebla, Puebla, México, 9 de julio del 2019

HUELLA HÍDRICA DE LOS CULTIVOS DE CEBOLLA (*Allium cepa* L.) Y TOMATE DE CÁSCARA (*Physalis ixocarpa* Brot.) BAJO RIEGO EN LA REGIÓN DE ATLIXCO, PUEBLA, MÉXICO

Ana María Peñaloza Sánchez, M.C.

Colegio de Postgraduados, 2019

La Huella Hídrica en el sector agrícola es un indicador de consumo directo e indirecto del agua dulce en la producción de cultivos agrícolas. El objetivo de este estudio fue calcular los componentes de la huella hídrica azul, verde y gris de los cultivos de tomate de cáscara (*Physalis ixocarpa* Brot.) y cebolla (*Allium cepa* L.) en las áreas de agricultura de riego en la región de Atlixco, Puebla, México. Se estimó la Huella Hídrica del cultivo de cebolla para los ciclos de primavera-verano (P-V) y otoño-invierno (O-I) de 2017. Para el cultivo de tomate de cáscara se estimó para el ciclo de O-I, ciclo para el que se reporta la principal producción del cultivo en la región. Las Huellas Hídricas verde y azul se estimaron a partir de la evapotranspiración de los cultivos estimada con el programa CROPWAT versión 8, a partir de información climática de la estación más cercana 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. El cultivo de cebolla de P-V tuvo la mayor Huella Hídrica, comparada con la estimada para el mismo cultivo y el cultivo de tomate de cáscara de O-I. Las condiciones climáticas son clave para explicar la mayor ineficiencia del uso del agua en la producción de cultivos en el ciclo de P-V en la región. Se concluyó que los cultivos de cebolla y tomate de cáscara tienen un uso consuntivo de agua alto en la región, ya que en el año agrícola de 2017 el agua incorporada al proceso de producción de los mismo fue de 4876710.27 m³, lo que representa el 5.22% del agua concesionada para todos los usos consuntivos de agua y el 6.83% del agua concesionada para la agricultura en la región.

Palabras clave: Atlixco, cebolla, Huella Hídrica, tomate de cáscara

WATER FOOTPRINT OF ONION (*Allium cepa* L.) AND HUSK TOMATO (*Physalis ixocarpa* Brot.) CROPS UNDER IRRIGATED CONDITIONS IN THE REGION OF ATLIXCO, PUEBLA, MEXICO

Ana María Peñaloza Sánchez, M.C.
Colegio de Postgraduados, 2019

The Water Footprint in the agricultural sector is an indicator of direct and indirect consumption of fresh water in crop production. The objective of this study was to estimate the blue, green and gray Water Footprint of husk tomato (*Physalis ixocarpa* Brot.) and onion (*Allium cepa* L.) crops in the irrigated agriculture areas in the region of Atlixco, Puebla, Mexico. The Water Footprint of the onion crop was estimated for the spring-summer (PV) and autumn-winter (OI) cycles of 2017. For the cultivation of husk tomato, it was estimated for the RO cycle, cycle for which its production is relevant in the region. The green and blue water footprints were calculated from the evapotranspiration of the crops estimated with the program CROPWAT version 8, from climatic information of the nearest climatic station and information on yield, management practices and development of the crops obtained in a survey of producers in the region. The gray water footprint was estimated based on the use of nitrogen and phosphorus fertilizers. Onion cultivation of P-V had the highest Water Footprint, compared with that estimated for the same crop and the tomato crop of O-I. Climatic conditions are key to explain the greater inefficiency of water use in crop production in the P-V cycle in the region. It was concluded that onion and tomato peel crops have a high consumptive use of water in the region, since in the agricultural year of 2017 the water incorporated into the production process was 4876710.27 m³, which represents 5.22% of the assigned water for all consumptive water uses and 6.83% of the assigned water for agriculture in the region.

Keywords: Atlixco, onion, water footprint, husk tomato

AGRADECIMIENTOS

Al Colegio de Postgraduados Campus Puebla por todos los recursos otorgados durante el proceso formativo en lo académico y personal en este periodo.

Al Dr. Angel Bustamante González por su amistad, su apoyo, su paciencia y aportes en cada etapa de la investigación.

Al Comité asesor Dr. Samuel Vargas López, Dr. José Luis Jaramillo Villanueva, Dr. Abel Quevedo Nolasco y al Dr. Mario Roberto Martínez Menes † por sus valiosas aportaciones en el proceso de la investigación.

A mis padres Rosa María y Mario a mi hermana Adriana por todo su apoyo y amor en para llegar a la meta.

A mi hijo, Paulo, por su paciencia, su amor y alegría.

A Mauro por todo el apoyo para lograr este objetivo.

CONTENIDO

	Página
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Planteamiento del problema de investigación.....	2
1.2. Objetivos.....	7
1.3. Hipótesis.....	7
2. MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL.....	8
2.1. El recurso hídrico en el contexto global.....	8
2.2. La agricultura: principal demandante de agua	9
2.3. El agua desde la perspectiva económica convencional.....	10
2.3.1. Valoración económica y contabilidad del agua.....	10
2.3.2. Instrumentos económicos.....	11
2.3.3. Análisis de relación beneficio-costos y efectividad-costos.....	11
2.3.4. Productividad y eficiencia del agua.....	12
2.3.5. Gobernanza	14
2.3.6. Asignación del recurso hídrico.....	15
2.4. El recurso hídrico desde la perspectiva de la economía ecológica.....	16
2.4.1. Agua virtual.....	16
2.4.2. Huella hídrica.....	17
2.4.2.1. Concepto de huella hídrica.....	17
2.4.2.2. La Huella Hídrica en el sector agrícola	19
2.4.2.3. Estimación de la Huella Hídrica de cultivos agrícolas	20

	Página
3. MATERIALES Y MÉTODOS	23
3.1. Área de estudio.....	23
3.1.1. Localización	23
3.1.2 Recurso hídrico.....	23
3.1.3. Clima.....	25
3.1.4. Suelos	26
3.2. Estimación de la Huella Hídrica	26
3.2.1 Huella Hídrica verde	27
3.2.2. Huella Hídrica azul	30
3.2.3. Estimación la Huella Hídrica gris	31
3.2.4. Información usada en el programa CROPWAT.....	33
3.3. Encuesta para obtener información de desarrollo del cultivo y prácticas de manejo.....	36
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	37
4.1. Características de las parcelas de cultivo de tomate de cáscara y cebolla ...	37
4.2. Precipitación efectiva y Evapotranspiración (ETo) para la zona de estudio....	39
4.3. Huella hídrica para el cultivo de cebolla de O-I	41
4.4 Huella Hídrica del cultivo de cebolla de P-V	45
4.5 Huella Hídrica del cultivo de tomate de cáscara de O-I.....	50
4.6 Implicaciones de la Huella Hídrica sobre el recurso hídrico regional	55
5. CONCLUSIONES	57
6. LITERATURA CITADA	58

LISTA DE CUADROS

	Página
Cuadro 1. Concesiones de agua en la región de Atlixco, Puebla	25
Cuadro 2. Información utilizada para la estimación de la Huella Hídrica gris	33
Cuadro 3. ETo de la estación CLIMWAT Puebla	34
Cuadro 4. Parámetros de características del suelo usados con el programa CROPWAT	34
Cuadro 5. Periodo de crecimiento de los cultivos	35
Cuadro 6. Duración de las etapas de desarrollo de los cultivos de cebolla y tomate de cáscara.....	35
Cuadro 7. Parámetros de datos de desarrollo del cultivo	36
Cuadro 8. Datos recolectados en las parcelas en la región de Atlixco....	38
Cuadro 9. Precipitación efectiva y evapotranspiración de referencia estimada para la zona de estudio	40
Cuadro 10. Huella Hídrica verde para el cultivo de cebolla de O-I	42
Cuadro 11. Huella Hídrica azul para el cultivo de cebolla de O-I	43
Cuadro 12. Huella Hídrica gris para el cultivo de cebolla de O-I	44
Cuadro 13. Huella Hídrica verde para el cultivo de cebolla de P-V	47
Cuadro 14. Huella Hídrica azul para el cultivo de cebolla de P-V	48
Cuadro 15. Huella Hídrica gris del cultivo de cebolla de P-V	49
Cuadro 16. Huella Hídrica verde para el cultivo de tomate de cáscara de O-I	52
Cuadro 17. Huella Hídrica azul para tomate de cáscara de O-I	53
Cuadro 18. Huella Hídrica gris del cultivo de tomate de cáscara de O-I .	54

Cuadro 19. Impacto de la Huella Hídrica de los cultivos de cebolla y tomate de cáscara sobre el recurso hídrico regional	56
---	----

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Figura 1. Porcentaje de superficie por cultivo en Atlixco en ciclo O-I de 2017	4
Figura 2. Porcentaje de superficie por cultivo en Atlixco en ciclo P-V de 2017	5
Figura 3. Localización del área de estudio	23
Figura 4. Precipitación efectiva (P_e) y Evapotranspiración de referencia (ET_o)	40
Figura 5. Comparación de las Huellas Hídricas de los cultivos evaluados.....	55

1. INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso natural sobre el que se ha generado una alta presión debido a la sobredemanda 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, que para muchas regiones es cada vez más escasa, particularmente entre las actividades agropecuarias del medio rural y los usos domésticos e industriales del medio urbano (Meinzen-Dick y 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 de 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 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 aproximadamente del 80% al 90% del consumo mundial de agua (Shiklomanov, 2000; Morison *et al.*, 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 para una porción de la población e industrias. Sin embargo, es conveniente hacer más eficiente el uso del agua para riego, para generar excedentes de agua transferibles para otros usos económicos o para uso ecológico (Chukalla *et al.*, 2015).

Un análisis importante es la identificación de indicadores de demanda de agua de los cultivos de riego y la eficiencia del uso del agua. Estos indicadores permiten comparar la demanda y eficiencia de uso del agua por diferentes cultivos, para una mejor planeación y manejo del agua en una cuenca. Un parámetro usual relacionado con la demanda del recurso hídrico es el uso consuntivo. El uso consuntivo del agua en un determinado período en una determinada cuenca hace referencia al agua que después de su uso ya no está disponible para otros fines, porque se evapora (Perry, 2007). De acuerdo con Burman y Pochop (1994), el término uso consuntivo se originó en el oeste de los Estados Unidos 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 uso de agua en

un proceso de producción de un bien o un servicio, se han propuesto diferentes indicadores aplicables a niveles local, regional, nacional e internacional. Dentro de estos indicadores, uno de los más actuales y más utilizados recientemente es el de Huella Hídrica (Vanham y Bidoglio, 2013).

La estimación de la huella hídrica para las zonas de regadío del país es información valiosa para evaluar la racionalidad de la producción agrícola de una cuenca o región (Sadras *et al.*, 2011) y compararla con la disponibilidad del recurso hídrico. La huella hídrica debe estimarse por cultivo y por ciclo de producción para cada cuenca donde la agricultura de riego demanda cantidades importantes de agua y compiten 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 doméstico, industriales y de servicios.

El objetivo de este estudio fue estimar la Huella Hídrica de los cultivos de tomate de cáscara y cebolla producidos bajo riego en la región de Atlixco, Puebla. Se seleccionó esta área de estudio por su importancia en la producción de hortalizas y flores. Para cada uno de los dos cultivos, se cuantificaron los componentes de la Huella Hídrica: Huella Verde, Huella Azul y Huella Gris. El análisis y la determinación de la Huella Hídrica se realizaron con el software CROPWAT versión 8.0, diseñado por la FAO.

1.1. Planteamiento del problema de investigación

En México se tienen 50,735 unidades de riego, con 4 020 000 ha irrigadas. En el estado de Puebla, para el año agrícola 2016-2017 se reportó una superficie sembrada bajo riego de 150,427.02 ha, con una superficie cosechada de 149,112.57 ha; la producción generada fue de 4,517,612.24 t, lo que generó un valor de producción de 7,777,033.17 miles de pesos. Los cultivos con mayor superficie sembrada fueron maíz para producción de grano, maíz para producción de elote, cebolla, calabacita, tomate de cáscara y papa,

con una superficie de 5,999.0 ha, 5,541.00 ha, 2, 599.8 ha, 1,943.6 ha, 1,424.4 ha, 1,286.4 ha, respectivamente (CONAGUA, 2018).

La región de Atlixco, en el estado de Puebla, está delimitada por los municipios de Atlixco, Tochimilco y Huaquechula, dentro de la cuenca Nexapa, se caracteriza por la producción de cultivos hortícolas y flores comerciales que se destinan para el mercado nacional e internacional. En el ciclo de cultivo de otoño-invierno (O-I) de 2017, los cultivos de cebolla, calabacita, tomate de cáscara y gladiola ocuparon la mayor superficie (Figura 1). Del total de la superficie cultivada y cosechada en Atlixco, la cebolla ocupó el 21% y el tomate de cáscara un 13% en el ciclo otoño-invierno (O-I) en el año 2017. La superficie cosechada de cebolla fue de 460 ha, con un rendimiento promedio de 18.3 ton ha⁻¹. Para el tomate de cáscara se cosecharon 290 ha, con un rendimiento de 12.3 ton ha⁻¹. Del total de la superficie cultivada y cosechada en el ciclo primavera-verano (P-V) del año 2017, el cultivo de cebolla ocupó el 10% y el tomate de cáscara de 4% (Figura 2). Se sembraron 234.3 ha de cebolla con un rendimiento promedio de 15.3 ton ha⁻¹.

