



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO

INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN CIENCIAS DE LA TIERRA
"DR. VICTOR HUGO GARDUÑO MONROY"

HUELLA HÍDRICA DEL ARÁNDANO EN AGRICULTURA PROTEGIDA Y SUS IMPLICACIONES GEOHIDROLÓGICAS, HIDROGEOQUÍMICAS Y SOCIALES EN MICHOACÁN

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE

"*****MCGUVTQ'GP"

GEOCIENCIAS Y PLANIFICACIÓN DEL TERRITORIO

PRESENTA

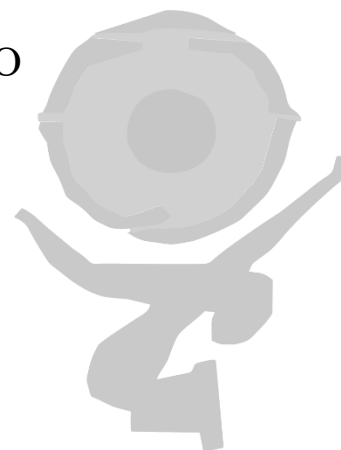
DAVID ARIEL BARRALES MARTÍNEZ

DIRECTORA

DRA. MARIA LOURDES GONZÁLEZ ARQUEROS

CO-DIRECTOR

DR. LENIN EJECATL MEDINA OROZCO



MORELIA, MICHOACÁN NOVIEMBRE 2023

Índice general

Resumen	1
Abstract.....	3
1. Introducción.....	5
1.1 Justificación.....	10
1.2 Preguntas de investigación.....	11
1.3 Objetivos	11
1.4 Hipótesis	12
2. Antecedentes.....	13
3. Materiales y métodos.....	20
3.1 Zona de estudio	20
3.2 Selección y caracterización del sitio de estudio	21
3.3 Estimación de la huella hídrica azul	25
3.4 Estimación de la huella hídrica gris.....	28
3.5 Estimación de la huella hídrica total	31
3.6 Implicación geohidrológica de la huella hídrica azul	33
3.7 Implicación geohidrológica de la huella hídrica gris	36
3.8 Propuesta de estrategia para reducir la huella hídrica gris.....	43

4. Resultados y discusión	44
4.1 Evapotranspiración	44
4.2 Estimación de la huella hídrica azul	45
4.3 Estimación de la huella hídrica gris.....	48
4.4 Estimación de la huella hídrica total	51
4.5 Implicación de la huella hídrica azul en la sustentabilidad del recurso hídrico en las zonas de estudio	52
4.6 Implicación de la huella hídrica azul en la sustentabilidad del recurso hídrico a en Michoacán.....	56
4.7 Implicación de la huella hídrica gris en el nivel de contaminación del recurso hídrico	58
4.8 Propuesta para la disminución de la huella hídrica	59
4.9 Implicación social de la huella hídrica.	60
5. Conclusiones.....	69
6. Referencias	71

Índice de tablas

Tabla 1. Niveles de escalas en estudios de huella hídrica.	13
Tabla 2. Criterios de evaluación del estrés hídrico.....	35
Tabla 3. Niveles de contaminación del agua.	37
Tabla 4. Valor de w_i para cada parámetro.....	39
Tabla 5. . Índice de calidad del agua de acuerdo con su valor de ICA.....	41
Tabla 6. Huella hídrica azul total de los sitios de estudio.	45
Tabla 7. Huella hídrica azul del cultivo de aguacate en el municipio de Acuitzio.	46
Tabla 8. Comparación de los valores globales de Huella hídrica en arándano y de los sitios de estudio.....	51
Tabla 9. Diferencias entre coberturas de cultivos para los sitios de estudio.	54
Tabla 10. Grado de estrés hídrico en la zona de Acuitzio	55
Tabla 11. Grado de estrés hídrico en la zona de Los Reyes.	55
Tabla 12. Grado de estrés hídrico de los principales municipios productores en Michoacán de arándano.....	56
Tabla 13. Nivel de contaminación de agua de los principales municipios productores de arándano en Michoacán.....	58
Tabla 14. Valor de los ICAs para la zona de Acuitzio.	65
Tabla 15. Valor de los ICAs para la zona de Los Reyes.	66

Índice de figuras

Figura 1. Localización del área de estudio.	20
Figura 2. Condiciones del sitio de estudio.....	22
Figura 3. Sistema regional de producción del arándano.....	23
Figura 4. Diagrama de flujo de la metodología para la obtención de datos de producción. 35	
Figura 5. Huella hídrica azul de los principales productos consumidos en México.	47
Figura 6. Huella hídrica gris de los principales productos consumidos en México.	50
Figura 7. Cultivos plastificados en el municipio de Acuitzio en el año 2022.	53
Figura 8. Cultivos plastificados en el municipio de Los Reyes en el año 2022.	54
Figura 9. Principales municipios productores de arándano bajo agricultura protegida (CONAGUA, 2022; SIAP, 2019).....	61
Figura 10. Campos de cultivo en el municipio de Acuitzio en el año 1995.....	63
Figura 11. Campos de cultivo en el municipio de Los Reyes en el año 1995.....	64

Lista de abreviaturas y acrónimos

APC	Agua potencialmente contaminante
AST	Sociedad Estadounidense para pruebas y materiales
AV	Agua virtual
Cap	Cantidad total aplicada de la sustancia química
Ci	Concentración de cada parámetro
Cmax	Concentración máxima permitida del contaminante
Cnat	Concentración natural del contaminante
CONAGUA	Comisión Nacional del Agua
CVM	Cuenca del valle de México
DA	Disponibilidad de agua
DMA	Disponibilidad media anual de agua
dp	Densidad del cultivo
dr	Duración del riego
E	Evaporación
E _{real}	Escurrimiento real
EA azul	Escasez de agua azul
EH	Estrés hídrico
ET	Evapotranspiración
ET _{azul}	Evapotranspiración del agua azul
FAO	Organización de las naciones unidas para la alimentación y la agricultura
FAOSTAT	Base de datos estadísticos corporativos de la organización para la agricultura y la alimentación

G	Gasto del gotero
g	Número de goteros por planta
HH	Huella hídrica
HH azul	Huella hídrica azul
HH gris	Huella hídrica gris
HH total	Huella hídrica total
ICA	Índice de calidad del agua
i	Número de riegos al día
INEGI	Instituto Nacional de Estadística y Geografía
msnm	Metros sobre el nivel del mar
NCA	Nivel de contaminación de agua
NIST	Instituto Nacional de Estándares y Tecnología
NOM	Norma Oficial Mexicana
ONU	Organización de las Naciones Unidas
pc	Periodo del cultivo
ppc	Período de crecimiento del cultivo
qi	Calificación de calidad
r	Riego
R	Rendimiento
REPDA	Registro Público de Derechos de Agua
SEDRUA	Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural
SIAP	Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera
Si	Concentración de los estándares establecidos por las normas

s _i	Subíndice del i-ésimo parámetro
T	Transpiración
TA	Tasa de aplicación del fertilizante
UAC	Uso de agua de cultivo
VC	Volumen de agua concesionado
W _i	Peso relativo
w _i	Peso por parámetro
α	Fracción de lixiviación esorrentía

Resumen

La producción del arándano de exportación en Michoacán ha ido creciendo de manera ininterrumpida en las últimas dos décadas generando una consecuente derrama económica en el estado. No obstante, esta producción es demandante de materias primas como el agua. Un indicador de la demanda de agua es la huella hídrica (HH), medida como el volumen de agua utilizada en la producción de un bien o servicio. El objetivo de este estudio fue estimar la HH del arándano bajo un modelo regional de producción en dos sitios representativos en el estado, Acuitzio y Los Reyes. Con base en la propuesta de Hoekstra *et al.*, (2011) se realizaron adaptaciones con el fin de obtener una metodología aplicable al modelo regional de producción, consistente en agricultura plastificada bajo macrotúnel e hidroponía con fibra de coco como sustrato. Las principales adaptaciones consistieron en: I) la obtención de la evapotranspiración por el método del lisímetro en la estimación de la HH azul; II) la medición del escurrimiento para medir la HH gris. Los indicadores de las implicaciones geohidrológicas, hidrogeoquímicas y sociales fueron el estrés hídrico (EH), el Índice de Calidad del Agua (ICA), y el análisis del Agua Virtual (AV). Los resultados sugieren una HH azul de $487 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$ para Acuitzio y $1217 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$ para Los Reyes, la HH gris fue de $776 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$ y $2140 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$ para Acuitzio y Los Reyes, respectivamente y la HH total fue de $1263 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$ en Acuitzio y $3357 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$ en Los Reyes. Los valores de la HH del presente estudio son mayores que los reportados a nivel global para el arándano producido a cielo abierto, el cual tiene una HH azul de $334 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$, una HH gris de $170 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$ y una HH total de $845 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$ (Mekonnen y Hoekstra, 2010). El EH generado por la huerta de estudio fue bajo para Acuitzio y moderado para Los Reyes. El ICA para ambas zonas de estudio indicó que el agua de riego es de excelente calidad, el porcentaje promedio de agua que contiene un

arándano es del 80 %, lo anterior indica que, por cada tonelada de arándano exportada, se exportan 800 L de AV de excelente calidad extraída de aguas subterráneas. Por último, se realiza una propuesta para reducir la HH gris del cultivo, ésta se basa en la sustitución de la fibra de coco como sustrato por el biocarbón proveniente del olote de maíz, los resultados de la comparación estadística para las variables de supervivencia y producción no es significativa entre sustratos, no obstante, la concentración de los sustratos en el agua de escurrimiento fue de 614 mg L⁻¹ para la fibra de coco y 321 mg L⁻¹ para el biocarbón. Los resultados anteriores sugieren que el biocarbón es una alternativa para reducir la huella hídrica gris y, por ende, el potencial de contaminación de los cuerpos de agua por arrastre de nitratos.