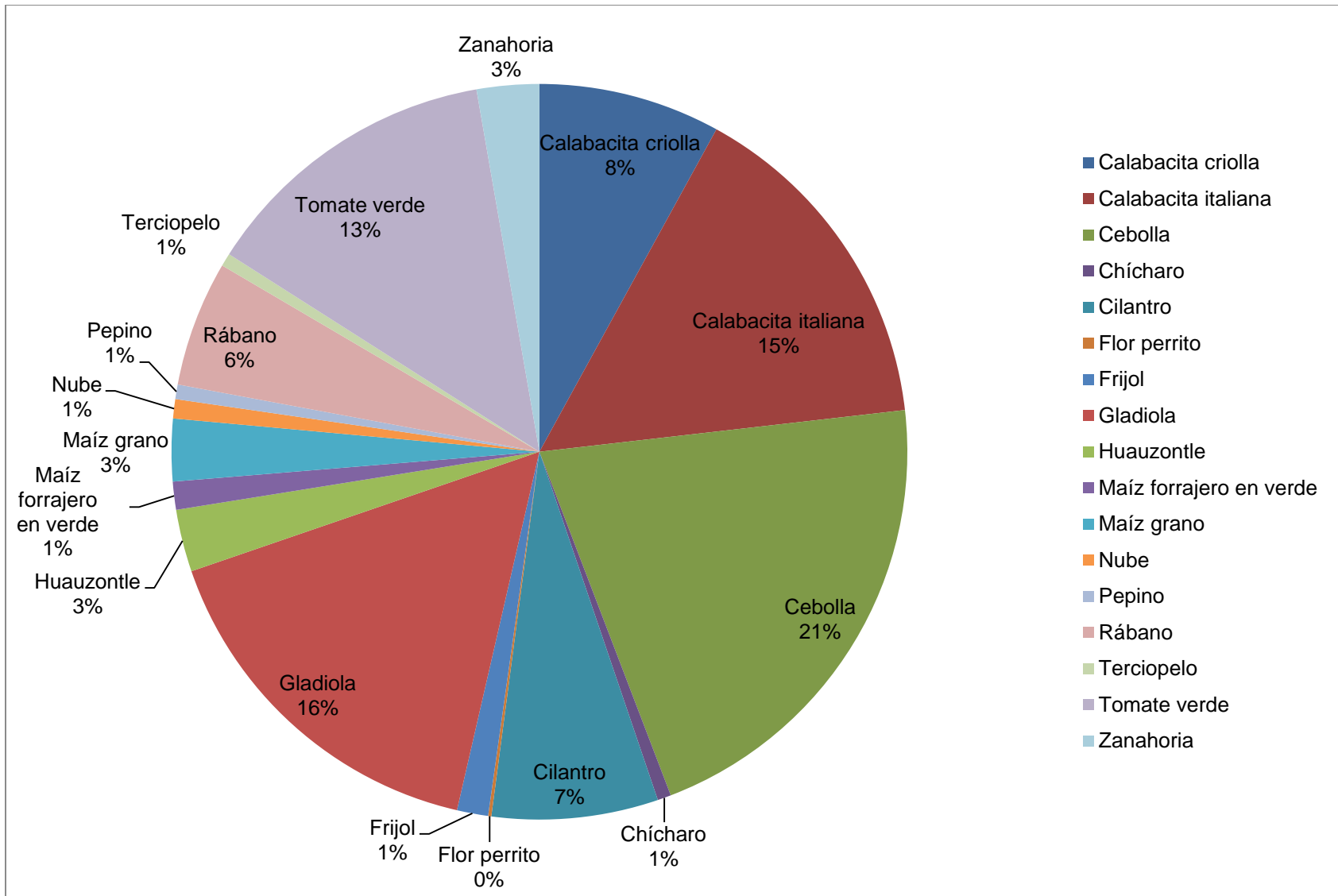


Figura 1. Porcentaje de superficie por cultivo en Atlixco en ciclo O-I de 2017

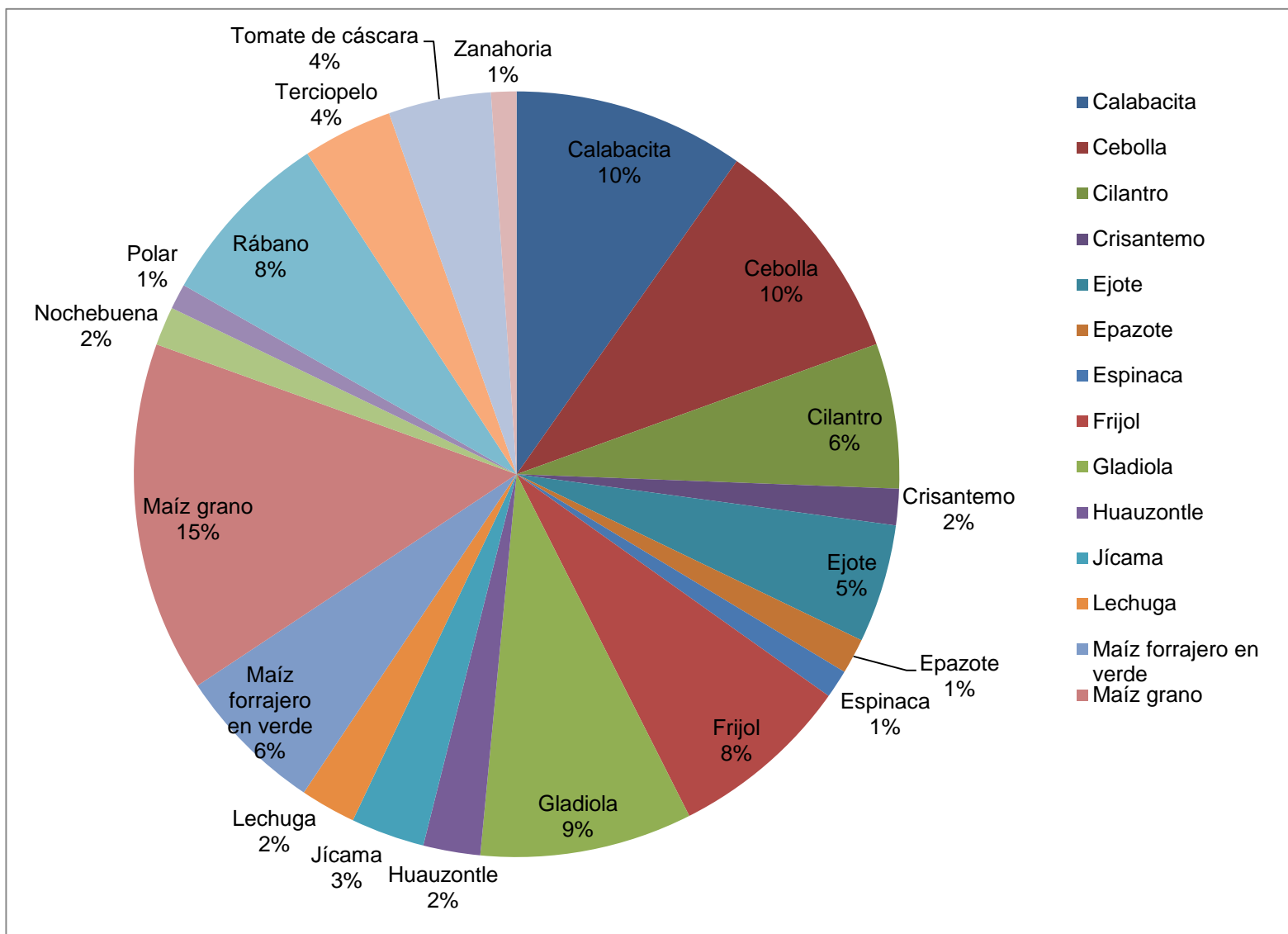


Figura 2. Porcentaje de superficie por cultivo en Atlixco en ciclo P-V de 2017

En la región, se utilizan las aguas superficiales y subterráneas para la producción agrícola. Paralelamente a esto, en la región se tiene un rápido crecimiento de desarrollos habitacionales y turísticos. Como consecuencia, se ha ocasionado alta competencia por los recursos hídricos en la región. En lo que se refiere al sector agrícola, se registra una superficie de cultivos de riego de 24,391 ha (DOF, 2015), por lo que la agricultura es un usuario altamente demandante del recurso hídrico en la región, y se tiene limitaciones ya del recurso en la región (La Campiña, 2016). Por otro lado, en la región de Atlixco la población aumentó en un 60% entre 1970 y 2005 (INEGI, 2010), por lo que el crecimiento en el desarrollo de conjuntos habitacionales es cada vez mayor. La disponibilidad media anual de agua superficial de la cuenca del Río Nexapa es de -10.9 millones de m³ (DOF, 2011) y de agua subterránea de 47,141,339 m³ /año (DOF, 2015).

La existencia de una notable competencia por el uso de agua entre los sectores agrícola, urbano e industrial requiere un análisis de la sostenibilidad del uso actual del agua en la región. Debido a que el principal demandante de agua es el uso agrícola, se considera que la huella hídrica es un indicador para evaluar la sostenibilidad del recurso hídrico, ya que permite comparar el uso del recurso hídrico entre cultivos y con otros procesos productivos no agrícolas. Esto lo hace valioso para la gestión de la política pública, económica y ambiental en la región de Atlixco y en el estado de Puebla.

En esta investigación se consideró la siguiente pregunta de investigación:

¿Cuál es la contribución de la Huella Hídrica de los cultivos de cebolla y tomate de cáscara sobre la disponibilidad del recurso hídrico en la región de Atlixco, Puebla, México?

1.2 Objetivo

Determinar el impacto de la producción agrícola de los cultivos de la cebolla y tomate de cáscara sobre el recurso hídrico, de acuerdo con su Huella Hídrica, en la región de Atlixco, Puebla, México.

1.3 Hipótesis

Los cultivos de cebolla y tomate de cáscara tienen una Huella Hídrica verde, azul y gris alta y son un factor de presión a la disponibilidad del recurso hídrico de la región de Atlixco, Puebla, México

2. MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL

2.1. El recurso hídrico en el contexto global

El agua es un recurso natural fundamental para la vida humana y de los demás seres vivos. Para el hombre, además de su requerimiento para sus funciones fisiológicas, el recurso hídrico es la base de las actividades económicas, ya sean productivas, de servicios o recreativas. Para los ecosistemas, el agua está relacionada con los ciclos de materia y energía, donde sobresale la producción de biomasa. Además de la competencia de los usos humanos con los ecosistemas por el agua, la escasez del recurso ha acentuado en las últimas décadas la competencia entre diferentes usos humanos. Un reto de la gestión del agua es lograr un aprovechamiento sustentable del recurso, no agotando el agua disponible y manteniendo caudales de aguas superficiales y volúmenes de aguas subterráneas que permitan el buen funcionamiento de los ecosistemas. Un tema fundamental en esto es el balance entre la disponibilidad y la demanda del agua, lo cual depende de factores naturales y antropogénicos (Issanova *et al.*, 2018).

La producción de bienes y servicios, así como las actividades agrícolas e industriales son los principales consumidores del agua de acuerdo con datos generados a escala mundial. Es preciso disponer de suficientes recursos hídricos para responder a las grandes necesidades de los consumidores y en especial del sector agroalimentario (Aivazidou *et al.*, 2016). El alto consumo de agua superficial y subterránea, la contaminación y la degradación del suelo son de los grandes problemas ambientales que se generan por la actividad agrícola (Mekonnen y Hoekstra, 2011).

Los sistemas actuales de producción y de consumo se han señalado en su mayoría como insostenibles desde las perspectivas social, económica y ambiental (Blok *et al.*, 2015). El gran sistema de producción agroalimentario y forrajes para la producción pecuaria ocasiona grandes emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) (Renzulli *et al.*, 2015) y por consecuencia una sobre explotación y agotamiento del agua (Hess *et al.*, 2016;

Pellegrini *et al.*, 2016). Debido a ello, se han dirigido estudios para evaluar y mitigar el impacto ambiental de la agroalimentación (Nemecek *et al.*, 2011). Es preciso implementar y evaluar herramientas que conlleven a una transición hacia sociedades sostenibles y equitativas (Repar *et al.*, 2016).

2.2. La agricultura: principal demandante de agua

La producción de cultivos para abastecer la demanda de alimentos, forrajes y materias primas para actividades industriales, como la producción de biocombustibles, es la que consume más agua en el mundo (Pimentel *et al.*, 1997). A nivel mundial, se estima un uso consuntivo promedio de agua por la agricultura del 85% del uso consuntivo global (Foley *et al.*, 2005). La irrigación de las tierras agrícolas se hace extrayendo agua subterránea o desviando agua de los cauces y cuerpos de agua superficiales. Cuando se hace un uso simultáneo de aguas superficiales y aguas subterráneas, o un manejo coordinado del recurso hídrico, se le denomina uso “conjuntivo” del agua (Singh, 2014), lo que permite no presionar la disponibilidad de ninguna de las dos fuentes del recurso.

En México, la demanda de agua por la industria es de 505 Hm³ año⁻¹, doméstico 2105 hm³ año⁻¹ y agrícola 12359 hm³ año⁻¹, sin considerar la demanda ambiental. En particular, a la agricultura de regadío se le considera el mayor usuario en México y en el mundo, con una demanda de 82% y 70%, respectivamente (CONAGUA, 2017). Debido a esto, tanto para el agua superficial como para el agua subterránea, se ha puesto mucha atención a la optimización de su uso y manejo eficiente en la agricultura, para transferir, por lo menos parcialmente el agua utilizada para riego agrícola hacia los usos industriales y doméstico. Si bien la base del manejo es la disponibilidad del recurso, ya que no puede utilizarse más de lo que existe en la cuenca o el acuífero, a menos de que se hagan transferencias de otras cuencas o acuíferos, la toma de decisión para la asignación del recurso es socioeconómica y política. Para optimizar la asignación de manera racional, se utilizan generalmente herramientas de las ciencias económicas, ya que cada vez se considera más al agua como un recurso natural escaso.

2.3. El agua desde la perspectiva económica convencional

Desde la década de los 90s del siglo pasado, el tema del agua como un bien económico tomó relevancia en el ámbito académico y de las políticas públicas gubernamentales. Desde entonces, los aspectos relevantes abordados por los estudios de la economía de los recursos naturales son: valoración económica y contabilidad del agua, instrumentos económicos, análisis de relación beneficio-costos y efectividad-costos, productividad y eficiencia del agua y gobernanza (Berbel *et al.*, 2017).

2.3.1 Valoración económica y contabilidad del agua

La economía de los recursos naturales pone énfasis en el estudio de la demanda y la asignación del recurso agua para los diversos usos. Desde una perspectiva de la economía neoclásica, se plantea que los instrumentos de precio del agua es el mejor medio para lograr la sostenibilidad de los sistemas hídricos y su asignación más eficiente para sus usos (Massarutto, 2007). Aunque se reconoce que el agua, como en la mayoría de los recursos naturales, no existen mercados reales y los precios y la asignación del agua a los usos es en gran medida una decisión administrativa, política e ideológica (Olmstead, 2010). Por lo que se han desarrollado propuestas metodológicas para valorar económicamente el recurso hídrico.

En la década de los 50s del siglo pasado se iniciaron las valoraciones de no mercado, utilizando inicialmente el método del viaje del costo del viaje, o más generalmente el método de las preferencias reveladas (Hanemann, 2006). Una categorización de métodos de valoración propone tres grupos: enfoque de valoración directa del mercado, enfoque de las preferencias reveladas y enfoque de las preferencias establecidas (Pascual *et al.*, 2010).

El Sistema de Cuentas Nacionales de un país se mide a través del Producto Interno Bruto, pero no toma en cuenta los activos ambientales y su deterioro, ni la depreciación de los recursos naturales (Torres-Pérez *et al.*, 2001). Una manera de incorporar lo

anterior en las cuentas nacionales de un país son las Cuentas Satélite de Agua. En éstas, se estiman los flujos cuantitativos y cualitativos generados en el ciclo hidrológico y se conectan con el sistema económico (Rey, 2008). Más recientemente, se propuso el Sistema de Contabilidad Ambiental y Económica del Agua que contiene conceptos, clasificaciones, normas de contabilidad y tablas de estadísticas sobre el medio ambiente y su conexión con la economía (Gutiérrez-Martín *et al.*, 2015)

2.3.2. Instrumentos económicos

Una propuesta para abordar el tema de la escasez y sostenibilidad del recurso hídrico desde una perspectiva económica es el uso de mecanismos basados en el mercado. Parte del principio de que por la creciente escasez y costos elevados del agua, este recurso debe ser asignado y usado eficientemente, lo que se hace a través del manejo de la demanda y considerando al agua como un recurso económico (Savenije y van der Zaag, 2002). Los mercados y precios ayudan a asegurar el uso sustentable del agua, minimizan el desperdicio, permiten una asignación eficiente y dan incentivos para el desarrollo de tecnologías hídricas eficientes, así como el re-uso y reciclado (Grimble, 1999). Se han propuesto cuatro grupos principales de instrumentos basados en el mercado (Cantin *et al.*, 2005): a) instrumentos de derecho de propiedad, b) medidas basadas en impuestos, c) regímenes de seguros y responsabilidad y, d) permisos de comercialización.

2.3.3. Análisis de relación beneficio – costo y efectividad-costo

El análisis de beneficio – costo es un procedimiento ampliamente usado en la formulación de proyectos de diferente índole. Los diferentes beneficios y costos de los proyectos propuestos son identificados y medidos, generalmente en términos monetarios, para hacer una comparación de proyectos y determinar si los beneficios del proyecto exceden los costos (California Department of Water Resources, 2008).

El análisis de efectividad – costo evalúa los costos de intervenciones específicas y los efectos obtenidos, que son el fin esperado de la intervención. Generalmente, se comparan prospectivas de nuevas intervenciones con prácticas actuales y no se hace una comparación de todas las alternativas de intervenciones. Más bien, la efectividad de costo estimada para una intervención nueva propuesta se compara con la efectividad de costo de una serie de intervenciones actuales reportadas en publicaciones o con un punto de corte de precio fijo que representa la disposición a pagar social asumida para una unidad adicional del efecto buscado (Baltussen *et al.*, 2003). Aunque este método ha sido usado más en el sector salud es útil en cualquier sector, incluido el hídrico (Whitehead *et al.*, 2013). El procedimiento de efectividad de costo provee una base para poner precios a políticas que buscan innovaciones socialmente interesantes y para buscar la sustentabilidad financiera del componente evaluado (Campillo-Artero y Ortún, 2016).

Mientras que el análisis beneficio – costo traslada todos los beneficios y costos en términos monetarios, incluyendo los impactos ambientales y sociales que no tienen precio de mercado, el análisis de efectividad – costo identifica la opción más efectiva por su costo para lograr una serie de objetivos predefinidos. En el primer método, las opciones son económicamente viables solo si el valor presente neto generado es positivo o el valor presente de todos los beneficios iguala o excede el valor presente del costo total. Para el segundo método, se identifica la alternativa que para un nivel de producción dado minimiza el valor actual de costos o maximiza el nivel de producción para un costo dado (UNDP, 2013).