Palabras clave: Agua exógena, agua virtual, índice de Calidad del Agua, Frutillas, Plasticultura

Abstract

The production of blueberries for export in Michoacán has been growing uninterruptedly in the last two decades, generating a consequent economic benefit in the state. However, this production requires raw materials such as water. An indicator of water demand is the water footprint (WF), measured as the volume of water used in the production of a good or service. The objective of this study was to estimate the WF of blueberry under a regional production model in two representative sites in the state, Acuitzio and Los Reyes. Based on the proposal of Hoekstra *et al.*, (2011), adaptations were made in order to obtain a methodology applicable to the regional production model, consisting of plasticized agriculture under macrotunnel and hydroponics with coconut fiber as a substrate. The main adaptations consisted of: I) obtaining evapotranspiration by the lysimeter method in estimating blue WF; II) measurement of runoff to measure gray WF. The indicators of the geohydrological, hydrogeochemical and social implications were water stress (WS), the Water Quality Index (WQI), and the analysis of Virtual Water (VW). The results suggest a blue WF of 487 m³ t⁻¹ for Acuitzio and 1217 m³ t⁻¹ for Los Reyes, the gray WF was 776 m³ t⁻¹ and 2140 m³ t⁻¹ for Acuitzio and Los Reyes, respectively, and the WF total was 1263 m³ t⁻¹ in Acuitzio and 3357 m³ t⁻¹ in Los Reyes. The WF values of the present study are higher than those reported globally for blueberries produced in the open air, which has a blue WF of 334 m³ t⁻¹, a gray WF of 170 m³ t⁻¹ and a total WF of 845 m³ t⁻¹ (Mekonnen and Hoekstra, 2010). The WS generated by the study orchard was low for Acuitzio and moderate for Los Reyes. The ICA for both study areas indicated that the irrigation water is of excellent quality, the average percentage of water contained in a blueberry is 80%, which indicates that, for every ton of blueberry exported, 800 L of AV are exported. of excellent

quality extracted from groundwater. Finally, a proposal is made to reduce the gray WF of the crop, this is based on the replacement of coconut fiber as a substrate with biochar from corn cob, the results of the statistical comparison for the survival and production variables It is not significant between substrates, however, the concentration of the substrates in the runoff water was 614 mg L⁻¹ for coconut fiber and 321 mg L⁻¹ for biochar. The previous results suggest that biochar is an alternative to reduce the gray water footprint and, therefore, the potential for contamination of water bodies due to nitrate carryover.

Keywords: Exogenous water, virtual water, Water Quality Index, Strawberries, Plasticulture

1. Introducción

El agua es un recurso natural determinante para el desarrollo, al ser esencial para la supervivencia y el bienestar humano; es un factor de producción en la mayoría de los sectores económicos, así como un activo ambiental y social (Martínez-Paz *et al.*, 2014; Pellicer-Martínez y Martínez-Paz, 2016). Según datos de la Fundación de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), desde la década de 1950 el consumo de agua dulce se ha triplicado en todo el mundo. Según esta misma organización, para el año 2025 se estima que aproximadamente 1,800 millones de personas vivirán en zonas de absoluta escasez de agua. Con el aumento de la población, el cambio en los patrones de consumo y las presiones adicionales ejercidas por el cambio climático, se prevé que habrá mayores dificultades para satisfacer la demanda de agua (Zárate y Kuiper, 2013).

A nivel global, la mayor parte del uso del agua está destinado a la producción agrícola, se estima un uso consuntivo promedio de agua por la agricultura del 85 % (Foley *et al.*, 2005), y se proyecta que para el año 2050 aumente un 70 % como consecuencia del incremento constante de la población y el consecuente requerimiento de alimentos (Vázquez del Mercado 2017, Velasco Muñoz *et al.*, 2018), y en artículos de primera necesidad cuya materia prima es derivada de la agricultura. En México, de acuerdo con datos de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2018), se estima que el 76.3 % del agua se utiliza para la producción agrícola, y similar a la tendencia global, se espera que este porcentaje incremente con el aumento de la demanda de los recursos hídricos.

En Michoacán, la agricultura es una de las principales actividades económicas, es líder a nivel nacional en la producción de cultivos como el aguacate y las frutillas, frutos rojos o

berries por su término en inglés (arándano, frambuesa, fresa y zarzamora), cultivos importantes por la derrama económica que generan. La producción y consumo de arándano en México se remonta a la década de 1960 y su exportación a Estados Unidos comenzó a principios de la década de 1970, actualmente México es el segundo productor mundial de arándanos (Bernal, 2023), se estima que su crecimiento en la última década ha sido del 800 % (Pérez, 2018). En 2022, en México se produjeron más de 80 mil toneladas de arándanos; para la temporada del año 2023 se espera una producción de 95,802 toneladas (crecimiento del 20%) y se proyecta que para el año 2024 se alcancen las 111,484 toneladas y posicionaría a nuestro país en los primeros lugares de esta industria global (Navas, 2023). El incremento en este cultivo se debe a su demanda en el comercio internacional, principalmente a los Estados Unidos de América (SEDRUA, 2019) y por su rentabilidad para los medianos y grandes productores del país.

En México, en el año 2020 existían 4,610 hectáreas de arándano sembradas (FAOSTAT, 2020). Según datos del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP, 2019) los principales estados productores de arándano son Jalisco, Michoacán, Sinaloa y Baja California. México la superficie plantada con arándanos alcanza las 11.400 hectáreas y está repartida principalmente en Jalisco, con 4.915ha, lo que representa un 43,1%; Sinaloa, con 2.440ha (21,4%); Michoacán, con 1.830ha (16,1%); Guanajuato, con 970ha (8,5%); Baja California, con 565ha (5,0%); Puebla, con 270ha (2,4%); Nayarit, con 200ha (1,8%); Querétaro, con 60ha (0,5%); Baja California Sur, con 35ha (0,2%); Estado de México, con 30ha (0,2%); Colima, con 25ha (0,2%); Sonora, con 25ha (0,2%); San Luis Potosí, con 25ha (0,2%); y Chihuahua, con 10ha (0,1%) (Navas, 2023).

El cultivo convencional del arándano en la producción mexicana representa el 88%, con una superficie de 10.032 hectáreas y el cultivo orgánico representa un 12 %, con 1.368 hectáreas de superficie, aunque creciendo anualmente. Las plantaciones bajo agricultura plastificada alcanzan el 77 %, con 8.778 hectáreas y las que se cultivan en modo cielo abierto-malla sombra, alcanzan las 2.622 hectáreas, equivalentes a un 23% (Navas, 2013).

Lo anterior ha generado una tecnificación importante en el centro-occidente del país que consiste principalmente en macrotúneles de plástico y en hidroponía (Pérez, 2018), este sistema ofrece ventajas, tales como mejores rendimientos, alta calidad del fruto, mayor control del clima (principalmente por heladas y granizadas) y del suministro de nutrientes, producción temprana y uniforme, menor espacio para producir, fácil control de patógenos, disminución de costos en agroquímicos, entre otros, por esta razón, los productores de arándano están adoptando el sistema plastificado y abandonando paulatinamente el cultivo a cielo abierto. La tendencia actual sugiere que en los próximos años el cultivo será predominantemente plastificado, debido al manejo para alcanzar los estándares que demanda el mercado de exportación. Sin embargo, estos sistemas son altamente demandantes en agua y materias primas como los plásticos agrícolas, lo cual representa un potencial problema ambiental.

En los 15 años recientes, la agroindustria en el occidente de México ha cambiado no sólo el paisaje agrícola tradicional de la zona, sino el entorno económico, social y productivo del campo que incluye tala clandestina, despojo de tierras mediante rentas o compras (muchas veces forzadas) a comuneros, ejidatarios y pequeños productores, incendios forestales para tener más terreno, deforestación, perforación de pozos, robos de agua, precarización laboral, así como afectación ambiental y a la salud.

Concretamente en Jalisco y Michoacán, cada vez se siembra menos maíz y se siembran más berries y aguacates, en consecuencia, la zona occidente del país perdió el liderazgo nacional en la siembra del maíz resultado de una reconversión en la que el dinero y no la autosuficiencia alimentaria es la meta, un ejemplo a escala de lo que también ocurre en gran parte del país Carbajal y Partida, 2022).

El arándano es un cultivo de exportación que necesita cumplir normas de inocuidad, lo cual implica ser regado con agua de buena calidad microbiológica y fisicoquímica. En general, el agua de los acuíferos satisface mejor las exigencias de calidad del agua comparada con el agua superficial de embalses o ríos. Lo anterior ha ocasionado que la expansión del cultivo de arándano se esté presentando hacia las tierras agrícolas con presencia de acuíferos con excelente calidad. En Michoacán el cultivo se ha extendido principalmente sobre siete acuíferos, cinco de los cuales presentan una disponibilidad media anual de agua (DMA) negativa, es decir, su recarga es menor que la extracción (CONAGUA, 2020).

Por lo anterior, estos sistemas de producción representan una presión adicional a la disponibilidad de los recursos hídricos, tanto para la producción agrícola como para el consumo humano. En consecuencia, es necesario evaluar el uso del agua en los principales cultivos en el estado, lo que permitirá tomar decisiones frente a la planificación del territorio, teniendo en cuenta las ofertas y demandas hídricas (Tovar *et al.*, 2017).

En este sentido, una de las herramientas para la evaluación de la presión que los sistemas de producción plastificados ejercen sobre los recursos hídricos es la huella hídrica (HH), el volumen total de agua utilizado para la producción de un bien o un servicio. El concepto de huella hace referencia a una medida cuantitativa que describe la apropiación humana de los

recursos naturales (Hoekstra *et al.*, 2011), e indica cómo, a partir de actividades humanas, se genera un impacto en la sostenibilidad global (Valdivia *et al.*, 2013).

En la agricultura, la HH, incluye el volumen total de agua dulce utilizada durante el desarrollo fenológico del cultivo, indica la cantidad de agua evapotranspirada para obtener una determinada producción, compuesta por la suma de tres componentes básicos (Álvarez *et al.*, 2016).

- Agua azul: cuerpos de agua superficiales (ríos, lagos, esteros, etc.) y subterráneos. Se utiliza principalmente en la producción agrícola.
- Agua verde: agua de lluvia almacenada en el suelo como humedad, durante el flujo de la evapotranspiración del suelo. Se utiliza en agricultura y producción forestal.
- Agua gris: volumen de agua dulce que se requiere para diluir la carga de los contaminantes que producen todos los productos químicos utilizados en el cultivo que se lixivian hacia los cuerpos de agua (Hoekstra *et al.*, 2011; Cao *et al.*, 2017). Sin embargo, esta no es un indicador de la cantidad de agua contaminada, sino de la cantidad de agua dulce necesaria para asimilar la carga de contaminantes dadas las concentraciones naturales conocidas de éstos, y los estándares locales de calidad del agua vigentes (Normas Oficiales Mexicanas).

La HH es un factor importante para determinar la sustentabilidad de los recursos hidrológicos de un país, sin embargo, la HH en México en la producción de alimentos agrícolas es muy poco investigada o explorada, por lo que se presenta como un tema de interés para realizar nuevas investigaciones. Como menciona Vázquez del Mercado y

Lambarri (2017) es necesario estudiar con detalle la sostenibilidad de la HH de México, así como la relación entre sus recursos hídricos y soberanía alimentaria, para orientar y articular de mejor manera las políticas públicas, especialmente las hídricas, ambientales, agrícolas, comerciales y energéticas. Todo ello con el fin de diseñar acciones concretas que reduzcan el impacto de la producción de estas frutillas en el recurso hídrico, optimicen las formas de riego que permitan ahorrar volúmenes considerables de agua y disminuyan la contaminación de los cuerpos de agua del estado y del país.

1.1 Justificación

La disponibilidad del agua dulce del planeta está disminuyendo en muchas regiones. A partir de este contexto, surge la necesidad de medir la huella hídrica con el fin de mostrar el impacto humano sobre los recursos globales de agua dulce, y de generar una base de conocimiento útil en el diseño de estrategias de gestión del agua más eficientes; especialmente en el caso de México en donde los trabajos realizados sobre huella hídrica son escasos.

El crecimiento de la producción de frutillas bajo sistemas plastificados ha crecido de manera exponencial durante la última década en Michoacán, no existe información sobre el impacto que este tipo de cultivos genera sobre los recursos hídricos, edáficos, socioeconómicos del estado.

Evaluar la HH del arándano en estos municipios permitirá contar con datos reales sobre el impacto de estos cultivos permitiendo establecer una base metodológica para el análisis de futuros trabajos

En el caso del agua resulta imprescindible abordar este tema con el fin de aportar una base metodológica robusta para el estudio de las demandas de cantidad de agua usada en agricultura plastificada, así como la estimación de la contaminación que genera el proceso de producción.

1.2 Preguntas de investigación

- 1.- ¿Qué grado de demanda de agua genera el modelo regional de producción del arándano de exportación en el estado de Michoacán?
- 2.- ¿Cuál es el grado de estrés hídrico de los cultivos de frutillas sobre los cuerpos de agua de los cuales se extrae el agua de riego?
- 3.- ¿Qué nivel de contaminación, proveniente de la fertilización de estos cultivos, genera la producción de frutillas a los cuerpos de agua?
- 4.- ¿Cuál es el Índice de Calidad del Agua con la que riegan estos cultivos?
- 5.- ¿Qué efectos tiene sobre la población el crecimiento de los cultivos de frutillas?

1.3 Objetivos

Analizar el impacto de un ciclo de producción del cultivo de arándano bajo agricultura plastificada en los recursos hídricos del estado de Michoacán.

Objetivos específicos:

- Generar una metodología robusta para el análisis, evaluación y obtención de información sobre la demanda de agua del modelo de producción plastificado.

- Determinar la huella hídrica y sus componentes (huella azul y huella gris) en un ciclo de producción del cultivo de arándano bajo agricultura plastificada en los municipios de Acuitzio y Los Reyes.
- Analizar la calidad del agua de riego y escurrimiento para estimar los productos contaminantes que se infiltran a los acuíferos.
- Evaluar el efecto que genera el cambio de agricultura convencional a agricultura plastificada sobre los recursos hídricos de los que dependen las poblaciones rurales.
- Formular una estrategia que mitigue el impacto ambiental que estos sistemas de producción generan.

1.4 Hipótesis

Los componentes azul y gris de la huella hídrica del cultivo de arándano de exportación, producido bajo agricultura plastificada son altos, constituyendo un punto de presión sobre los recursos hídricos de las zonas de estudio.

2. Antecedentes

Durante la última década los estudios sobre HH han aumentado debido a la preocupación sobre el uso del recurso agua, estos se centran en cinco niveles; proceso, producto, sector, unidad administrativa (país) y global (mundial) (Zeng *et al.*, 2012), a su vez, estos niveles pueden evaluarse a diferentes escalas (tabla 1).

Tabla 1. Niveles de escalas en estudios de huella hídrica.

Nivel	Escala	Fuente de datos necesarios sobre el uso del agua	Uso típico de la contabilidad
A	Global	Literatura científica disponible sobre el consumo y la contaminación del agua por producto o proceso (FAO)	Concientización; identificación aproximada de los componentes que más contribuyen a la huella hídrica total; desarrollo de proyecciones globales sobre el consumo de agua
B	Nacional, regional o de la zona de captación	Datos específicos a nivel nacional, regional o de la zona de captación (SIAP)	Base de conocimiento para la identificación de puntos críticos y decisiones sobre la asignación del agua
C	Pequeña zona de captación o terreno específico	Datos empíricos y/o mediciones directas por lugar geográfico durante un periodo de tiempo	Base del conocimiento para llevar a cabo un análisis de sostenibilidad de la huella hídrica; formulación de una estrategia para reducir las huellas hídricas y sus impactos locales asociados.

Fuente: Hoekstra., *et al* (2011)

A escala global, Postel *et al.*, (1996) estimaron el uso consuntivo de agua azul y verde

accesible geográfica y temporalmente, mostrando que se usa el 26 % de la evapotranspiración terrestre total y el 54 % de la escorrentía. Asimismo, mostraron que un mayor uso de la evapotranspiración otorgaría beneficios mínimos a nivel mundial, ya que la mayor parte de la tierra apta para la agricultura de temporal ya está en producción. La construcción de nuevas represas podría aumentar la escorrentía accesible en aproximadamente un 10 % durante los próximos 30 años, mientras que se prevé que la población aumente en más del 45 % durante ese período.

A nivel de país sobre el uso consuntivo del agua azul, Seckler *et al.*, (1998) indicaron que el aumento de la demanda de agua por parte de la agricultura será exponencial, sobre todo en los países con una alta tasa de natalidad, sin embargo, alrededor del 50 % del aumento de la demanda de agua para el año 2025 se podría cubrir aumentando la efectividad del riego. Mientras que algunas de las necesidades restantes de desarrollo de agua podrían ser satisfechas por pequeñas represas y el uso conjunto de acuíferos.

Rockström y Gordon (2001) realizaron una de las primeras valoraciones sobre el consumo de agua verde por parte de cultivos, evaluando críticamente las limitaciones en el uso del agua azul. Los autores cuantificaron los flujos de agua verde continental para los principales biomas terrestres, encontrando que, en los biomas grandes, la generación de servicios ecosistémicos esenciales depende, en promedio, de más del 90 % del flujo terrestre de retorno de agua verde a la atmósfera.

En 2002, Hoekstra y Hung estimaron el uso global consuntivo del agua para un determinado número de cultivos en los Países Bajos, analizando el comercio del agua virtual de cultivos entre naciones y encontrando que los Países Bajos tienen una alta

importación de agua virtual por productos importados para la bioindustria. Por otro lado, sugirieron que conocer el balance nacional del agua virtual es esencial para el desarrollo de políticas que tengan como fin el uso racional del agua virtual.

Por otra parte, Hoekstra y Chapagain (2008) analizaron la relación entre la globalización y la gestión sostenible del agua. Exploraron el impacto del comercio internacional, en el agotamiento y la contaminación del agua local e identificaron a naciones "dependientes del agua" estas son aquellas naciones que pueden hacerse dependientes del agua a través de otras naciones. Esto sucede de dos formas: I) Se puede depender de las importaciones de agua-virtual de un país, como Japón hace de Brasil en lo referente al azúcar o al algodón II) Se puede depender del agua que fluye desde países colindantes situados aguas arriba, como Egipto depende extremadamente de las aguas del Nilo. Esto sucede siempre que los recursos hídricos externos de un país constituyen una parte significativa del total de sus recursos renovables. Asimismo, examinaron el vínculo entre la gestión del agua y el comercio internacional, considerando que el agotamiento y la contaminación del agua local a menudo están estrechamente relacionados con la estructura de la economía global.

En 2009 Chapagain y Orr analizaron la HH bajo un modelo de producción regional para tomate en España, en donde, el cultivo se sembraba la mitad del año de producción a cielo abierto y la otra mitad bajo condiciones protegidas. El estudio concluyó que el agua verde no se calcula ya que es parte de manera indirecta del agua azul, por otra parte, reportaron que la HH gris para sistemas abiertos es de $8 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$ mientras que en sistemas cerrados es de $4 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$, lo que brindó la pauta para discutir la eficiencia en los cambios de manejo en la nutrición de sistemas cerrados y abiertos.

Durante los años 2009, 2010 y 2012 la atención se centró en la HH gris que la agricultura genera Mekkonen y Hoekstra (2010) realizaron una aproximación a escala global de la HH gris para 126 cultivos. Bulsink *et al.* (2009) y Arévalo *et al.* (2012) analizaron la HH gris en diferentes cultivos a nivel de país, para Indonesia y Colombia respectivamente, al ser estos trabajos a escala global, son la base para comparar las HH de estudios más recientes y a escalas más detalladas.

En México los trabajos sobre HH han ido tomando relevancia en los últimos años. Ríos *et al.*, (2014) determinaron la HH azul de los principales cultivos forrajeros del distrito de riego 17 en la zona de la Comarca Lagunera (Durango y Coahuila) y la contrastaron con el volumen de agua extraído para la producción agrícola, estos autores encontraron que el volumen extraído durante el ciclo de producción de los forrajes fue de 1,038.1 m³, mientras que la HH azul del cultivo de alfalfa fue de 678.2 m³, lo que representa el 62.7 % de la extracción total de agua subterránea para el riego de cultivos forrajeros, el maíz forrajero empleó 138.3 m³, avena forrajera 123.1 m³, sorgo forrajero 90.7 m³ y el rye grass 7.9 m³, también concluyeron que si el patrón forrajero de la Comarca Lagunera se estableciera únicamente con maíz y sorgo forrajeros, la presión sobre los recursos hídricos disminuiría, además de que la producción de forraje se mantendría y el empleo no se vería considerablemente afectado. Seguí *et al.*, (2017) analizaron la HH como un instrumento estratégico de gestión para el aprovechamiento eficiente de los recursos hídricos y concluyeron que la HH es un concepto nuevo y, como a menudo sucede con nuevos conceptos y herramientas, estas expectativas no son siempre realistas. De igual forma concluyeron que teniendo en cuenta el hecho de que los recursos mundiales de agua dulce son limitados, la HH es un indicador muy útil, ya que muestra cuándo, dónde y cómo

sobrecargan la demanda de este recurso limitado los consumidores, productores, y los procesos individuales y con cuáles productos, sin embargo, reportaron que para el año de realización del estudio México se encuentra muy atrasado en estudios sobre HH y los países Europeos, Asiáticos y del Medio Oriente le llevan una gran ventaja a México en el análisis de la HH para la implementación de políticas públicas.