2.3.4 Productividad y eficiencia del agua

El tema de la productividad y eficiencia del uso del agua, particularmente en la agricultura y el uso urbano, es aún parte de un debate de cómo definirlo, medirlo y evaluarlo (Gleick *et al.*, 2011). De acuerdo con las Naciones Unidas (2012), la productividad hídrica de una economía es:

$$WP_{economía} = \left[\frac{PIB}{(E + G) - (F + H)} \right]_{economía}$$

Donde:

WP = Productividad hídrica

E = Extracción de agua

G = Agua recibida de otras unidades económicas

F = Agua suministrada a otras unidades económicas

H = Retornos de agua de unidades económicas al medio ambiente

PIB = Producto interno bruto

De acuerdo a DANE (s.f.), la productividad hídrica en un año se puede estimar como:

$$PI_j = \frac{VA_j}{ATE_j}$$

Donde:

PI_j = Productividad hídrica en el año de cálculo (Valor agregado en pesos (\$)/l)

VA_j = Valor agregado de las ramas de actividad económica sobre las cuales se conoce el agua extraída (miles de millones de pesos, a precios constantes)

ATE_j = Agua total extraída (hm³)

J = Año de cálculo

La eficiencia del agua se refiere a “la obtención de más valor con los recursos disponibles, reduciendo el consumo de recursos y la contaminación y el impacto ambiental del uso de agua para la producción de bienes y servicios en cada etapa de valor y de la prestación de servicios del agua” (UNEP, 2014). En cambio, Ríos *et al.* (2018) consideran para la producción de cultivos la eficiencia física, económica y social del agua. La eficiencia y la productividad física del agua se definen como:

$$Productividad = \frac{Cantidad\ del\ producto}{Unidad\ de\ agua}$$

$$Eficiencia = \frac{Cantidad\ de\ agua}{Unidad\ de\ producto}$$

A diferencia de la productividad física del agua, la productividad económica se define como el valor derivado por unidad de agua utilizada (Ríos *et al.*, 2018). Esta eficiencia se expresa como:

$$Eficiencia\ de\ riego = \frac{Agua\ evapotranspirada\ por\ los\ cultivos}{Agua\ suministrada\ a\ los\ cultivos} 100$$

En la agricultura de riego se utiliza el término eficiencia de riego, definido como “el porcentaje del agua total suministrada a un cultivo que sirve efectivamente para satisfacer sus necesidades hídricas (su uso consuntivo) (Cruz y Bielsa, 2001; Pereira et al. 2012).

2.3.5. Gobernanza

El término gobernanza se refiere a la acción conjunta entre el gobierno y sociedad para un objetivo positivo común (Murillo-Licea y Soares-Moraes, 2013). El concepto de gobernanza se enmarca en el reconocimiento del fracaso de las acciones de los gobiernos para diferentes temas, y de la necesidad de encontrar opciones novedosas en las que se involucren a diferentes actores sociales (González, 2017).

La Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE) considera tres dimensiones de la gobernanza: efectividad, eficiencia y confianza y participación (OCDE, 2015). La primera se relaciona con la definición de metas y objetivos de sostenibilidad. La eficiencia se refiere a la maximización de los beneficios de la gestión del agua. La confianza y la participación consideran la creación de confianza en la población y el garantizar la inclusión de actores, considerando la legitimidad democrática y la equidad social.

2.3.6. Asignación del recurso hídrico

El uso y disponibilidad del recursos hídrico, ya sea de aguas superficiales o de aguas subterráneas, es evaluado tradicionalmente considerando la disponibilidad física del recurso y la demanda que las diferentes actividades humanas requieren. Una disponibilidad baja del recurso y una demanda alta llevan inexorablemente a su disminución y finalmente a su agotamiento, a pesar de que el agua es un recurso fluente. Dentro de las variables que se han identificado que inciden en la demanda del agua son: crecimiento de la población, crecimiento económico, consumo de energía per cápita, desarrollo tecnológico, cambio de uso de la tierra (incluyendo la urbanización), la tasa de degradación ambiental, conciencia ambiental, programas de gobierno y el cambio climático (Sophocleous, 2004). En la economía de recursos naturales, la asignación del recurso para diferentes usos se ha dado fundamentalmente sobre una base económica (Kim *et al.*, 2016).

El agua disponible en una cuenca, un acuífero, corriente de agua o cuerpo de almacenamiento es asignado a los diferentes usos humanos, y recientemente se considera al uso ecológico o ambiental también. Para la planeación y manejo del recurso, un enfoque económico es el de análisis de entradas y salidas. Velázquez (2006), realizó un análisis de entradas y salidas del consumo de agua sectorial en España, combinando el modelo de entradas y salidas de Leontief con el modelo de uso de energía desarrollado por Proops (1988). El propósito de su estudio fue determinar qué sectores consumen más agua y cómo el recurso hídrico puede llegar a ser limitante para el crecimiento de los sectores productivos. Para el análisis de entradas y salidas se divide el total de los usos del agua en los diferentes canales de ingreso dentro del sistema productivo, para analizar los patrones de consumo de agua sectorial (Di Cosmo *et al.*, 2014). El método es útil para explorar las relaciones entre los sectores económicos y el consumo de agua, para lo cual se utiliza una tabla de entradas y salidas que captura las operaciones de la economía productiva (Chanan *et al.*, 2008).

2.4. El recurso hídrico desde la perspectiva de la economía ecológica

La economía ecológica “considera los procesos de la economía como parte integrante de esa versión agregada de la naturaleza que es la biósfera y los ecosistemas que la componen” (Naredo, 2002). La economía ecológica se ha propuesto como un enfoque alternativo para orientar una gestión integral y sostenible del agua. Propone trascender el enfoque tradicional económico que solo toma en cuenta aspectos monetarios, hacia una perspectiva más integral, tomando en cuenta indicadores físicos y sociales de sustentabilidad, y de los deseos y preferencias no económicas de la población, así como de los demás seres vivos (Gil y Reyes, 2013). Los indicadores biofísicos de sostenibilidad considerados por la economía ecológica valoran los impactos de las actividades humanas en términos de unidades físicas (López y Cattaneo, 2013). Dos conceptos relevantes utilizados en esta perspectiva son el agua virtual y la Huella Hídrica.

Beltrán y Velázquez (2015) mencionan que “desde la perspectiva de la economía ecológica, los indicadores físicos de consumo de agua como son el Agua Virtual (AV) y la Huella Hídrica (HH) pueden ser utilizados para visibilizar los conflictos ecológicos distributivos que provoca el metabolismo social de la economía”. Los autores reconocen que los dos conceptos mencionados, dado su fundamento físico, deben complementarse con el análisis de procesos institucionales, políticos y sociales, relacionados más con la esfera de la ecología política.

2.4.1 Agua virtual

En la década de los 90 del siglo pasado, Allan (1993) puso énfasis en el déficit de agua de algunos países, asociado a un desbalance entre la demanda y la oferta, particularmente en ambientes áridos, así como en la importancia de la transferencia del agua entre países. De este planteamiento se deriva el concepto de agua virtual, como el “agua incorporada en productos como los granos” (Allan, 1998). Más recientemente, el agua virtual se ha definido como el agua incorporada en los bienes y servicios hasta el punto final de la demanda, por lo que incluye a toda el agua extraída y usada en todos

los lugares a través de la red de cadena de abastecimiento intermedia que es finalmente requerida para la producción del bien o servicio (Lenzen, 2009).

2.4.2. Huella Hídrica

Un parámetro usual relacionado con la demanda del recurso hídrico es el uso consuntivo. El uso consuntivo del agua, en un determinado período y en una determinada cuenca, hace referencia al agua que después de su uso ya no está disponible para otros fines, porque se evapora (Perry, 2007). En la actualidad, se contabiliza en el sector agropecuario que aproximadamente el 85% del consumo mundial es agua azul (Shiklomanov, 2000). Debido a que el uso consuntivo no considera todo el uso de agua en un proceso de producción de un bien o un servicio, se han propuesto diferentes indicadores aplicables a niveles local, regional, nacional e internacional. Dentro de estos indicadores, uno de los más actuales y más utilizados recientemente es el de Huella Hídrica (HH).

La Huella Hídrica se ha propuesto como parte de la generación de indicadores de sostenibilidad del recurso hídrico (Pellicer-Martínez y Martínez-Paz, 2016). Con esto, es posible 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. Por ello, la HH es de utilidad para una comparación y evaluación más general, que conlleve a una mejor planeación y un mejor aprovechamiento de los recursos hídricos, sobre todo en regiones donde la competencia por el recurso hídrico es alta.

2.4.2.1 Concepto de Huella Hídrica

El concepto general de huella se refiere a una medida cuantitativa que describe la apropiación humana de los recursos naturales (Hoekstra *et al.*, 2011). Una huella describe como, a partir de actividades humanas, se genera un impacto o una carga en

la sostenibilidad global (Valdivia *et al.*, 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 para producir un producto. La Huella Hídrica 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 y 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. La Huella Hídrica se puede calcular para un producto y de un proceso de la agricultura y en la industria o del sector servicios. La huella hídrica tiene tres componentes: la huella hídrica azul (agua azul), la huella hídrica verde (agua verde) y la huella hídrica 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. El consumo se refiere a la pérdida de agua superficial y subterránea disponible en una cuenca hidrográfica. La Huella Hídrica verde se refiere al consumo de agua de lluvia que no se llega a convertir en escorrentía superficial. La Huella Hídrica gris de un producto se refiere al volumen de agua dulce que se requiere para diluir la carga de contaminantes de acuerdo a las concentraciones en el medio natural y los límites máximos permisibles en la legislación (Hoekstra *et al.*, 2011).

De los diferentes indicadores de sostenibilidad ambiental geográficos (escasez de agua verde y azul y el nivel de contaminación del agua), el indicador de escasez de agua azul es el más desarrollado y más aplicado (Hoekstra *et al.*, 2011). Se calcula de dividir la HHprod azul entre la disponibilidad de agua azul (disponibilidad de agua hidrológica menos los caudales ecológicos) en el área geográfica. Este indicador da evidencia del grado de impacto al caudal ecológico. Por otra parte, el indicador de escasez de agua verde se calcula de dividir la HHprod verde entre la disponibilidad de agua en la región geográfica; se considera como la evapotranspiración total (ET) del agua de lluvia de la

tierra (ET green) menos la ET del área cubierta por vegetación natural (ET env) y menos la ET del suelo que no es productiva. Aunque este indicador no se ha aplicado en estudios de caso (UNEP, 2012). El indicador de contaminación del agua se obtiene de dividir la suma de todas las Huellas Hídricas gris en una cuenca a su escurrentía normal. Hay indicadores sociales y económicos que están en desarrollo así como condiciones para abordar la sostenibilidad de la HH.

2.4.2.2. La Huella Hídrica en el sector agrícola

En la agricultura, la Huella Hídrica (HH) de un cultivo indica la cantidad de agua evapotranspirada para obtener una determinada producción, haciendo una distinción entre el agua procedente de las precipitaciones, el agua verde, y el agua extraída de ríos, lagos y acuíferos aplicada mediante riego, el agua azul (Álvarez *et al.*, 2016). La HH en la producción agrícola incluye el volumen de agua dulce consumida durante el desarrollo fenológico del cultivo y considera tres componentes: Huella Hídrica azul, verde y gris. La HH verde y azul en agricultura son de tipo consuntivo y se considera el total de la evapotranspiración durante el crecimiento del cultivo. La HH gris se refiere al volumen de agua dulce que se requiere para diluir la carga de los contaminantes que ocasionan los fertilizantes que se lixivian hacia los cuerpos de agua (Hoekstra *et al.*, 2011; Cao *et al.*, 2017).

Con relación a la Huella Hídrica gris, el Nitrógeno (N) y fósforo (P) son minerales esenciales para la vida y en agricultura son elementales para la producción (Sutton *et al.*, 2013). Utilizar fertilizantes ha beneficiado tanto a la producción agrícola y ha provisto de alimento a una población mundial en crecimiento que ha tenido un cambio en la dieta incrementando el consumo de carne y productos derivados de la leche. Sin embargo, el uso excesivo de fertilizantes también ha incrementado la cantidad de N y P hacia los ecosistemas naturales (Bennet *et al.*, 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, la contaminación de las aguas subterráneas, pérdida de la biodiversidad y la eutrofización (Obersteiner *et al.*,

2013). Por ello, surge la necesidad de evaluar esos impactos de la producción agrícola en referencia a la cantidad y la calidad del agua.

2.4.2.3 Estimación de la Huella Hídrica de cultivos agrícolas

Para el desarrollo de cualquier cultivo, se requiere agua para la transpiración (T). La transpiración es un proceso de vaporización del agua líquida en el tejido de la planta y su remoción a la atmósfera circundante a la planta (Burman y Pochop, 1994). A través de la transpiración la planta controla su temperatura y realiza otras funciones vitales (Dunne y Leopold, 1995). Así mismo, en una zona con cultivos se presenta la pérdida (uso) del agua por evaporación (E) de las superficies vegetales y del suelo, proceso conocido como evaporación. En términos prácticos, es difícil separar la transpiración de la evaporación, por lo que es usual usar el término evapotranspiración (ET). La medición directa de la evapotranspiración es complicada, por lo que se ha desarrollado diferentes métodos de estimaciones indirectas. Además, se utilizan diferentes términos relacionados con la estimación de la evapotranspiración de las plantas bajo diferentes condiciones. Los más usuales son evapotranspiración máxima (ET_m), evapotranspiración actual (ET_a), evapotranspiración potencial (ET_p) y evapotranspiración de referencia (ET_r). La ET_r se define como la cantidad de agua transpirada de una superficie con vegetación, como la alfalfa o pasto, sin limitaciones de humedad ni de enfermedades o fertilidad del suelo, y que es usada como estándar para la predicción de la ET de cultivos a través de coeficientes de cultivos. El coeficiente de cultivo es una relación adimensional que relaciona la ET_r con la ET de un cultivo para condiciones específicas de la planta o cultivo en un tiempo específico (Burman y Pochop, 1994).

En las plantas ocurre mucho mayor transpiración que retención de agua, por ello se calcula la evapotranspiración. Se define como uso consuntivo o evapotranspiración (ET) a la suma de los volúmenes de agua que se usan para llevar a cabo el desarrollo vegetativo. Es así que el agua que se evapotranspira debe reponerse constantemente en el suelo para no someter a la planta a condiciones de estrés hídrico y proveerle el requerimiento de agua necesario para el desarrollo vegetal.

La ET se calcula con frecuencia a partir de datos meteorológicos. Se han desarrollado diversas ecuaciones empíricas y semi-empíricas para calcular la evapotranspiración del cultivo utilizando datos meteorológicos (Burman y Pochop, 1994). Sin embargo, algunos métodos son válidos para condiciones climáticas y agronómicas específicas. Por ello, a partir del análisis de varios métodos, los investigadores determinaron que el método FAO Penman-Monteith es el más recomendable para el cálculo de la evapotranspiración de referencia, ETo. Consecuentemente, la ET del cultivo bajo condiciones estándar, se determina utilizando los coeficientes de cultivo (Kc) que están relacionados con la ETc y la ETo (Allen, 2006). En el caso de cultivos bajo condiciones no estándar, se hace un ajuste con el coeficiente de estrés hídrico (Ks) o con la modificación del coeficiente de cultivo. Este método es útil en el cálculo de la evapotranspiración de referencia (ETo) a partir de los datos climatológicos. La FAO Penman-Monteith recomienda este método como único para el cálculo de la evapotranspiración de referencia (ETo). La ecuación combinada de Penman-Monteith es la siguiente:

$$\lambda ET = \frac{\Delta(R_n - G) + \rho_a c_p \left(\frac{e_s - e_a}{r_a} \right)}{\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_s}{r_a} \right)}$$

Donde:

R_n = Radiación neta

G = Flujo del calor en el suelo

(e_s - e_a) = Déficit de presión de vapor de aire

P_a = Densidad media del aire a presión constante

C_p = Calor específico del aire

Δ es la pendiente de curva de la presión de vapor de saturación

γ es la constante psicrométrica

R_a r_s son las resistencias superficiales (total) y aerodinámica

El programa de cómputo CROPWAT es de uso frecuente para calcular la huella verde y azul en agricultura. El modelo considera el concepto de precipitación efectiva. Para ello se consideran datos del balance de agua en el suelo que lo valora como el contenido de

humedad en el suelo en un periodo de tiempo. El ingreso de datos se relacionan con el clima, suelo, tipo de riego, lluvia, el cultivo y sus características (Charchousi *et al.*, 2013).