En 2017 Vázquez del Mercado y Lambarri analizaron la implicación de la HH en la agricultura con el fin de proponer ideas para el uso inteligente del agua en México y generar conciencia de que la gobernanza del agua es esencial para el desarrollo del país.

Bueno *et al.*, (2019) implementaron un método de escasez en la determinación de la huella hídrica en la zona costera de San Blas, Nayarit, México los autores reportaron que, en la zona costera de San Blas, el volumen total de agua utilizada por los habitantes es de 3,6904 m³ hab⁻¹ año⁻¹ valor por debajo de la huella hídrica nacional que es de 4,161m³ hab⁻¹ año⁻¹ y por ende el recurso hídrico no se encuentra en estrés, pues existe una buena disponibilidad.

En 2020 Morales y Rodríguez analizaron la sustentabilidad de la HH en la cuenca del valle de México (CVM) la región más poblada y de mayor actividad económica del país la HH estimada fue de 3,895.59 hm³ de agua anual en 2015, que mostró los requerimientos del consumo de los residentes en la CVM. La huella equivale a la captación de agua anual promedio en la presa Falcón (Tamaulipas, México), que da cuenta del enorme requerimiento del recurso. Concluyeron que abastecer ese nivel de consumo de agua ha requerido la creación de una complicada y costosa ingeniería de suministro, y la sobreexplotación de recursos hídricos propios y externos. En la CVM, cuando se consumen 202 m³ de agua, 100 m³ se explican por agua renovable y 102 m³ de agua no renovable. De

este último valor, 39.3 m³ provienen de acuíferos sobreexplotados en la misma cuenca; 32.8 m³ de la importación de otras cuencas sobreexplotadas, y 30.4 m³ es agua virtual importada vía el comercio exterior de la cuenca.

Esquivel y Salgado (2020) analizaron estadísticamente los datos de la HH de once productos de origen animal (leche, yogurt, mantequilla, queso procesado, huevo, queso azul, jamón de cerdo, carne de cerdo, crema, carne de res, carne de pavo) reportados por Mekonnen y Hoekstra, 2010 para México y Estados Unidos, el resultado que este análisis arrojó que la HH de estos once productos es igual entre los dos países, estadísticamente. Y aunque, son poblaciones completamente diferentes en cuanto a sus rasgos étnicos, al tamaño de la población, al nivel educativo, a la estructura política y social y a aspectos económicos, comparten este rasgo en común.

Peñaloza *et al.*, (2020) calcularon la HH de la cebolla y el tomate en Atlixco, Puebla, los resultados que reportan indican que la HH del cultivo de cebolla para el ciclo primavera-verano es mayor en comparación con la reportado a nivel nacional y global. Por otro lado, encontraron que estos cultivos incorporan a su proceso productivo 5.5 hm³ por año agrícola, lo que representa el 6.83 % de las concesiones para uso agrícola en la región.

En Michoacán, la preocupación por el impacto que la agricultura genera a los recursos hídricos del estado se ha centrado en el principal cultivo producido, el aguacate, para dicho cultivo Gómez-Tagle *et al.*, (2022) calcularon la HH azul y verde del aguacate de los años 2012 a 2017 en el municipio de Uruapan, estos autores indican que la media de la HH verde para el aguacate de temporal entre estos años fue de 417.1 m³ t⁻¹, en cuanto al aguacate de riego la HH media para estos años fue de 790.6 m³ t⁻¹. Por su parte la HH azul media fue de

280.8 m³ t⁻¹ mientras que la HH total media fue de 1071.4 m³ t⁻¹. Por otra parte, los autores reportaron que el agua destinada para el cultivo de aguacate superó el 40 % del volumen total de agua concesionada para uso agrícola en el municipio.

3. Materiales y métodos

3.1 Zona de estudio

El presente trabajo se realizó en dos municipios del estado de Michoacán (figura 1), ubicados en el eje Neovolcánico, subprovincia neovolcánica Tarasca, con clima predominante templado subhúmedo con lluvias en verano (INEGI 2010).

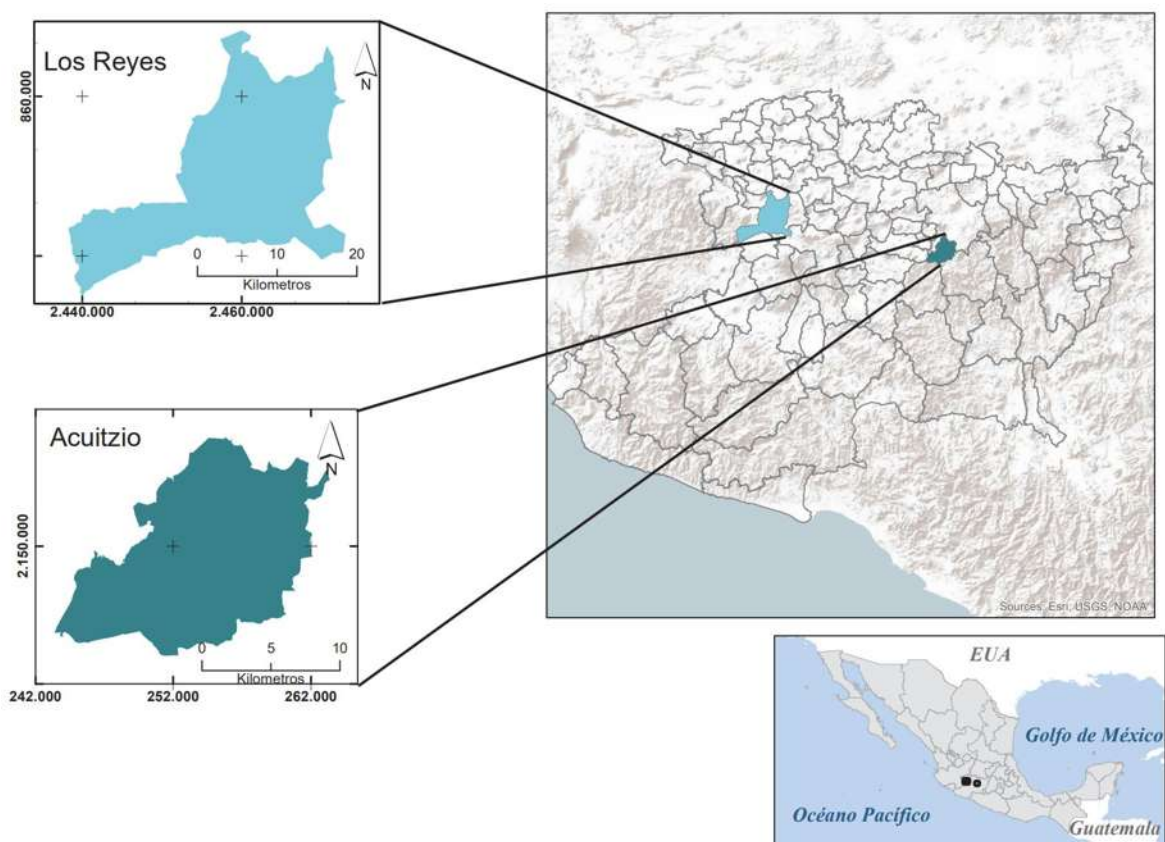


Figura 1. Localización del área de estudio (Fuente: Elaboración propia con base en INEGI, 2010).

El municipio de Acuitzio cuenta con una población total de 11,301 habitantes (INEGI, 2020), su altitud oscila entre 2,100 y 3,400 msnm. El rango de temperatura oscila entre 10-18 °C, el rango de precipitación promedio anual oscila entre 800-1,300 mm. Los tipos de

suelo dominantes son Andosoles, Luvisoles y Leptosoles (INEGI, 2010).

Los principales usos de suelo corresponden a agricultura y zona urbana. La vegetación predominante en el municipio es de bosque y pastizal (INEGI, 2010).

El abastecimiento de agua depende del acuífero Morelia-Queréndaro, el cual, se encuentra sobreexplotado con una disponibilidad media anual de $-10.205 \text{ hm}^3 \text{ año}^{-1}$ (CONAGUA, 2020).

El municipio de Los Reyes cuenta con una población total de 78,935 habitantes (INEGI, 2020), su altitud oscila entre 900 y 3,400 msnm. El rango de temperatura oscila entre 10-24 °C, el rango de precipitación promedio anual oscila entre 1,100-1,300 mm. Los tipos de suelo dominantes son Andosoles, Vertisoles, Luvisoles y Phaeozem (INEGI, 2010).

Los principales usos del suelo corresponden a agricultura y zona urbana. La vegetación predominante en el municipio es bosque, pastizal y selva (INEGI,2010).

El abastecimiento de agua depende principalmente del acuífero Cotija, el cual, se encuentra sobreexplotado con una disponibilidad media anual de $-0.017 \text{ hm}^3 \text{ año}^{-1}$ (CONAGUA, 2020).

3.2 Selección y caracterización de los sitios de estudio

La selección de los sitios de estudio se basó en los datos del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP, 2020) para el cultivo de arándano de exportación en Michoacán. El principal criterio se basó en que los sitios fueran representativos de la producción de arándano de exportación y que mostraran un contraste en el requerimiento de agua de cultivo, así como en la producción.

Los sitios de estudio se encuentran bajo un sistema de agricultura protegida en condiciones de macrotúnel e hidroponía, que se compone de una bolsa de plástico con antioxidante y resistente a rayos ultravioleta (figura 2).

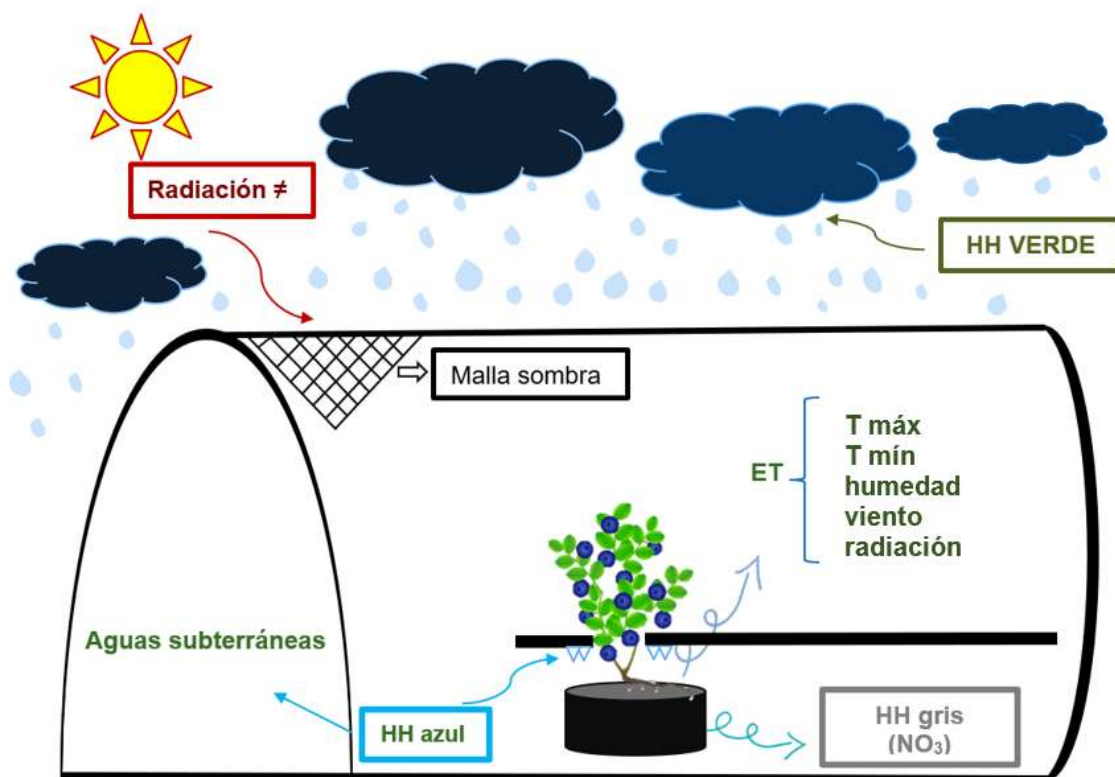


Figura 2. Condiciones del sitio de estudio (Fuente: elaboración propia).

El sistema de riego para los dos sitios es por goteo autocompensado y antidrenante, la diferencia radica en la cantidad de agua que emite el gotero. Para el municipio de Acuitzio el sistema cuenta con goteros de 2 L h⁻¹ y para el municipio de Los Reyes de 4 L h⁻¹. Cada planta cuenta con cuatro goteros calibrados para la correcta aplicación y emisión del volumen de agua y, por ende, se garantiza que la presión en toda el área de riego sea igual en cada gotero.

El sustrato en el que está sembrada la planta es fibra de coco, cuya composición consta de

85 % fibras gruesas y 15 % de fibras delgadas. Este sustrato confiere características esenciales para el desarrollo de la planta como un pH neutro, buen drenaje y aireación, promueve el desarrollo radicular haciéndola ideal para la producción de cultivos en hidroponía. Sin embargo, se ha observado una baja retención de humedad. Las bolsas con arándano se encuentran sobre una malla de polipropileno (*ground cover*) con el fin de evitar el desarrollo de plantas arvenses al interior del invernadero. Para evitar el contacto de la bolsa contenedora con la malla de polipropileno, estas se encuentran sobre bloques de concreto (figura 3).



Figura 3. Sistema de producción del arándano de exportación en Michoacán (Perales, 2018).

En Acuitzio el riego de las plantas en los macrotúneles lo realizan siete veces por día durante cinco minutos con intervalos de una hora en cada planta, de los siete riegos, cinco son riegos con fertilizante (fertirriegos) y dos son riegos convencionales. En Los Reyes el riego lo realizan diez veces por día durante cinco minutos con intervalos de una hora en

cada planta, en esta zona de estudio los diez riegos son fertirriegos, la fuente de extracción de agua para ambos sitios de estudio es de aguas subterráneas.

La cantidad de agua de riego utilizada durante un día fue de 4.6 L en los siete riegos para cada planta en Acuitzio y de 13.3 L en los diez riegos para cada planta en Los Reyes, no se reportaron diferencias en el flujo de los goteros al inicio, zona media y al final de la línea de riego.

La densidad de plantas en Acuitzio fue de 4,500 por hectárea mientras que para Los Reyes fue de 5,050 plantas por hectárea. El rendimiento fue de 3.5 kg por planta en Acuitzio y 4 kg en Los Reyes, por lo tanto, durante el ciclo de producción el rendimiento fue de 15,750 kg año⁻¹ (15.75 t) en Acuitzio y 20,200 kg año⁻¹ (20.2 t) en Los Reyes.

El escurrimiento promedio de ambos sitios de estudio fue del 30 %, esto fue corroborado con las mediciones que los técnicos realizan día a día como parte de su control de calidad y coincidieron, la respuesta de ellos a la pregunta de ¿Por qué dejar un escurrimiento considerable que puede ser mayormente aprovechado por la planta si este es menor? fue que esa cantidad de escurrimiento por riego es la óptima para evitar una mayor acumulación de sales en el sustrato y la planta.

Los macrotúneles se dividieron en tres segmentos, tomando en cuenta la función del flujo de riego: 1) entrada, 2) zona media y 3) final de la línea. Lo anterior con el propósito de tener una representatividad del volumen de riego que es aplicado por bolsa al día.

3.3 Estimación de la huella hídrica azul

El componente azul de la HH (ecuación 1) es consuntivo, por lo tanto, se compone del volumen total de agua utilizada para el riego, en donde se incluye la evapotranspiración y el escurrimiento de cada una de las bolsas de hidroponía.

$$HH_{azul} = \frac{UAC_{azul}}{R} \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde:

HH_{azul} = huella hídrica azul ($\text{m}^3 \text{t}^{-1}$)

UAC_{azul} = uso del agua de cultivo tomando en cuenta la evapotranspiración (mm día^{-1})

R = rendimiento (t)

La metodología general indica que el uso de agua de cultivo azul (UAC) (ecuación 2) se calcula por acumulación de la evapotranspiración diaria (ET) durante todo el ciclo de producción (Peñaloza *et al.*, 2019).

$$UAC_{azul} = 10 \times \sum_{d=1}^{pcc} ET_{azul} \quad (\text{Ecuación 2})$$

Donde:

UAC_{azul} = uso del agua de cultivo ($\text{m}^3 \text{t}^{-1}$)

10 = factor de conversión de la profundidad del agua (en mm) a volúmenes de agua por superficie terrestre ($\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$)

Σ = periodo de cultivo desde la siembra (día 1) hasta la cosecha (día n)

ppc = periodo que dura el crecimiento del cultivo en días

ET_{azul} = evapotranspiración del agua azul

La cantidad de agua utilizada en la producción de un cultivo dependerá de los parámetros climáticos, específicamente de la ET, la cual, para cultivos a cielo abierto, se calcula mediante modelos teóricos de referencia a través del programa CROPWAT 8.0 en combinación con el programa CLIMWAT 2.0, ambos de la FAO, así como de las características del cultivo y del suelo (Hoekstra *et al.*, 2011). No obstante, en sistemas de agricultura protegida no existe un método que indique como realizar el cálculo de la ET, esto se debe a que las metodologías utilizadas para el cálculo de la ET dependen de variables climáticas, las cuales tienden a cambiar de manera considerable entre estos sistemas. Por lo anterior, este tipo de métodos no son aplicables para el sistema estudiado.

Fernández *et al.*, (2010) modificaron la ecuación Penman-Monteith de la FAO-56 para condiciones de invernadero, en donde la ET estimada coincide con el 70–80 % de la ET calculada con los parámetros climáticos observados en el ambiente abierto (Fernández, 2000; Fernandes *et al.*, 2003; Harmato *et al.*, 2004). Por otro lado, Chapagain y Orr (2009) concluyeron que para este tipo de cultivos la ET no tiene protagonismo alguno ya que es parte del volumen de agua aplicado, sin embargo, los estudios previamente mencionados se realizaron bajo condiciones de invernadero y en suelo como sustrato, a diferencia de este estudio donde se utilizó fibra de coco (hidroponía).

Por tanto, para estimar la ET de este trabajo se montó un macrotúnel bajo un sistema de producción de arándano con 80 macetas. En 40 macetas se sembró planta para estimar la transpiración (T), y las 40 macetas restantes se dejaron sin sembrar, únicamente con la fibra

de coco como sustrato para estimar la evaporación (E).