La estimación de la huella gris en un cultivo ($\text{m}^3 \text{ton}^{-1}$) se calcula con base en la tasa de dosis de fertilización aplicada al cultivo por superficie (kg ha^{-1}), la fracción del contaminante que se estima se exporta en el escurrimiento (α), la concentración máxima aceptada (C_{max}) en mg l^{-1} , la concentración natural del contaminante en el cuerpo de agua receptor (C_{nat}) en mg l^{-1} , y el rendimiento del cultivo (Y).

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Área de estudio

3.1. Localización

El estudio se realizó en el área de agricultura de riego de cultivos anuales de los municipios de Atlixco y Huaquechula, en la subcuenca Huaquechula (Figura 1), que pertenece al Distrito de Desarrollo Rural (DDR) 005 Cholula.

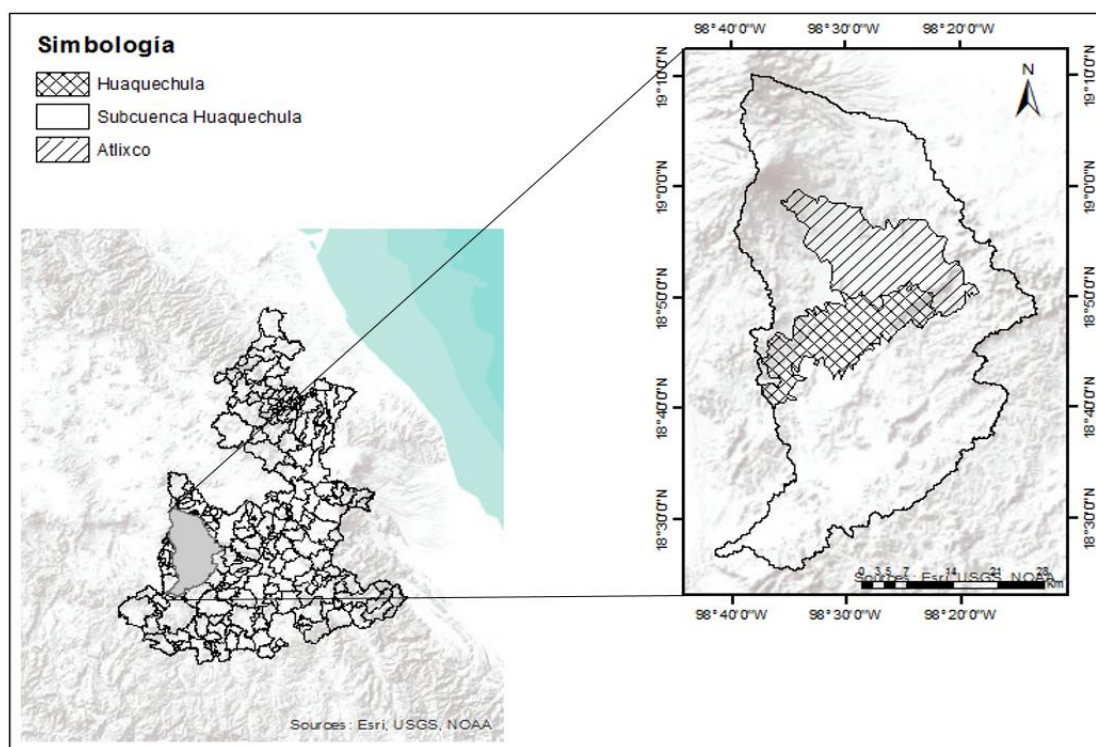


Figura 3. Localización del área de estudio

3.1.2 Recurso hídrico

En el área se tienen corrientes originadas en las laderas del Iztaccíhuatl, las cuales confluyen con el río Nexapa, que cruza en medio del Valle de Atlixco (INAFED, 2010). La región de Atlixco, se localiza dentro de la región hidrológica-administrativa 18 que

pertenece al Balsas, dentro de la cuenca del río Atoyac. El área de la cuenca del río Atoyac es de 31,480 km² y el área de la subcuenca del río Nexapa es de 4,440.54 km² (CONAGUA, 2016). La disponibilidad del recurso hídrico superficial se ha reportado por la CONAGUA como negativa, es decir, se ha asignado o concesionado más agua de la disponible. En cuanto al recurso hídrico subterráneo, la región se localiza dentro del acuífero de Atlixco–Izúcar de Matamoros. El acuífero se considera de tipo libre, posee condiciones de buena permeabilidad en las rocas basálticas fracturadas y rocas calcáreas (CONAGUA, 2016).

La zona de estudio pertenece a la zona baja de la cuenca del Río Cantarranas en el municipio de Atlixco. En ella existe una zona agrícola muy eficiente, productiva y diversa. Se producen cultivos básicos, gran diversidad de hortalizas, flores, en donde gran parte de esta producción se destina para la exportación. También se producen cultivos forrajeros para el sector ganadero. La mayoría de las flores y las hortalizas se producen a cielo abierto y se riegan con agua de origen superficial y de aguas negras que la distribuye en canales de riego abiertos de tierra. Sin embargo, en años recientes se ha incorporado el sistema de riego proveniente de pozos que se conduce a través de tubería o por canales revestidos (IMTA, 2017).

El área de estudio se localiza en la región del Acuífero de Atlixco-Izúcar de Matamoros y tiene una superficie de 2,000 km². Se localiza en la parte suroccidental del Estado de Puebla. Debido a las características del suelo de origen volcánico en la cuenca del Río Cantarranas hace que sean muy permeables. Ocurren precipitaciones abundantes y que se filtre gran cantidad del agua al subsuelo y llegue a los acuíferos. Otra parte del agua, forma manantiales que se aprovechan en riego y para abastecer a la zona urbana, industrial y recreativa (IMTA, 2017).

De acuerdo con información disponible en la Red Pública de Derechos de Agua (REPDA) a cargo de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) se registran, al 8 de abril de 2018, un total de 569 concesiones en ocho categorías de uso en el municipio de Atlixco, Puebla (Cuadro 1). El 59.6 % de las concesiones son para uso agrícola. El volumen total

concesionado es de 93.43 hm³, del cual 61.257 hm³ corresponde a fuentes superficiales y 32.173 hm³ a agua subterránea (REPDA, 2016).

Cuadro 1. Concesiones de agua en la región de Atlixco, Puebla.

Uso	Número de concesiones	Porcentaje (%)
AGRÍCOLA	339	59.6
Diferentes usos	104	18.3
Doméstico	8	1.41
Generación de energía eléctrica	1	0.2
Industrial	8	1.4
Pecuario	7	1.2
Público urbano	79	13.8
Servicios	23	4.04
Total	569	99.9

Fuente: Conagua, 2017.

3.1.3 Clima

De acuerdo con la clasificación de Koppen, modificado por García (2004), el clima que prevalece en la región de estudio es semiseco-semicálido con lluvias en verano. Se denomina seco estepario y su característica principal es que la evaporación es mayor a la precipitación que se asocia con vegetación de tipo maorral desértico y crasicale (nopalera, cardonal, etc.). La temperatura media anual registrada en la región de Atlixco y la cuenca asociada oscila entre los 14° y 19° C, en tanto que en el resto de la cuenca la temperatura está entre los 4° y los 19°C. La precipitación media anual varía de 822 a 1200 mm (CONAGUA, 2016).

3.1.4 Suelos

La edafología en la cuenca de Atlixco se forma por los suelos predominantes de Phaeozem (39.14%), Leptosol (22.88%) y Planosol (16.60%), Fluvisol eútrico, Regosol eútrico y Phaeozem háplico (franco arenoso) (CONAGUA, 2016).

3.2 Estimación de la Huella Hídrica

Para el estudio se seleccionaron los cultivos de cebolla y tomate de cáscara, a partir del análisis de la producción de cultivos bajo el sistema de riego. Se consideró la superficie de cultivos de riego para la región de Atlixco, de acuerdo al informe de producción agrícola del año 2017 del Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP, 2017). Se utilizó como base la zonificación de áreas con cultivos de riego para la zona elaborado por Flores (2019) para delimitar el área de cultivo de riego de la zona de estudio.

La Huella hídrica se estimó con el método propuesto por Hoekstra *et al.* (2011). Este método se propuso para estimaciones estandarizadas globales de la Huella Hídrica de un producto y un proceso individual, así como para consumidores, empresas y naciones. La Huella Hídrica total del proceso de cultivos (WF_{proc}) es estimada como la suma de los componentes de la huella azul, verde y gris:

$$HH_{proc} = HH_{proc,verde} + HH_{proc,azul} + HH_{proc,gris}$$

Donde:

HH_{proc} = Huella Hídrica del proceso de cultivo, en $m^3 t^{-1}$

$HH_{proc,verde}$ = Huella Hídrica verde del proceso de cultivo, en $m^3 t^{-1}$

$HH_{proc,azul}$ = Huella Hídrica azul del proceso de cultivo, en $m^3 t^{-1}$

$HH_{proc,gris}$ = Huella Hídrica gris del proceso de cultivo, en $m^3 t^{-1}$

3.2.1 Huella Hídrica verde

La Huella Hídrica verde se calculó con los siguientes datos:

$$HH_{verde} = \frac{UAC_{verde}}{Y}$$

Donde:

HH_{verde} = Huella Hídrica verde, en $m^3 t^{-1}$

UAC_{verde} = Uso de Agua del Cultivo asociado a la precipitación, en $m^3 ha^{-1}$

Y = Rendimiento del cultivo, en $t ha^{-1}$

UAC_{verde} es igual al total de la evapotranspiración del agua verde ($ET_{C\ verde}$) en campo. El cálculo de UAC_{verde} se hace a partir de la sumatoria de la evapotranspiración del cultivo (ET_c) considerado desde el día de la siembra ($d=1$) hasta el día de la cosecha ($d=n$).

$$UAC_{verde} = 10 \times \sum_{d=1}^{lgp} ET_{C\ verde}$$

Donde:

Σ = Ciclo de crecimiento del cultivo, desde la siembra (día 1) hasta la cosecha

Lgp = Longitud, días de la etapa del ciclo

$ET_{C\ verde}$ = Evapotranspiración del cultivo del agua verde, en $mm\ día^{-1}$

El factor 10 se utiliza para hacer la conversión de unidades de CWU

Para el cálculo de la Huella Hídrica azul y verde se utilizó el programa CROPWAT 8.0. Este programa fue diseñado por la FAO y es ampliamente usado para calcular los

requerimientos de agua en el cultivo y las necesidades de riego a partir de datos de suelo, clima y los cultivos (FAO, 1996). Se consideraron las bases de datos climáticas de CLIMWAT 2.0, utilizado en combinación con el programa CROPWAT, para el cálculo de requerimientos del agua de cultivos de cebolla y tomate de cáscara, a partir de estaciones climáticas ubicadas en la región de estudio. La UAC_{verde} se estimó con el programa CROPWAT v. 8.0. El programa genera la ET_c para cada cultivo y precipitación efectiva (P_e). La ET_c es estimada con el método de Penman- Monteith, mientras que la precipitación efectiva fue estimada con el método USDA-SC.

CROPWAT calcula el valor de evapotranspiración actual con la siguiente ecuación:

$$ET_c = K_c \cdot ET_o$$

El uso consuntivo del cultivo o el requerimiento hídrico (UAC) es estimado por el programa CROPWAT considerando la suma de los datos de evapotranspiración diaria del cultivo durante todas las fases fenológicas del mismo. El programa estima ET_c en intervalos diarios ($mm \text{ día}^{-1}$) o de 10 días ($mm \text{ 10-días}^{-1}$). La precipitación efectiva la estima en intervalos de 10 días. Tanto para ET_c como para P_e se utilizaron las estimaciones de 10 días. El coeficiente K_c es adimensional.

CROPWAT estima la evapotranspiración de referencia con el método Penman-Monteith. Este método considera el concepto de cultivo de referencia, el cual se refiere hipotéticamente a una superficie con cultivo de una altura de 0.12 m, una resistencia de superficie de 70 sm^{-1} y una difusión de 0.23. Esta superficie de referencia simula una superficie uniforme y extensa de pasto verde con una altura semejante que cubre por completo el suelo y con un aporte de agua requerido sin someterse a un estrés hídrico. La ecuación del método Penman-Monteith se expresa con la ecuación:

$$ET_o = \frac{0.408 \Delta (Rn - G) \gamma \frac{900}{T + 273.15} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 u_2)}$$

En donde:

Δ = pendiente de la curva de la presión de vapor, en unidades de $\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$

Rn = Radiación neta de la superficie del cultivo, en unidades de $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$

G = Flujo de calor en el suelo, en unidades de $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$

γ = Constante psicrométrica, en unidades $\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$

T = Temperatura media del aire considerada a 2 m de altura, en $^\circ\text{C}$

u_2 = Velocidad del viento a 2 m de altura, en unidades de m s^{-1}

e_s = Presión de vapor de saturación, en unidades de kPa

e_a = Presión real de vapor expresada, en unidades de kPa

El método del USDA-CS estima la precipitación efectiva (parte de la precipitación retenida en el suelo y que está disponible para las plantas) como (Renderos, 2014):

$$P_e = \frac{P_{\text{mensual}}(125 - 0.2P_{\text{mensual}})}{125} \quad \text{Cuando la precipitación mensual } (P_{\text{mensual}}) \text{ es menor o igual a } 250 \text{ mm mes}^{-1}$$

$$P_e = 125 + 0.1P_{\text{mensual}} \quad \text{Cuando la precipitación mensual } (P_{\text{mensual}}) \text{ es mayor a } 250 \text{ mm mes}^{-1}$$

$$P_e = \frac{P_{\text{dec}}(125 - 0.6P_{\text{dec}})}{125} \quad \text{Para precipitación de 10 días } (P_{\text{dec}}) \text{ menor o igual a } 83.33 \text{ mm } 10\text{días}^{-1}$$

$$P_e = 41.67 + 0.1P_{\text{dec}} \quad \text{Para precipitación de 10 días } (P_{\text{dec}}) \text{ mayor a } 83.33 \text{ mm } 10\text{días}^{-1}$$

En este estudio se utilizaron las estimaciones de CROPWAT de P_e de periodos de 10 días.

$ET_{\text{c verde}}$ se estimó de los valores obtenidos con CROPWAT como lo establece Renderos (2014):

$$ET_{\text{c verde}} = \min(ET_{\text{c}}, P_e)$$

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 fue menor.

3.2.2. Huella Hídrica azul

Tanto la Huella Hídrica verde como la azul se consideran consuntivas (Hoekstra *et al.*, 2011). Se definen por el uso del agua en el cultivo (UAC , $m^3 ha^{-1}$), por ejemplo la evapotranspiración (ET) del cultivo y el rendimiento. La Huella Hídrica azul se estimó como:

$$HH_{azul} = \frac{UAC_{azul}}{Y}$$

$$UAC_{azul} = 10 \times \sum_{d=1}^{l_{gp}} ET_{c_{azul}}$$

Donde:

Σ = Ciclo de crecimiento del cultivo, desde la siembra (día 1) hasta la cosecha

L_{gp} = Longitud, días de la etapa del ciclo

$ET_{c_{azul}}$ = Evapotranspiración del cultivo del agua azul, en $mm día^{-1}$

El factor 10 se utiliza para convertir de mm a m^3 de agua por tonelada.

ET_{azul} se obtuvo de las estimaciones de CROPWAT con la ecuación siguiente (Renderos, 2014; Novoa *et al.*, 2016):

$$ET_{azul} [mm 10días^{-1}] = \text{Requerimiento de riego} [mm 10días^{-1}]$$

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

$$ET_{azul} = \max(ET_c - P_e)$$

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

3.2.3 Estimación la Huella Hídrica gris

La Huella Hídrica gris se estimó con base en el uso de fertilizantes en la zona de estudio. Los fertilizantes utilizados contribuyen a la Huella Hídrica gris porque generan lixiviados de nutrientes que se incorporan por flujo lateral a las aguas superficiales o por percolación a las aguas subterráneas. Se calcula a partir de la siguiente formula:

$$HH_{gris} = \frac{T_a \cdot \alpha}{(C_{max} - C_{nat}) \cdot Y}$$

En donde:

HH_{gris} = Huella Hídrica gris, en unidades de volumen de agua por hectárea ($m^3 ha^{-1}$) o volumen de agua por tonelada de cultivo ($m^3 t^{-1}$)

T_a = Tasa de aplicación de fertilizante ($kg ha^{-1}$)

α = Fracción de fertilizante que se infiltra (exportada) a los cuerpos de agua

C_{max} = Máxima concentración aceptable en unidades de masa por volumen

C_{nat} = Concentración natural en unidades de masa por volumen

Y = 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 una muestra no probabilística de 31 productores. Las dosis promedio de fertilización nitrogenada 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 77.86 y $36 kg ha^{-1}$, respectivamente. Estos valores se convirtieron a su contenido de N y P (Cuadro 2).