Los dos parámetros E y T se calcularon mediante un sistema de lisímetros, el lisímetro consistió en una báscula Rhino® de 40 kg de capacidad para obtener los pesos 30 minutos después del riego, una vez que el escurrimiento del riego se terminó y después de 24 horas. La suma de las macetas con sustrato solo y sustrato más planta permitió aproximar los valores de ambos procesos, con los datos obtenidos se estimó la evapotranspiración (ecuación 3).

$$ET = T + E \quad (\text{Ecuación 3})$$

Donde:

T = transpiración (ml)

E = evaporación (ml)

Los resultados derivados del cálculo de la ET llevaron a realizar una modificación al cálculo del UAC (ecuación 4), ésta consistió en sustituir la ET por el riego total. Es decir que, la HH azul se midió a partir del volumen de agua utilizada en el riego y medido de manera directa en el sistema de goteo, realizando una comprobación de la calibración de los goteros para cerciorarnos que la cantidad de agua suministrada por los goteros fuera la correcta, esta comprobación se realizó mediante una probeta graduada de 500 ml clase A ASTM con certificado traceable ante NIST.

$$UAC_{\text{azul}} = r \cdot dp \cdot pc \quad (\text{Ecuación 4})$$

Donde:

UAC_{azul} = uso de agua de cultivo azul (m^3)

r = riego total por día (L)

dp = densidad de plantas (L)

pc = periodo del cultivo

El modelo regional de producción utiliza riego por goteo. Para el cálculo del riego total (r) (ecuación 5) es necesario contar con los datos de la cantidad de riegos por día, duración de los riegos y gasto del gotero utilizado en el sistema de riego.

$$r = \left(\frac{d_r \cdot G}{60} \cdot g \right) i \quad (\text{Ecuación 5})$$

Donde:

r = riego total (L)

d_r = duración del riego en minutos

G = gasto del gotero (L)

60 = factor de conversión de horas a minutos

g = número de goteros por planta

i = número de riegos al día

3.4 Estimación de la huella hídrica gris

La HH gris (ecuación 6) considera el flujo de contaminantes que se vierten a las masas de

agua dulce, lo que normalmente es una fracción de la aplicación total de fertilizantes (nitrógeno, fósforo, etc.) o plaguicidas que se usan en el fertirriego. En general se toman en cuenta únicamente los contaminantes más críticos, es decir, el más presente en el agua de escurrimiento, que, por lo general, suelen ser los nitratos (NO_3^-) y fosfatos (PO_4^{3-}), para este estudio fueron los nitratos fueron analizados.

$$HH_{gris} = \frac{(\alpha \cdot TA) / (C_{max} - C_{nat})}{R} \quad (\text{Ecuación 6})$$

donde:

HH_{gris} = huella hídrica gris ($\text{m}^3 \text{t}^{-1}$)

TA = tasa de aplicación del fertilizante (kg ha^{-1})

α = fracción del fertilizante que se infiltra

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

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

R = rendimiento (t)

En sistemas a cielo abierto la fracción de lixiviación-escorrentía (α) para nitratos es del 10 %, este porcentaje corresponde, en promedio, a la cantidad de fertilizante aplicado que se pierde por lixiviación (Mekonnen y Hoekstra, 2010; Franke *et al.*, 2013).

En sistemas plastificados, a diferencia de sistemas abiertos, el manejo de arvenses o malezas se realiza mediante la colocación de una capa de rocas, escorias volcánicas de origen ígneo extrusivo llamadas comúnmente tezontle. Esta técnica no es totalmente

efectiva, por lo que aparte del tezontle, se coloca una malla antimaleza (*Ground Cover*). Esta modificación podría afectar a la fracción de lixiviación-esorrentía del contaminante.

Para determinar la variable (α) se midió la cantidad de NO_3^- que entran al sistema como solución nutritiva (fertirriego) y la cantidad de NO_3^- que salen del sistema en el agua de escurrimiento mediante un ionómetro Horiba modelo LAQUAtwin, la diferencia es la cantidad de NO_3^- que se pierden por lixiviación. La variable usada como concentración máxima aceptable (C_{max}) (11 mg L^{-1}) se tomó de los valores de las Normas Oficiales, en este caso se tomaron los valores de la NOM-127-SSA-2021 (DOF, 2022) para NO_3^- .

En cuanto a la variable concentración natural (C_{nat}), cuando el agua de riego procede de aguas subterráneas, C_{nat} puede ser medido directamente en el agua de riego. En caso de que el agua provenga de otras fuentes se mide directamente en la fuente de procedencia, de no poder realizar la medición se asumirá que el valor de C_{nat} es cero, como lo sugiere la metodología general.

Bajo este nuevo escenario se realiza una adaptación para el cálculo de la HH gris (ecuación 7) en condiciones de agricultura plastificada e hidroponía.

$$HH_{gris} = \left(\frac{(\alpha \cdot TA) / (C_{max} - C_{nat})}{R} \cdot dp \right) pc \quad (\text{Ecuación 7})$$

Donde:

HH_{gris} = huella hídrica gris ($\text{m}^3 \text{ t}^{-1}$)

α = fracción de lixiviación-esorrentía

TA = concentración aplicada del contaminante derivada del riego diario (mg L^{-1})

C_{max} = concentración máxima de NO_3 permitida por la NOM-127-SSA-2021 (mg L^{-1})

C_{nat} = concentración natural (mg L^{-1})

R = rendimiento (t)

dp = densidad del cultivo

pc = periodo del cultivo

La densidad del cultivo (dp) se obtuvo a partir de la densidad de plantas de la huerta, por último, para el cálculo del periodo del cultivo pc se usaron el número de días que duró la cosecha, lo cual nos permitió estimar la cantidad de agua que se requirió para llevar la concentración natural del contaminante a la concentración permisible.

La variable de la tasa de aplicación del fertilizante (TA) (ecuación 8) fue medida directamente en campo.

$$TA = C_{ap} \cdot r \quad (\text{Ecuación 8})$$

Donde:

TA = tasa de aplicación del fertilizante (mg L^{-1})

C_{ap} = cantidad total aplicada de la sustancia química (mg L^{-1})

r = riego total por día por planta

3.5 Estimación de la huella hídrica total

La metodología general utilizada para el cálculo de la HH propuesta por Hoekstra *et al.*

(2011) se diseñó para cultivos a cielo abierto. Sin embargo, debido a las características del sistema de estudio (figuras 2 y 3), se realizaron adaptaciones a esta metodología con el fin de contar con un modelo adecuado para ser implementado en un sistema de producción regional del arándano de exportación, así como a otros cultivos bajo este mismo sistema de producción.

Las principales adaptaciones fueron: I) en cuanto al agua consuntiva (HH azul) se adaptó a un riego por goteo; II) en cuanto al agua de contaminación (HH gris) se adaptó para ser medida directamente en el agua de escurrimiento.

Para calcular la HH total (ecuación 9) se tomó en cuenta únicamente los componentes HH azul y HH gris. No se tomó en cuenta el agua proveniente de la precipitación (HH verde) ya que, al estar bajo condiciones controladas de producción, este tipo de agua no entra al sistema de manera directa, por lo se le asigna un valor de cero. De acuerdo con Chapagain y Orr (2009), en este tipo de cultivos el agua verde es incorporada de manera indirecta en el agua azul.

$$HH_{total} = HH_{azul} + HH_{gris} \quad (\text{Ecuación 9})$$

Donde:

HH_{total} = huella hídrica total del proceso de producción del cultivo ($m^3 t^{-1}$)

HH_{azul} = huella hídrica azul del proceso de producción del cultivo ($m^3 t^{-1}$)

HH_{gris} = huella hídrica gris del proceso de producción del cultivo ($m^3 t^{-1}$)

3.6 Implicación geohidrológica de la huella hídrica azul

En este caso de estudio, la principal implicación de la HH del cultivo de arándano en los recursos hídricos es por el estrés hídrico (EH) que genera en los dos acuíferos de donde se extrae el agua de riego, el acuífero Morelia–Queréndaro y el acuífero Cotija para Acuitzio y Los Reyes, respectivamente. Los datos de la CONAGUA (2020) reportan que ambos acuíferos cuentan con puntos críticos debido a su déficit, es decir, se extrae más agua de la que se recarga. Por lo anterior se analizó el grado de implicación del cultivo de arándano en el déficit de los acuíferos. Este análisis se llevó a cabo mediante un análisis de sustentabilidad de la HH azul tomando como base la metodología propuesta por Hoekstra *et al.*, (2011).

El análisis de sustentabilidad se realizó con el fin de identificar los puntos críticos en donde la HH azul exceda la disponibilidad de agua azul. El análisis de sustentabilidad toma como base el escurrimiento y el caudal mínimo ecológico (ecuación 10). Esta ecuación no se adecuó a las condiciones del presente estudio ya que el análisis contempla datos generales para aguas superficiales y el agua de riego en las zonas de estudio es extraída de aguas subterráneas.

$$EA_{azul} = \frac{\sum HH_{azul}}{DA} \quad (\text{Ecuación 10})$$

Donde:

EA_{azul} = escasez de agua azul

$\sum HH_{azul}$ = relación entre el total de las HH azules en la zona

DA = disponibilidad de agua tomando en cuenta el escurrimiento y el caudal mínimo ecológico

Para realizar este análisis se adaptó la metodología en la cual se sustituyeron los datos de escurrimiento y caudal mínimo ecológico, por los datos de los volúmenes de agua subterránea concesionados para uso agrícola obtenidos del Registro Público de Derechos del Agua (REDPA, 2023). A partir de esto, se tomó la ecuación (11) propuesta por Fuerte (2022) para estimar el estrés hídrico de las zonas de estudio.

$$EH = \frac{HH_{azul}}{VC} \quad (\text{Ecuación 11})$$

donde:

EH = estrés hídrico

HH_{azul} = huella hídrica azul de la zona de estudio $\text{m}^3 \text{t}^{-1}$

VC = volumen de agua concesionado en la zona de estudio m^3

Esta adaptación requiere de contar con los datos de producción para el cálculo de la HH azul total de los sitios de estudio. Sin embargo, estos datos no están disponibles para todas las zonas, porque los dueños no permiten la realización de este tipo de estudio; lo que constituyó una limitante para el cálculo del EH. No obstante, este dato se obtuvo mediante la figura 4, en donde el paso tres consiste en analizar las áreas de estudio mediante los SIG y con la información de la producción disponible en el SIAP se asumen ciertos criterios, en este sentido, en caso de no obtener los datos de la producción total, se asumirá que los datos resultantes del UAC y la densidad de plantas será los mismos para las zonas donde las

condiciones climáticas sean similares, los datos de producción serán obtenidos del SIAP.

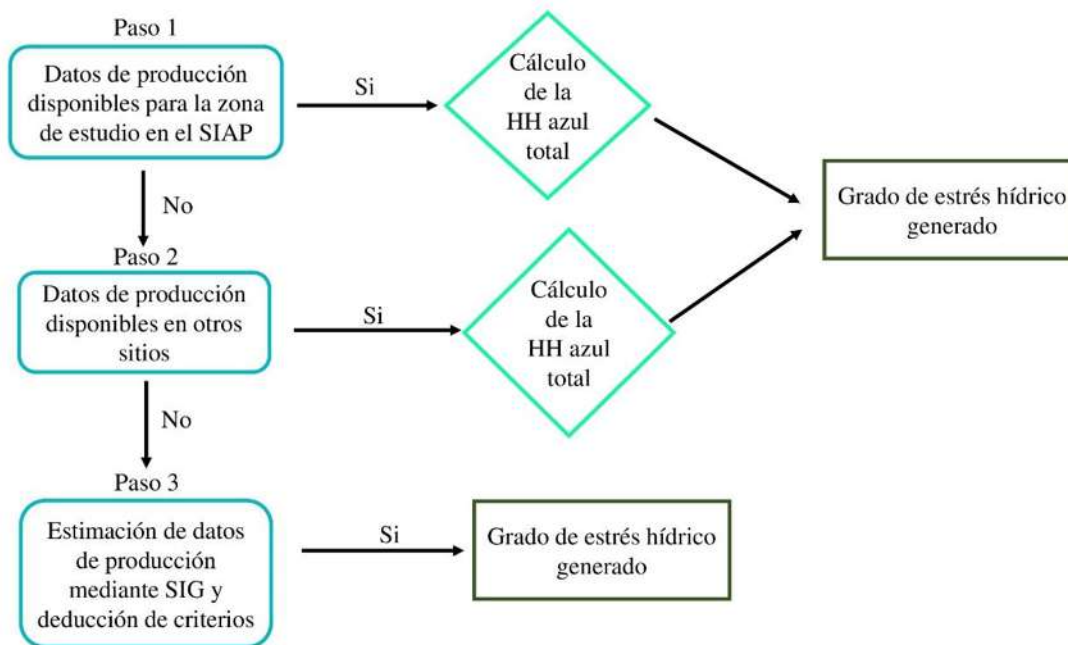


Figura 4. Diagrama de flujo de la metodología para la obtención de datos de producción (Fuente: elaboración propia).

Con el valor obtenido del EH de los municipios de estudio y los principales municipios productores de arándano bajo agricultura protegida del estado, se evaluó el nivel de EH mediante los criterios de la tabla 2 (Fuerte, 2022).

Tabla 2. Criterios de evaluación del estrés hídrico.

Nivel	Criterio
Bajo	La HH azul del cultivo es menor al 20 % del volumen concesionado de agua subterránea para uso agrícola.
Moderado	La HH azul del cultivo esta entre el 20 % y 30 % del volumen concesionado de agua subterránea para uso agrícola.
Significativo	La HH azul del cultivo esta entre el 30 % y el 40 % del volumen concesionado de agua subterránea para uso agrícola.

Severo La HH azul del cultivo es mayor al 4 % del volumen concesionado de agua subterránea para uso agrícola.

Fuente: Fuerte, 2022.

3.7 Implicación geohidrológica de la huella hídrica gris

El umbral máximo de HH gris para asimilar la sustentabilidad de una cuenca se define cuando en un cuerpo de agua la carga total de un compuesto es igual a la carga crítica estimada, por ejemplo, cuando la HH gris de un río es igual al volumen del escurrimiento superficial de un río. Una HH gris genera un punto crítico cuando se violan las normas de la calidad ambiental, es decir, cuando se consume por completo la capacidad de asimilación natural de las cargas de contaminantes (Hoekstra., *et al* 2011).

La metodología general estima el nivel de contaminación del agua calculada tomando la relación entre el total de huellas hídricas grises en una zona de captación y la esorrentía real de esa zona de captación (ecuación 12).

$$NCA = \frac{\sum HH_{gris}}{E_{real}} \quad (\text{Ecuación 12})$$

Donde:

NCA = nivel de contaminación del agua m^3

$\sum HH_{gris}$ = suma de las HH gris del total de la zona de estudio

E_{real} = escurrimiento real

El nivel de contaminación del agua propuesto representa la apropiación antropogénica del

agua por medio de la contaminación, se puede usar como una herramienta que permite evaluar la sustentabilidad, eficiencia y equidad en el uso de los recursos hídricos (Franke *et al.*, 2013)

Al igual que la estimación del EH, la ecuación 12 no responde a las características de este estudio, por lo que, tomando como base el trabajo de Fuerte (2022) se modificó la ecuación de la siguiente manera (ecuación 13).

$$NCA = \frac{\sum HH_{gris}}{VC} \quad (\text{Ecuación 13})$$

Donde:

NCA = nivel de contaminación del agua m^3

$\sum HH_{gris}$ = suma de las HH gris del total de la zona de estudio

VC = volumen de agua subterránea concesionada

Para la variable del volumen de agua subterránea concesionada (VC) se consultó el sistema REDPA. Al igual que en el análisis geohidrológico de la HH azul, para la HH gris es necesario contar con los datos de producción para estimar la HH gris total de las zonas de estudio, estos datos fueron obtenidos con la metodología indicada en la figura 4, al obtener el dato del NCA se comparó con la tabla 3 propuesta para este trabajo y cuyos criterios y umbrales se basaron en el trabajo de Fuerte (2022) sobre los criterios de clasificación para evaluar el EH.

Tabla 3. Niveles de contaminación del agua.

Nivel	Umbral
Bajo	El nivel de contaminación de la HH gris del cultivo se encuentra entre el 20 % del volumen de agua concesionado.
Moderado	El nivel de contaminación de la HH gris del cultivo está entre el 20 % y 30 % del volumen de agua concesionado.
Significativo	El nivel de contaminación de la HH gris del cultivo es entre el 30 % y el 40 % del volumen de agua concesionado.
Severo	El nivel de contaminación de la HH gris del cultivo se encuentra entre el 40 % del volumen de agua concesionado.

Fuente: Fuerte, 2022.

3.8 Implicación hidrogeoquímica y social de la huella hídrica

El análisis para determinar la implicación del cultivo de arándano de exportación en la calidad del agua y su exportación consistió en tres fases:

1) Determinación de la cantidad de agua que contiene el arándano con el fin de conocer qué volumen de agua de los recursos hídricos del estado se exportan (agua virtual). Se comparó el peso de la fruta recién cosechada con el de la fruta deshidratada en un horno a 90 °C durante 8 h. La diferencia de peso fue la cantidad de agua que contiene la frutilla.

2) Determinación del índice de calidad del agua subterránea (ICA) que se utiliza para el riego del arándano. Se analizó la cantidad de agua de los pozos de donde se extrae el agua de riego para los indicadores de calidad: nitratos, fosfatos, carbonatos, sulfatos, cloro, calcio, magnesio, sodio, potasio y elementos traza (Al, As, Pb, Co, Cr, Fe, Mn, Ni, Zn, Cd, Be y Cu). Los resultados se compararon con la NOM-127-SSA1-2021 (DOF, 2022). Para la obtención del ICA se implementó la metodología desarrollada por Brown *et al.*, (1970) la cual es un método ampliamente utilizado para la evaluación de la calidad del agua

subterránea y es una de las herramientas más efectivas para la evaluación y gestión de la calidad del agua subterránea (Sadat-Noori *et al.*, 2014). Se utilizaron 12 parámetros (pH, Cl⁻, SO₄²⁻, HCO₃⁻, Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺, Dureza total, F⁻, NO₃⁻ y N-NH₃), a los que, en función a sus efectos en la salud se les asigna un peso (*w_i*) que va de 1 a 5, Saravanan *et al.*, (2015) proponen que el peso 5 sea asignado a parámetros como sólidos totales disueltos, nitratos, cloruros y sulfatos debido a su importancia en la evaluación de la calidad del agua, una vez asignado el *w_i* se calcula el peso relativo mediante la siguiente ecuación:

$$Wi = \frac{wi}{\sum wi} \quad (\text{Ecuación 14})$$

donde:

Wi = peso relativo

w_i = peso de cada parámetro

$\sum w_i$ = total de los pesos (*w_i*)

por lo anterior la tabla 4 muestra el *w_i* asignado a cada parámetro

Tabla 4. Valor de *w_i* para cada parámetro.

Parámetros	Wi	Peso relativo
pH	4	0.10
Cl ⁻	3	0.078
SO ₄ ²⁻	5	0.131
HCO ₃ ⁻	1	0.026
Ca ²⁺	3	0.078
Mg ²⁺	3	0.078

Na ⁺	3	0.078
K ⁺	2	0.052
Dureza	4	0.10
NO ₃ ⁻	5	0.131
PO ₄ ³⁻	5	0.131
Total	38	1

Al obtener el peso relativo, se procede a calcular la escala de calificación de calidad para cada parámetro (ecuación 15).

$$qi = \left(\frac{Ci}{Si}\right) \times 100 \quad (\text{Ecuación 15})$$

Donde:

qi = calificación de calidad

Ci = concentración de cada parámetro

Si = concentración de los estándares establecidos por la Norma Oficial Mexicana NOM-127- SSA1-2021 y por la OMS.

Posteriormente se calcula una escala de calificación de calidad (*qi*) para cada parámetro (ecuación 16).

$$sli = wi \times qi \quad (\text{Ecuación 16})$$

Donde:

sli = subíndice del *i*-ésimo parámetro

wi = peso relativo

qi = calificación de calidad

Por último, el cálculo del Índice de Calidad del Agua (ecuación 17):

$$ICA = \sum sli \quad (\text{Ecuación 17})$$

Donde:

ICA = índice de Calidad del Agua

$\sum sli$ = sumatoria del Subíndice del i -ésimo de cada parámetro

Al obtener los valores del ICA se compararon con la tabla 5 con el fin de determinar la calidad del agua que se usa para el riego del cultivo de arándano

Tabla 5. Índice de calidad del agua de acuerdo con su valor de ICA.

ICA	Criterio
<50	Excelente
50-100	Buena Calidad
100-200	Mala Calidad
200-300	Muy Mala Calidad
>300	Agua no Potable

Fuente: Brown *et al.* (1970).

3) Evaluación del crecimiento de estos cultivos mediante percepción remota con ortofotos del año 1995 e imágenes LANDSAT del sitio Copernicus para el año 2022. Posteriormente se contrastó la información con los datos de disponibilidad media del agua de los acuíferos (SIAP, 2019 y CONAGUA, 2022). Por último, se valoró el crecimiento en los últimos 27 años de este tipo de sistemas de producción y su posible implicación con los recursos

hídricos del estado.

3.9 Propuesta de estrategia para reducir la huella hídrica gris

Se planteó el cambio de sustrato por biochar o biocarbón derivado del olote de maíz, para lo anterior se dividieron 60 plantas en dos grupos de 30, el primer grupo tuvo un tratamiento convencional con sustrato de fibra de coco y al segundo grupo se sembró en sustrato de biocarbón derivado del olote de maíz, la fertilización se realizó con solución nutritiva específica para arándano, el gasto del fertirriego fue de $1\text{L } 10^{-1} \text{ min}$. Las variables evaluadas fueron: I) supervivencia de la plántula al trasplante de la bolsa de vivero hacia el envase de producción, II) temperatura del sustrato, III) número de frutos por planta, IV) producción de frutos y, V) retención de NO_3^- por los sustratos. Se realizaron análisis estadísticos con Anova unidireccional, incluido Tukey HSD. Los datos fueron procesados con el programa de la Social Science Statistics (<https://www.socscistatistics.com/>) y se consideró un valor de $\alpha = 0.05$ para la significancia estadística.