La fracción de fertilizante exportado (α) a cuerpos de agua usada fue de 0.1 (Cuadro 2) para nitrógeno, asumiendo que en promedio un 10 % de la cantidad de fertilizante

nitrogenado aplicado se pierde por lixiviación (Mekonnen y Hoekstra, 2010; Franke *et al.*, 2013). Para fósforo, se utilizó un valor de α de 0.3, considerando el valor promedio reportado por Franke *et al.* (2013).

Franke *et al.* (2013) sugieren utilizar los estándares de calidad de agua de los cuerpos de agua dulce receptores como referencia de la máxima concentración aceptable (C_{max}). La organización mundial de la salud y la Unión Europea consideran un valor máximo de 50 mg de nitrato (NO_3) por litro; mientras que la US-EPA de los Estados Unidos considera un máximo de 10 mg por litro medido como nitrógeno-nitrato ($N-NO_3$) (Mekonnen y Hoekstra, 2010). En este estudio se usó un valor de C_{max} de 0.006 para nitrógeno y de 0,03 para fósforo, de acuerdo a 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 y Hoekstra, 2010; Renderos, 2014). Debe tenerse en cuenta que se asume como cero por la falta de información, pero si la cuenca ha sido altamente alterada por actividades humanas, puede subestimarse la Huella Hídrica gris, porque se sobreestima la capacidad del cuerpo de agua (capacidad de sumidero) para asimilar la sustancia química (Franke *et al.*, 2013)

Cuadro 2. Información utilizada para la estimación de la Huella Hídrica gris.

Parámetro	Unidades	Cebolla		Tomate de cáscara
		PV	OI	OI
T α	t ha ³	N=46 P=9.5	N=76.8 P=15.41	N=48.3 P=5.76
α		N=0.1 P=0.3	N=0.1 P=0.3	N=0.1 P=0.3
Cmax	ton m ³	N=0.6 P=0.3	N=0.6 P=0.3	N=0.6 P=0.3
Cnat	ton m ³	N=0 P=0	N=0 P=0	N=0 P=0
Y (rendimiento)	ton ha-1	7.7	14	16

PV, ciclo primavera-verano, OI, ciclo otoño-invierno

3.2.4. Información usada en el programa CROPWAT

Se utilizó información de la estación Puebla de la base de datos de CLIMWAT (Cuadro 3). Los datos de localización de la estación meteorológica usada son:

Latitud: 18° 49' 30"

Longitud: 98° 33' 36"

Altitud: 1700 m

Cuadro 3. ETo de la estación CLIMWAT Puebla.

Mes	T_{min} (°C)	T_{max} (°C)	Humedad Relativa (%)	Velocidad del Viento (km día ⁻¹)	Insolación (h)	Radiación solar (MJ m ⁻² día ⁻¹)
Enero	6.7	21.4	65	112	7.2	15.9
Febrero	8	22.9	47	121	7.9	18.5
Marzo	10.5	25.1	41	147	7.9	20.4
Abril	11.9	26.2	53	130	7.7	21.2
Mayo	12.6	25.8	52	121	7.3	20.9
Junio	13	24.1	77	121	6.7	19.9
Julio	12	23.4	79	95	6.6	19.7
Agosto	12.2	23.6	80	78	7	20.1
Septiembre	12	22.6	85	86	5.7	17.4
Octubre	10.3	23.1	78	78	7	17.7
Noviembre	8.4	22.5	70	78	7.3	16.3
Diciembre	6.8	21.6	66	86	7.1	15.2
Promedio	10.4	23.5	66	104	7.1	18.6

Para la estimación de la evapotranspiración actual de los cultivos con el programa CROPWAT se utilizaron los parámetros de suelos listados en el Cuadro 4.

Cuadro 4. Parámetros de características del suelo usados con el programa CROPWAT

Parámetro	Unidades	Cebolla		Tomate de
		PV	OI	cáscara
				OI
Humedad del suelo disponible total	mm m ⁻¹	75	75	80
Tasa máxima de infiltración de la precipitación	Mm día ⁻¹	110	110	112
Profundidad radicular máxima	m	0.20	0.20	0.30
Agotamiento inicial de humedad del suelo	%	0	0	0
Humedad del suelo inicialmente disponible	mm m	75	75	80

PV, ciclo primavera-verano, OI, ciclo otoño-invierno

En el Cuadro 5 se presentan las fechas de siembra y cosecha de los cultivos. Durante el desarrollo del cultivo el área del suelo tiene diferente cubierta de vegetación del área foliar, por lo que se tienen diferencias en la evapotranspiración a lo largo de las fases fenológicas del cultivo y un cambio en el valor de Kc a lo largo del periodo del desarrollo. Este periodo fenológico se divide en cinco etapas para el cultivo de cebolla y para el tomate de cáscara. Con información obtenida en la encuesta a productores se determinó la duración de las etapas de desarrollo de cada cultivo, misma que se presenta en el Cuadro 5. En el Cuadro 6 se presentan los datos registrados de la fenología del desarrollo de los cultivos utilizados.

Cuadro 5. Periodo de crecimiento de los cultivos

Cultivos	Cebolla P-V	Cebolla O-I	Tomate de cáscara O-I
Fecha de siembra	07-abr	02-ago	28-jul
Fecha de cosecha	30-jul	24-nov	30-oct

Cuadro 6. Duración de las etapas de desarrollo de los cultivos de cebolla y tomate de cáscara

Cultivo			Inicial	Desarrollo	Intermedio	Final	Total
Cebolla							
O-I	Días de fenológica	la etapa	15	22	40	20	97
P-V	Días de fenológica	la etapa	15	22	45	20	102
O-I y P-V	Altura				0.60		
Tomate de cáscara O-I							
	Días de fenológica	la etapa	9	28	36	22	95
	Altura				0.85		

PV, ciclo primavera-verano, OI, ciclo otoño-invierno

Cuadro 7. Parámetros de datos de desarrollo del cultivo

Cultivo/Dato	Inicial	Desarrollo	Media	Final	Total
Cebolla O-I y P-V					
Coefficiente de cultivo (kc)	0.7		1	1	
Profundidad de raíces (m)	0.1		0.15	0.3	
Agotamiento crítico (Fracción)	0.2		0.3	0.2	
Respuesta al rendimiento (Ky)	0.9	1	1.1	0.8	0.9
Tomate de cáscara O-I					
Coefficiente de cultivo (kc)	0.6		1.05	0.9	
Profundidad de raíces (m)	0.5		0.7	1	
Nivel de agotamiento (Fracc)	0.3		0.45	0.3	
Respuesta al rendimiento (Ky)	0.9	1.0	1.0	0.8	0.8

Kc, Ky y Nivel de agotamiento de (Allen *et al.*, 2006)

El factor de respuesta de la productividad (Ky) se relaciona con la productividad del cultivo. Esta disminuye cuando la ETc es menor por la falta de agua. La disminución relativa de la productividad es menor durante la etapa de desarrollo y final.

3.3. Encuesta para obtener información de desarrollo del cultivo y prácticas de manejo

Se aplicó una encuesta a 31 productores de hortalizas para obtener información sobre la fenología de los cultivos de cebolla y tomate de cáscara y prácticas de manejo. Las variables consideradas fueron: fecha de siembra, fecha de cosecha, altura de planta a pleno desarrollo del cultivo, dosis y fuente de fertilización nitrogenada, dosis y fuente de fertilización fosfórica, número de riegos durante el ciclo de cultivo, lámina de riego, método de riego y costo del agua de riego. Adicionalmente, se consideraron las variables: superficie cultivada de cebolla y tomate de cáscara y percepción de los productores sobre la calidad del agua utilizada.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Características de las parcelas de cultivo de tomate de cáscara y cebolla

Los productores de cebolla y tomate de cáscara tienen superficie de tierra de menos de 1 ha. Para el tomate de cáscara, el rendimiento varía de acuerdo a las condiciones ambientales, los productores los identifican como años buenos y años malos (Cuadro 7), para la zona se registró un rendimiento promedio para el ciclo de Otoño-Invierno (O-I) de 16.17 t ha⁻¹. Este rendimiento es mayor al promedio nacional de 12 t ha⁻¹, pero menor al rendimiento potencial de 40 t ha⁻¹ (López-López *et al.*, 2009). Para el estado de Puebla, en el ciclo Otoño-Invierno de 2018 se estimó un rendimiento de tomate de cáscara para temporal y riego de 12.2 t ha⁻¹ y de 14.0 t ha⁻¹ para producción con riego; mientras que el rendimiento bajo condiciones de riego en el ciclo de primavera-verano (P-V) fue de 13.9 t ha⁻¹ (SIAP, 2018a). El rendimiento obtenido en la encuesta es cercano al promedio estatal bajo riego.

Para el cultivo de cebolla, se registró un mayor rendimiento, tanto para años buenos como malos (Cuadro 8) en el ciclo de Otoño – Invierno, con un promedio para el ciclo de Primavera – Verano de 7.69 t ha⁻¹ y para el Ciclo de Otoño – Invierno de 20.4 t ha⁻¹. De acuerdo al SIAP, en el año 2018 se estimó un rendimiento en el estado de Puebla para el cultivo de cebolla para temporal y riego en el ciclo de Otoño-Invierno (O-I) de 21.170 t ha⁻¹, mientras que para producción de riego fue de 21.567 t ha⁻¹; la producción bajo riego para el ciclo de Primavera-Verano (P-V) de 2018 fue de 15.961 t ha⁻¹ (SIAP, 2018a). El rendimiento promedio nacional para el cultivo de cebolla bajo riego fue de 33.642 t ha⁻¹ para Primavera-Verano (P-V) (SIAP, 2018b) y de 21.248 t ha⁻¹ para Otoño-Invierno (O-I) (SIAP, 2019). El rendimiento registrado en la zona de estudio fue un poco menor que el rendimiento promedio estatal.

Cuadro 8. Datos recolectados en las parcelas en la región de Atlixco.

Cultivo	Superficie cosechada (ha)	Fuente del agua de riego	Sistema de riego	Costo de riego (pesos hora ⁻¹)	Frecuencia de riego (días)	Número de riegos	Horas de riego	Rendimiento (T ha ⁻¹)		Calidad del agua*
								Año bueno	Año malo	
Tomate de cáscara	0.5166	Pozos y canal de riego	Gravedad	225	13.6	12.2	4	19.26	13.08	Buena
Cebolla P_V	0.56619	Pozos y canal de riego	Gravedad	169.05	8.05	11.76	3.12	9.02	6.36	Buena
Cebolla O-I	0.8500	Pozos y canal de riego	Gravedad	181	5.8	11.2	9	28.3	12.5	Buena

* Percepción del productor (todo esto no está en la metodología)

Las fuentes de agua para riego son corrientes superficiales y 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 usan para el riego es buena. El costo que los productores de cebolla y tomate de cáscara invierten para regar la parcela es en promedio de \$171 pesos por hora de riego. El caudal de riego se determinó de $44,290 \text{ l s}^{-1}$, con una frecuencia de riego de 7 días por mes durante cada ciclo de cultivo de 96 días en promedio. Se destinan aproximadamente 4 horas en cada sesión de riego.

4.2 Precipitación efectiva y Evapotranspiración (ET_o) para la zona de estudio

La ET_o promedio obtenida con CROPWAT para el año de 2017, con el método de Penman-Monteith, fue de 4.1 mm día^{-1} (Cuadro 9). 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 (124.7 a 110 mm). Esto significa que la fracción de agua que es 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 4). Allen *et al.* (2006) indican un valor promedio de ET_o para clima templado subhúmedo de entre 2 a 4 mm día^{-1} , considerando una temperatura moderada promedio de 20 °C , y de 4 a 7 mm día^{-1} para condiciones de temperatura mayores de 30 °C ; el resultado obtenido para el área de estudio corresponde al límite superior de lo reportado para climas templados moderados.

Cuadro 9. Precipitación efectiva y evapotranspiración de referencia estimada para la zona de estudio

	P (mm)	P_e (mm)	ET_o (mm día⁻¹)
Enero	7	6.9	2.76
Febrero	7	6.9	3.55
Marzo	10	9.8	4.45
Abril	28	26.7	4.55
Mayo	79	69	4.54
Junio	172	124.7	3.91
Julio	148	113	3.74
Agosto	142	109.7	3.75
Septiembre	144	110.8	3.19
Octubre	70	62.2	3.15
Noviembre	13	12.7	2.8
Diciembre	4	4	2.56
Total	824	657	Promedio = 4.1

P, precipitación; P_e, precipitación efectiva; ET_o, Evapotranspiración de referencia

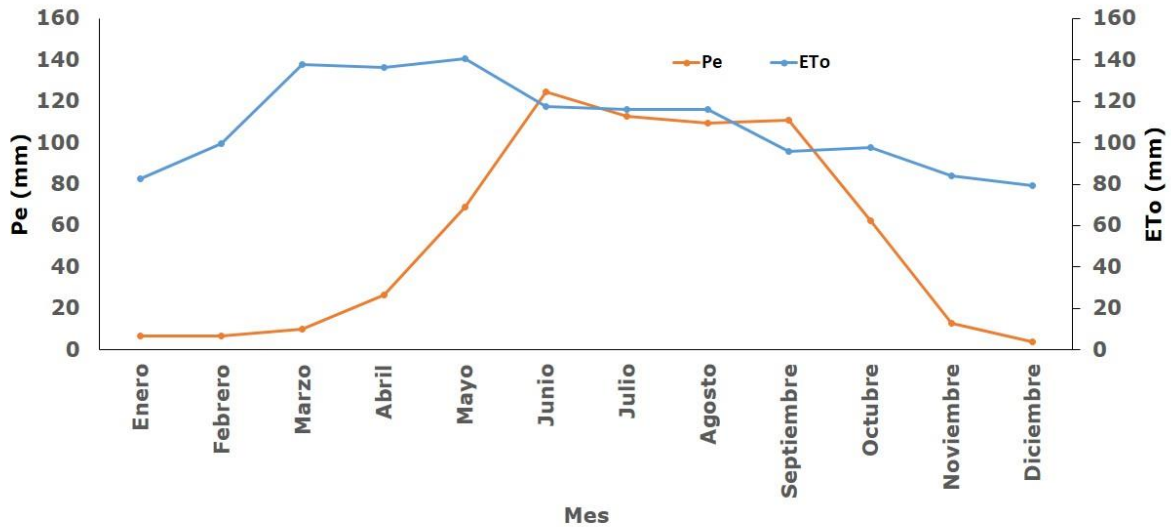


Figura 4. Precipitación efectiva (P_e) y Evapotranspiración de referencia (ET_o).

4.3 Huella Hídrica para el cultivo de cebolla de O-I

La Huella Hídrica verde para el cultivo de cebolla de Otoño-Invierno (O-I) fue de 176.36 m³ t⁻¹ (Cuadro 10), la Huella Hídrica azul fue de 53 m³ t⁻¹ (Cuadro 11) y la Huella Hídrica gris estimada es de 20.14 m³ t⁻¹ (Cuadro 12). La Huella Hídrica total estimada fue de 249.72 m³ t⁻¹. Ríos-Flores *et al.* (2017) reportan una Huella Hídrica total de 115 m³ t⁻¹ para el cultivo de otoño-invierno (O-I) en Delicias, Chihuahua, México, por lo que el valor obtenido en este estudio es mayor.

A nivel mundial, de acuerdo con Mekonnen y Hoekstra (2010), las Huellas Hídricas promedio verde, azul, gris y total para el cultivo de cebolla bajo riego son de 176, 44, 51 y 272 m³ ton⁻¹, respectivamente. A excepción de la Huella Hídrica gris, los resultados para las Huellas Hídricas verde, azul, gris y total del cultivo de cebolla del ciclo de Otoño-Invierno (O-I) (176.36, 53.21, 20.14 y 249.72 m³ t⁻¹, respectivamente) son similares a los promedios reportados por Mekonnen y Hoekstra (2010). Para España, Salvador *et al.* (2011) mencionan que el cultivo de cebolla utiliza en promedio 6683 m³ ha⁻¹. En este estudio se obtuvo una estimación de 4569 m³ ha⁻¹ para el ciclo de otoño-invierno (O-I) y de 8853 m³ ha⁻¹ para el ciclo de primavera-verano (P-V), con un promedio de los dos ciclos de 6711.56 m³ ha⁻¹.

Cuadro 10. Huella Hídrica verde para el cultivo de cebolla de O-I

Mes	dec	Etapa	Kc	ETc (mm día ⁻¹)	ETc (mm dec ⁻¹)	P _e (mm dec ⁻¹)	ET _C verde (mm dec ⁻¹)	HH _{verde} (m ³ t ⁻¹)
Ago	1	I	0.7	2.62	23.6	33.2	23.6	16.9
Ago	2	D	0.71	2.66	26.6	36.4	26.6	19.0
Ago	3	D	0.8	2.83	31.2	36.6	31.2	22.3
Sep	1	D	0.9	3.03	30.3	38.4	30.3	21.6
Sep	2	M	0.97	3.08	30.8	39.3	30.8	22.0
Sep	3	M	0.97	3.08	30.8	33.1	30.8	22.0
Oct	1	M	0.97	3.06	30.6	26.1	26.1	18.6
Oct	2	M	0.97	3.05	30.5	20.7	20.7	14.8
Oct	3	F	0.96	2.92	32.1	15.2	15.2	10.9
Nov	1	F	0.88	2.56	25.6	8.5	8.5	6.1
Nov	2	F	0.77	2.17	21.7	2.3	2.3	1.6
Nov	3	F	0.7	1.9	7.6	0.8	0.8	0.6
					321.3	290.6	246.9	176.36

I, inicial; D, desarrollo; M = media; F = final; P_e = precipitación efectiva; dec= diez días; Kc= coeficiente de cultivo; ETc= evapotranspiración del cultivo; Req Riego= necesidad de riego del cultivo.

Cuadro 11. Huella Hídrica azul para el cultivo de cebolla de O-I

Mes	Década	Etapa	Kc	ETc (mm día ⁻¹)	ETc (mm dec ⁻¹)	P _e (mm dec ⁻¹)	Req.Riego (mm dec ⁻¹)	ETC _{azul} (mm dec ⁻¹)	HH _{azul} (m ³ t ⁻¹)
Ago	1	Inic	0.7	2.62	23.6	33.2	0	0	0
Ago	2	Des	0.71	2.66	26.6	36.4	0	0	0
Ago	3	Des	0.8	2.83	31.2	36.6	0	0	0
Sep	1	Des	0.9	3.03	30.3	38.4	0	0	0
Sep	2	Med	0.97	3.08	30.8	39.3	0	0	0
Sep	3	Med	0.97	3.08	30.8	33.1	0	0	0
Oct	1	Med	0.97	3.06	30.6	26.1	4.5	4.5	3.21
Oct	2	Med	0.97	3.05	30.5	20.7	9.8	9.8	7
Oct	3	Fin	0.96	2.92	32.1	15.2	16.9	16.9	12.07
Nov	1	Fin	0.88	2.56	25.6	8.5	17.2	17.1	12.21
Nov	2	Fin	0.77	2.17	21.7	2.3	19.3	19.4	13.86
Nov	3	Fin	0.7	1.9	7.6	0.8	6.6	6.8	4.86
					321.3	290.6	74.2	74.5	53.21

Cuadro 12. Huella Hídrica gris para el cultivo de cebolla de O-I

Parámetros	N	P
T _a	76.75	15.41
α	0.10	0.30
C _{max}	0.06	0.03
C _{nat}	0.00	0.00
Y	14.00	14.00
T _a *a	7.68	4.62
(C _{max} -c _{nat})Y	0.84	0.42
HHgris por elemento(m ³ t ⁻¹)	9.14	11.01
	Huella Hídrica gris (m ³ t ⁻¹)	20.14

4.4. Huella Hídrica del cultivo de cebolla de primavera-verano

La Huella Hídrica total para el cultivo de cebolla de primavera-verano (P-V) fue de 578.65 m³ t⁻¹. El agua incorporada en la producción del cultivo es principalmente agua verde, con un valor de 293.30 m³ t⁻¹ (Cuadro 13), aunque, a diferencia del ciclo de otoño-invierno (O-I), la Huella Hídrica azul estimada es alta (Cuadro 14), lo que se explica por la mayor temperatura y evapotranspiración de este ciclo de cultivo. La Huella Hídrica gris (Cuadro 15) es similar a la estimada para el ciclo de otoño-Invierno (O-I).

Tomando como referencia otros estudios de la Huella Hídrica del cultivo de cebolla, Mallma y Mejía (2015) reportan para Perú una estimación de 302.5 m³ t⁻¹. Para Colombia, Castañeda y Ramírez (2016) estimaron una Huella Hídrica total para el cultivo de cebolla en bulbo de 505.11 m³ t⁻¹, valor parecido al obtenido en el presente estudio.

Con relación a los promedios reportados por Mekonnen y Hoekstra (2010), la Huella Hídrica verde de 293.30 m³ t⁻¹ para el cultivo de cebolla de P-V es alta en la región, comparado con el valor registrados por los autores de 176 m³ t⁻¹. La Huella Hídrica azul fue de 262.99 m³ t⁻¹, mucho mayor de 44 m³ t⁻¹, valor reportado por los autores mencionados. En cambio, la Huella Hídrica gris fue de 22.90 m³ t⁻¹, menor al valor de 51 m³ t⁻¹ reportado por los autores. La Huella Hídrica azul es la que aumenta considerablemente a la Huella Hídrica total para el cultivo de cebolla de P-V en la región de estudio. El valor de la Huella Hídrica total en este estudio de 578.65 m³ t⁻¹ es más del doble del valor reportado para el cultivo de cebolla por Mekonnen y Hoekstra, el cual es de 272 m³ t⁻¹. Esto se explica por las temperaturas presentes durante el verano en la región y al uso de agua de riego.

La Huella Hídrica gris obtenida en el ciclo P-V para el cultivo de cebolla fue 12.34 m³ ton⁻¹ y para el ciclo O-I fue de 26 m³ ton⁻¹. El cultivo de tomate de cáscara obtuvo una Huella Hídrica gris para el ciclo de OI de 9.14 m³ ton⁻¹. El Nitrógeno se considera como un elemento importante por la influencia que tiene en el crecimiento de la cebolla e incide directamente en el rendimiento (Dilruba *et al.*, 2006). Los productores de la región aplican

en su mayoría urea y otros fertilizantes con alto contenido de nitrógeno para el cultivo. Álvarez *et al.* (2016) refiere que un manejo adecuado del cultivo con una planeación de riego y con una dosis adecuada de fertilización incide en una menor Huella Hídrica y contribuye a un uso eficiente y sostenible del agua. En este sentido, Mata *et al.* (2011) proponen el uso de un sistema de riego por goteo, pues este genera una distribución más homogénea del agua y por consecuencia el contenido de humedad tiene menos variación que lo que ocurre con el riego por inundación. La aplicación de fertilizantes también se hace más eficiente por lo que se favorece al incremento del rendimiento y se refleja en la calidad del producto.

Cuadro 13. Huella Hídrica verde para el cultivo de cebolla de P-V

Mes	Década	Etapa	Kc	ETc (mm día ⁻¹)	ETc (mm dec ⁻¹)	P _e (mm dec ⁻¹)	ETC verde (mm dec ⁻¹)	HH _{verde} (m ³ t ⁻¹)
Abr	1	Inic	0.7	3.16	12.6	2.5	2.5	3.25
Abr	2	Des	0.72	3.28	32.8	7.8	7.8	10.13
Abr	3	Des	0.85	3.85	38.5	12.8	12.8	16.62
May	1	Med	0.97	4.4	44	17.9	17.9	23.25
May	2	Med	0.98	4.46	44.6	22.4	22.4	29.09
May	3	Med	0.98	4.25	46.8	28.8	28.8	37.40
Jun	1	Med	0.98	4.05	40.5	37.5	37.5	48.70
Jun	2	Fin	0.97	3.81	38.1	44.7	38.1	49.48
Jun	3	Fin	0.86	3.32	33.2	42.4	33.2	43.12
Jul	1	Fin	0.73	2.76	24.9	34.8	24.9	32.34
					356	251.6	225.9	293.38

Cuadro 14. Huella Hídrica azul para el cultivo de cebolla de P-V

Mes	Década	Etapa	Kc	ETc (mm día ⁻¹)	ETc (mm dec ⁻¹)	P _e (mm dec ⁻¹)	Req.Riego (mm dec ⁻¹)	ETC _{azul} (mm dec ⁻¹)	HH _{azul} (m ³ t ⁻¹)
Abr	1	Inic	0.7	3.16	12.6	2.5	9.5	10.1	13.12
Abr	2	Des	0.72	3.28	32.8	7.8	25	25	32.47
Abr	3	Des	0.85	3.85	38.5	12.8	25.7	0	0
May	1	Med	0.97	4.4	44	17.9	26.1	0	0
May	2	Med	0.98	4.46	44.6	22.4	22.2	0.2	0.26
May	3	Med	0.98	4.25	46.8	28.8	18	10.8	14.03
Jun	1	Med	0.98	4.05	40.5	37.5	3	34.5	44.81
Jun	2	Fin	0.97	3.81	38.1	44.7	0	44.7	58.05
Jun	3	Fin	0.86	3.32	33.2	42.4	0	42.4	55.06
Jul	1	Fin	0.73	2.76	24.9	34.8	0	34.8	45.19
					356	251.6	129.5	202.5	262.99

Cuadro 15. Huella Hídrica gris del cultivo de cebolla de P-V

Parámetros	Contaminante	
	N	P
T _a	45.96	9.50
α	0.10	0.30
C _{max}	0.06	0.03
C _{nat}	0.00	0.00
Y	7.70	7.70
T _a *a	4.60	2.85
(C _{max} -c _{nat})Y	0.46	0.23
HHgris por elemento(m ³ t ⁻¹)	9.95	12.34
	Huella Hídrica gris (m³ t⁻¹)	22.90

4.5 Huella Hídrica del cultivo de tomate de cáscara de O-I

La Huella Hídrica total del cultivo de tomate de cáscara del ciclo de otoño-invierno (O-I) en el área de estudio es de $196.32 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$. Debido a que el cultivo es de ciclo corto y su siembra se realiza a finales del verano, la contribución del agua verde es importante (Cuadro 16). El agua azul incorporada en la producción del cultivo es menor (Cuadro 17) al del cultivo de cebolla. Situación similar se observa para la Huella Hídrica gris asociada al uso de fertilizantes (Cuadro 18). Para ninguno de los cultivos se consideró la contaminación asociada al uso de pesticidas, el cual aumenta la Huella Hídrica gris de los cultivos estudiados.

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 realizado en Chapingo, México, por López *et al.* (2010). En este estudio se obtuvo un valor de ET_c para el periodo de cultivo de 300.2 mm, mientras que los autores referidos reportan 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 por Mekonnen y Hoekstra (2010). Ellos reportan valores de $194 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$, $43 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$, $85 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$ y $322 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$ para las Huellas Hídricas verde, azul, gris y total, respectivamente, para cultivos hortícolas. En este estudio se obtuvieron valores de $165.75 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$, $21.95 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$, $8.63 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$ y $196.32 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$ 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.

La huella hídrica gris para el cultivo de tomate de cáscara que se obtuvo fue de $8.63 \text{ m}^3 \text{ ton}^{-1}$, lo que corresponde a $5.03 \text{ m}^3 \text{ ton}^{-1}$ para el elemento N y $3.60 \text{ m}^3 \text{ ton}^{-1}$ para el P. De acuerdo con Franke *et al.* (2013) y Hoekstra *et al.* (2011) la cantidad de nitrógeno que

logra llegar a los cuerpos de agua es aproximadamente del 10% del total del fertilizante aplicado.

Cuadro 16. Huella Hídrica verde para el cultivo de tomate de cáscara de O-I

Mes	Década	Etapa	Kc	ETc (mm día ⁻¹)	ETc (mm dec ⁻¹)	P _e (mm dec ⁻¹)	ETC verde (mm dec ⁻¹)	HH _{verde} (m ³ t ⁻¹)
Jul	3	Inic	0.6	2.24	9	13.5	9	5.63
Ago	1	Des	0.63	2.35	23.5	36.8	23.5	14.69
Ago	2	Des	0.79	2.96	29.6	36.4	29.6	18.50
Ago	3	Des	0.98	3.5	38.5	36.6	36.6	22.88
Sep	1	Med	1.11	3.74	37.4	38.4	37.4	23.38
Sep	2	Med	1.11	3.54	35.4	39.3	35.4	22.13
Sep	3	Med	1.11	3.52	35.2	33.1	33.1	20.69
Oct	1	Fin	1.1	3.49	34.9	26.1	26.1	16.31
Oct	2	Fin	0.99	3.13	31.3	20.7	20.7	12.94
Oct	3	Fin	0.84	2.55	25.5	13.8	13.8	8.63
					300.2	294.8	265.2	165.75

Cuadro 17. Huella Hídrica azul para tomate de cáscara de O-I

Mes	Década	Etapa	Kc	ETc (mm día ⁻¹)	ETc (mm dec ⁻¹)	P _e (mm dec ⁻¹)	Req.Riego (mm dec ⁻¹)	ETC azul (mm dec ⁻¹)	HH _{azul} (m ³ t ⁻¹)
Jul	3	Inic	0.6	2.24	9	13.5	9	0	0
Ago	1	Des	0.63	2.35	23.5	36.8	0	0	0
Ago	2	Des	0.79	2.96	29.6	36.4	0	0	0
Ago	3	Des	0.98	3.5	38.5	36.6	1.9	1.9	1.19
Sep	1	Med	1.11	3.74	37.4	38.4	0	0	0
Sep	2	Med	1.11	3.54	35.4	39.3	0	0	0
Sep	3	Med	1.11	3.52	35.2	33.1	2.1	2.1	1.31
Oct	1	Fin	1.1	3.49	34.9	26.1	8.8	8.8	5.5
Oct	2	Fin	0.99	3.13	31.3	20.7	10.6	10.6	6.63
Oct	3	Fin	0.84	2.55	25.5	13.8	10.3	11.7	7.31
				300.2	294.8	294.8	42.5	35.1	21.94

Cuadro 18. Huella Hídrica gris del cultivo de tomate de cáscara de otoño-invierno (O-I)

Parámetros	N	P
T _a	48.30	5.76
α	0.10	0.30
C _{max}	0.06	0.03
C _{nat}	0.00	0.00
Y	16.00	16.00
T _a *a	4.83	1.73
(C _{max} -c _{nat})Y	0.96	0.48
HHgris por elemento (m ³ t ⁻¹)	5.03	3.60
	Huella Hídrica gris (m³ t⁻¹)	8.63

4.6 Implicaciones de la Huella Hídrica sobre el recurso hídrico regional

El cultivo de cebolla del ciclo de P-V tuvo la Huella Hídrica mayor (Figura 5). Sin embargo, debido a la mayor superficie del cultivo de cebolla del ciclo de otoño – invierno éste incorpora una cantidad similar al del cultivo de cebolla de primavera - verano (Cuadro 19). Para el ciclo primavera-verano (P-V) el SIAP reporta una producción de cebolla de 3,584.79 ton en una superficie sembrada y cosechada de 234.3 ha, por lo que se requieren 2074336.41 m³ (2.07 hm³) de agua para esa producción. Para el ciclo O-I de cebolla se reportó la producción de 8,418.00 ton en una superficie cosechada de 460 ha, por lo que se requirieron 2102104.88 m³ (2.1 hm³) de agua. Para el cultivo de tomate de cáscara en el ciclo O-I se requirieron 700268.98 m³ (0.70 hm³).

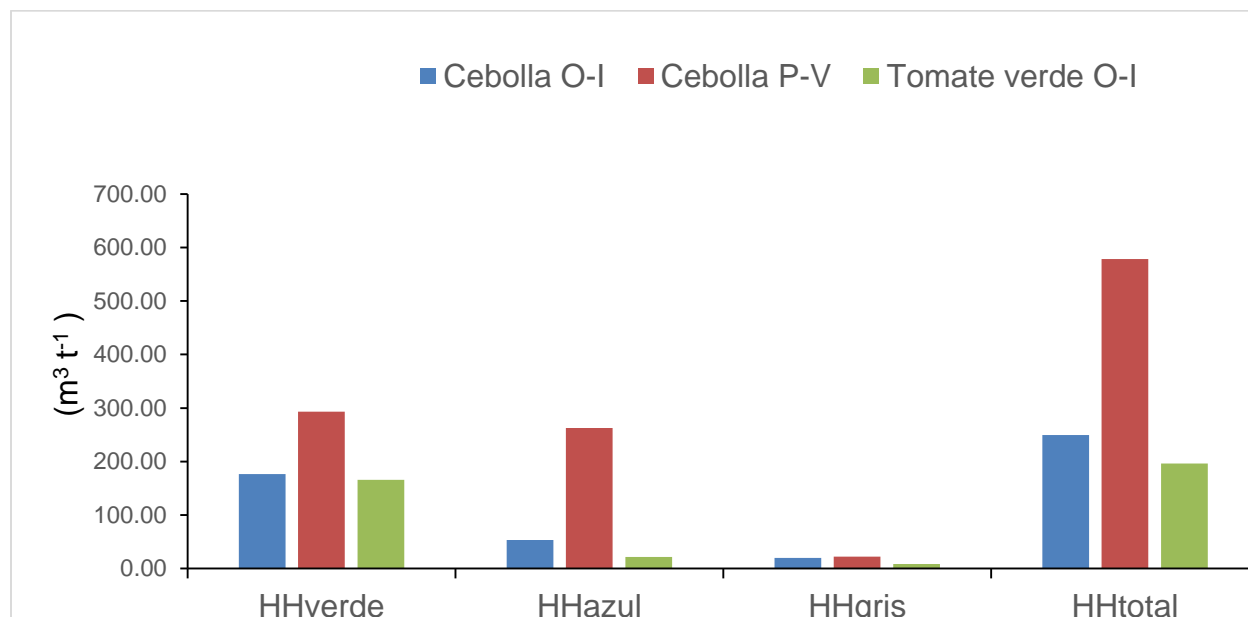


Figura 5. Comparación de las Huellas Hídricas de los cultivos evaluados

En cuanto al impacto de la Huella Hídrica del cultivo de cebolla de otoño-Invierno (O-I), considerando una producción reportada en el ciclo 2017 de 8418 t (SIAP, 2017), se estima la incorporación de 1484574.43 m³ de agua verde, 24478.57 m³ de agua azul, y un requerimiento de 169572.59 m³ de agua para diluir los contaminantes generados

durante la producción del cultivo. La cantidad total de agua incorporada en la producción regional de cebolla de O-I es de 2074336.41 m³ o 2.074 hm³ (Cuadro 18).

Cuadro 19. 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)*	3,584.79	8,418.00	3,567.00	
Superficie cosechada (ha)*	234.3	460	290	
HH total (m ³ t ⁻¹)	578.65	249.72	196.32	
Agua total incorporada (m ³)	2074336.41	2102104.88	700268.9813	
Agua total incorporada (hm ³)	2.07	2.1	0.7	
% del volumen total concesionado**	2.22	2.25	0.75	5.22
% del volumen concesionado para uso agrícola	2.90	2.94	0.98	6.83

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

** Considerando un volumen total concesionado de 93.43 hm³ y 76.43 % (71.41 hm³) asignado al uso agrícola (REPDA, 2016)

5. CONCLUSIONES

El cultivo de cebolla (*Allium cepa* L.) del ciclo de primavera-verano (P-V) tuvo una Huella Hídrica alta en la región de Atlixco, Puebla, comparada con los valores estimados para otras regiones de México y del mundo, y está asociada a un alto requerimiento de agua azul, por las condiciones de temperatura y precipitación.

El cultivo de cebolla (*Allium cepa* L.) del ciclo de otoño-invierno (O-I) tuvo una Huella Hídrica menor a la del ciclo de primavera-verano (P-V) 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 determinan el valor de la Huella Hídrica total.

El cultivo de tomate de cáscara (*Physalis ixocarpa* Brot.) del ciclo de otoño-invierno (O-I) tuvo una Huella Hídrica menor que el cultivo de cebolla, tanto para primavera-verano (P-V) como para otoño-invierno (O-I), 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 el 5.22% del agua concesionada para todos los usos consuntivos y el 6.83% de la concesionada para uso agrícola.

6. LITERATURA CITADA

Alvarez, A. J. Morábito, C. Schilardi. (2016). Huellas hídricas verde y azul del cultivo de maíz (*Zea mays*) en provincias del centro y noreste argentino. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias*, 48 (1): 161-177. Disponible en: http://revista.fca.uncu.edu.ar/index.php?option=com_content&view=article&id=382:2016-06-23-13-54-44&catid=22:2016-06-23-12-40-55&Itemid=30

Aivazidou, E., N. Tsolakis, E. Lakovou y D. Vlachos. (2016). The emerging role of water footprint in supply chain management: a critical literature synthesis and a hierarchical decision-making framework. *Journal of Cleaner Production*, 37: 1018-1037. Doi:10.1016/j.jclepro.2016.07.210

Allan, J.A. (1993). Fortunately there are substitutes for water: otherwise our hydro-political futures would be impossible. En: *Priorities for water resources allocation and management*, Natural Resources and Advisers Conference, Southampton, July 1992. Pp. 13-26.

Allan, J.A. (1998). Virtual water: a strategic resource global solutions to regional deficits. *Ground Water*, 36(4): 454-546. doi.org/10.1111/j.1745-6584.1998.tb02825.x

Allen, R.G., L.S. Pereira, D. Raes y M. Smith. (2006). *Evapotranspiración del cultivo, guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*. FAO. Roma, Italia. Disponible en: <http://www.fao.org/3/a-x0490s.pdf>

Baltussen, R., T. T.T. Adam, R. Edejer, A. Hutubessy, D.B. Acharya, Evans y C.J.L. Murray. (2003). Part one: Methods for generalized cost-effectiveness analysis. En: Edejer, T.T., R. Baltussen, T. Adam, R. Hutubessy, A. Acharya, D,B, Evans y C.J.L. Murray (eds.), *WHO Guide to cost-effectiveness analysis*. World Health Organization, Geneva. pp. 2-15. Disponible en: https://www.who.int/choice/publications/p_2003_generalised_cea.pdf

- Beltrán, M.J. E. Velázquez. (2015). La ecología política del agua virtual y huella hídrica. Reflexiones sobre la necesidad de un análisis crítico de los indicadores de flujos virtuales de agua en la economía. *Revista de Economía Crítica*, 20: 44-56. Disponible en: http://revistaeconomiccritica.org/sites/default/files/MariaBeltran-EstherVelazquez_Ecologia-Politica-Agua-Virtual.pdf
- Bennet, E.M. S.R. Carpenter, N.F. Caraco. (2001). Human impact on erodable phosphorus and eutrophication: a global perspective. *Bioscience* 51, 227-234. Doi.org/10.1641/0006-3568(2001)051[0227:HIOEPA]2.0.CO;2
- Blok, V., T.B., Long, A.I. Gaziulusoy, N. Ciliz, R. Lozano, D. Huisingh, C. Boks. (2015). From best practices to bridges for a more sustainable future: advances and challenges in the transition to global sustainable production and consumption: introduction to the ERSCP stream of the Special volume. *Journal of Cleaner Production*, 86 (108), 19-30. Doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.04.119
- Berbel, J., C. Gutiérrez-Martín, J. Martín-Ortega (2017). Water economics and policy. *Water*, 9, 801. Doi:10.3390/w9100801
- Burman, R. y L.O. Pochop. (1994). Evaporation, evapotranspiration and climatic data. Ed. Elsevier, Amsterdam, The Netherlands.
- California Department of Water Resources. (2008). Economic analysis guidebook. The Resources Agency, State of California. Disponible en: https://water.ca.gov/LegacyFiles/pubs/planning/economic_analysis_guidebook/econguidebook.pdf
- Chanan, A., J. Kandasamy y D. Sharma. (2008). A role for input-output analysis in urban water policy decisions in Australia. International input output meeting on managing

- the environment. Seville, Spain, July 9 – 11, 2008. Disponible en: https://www.iioa.org/conferences/intermediate-2008/pdf/2f1_Chanan.pdf
- Charchousi, D., V.K. Tsoukala and M.P. Papadopoulou. (2013). Benchmarking methodologies for water footprint calculation in Agriculture. School of Rural and Surveying Engineering, National Technical University of Athens. Disponible en: http://www.uest.gr/win4life/images/papers/charchousi_et_al.pdf
- Chukalla, A.D., M.S. Krol y A.Y. Hoekstra. (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.
- Cantin, B., D. Shrubsole, M. Aït-Ouyahia, (2005). Using economic instruments for water demand management: Introduction. *Canadian Water Resources Journal*, 30: 1–10. Doi.org/10.4296/cwrj30011
- Campillo-Artero, C. y V. Ortún. (2016). Cost-effectiveness analysis: why and how. *Revista Española de Cardiología*, 69(4): 370-373. Doi.org/10.1016/j.rec.2016.01.012
- Cao, X., M. Wu, X. Guo, Y. Zheng, Y. Gong, N. Wu, W. Wang. (2017). Assessing water scarcity in agricultural production system based on the generalized water resources and water footprint framework. *Science of The Total Environment*, 609: 587-597. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.07.191
- Castañeda, J.C. y J. A. Ramírez. (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. Proyecto de grado para optar por el título de ingeniero ambiental y sanitario. Universidad de la Salle, Facultad de Ingeniería. Bogotá, D.C. Disponible en:

http://repository.lasalle.edu.co/bitstream/handle/10185/21503/41102062_2016.pdf?sequence=1

CONAGUA. (2016). Programas contra contingencias hidráulicas por organismos de cuencas para las principales ciudades del país (etapa 2). Subdirección General Técnica, Gerencia de aguas superficiales e ingeniería de ríos. Disponible en: http://viveatoyac.org.mx/images/ZONA_URBANA_ATLIXCO__PUE..pdf

CONAGUA. (2017). Estadísticas del Agua en México. Secretaría Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Comisión Nacional del Agua, México. Disponible en: http://sina.conagua.gob.mx/publicaciones/EAM_2017.pdf

CONAGUA. (2018). Estadísticas agrícolas de las unidades de riego año agrícola 2016-2017. Comisión Nacional del Agua, Ciudad de México, México.

Disponible en:

<https://files.conagua.gob.mx/conagua/publicaciones/Publicaciones/SGIH-3-18.pdf>

Cruz, J. M. y J. Bielsa. (2001). Sobre la eficiencia, el uso sostenible del recurso del agua y la gestión del territorio. *Ager. Revista de Estudios sobre Despoblación y Desarrollo Rural*, 1: 85-112. Disponible en: http://www.ceddar.org/content/files/articulof_244_03_Ager1%20articulo%203.pdf

DANE. (s.f.). Hoja metodológica de indicadores cuenta satélite ambiental. Gobierno de Colombia. Disponible en:

https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/pib/ambientales/cuentas_ambientales/indicadores/cuenta-ambiental-y-economica-de-flujos-del-agua/productividad-hidrica/hoja-metodologica-productividad-hidrica.pdf

- Di Cosmo, V., M. Hyland y M. Llop. (2014). Disentangling water usage in the European Union: a decomposition analysis. *Water Resources Management*, 28(5): 1463-1479. DOI: 10.1007/s11269-014-0566-6.
- Dilruba S., M.M. Alam, M.A. Rahman y M.F. Hasan. (2006). Influence of nitrogen and potassium on yield contributing bulb traits of onion. *International Journal of Agricultural Research*, 1: 85-90. DOI: 10.3923/ijar.2006.85.90
- DOF. (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. 24 de diciembre de 1996.
- DOF. (2011). ACUERDO por el que se dan a conocer los estudios técnicos de aguas nacionales superficiales de la Región Hidrológica número 18 Balsas. 26 de enero de 2011.
- DOF. (2015). Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Atlixco-Izúcar de Matamoros. 20 de abril de 2015.
- Dunne, T. y L.B. Leopold. (1995). *Water in environmental planning*. W.H. Freeman and Company. New York.
- FAO. (1996). CROPWAT: A computer program for irrigation planning and management. Rome, Italy. 125 p.
- Flores, J.C. (2019). Impactos ambientales del uso de agroquímicos sobre la calidad del agua en la subcuenca Huaquechula, Puebla. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados.
- Foley, J.A., R. DeFries, G.P. Asner, C. Barford, G. Bonan, S.R. Carpenter, F. S. Chapin, M.T. Coe, G.C. Daily, H.K. Gibss, J.H. Helkowsky, T. Holloway, E- A. Howard, C.

- J. Kucharik, C. Monfreda, J. A. Patz, J.C. Prentice, N. Ramankutty y P.K. Snyder. (2005). Global consequences of land use. *Science*, 309: 570-574. DOI: 10.1126/science.1111772
- Franke, N.A., H. Boyacioglu y A.Y. Hoekstra. (2013). Grey water footprint accounting. TIER 1 supporting guidelines. UNESCO-IHE. The Netherlands. Disponible en: https://waterfootprint.org/media/downloads/Report65-GreyWaterFootprint-Guidelines_1.pdf
- García, E. (2004). Modificaciones al Sistema climático de Kööpen para la República Mexicana. 5ª. Ed. Instituto de Geografía. UNAM, México. 90 p.
- Gil, M.A. y H. Reyes. (2013). Gestión integral del agua desde un enfoque social hacia una nueva economía ecológica. *Nóesis*, 24(47): 159-176. DOI: <http://dx.doi.org/10.20983/noesis.2015.1.6>
- Gleick, P.H., J. Christian-Smith y H. Cooley. (2011). Water-use efficiency and productivity: rethinking the basin approach. *Water International*, 36(7): 784-798. Disponible en: <https://doi.org/10.1080/02508060.2011.631873>
- González, N. (2017). Hacia la gobernanza del agua, implicaciones de la gestión del recurso hídrico en el departamento de Antioquía. Tesis de Maestría en Estudios Políticos. Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, Facultad de Ciencias Humanas y Económicas. Medellín, Colombia. Disponible en: <http://bdigital.unal.edu.co/57448/7/1037594734.2017.pdf>
- Grimble, R.J. (1999). Economic instruments for improving water use efficiency: theory and practice. *Agricultural Water Management*, 40(1): 77-82. Disponible en: [https://doi.org/10.1016/S0378-3774\(98\)00107-3](https://doi.org/10.1016/S0378-3774(98)00107-3)

- Gutiérrez-Martín, C., M.M. Borrego-Martín y J. Berbel. (2015). Sistema de contabilidad ambiental y económica para el agua (SCAE-Agua). *Ambienta*, 110: 108-119. Disponible en: https://drive.google.com/file/d/1DjA5tnZ__hYEzskNiZ7dT00aNLp1Wj5Z/view
- Hanemann, W.M. (2006). The economic conception of water. En: Rogers, P.P., M.R. Llamas y L. Martínez-Cortina (Eds.), *Water crisis: Myth or reality?* Marcelino Botin Water Forum 2004, Tylor & Francis/Balkema, Great Britain. pp. 61-91. Disponible en: https://gspp.berkeley.edu/assets/uploads/research/pdf/The_economic_conceptio_n_of_water.pdf
- Hess, T., J. Chatterton, A. Daccache, A. Williams. (2016). The impact of changing food choices on the blue water scarcity footprint and greenhouse gas emissions of the British diet: the example of potato, pasta and rice. *Journal of Cleaner Production*, 112: 4558-4568. Doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.08.098
- Hoekstra, A.Y., A.K. Chapagain, M.M. Aldaya y M.M. Mekonnen. (2011). *Water Footprint Assessment Manual. Setting the Global Standard*. WaterFootprint Network, Enschede, the Netherlands. Disponible en: https://waterfootprint.org/media/downloads/TheWaterFootprintAssessmentManual_2.pdf
- IMTA. (2017) Proyecto: integración del sistema de información geográfica de superficies y usuarios del aprovechamiento Atlimeyaya en la microcuenca del río cantarranas y monitoreo de aforos, Atlixco, Puebla. Coordinación de riego y drenaje, subcoordinación de conservación de cuencas y servicios ambientales. Disponible en: <http://transparencia.atlixco.gob.mx/Atlixco/NuevasLeyes/2016/obras-publicas/A77FXLI/FISM16-U9-030.pdf>

INAFED. (2010). Atlixco. Instituto para el Federalismo y el Desarrollo Municipal. SEGOB. Disponible en: <http://www.inafed.gob.mx/work/enciclopedia/EMM21puebla/municipios/21019a.html>

INEGI. (2010). Principales resultados del Censo de Población y Vivienda 2010 Puebla. Disponible en: http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/Productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/censos/poblacion/2010/princi_result/pue/21_principales_resultados_cpv2010.pdf

Issanova, G., R. Lili, J. Abuduwaili, A. Kaldybayev y G. Saparov. (2018). Water availability of water resources within water economic basins in Kazakhstan. *Paddy and Environment*, 16(1): 183-191. Doi.org/10.1007/s10333-018-0630-6

Kim, S.H., M. Hejazi, L. Liu, K. Calvin, L. Clark, J. Edmonds, P. Kyle, P. Patel, M. Wise y E. Davis. (2016). Balancing global water availability and use at a basin scale in an integrated assessment model. *Climatic Change*, 136: 217-231. Doi.org/10.1007/s10584-016-1604-6

La Campiña (30 de diciembre de 2016). Desabasto de agua en Atlixco afecta 80% de los cultivos. Recuperado de: <http://www.lacampinadepuebla.mx/index.php/agricultura/item/299-desabasto-de-agua-en-atlixco-afecta-al-80-de-los-cultivos>.

Lenzen, M. (2009). Understanding virtual water flows: a multiregion input-output case study of Victoria. *Water Resources Research*, 45, W09416. Doi:10.1029/2008WR007649.

- López, E.M, y M.P. Cattaneo. (2013). Los indicadores ambientales como herramientas de la economía. *Ciencia y tecnología*, 13: 279-292. Disponible en: https://www.palermo.edu/ingenieria/pdf2014/13/CyT_13_19.pdf
- López-López, R., R. Arteaga-Ramírez, M.A. Vázquez-Peña, I. L. López-Cruz e I. Sánchez-Cohen. (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. Disponible en: <http://www.scielo.org.mx/pdf/rcsh/v15n1/v15n1a12.pdf>
- López, R., R. Arteaga, M.A. Vázquez, I.L. López e I. Sánchez Cohen. (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. Disponible en: <https://www.revistafitotecniamexicana.org/documentos/33-2/9a.pdf>
- Mallma, T. y J.A. Mejía. (2015). Huella hídrica de productos agrícolas producidas en la sierra central y comercializados en Lima. *Apuntes de Ciencia & Sociedad*, 05(01): 128-134. DOI: <http://dx.doi.org/10.18259/acs.2015020>
- Massarutto, A. (2007). Water pricing and full cost recovery of water services: economic incentive or instrument of public finance? *Water Policiy*, 9(6): 591-613. Doi: [O.21000/water.2007.024](https://doi.org/10.21000/water.2007.024)
- Mata, H., J. Patishtan, E. Vazquez, M. Ramírez. (2011). Fertirrigación del cultivo de cebolla con riego por goteo en el sur de Tamaulipas. Instituto Nacional De Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. CLAVE INIFAP/CIRNE/A-480, Primera Edición. Disponible en: <http://www.inifapcirne.gob.mx/Biblioteca/Publicaciones/901.pdf>

McDonald, R.I., P. Green, D. Balk, B.M. Fekete, C. Revenga, M. Todd y M. Montgomery. (2011). Urban growth, climate change, and freshwater availability. *PNAS*, 108(15): 6312-6317. Doi.org/10.1073/pnas.1011615108

Meinzen-Dick, R. y A. Appasamy. (2002). Urbanization and intersectoral competition for water. In: Finding the source: The linkages between population and water. Washington, D.C., Woodrow Wilson International Center for Scholars. Pp- 27-51. Disponible en: <https://www.wilsoncenter.org/sites/default/files/popwawa3.pdf>.

Mekonnen, M.M. y A.Y. Hoekstra. (2010). The green, blue and grey water footprint of crops and derived crop products. Volume 1: Main report. UNESCO-IHE. The Netherlands. Disponible en: <https://waterfootprint.org/media/downloads/Report47-WaterFootprintCrops-Vol1.pdf>

Mekonnen, M.M., Hoekstra, A.Y. (2011). The green, blue and grey *water footprint of crops* and derived *crop* products. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(5): 1577-1600. Doi:10.5194/hess-15-1577-2011

Mekonnen, M.M. y A.Y. Hoekstra. (2014). Water footprint benchmarks for crop production: A first global assessment. *Ecological Indicators*, 46: 214-223. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.06.013>

Morison, J.I.L., N.R. Baker, P.M. Mullineaux y W.J. Davies. (2008). Improving water use in crop production. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 363: 639-658. Doi: 10.1098/rstb.2007.2175

Murillo-Licea, D. y D. Soares-Moraes. (2013). El péndulo de la gobernabilidad y la gobernanza del agua en México. *Tecnología y Ciencias del Agua*, IV(3): 149-163. Disponible en: <http://www.scielo.org.mx/pdf/tca/v4n3/v4n3a9.pdf>

Naciones Unidas. (2012). Recomendaciones internacionales para las estadísticas del agua. Naciones Unidas, Departamento de Asuntos Económicos y Sociales, Nueva York. Disponible en: https://unstats.un.org/unsd/publication/seriesM/seriesm_91s.pdf

Naredo, J.M. (2002). Economía y sostenibilidad: la economía ecológica en perspectiva. *Polis*, 2, 1-29. Disponible en: <http://www.redalyc.org/pdf/305/30500213.pdf>

Nemecek, T., O. Huguenin-Elie, D. Dubois, G. Gaillard, B. Schaller, A. Chervet. (2011). Life cycle assessment of Swiss farming systems: II. Extensive and intensive production. *Agricultural Systems*, 104: 217-232. Doi.org/10.1016/j.agry.2010.07.007

Novoa, V., O. Rojas, J.L. Arumí, C. Ulloa y R. Urrutia. (2016). Variabilidad de la huella hídrica del cultivo de cereales, río Cachapoal, Chile. *Tecnología y Ciencias del Agua*, VII(2): 35-50. Disponible en: <http://revistatyca.org.mx/ojs/index.php/tyca/article/view/1138/1042>

Obersteiner M, J. Penuelas, P. Ciais, M. Van der Velde e I.A. Janssens. (2013). The phosphorus trilemma. *Nature Geoscience*, 6 (11): 897-898. DOI:10.1038/ngeo1990.

OCDE. (2015). Principios de la gobernanza del agua de la OCDE. Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico. Disponible en: <https://www.oecd.org/cfe/regional-policy/OECD-Principles-Water-spanish.pdf>

Olmstead, S.M. (2010). The economics of managing scarce water resources. *Review of Environmental Economics and Policy*, 4(2): 179-198. Doi.org/10.1093/reep/req004.

- Pascual, U., R. Muradian, L. Brander, E. Gómez-Baggethun, B. Martín-López, M. Verma, P. Armsworth, M. Christie, H. Cornelissen, F. Eppink, J. Farley, J. Loomis, L. Pearson y S Polasky. (2010). *TEEB : the Ecological and Economic Foundations - Chapter 5 – The economics of valuing ecosystem services and biodiversity*. TEEB Publication. Disponible en: <http://www.teebweb.org/wpcontent/uploads/2013/04/D0-Chapter-5-The-economics-of-valuing-ecosystem-services-andbiodiversity.pdf>
- Pellicer-Martínez, F. y J.M. Martínez-Paz. (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.
- Pellegrini, G., C. Ingrao, S. Camposeo, C. Tricase, F. Contò, D.Huisingh. (2016). Application of water footprint to olive growing systems in the Apulia region: a comparative assessment. *Journal of Cleaner Production*, 112 (2016), pp. 2407-418. Doi.org/10.1016/ j.jclepro.2015.10.088
- Pereira, L., I. Cordery, Iacovos Iacovides. (2012). Improved indicators of water use performance and productivity for sustainable water conservation and saving, *Agricultural Water Management*, 108: 39-51. Doi.org/10.1016/j.agwat.2011.08.022.
- Perry, C. (2007). Efficient irrigation; inefficient communication; flawed recommendations. *Irrigation and Drainage*, 56: 367-378. DOI: 10.1002/ird.
- Pimentel, D., J. Houser, E. Preiss, O. White, H. Fang, L. Mesnick, T. Masky, T. Tariche, J. Schrecj y S. Alpert. (1997). Water Resources: Agriculture, the Environment, and Society. *BioScience*, 47(2): 97-106. Doi.org/10.2307/1313020.
- Proops, J.L.R. (1988). Energy intensities, input-output analysis and economic development. En: Ciaschini, M. (Ed.), *Input-output analysis*. pp. 201-215.

Renderos, R. (2014). Huella Hídrica del Cultivo de Caña de Azúcar. Departamento de Ingeniería de Procesos y Ciencias Ambientales, Universidad “José Simeón Cañas”, El Salvador. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/303939723_Huella_Hidrica_del_Cultivo_de_Cana_de_Azucar.

Renzulli, P.A., Bacenetti, J., Benedetto, G., Fusi, A., Ioppolo, G., Niero, M., Proto, M., Salomone, R., Sica, D., Supino, S. (2015). Life cycle assessment in the cereal and derived products sector. In: Notarnicola, B., Salomone, R., Petti, L., Renzulli, P.A., Roma, R., Cerutti, A.K. (Eds.), *Life Cycle Assessment in the Agri-food Sector. Case Studies, Methodological Issues and Best Practices*. Springer International Publishing, Switzerland. pp. 185-249. Disponible en: https://doi.org/10.1007/978-3-319-11940-3_4

Repar, N., P. Jan, D. Dux, T. Nemecek, R. Doluschitz. (2016). Implementing farm-level environmental sustainability in environmental performance indicators: a combined global-local approach. *Journal of Cleaner Production*, 140: 692-704. Doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.022.

REPDA. (2016). Base de datos de títulos y permisos de aguas nacionales y sus bienes públicos inherentes. Disponible en: <https://app.conagua.gob.mx/repda.aspx>.

Rey, F.C. (2008). Las cuentas satélites de agua. *Índice*, 28: 8-10. Disponible en: <http://www.revistaindice.com/numero28/p8.pdf>

Ríos, J.L., B.E. Ríos, J.E. Cantú, H.E. Ríos, S. Armendáriz, J.A. Chávez, C. Navarrete y R. Castro. (2018). Análisis de la eficiencia física, económica y social del agua en espárrago (*Asparagus officinalis* L.) y uva (*Vitis vinífera*) de mesa del DR-037 Altar-PitiquitoCaborca, Sonora, Mexico 2014. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias*, 50(1): 101-122. Disponible en: http://revista.fca.uncu.edu.ar/images/stories/pdfs/2018-01/Cp_8_Ros_Flores.pdf

Ríos-Flores, J.L., R. Jacinto-Soto, M.A. Torres-Moreno y M. Torres-Moreno. (2017). Huella hídrica del cultivo de cebolla producida en el DR005, Delicias, Chihuahua. En: Pérez, F., E. Figueroa, L. Godínez y R. Salazar (eds.) Ciencias de la Economía y Agronomía. Handbook T-I. -©ECORFAN, Texcoco de Mora, México. Disponible en:

https://www.ecorfan.org/handbooks/Ciencias%20de%20la%20Economia%20y%20Agronomia%20T-I/HCEA_TI_2.pdf

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

Salvador, R., A. Martínez-Cob, J. Caverro y E. Playán. (2011). Seasonal on-farm irrigation performance in the Ebro basin (Spain): Crops and irrigation systems. *Agricultural Water Management*, 98: 577-587. Doi:10.1016/j.agwat.2010.10.003.

Savenije, H.H.G. y P. van der Zaag. (2002). Water as an economic good and demand management paradigms with pitfalls. *Water International*, 27(1): 98-104. Disponible en; <http://pacificwater.org/userfiles/file/IWRM/Toolboxes/financing%20IWRM/waterasaneconomicgood.pdf>.

Shiklomanov, I. A. (2000). Appraisal and Assessment of World Water Resources. *Water International*, 25(1), 11–32. Doi.org/10.1080/02508060008686794.

SIAP. (2017). Cierre estadístico de la producción agrícola 2017. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. Disponible en: <https://www.gob.mx/siap/articulos/cierre-estadistico-de-la-produccion-agricola-2017?idiom=es>

- SIAP. (2018a). Avance de siembras y cosechas resumen por cultivo, Puebla, Otoño-Invierno. Disponible en: http://infosiap.siap.gob.mx:8080/agricola_siap_gobmx/ResumenDelegacion.do
- SIAP. (2018b). Avance de siembras y cosechas resumen por cultivo, Puebla, Primavera-Verano. Disponible en: http://infosiap.siap.gob.mx:8080/agricola_siap_gobmx/ResumenDelegacion.do
- SIAP. (2019). Avance de Siembras y Cosechas Resumen nacional por estado. Disponible en: http://infosiap.siap.gob.mx:8080/agricola_siap_gobmx/AvanceNacionalCultivo.do.
- Singh, A. (2014). Conjunctive use of water resources for sustainable irrigated agriculture. *Journal of Hydrology*, 519: 1688-1607. Doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.09.049
- Sophocleous, M. (2004). Global and regional water availability and demand: prospects for the future. *Natural Resources Research*, 13(2): 61-75. Doi.org/10.1023/B:NARR.0000032644.16734.f5
- Sutton, M.A., A. Bleeker, C.M. Howard, M. Bekunda, B. Grizzeti, W. de Vries, H.J.M. Van Grinsven, Y.P. Abrol, T.K. Adhya y G. Billen. (2013). Our nutrient World: the Challenge to Produce More Food and Energy with Less Pollution. Edinburgh, NERC/Centre for Ecology & Hydrology, 114pp. Disponible en: <http://nora.nerc.ac.uk/id/eprint/500700/>
- Torres-Pérez, J.A., M.J. Santiago-Cruz, J. Matus-Gadea y J.L. Romo-Lozano. (2001). Las cuentas nacionales y el medio ambiente. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y Medio Ambiente*, 7(1):67-76. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=62970109>

UNDP. (2013). *Water governance in the Arab region, managing scarcity and securing the future*. United Nations Development Programme, New York, USA. Disponible en: https://www.undp.org/content/dam/rbas/doc/Energy%20and%20Environment/Arab_Water_Gov_Report/Arab_Water_Gov_Report_Full_Final_Nov_27.pdf

UNEP. (2012). *Measuring water use in a green economy, A Report of the Working Group on Water Efficiency to the International Resource Panel*. United Nations Environment Programme. McGlade, J., B. Werner, M. Young, M. Matlock, D. Jefferies, G. Sonnemann, M. Aldaya, S. Pfister, M. Berger, C. Farrell, K. Hyde, M. Wackernagel, A. Hoekstra, R. Mathew, J. Liu, E. Ercin, J.L. Weber, A. Alfieri, R. Martinez-Lagunes, B. Edens, P. Schulte, S. von Wirén-Lehr, D. Gee. Disponible en: https://waterfootprint.org/media/downloads/UNEP-2012-MeasuringWaterUse_1.pdf

UNEP. (2014). *Eficiencia en el uso del agua y la energía. Nota informativa*. Disponible en: https://www.un.org/spanish/waterforlifedecade/pdf/01_2014_water_energy_efficiency_spa.pdf

Valdivia, S., C.M.L. Ugaya, J. Hildenbrand. (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.org/10.1007/s11367-012-0529-1

Vanham, D. y G. Bidoglio. (2013). A review on the indicator water footprint for the EU28. *Ecological indicators*, 26: 61-75. Doi.org/10.1016/j.ecolind.2012.10.021

Velazquez E. (2006). An input-output model of water consumption: analysing intersectoral water relationships in Andalusia. *Ecological Economics*, 56 (2): 226-240. Doi.org/10.1016/j.ecolecon.2004.09.026

Vitousek, P.M., R. Naylor, T. Crews, M.B. David, L.E. Drinkwater, E. Holland, P.J. Johnes, J. Katzenberger, L.A. Martinelli, P.A. Matson, G. Nziguheba, D. Ojima, C.A. Palm, G.P. Robertson, P.A. Sanchez, A.R. Townsend, F.S. Zhang. (2009). Nutrient imbalances in agricultural development. *Science*, 324, 1519-1520. DOI: 10.1126/science.1170261

Whitehead, P.G., J. Crossman, B.B. Balana, M.N. Furtter, S. Comber, L.Jin, D. Skuras, A.J. Wade, M.J. Bowes y D.S. Read. (2013). A cost-effectiveness analysis of water security and water quality: impacts of climate and land-use change on the River Thames system. *Philosophical Transactions of The Royal Society A*, 371: 20120413. Doi.org/10.1098/rsta.2012.0413