4. Resultados y discusión

4.1 Evapotranspiración

La ET promedio estimada para el sistema del cultivo de arándano bajo condiciones de macrotúnel e hidroponía fue de 0.019 mm día⁻¹. La evapotranspiración en sistemas de cultivo cerrados y más específico en macrotúnel e hidroponía no ha sido estudiada, sin embargo, se realizó una comparación entre los datos obtenidos con el método propuesto para hidroponía en macrotúnel y la estimación de la ET para el área de estudio con la metodología general, apoyados con el programa CROPWAT 8.0 en combinación con el programa CLIMWAT 2.0, el promedio de ET con esta última metodología fue de 3.77 mm día⁻¹ en comparación con la ET promedio al interior del macrotúnel, esta última representa el 0.50 % de la ET, corroborando que en cultivos bajo agricultura protegida la ET es muy baja, de esta manera podemos concluir y coincidir con Orgaz *et al.*, (2005), que la ET en los cultivos cerrados, en este caso en macrotúnel, es muy baja dada la poca demanda evaporativa en el macrotúnel. Flores *et al.*, (2007) sostienen que, en los cultivos en invernadero dada la ausencia de lluvia y otras aportaciones hídricas, el requerimiento de riego es igual a la evapotranspiración real del cultivo, por lo que con los resultados obtenidos en la estimación de la ET podemos concluir que, al igual que en los invernaderos, en los macrotúneles con sistemas de cultivo en hidroponía la evapotranspiración real del cultivo va a ser igual al requerimiento de riego de los cultivos. Una posible explicación de estos resultados, tal como lo sostiene Fernández *et al.*, (2003) y algunos autores más (Farias *et al.*, 1986; Martins *et al.*, 1994) se dan por la influencia de los principales factores de demanda evaporativa de la atmósfera, tales como menores valores de velocidad del viento, mayor humedad relativa y menor incidencia de la radiación solar directa en el interior de

los sistemas de agricultura protegida.

Derivado de las conclusiones obtenidas y al ser la ET igual a los requerimientos de riego podemos obtener la HH de cualquier cultivo bajo agricultura protegida únicamente conociendo el riego total del cultivo, la densidad del cultivo y el rendimiento, puesto que la ET no tiene mayor relevancia en un cultivo bajo condiciones de macrotúnel e hidroponía.

4.2 Estimación de la huella hídrica azul

Para la zona de Acuitzio la HH azul fue de $487 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$, $146 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$ corresponden al escurrimiento total durante un ciclo de producción del cultivo. La cantidad de agua evapotranspirada es de $39 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$.

Para el municipio de Los Reyes la HH azul fue de $1217 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$, $365 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$ corresponden al escurrimiento total durante un ciclo de producción del cultivo. La cantidad de agua evapotranspirada es de $97 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$ (Tabla 6).

Tabla 6. Huella hídrica azul total de los sitios de estudio.

Municipio	Producción (t)	Cantidad de agua escurrida ($\text{m}^3 \text{ t}^{-1}$)	Cantidad de agua evapotranspirada ($\text{m}^3 \text{ t}^{-1}$)	HH azul total ($\text{m}^3 \text{ t}^{-1}$)
Acuitzio	15.75	146	39	487
Los Reyes	20.2	365	97	1217
Total	51.7 t	511	136	1704

La diferencia de HH azul entre municipios corresponde al volumen y la cantidad de riegos que se implementaron durante todo el ciclo de producción del arándano.

Estos resultados son mayores que los resultados reportados por Peñaloza *et al.*, (2019) para los cultivos de cebolla y tomate de cáscara a cielo abierto en Atlixco, estado de Puebla. En las temporadas de primavera-verano y otoño-invierno los valores de HH azul para la cebolla fueron de $263 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$ y $53 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$ respectivamente, mientras que la HH del tomate fue de $21.9 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$. Lo anterior puede estar dado por el tipo de manejo, corroborando que los sistemas plastificados demandan mayor agua que los cultivos sembrados tradicionalmente.

Por otro lado, Fuerte (2022) realizó una comparación entre los años 2012 a 2017 del aguacate tanto de riego como de temporal en el municipio de Acuitzio (Tabla 7), los resultados muestran una mayor demanda de agua azul por parte del aguacate en comparación con el arándano, no precisa si el agua azul es de origen subterráneo o superficial. Aunque la demanda de agua azul del arándano es menor que la del aguacate, para el arándano existe un factor a considerar, ya que el agua verde es cero en este tipo de sistemas, por ende, la demanda de riego del cultivo va a ser satisfecha en su totalidad por agua azul, esta agua azul proviene íntegramente del agua subterránea. Otro punto para considerar es que la producción del aguacate en comparación con la producción del arándano en este municipio es considerablemente mayor, sin embargo, con los resultados de ambos estudios y la relación entre estos se puede notar la gran cantidad de agua que es demandada por la agricultura en este municipio y la presión que estos cultivos ejercen al impacto de los recursos hídricos del municipio.

Tabla 7. Huella hídrica azul del cultivo de aguacate en el municipio de Acuitzio.

Año	HH azul ($\text{m}^3 \text{ t}^{-1}$)
2012	1365.45
2013	688.70

2014	790.22
2015	852.88
2016	784.46
2017	710.94

Fuente: modificada de Fuerte (2019).

Vázquez del Mercado y Lambarri (2017) realizaron un estudio donde compararon la HH de los productos más consumidos en México. En esta lista no figura el arándano, sin embargo, los resultados de la HH azul del presente estudio fueron más elevados que la naranja, mandarina, arroz, huevo, manzana, plátano, limón, lima, frijol, papa, tomate, cebolla, toronja y piña (Figura 5), el arándano ocuparía el octavo lugar en HH azul.

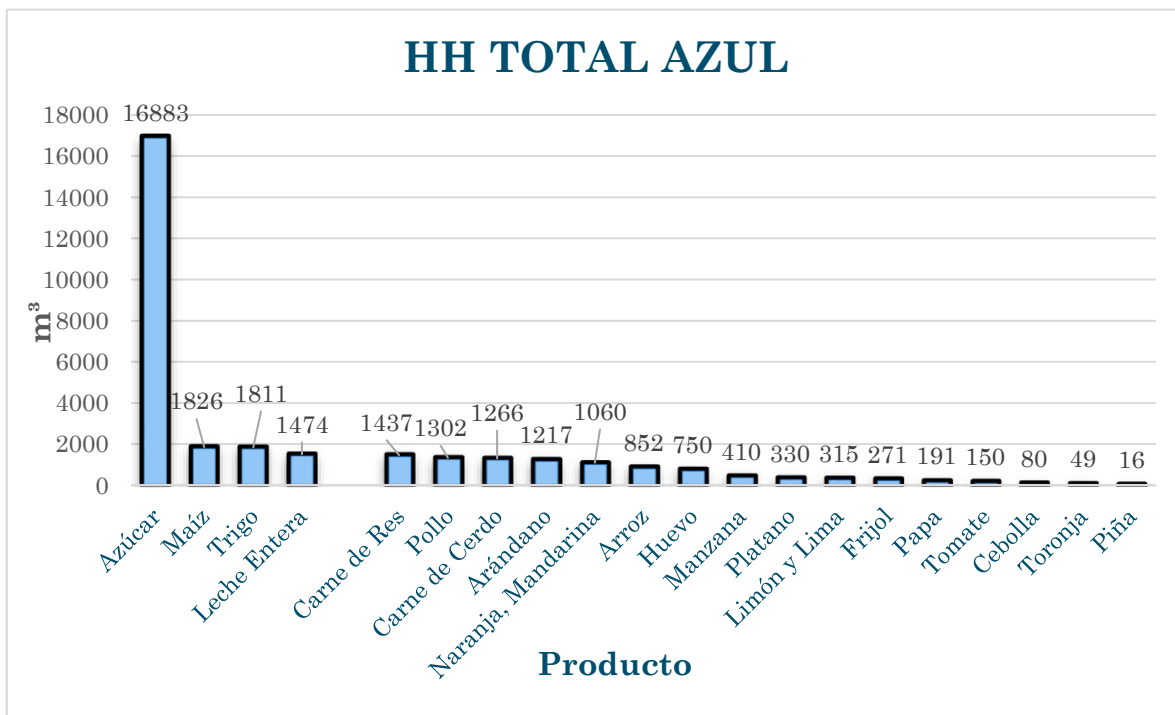


Figura 5. Huella hídrica azul de los principales productos consumidos en México (Vázquez del Mercado y Lambarri, 2017).

4.3 Estimación de la huella hídrica gris

Los resultados indican que la concentración de NO_3^- aplicados promedio es de 194 mg L^{-1} , resultado que coincidió en ambos sitios de estudio, lo que indica que el manejo en la nutrición del arándano es similar para todos los sistemas de producción con el fin de que se garantice el cumplimiento de los requerimientos de calidad de exportación.

Esta concentración de NO_3^- se encuentra calculada con base en la cantidad del riego por día que se aplica a cada planta (tasa de aplicación real del fertilizante), es decir, 3.3 L en Acuitzio y 13.6 L en Los Reyes. De esta manera, la cantidad de NO_3^- que entran al sistema es de 640 mg en Acuitzio y 2580 mg en Los Reyes. Los resultados de las mediciones en el agua de escurrimiento arrojan que la diferencia entre los NO_3^- que entran como riego y los que salen en el agua de escurrimiento (fracción de lixiviación real) es del 10.86 % para Acuitzio y 10.21 % para Los Reyes. Makonen y Hoekstra, (2010); Franke *et al.*, (2013) reportan un valor del 10 % para cultivos a cielo abierto y en suelo como sustrato, en contraste con el valor real de la fracción de lixiviación reportado en el presente estudio, estos valores no representan un cambio significativo, por lo tanto, se tomará el valor del 10 %, en consecuencia, podemos concluir que la fracción de lixiviación en cultivos a cielo abierto y en cultivos plastificados coincidirá.

En cuanto a la C_{nat} , los resultados del agua de riego en Acuitzio indicaron que ésta cuenta de forma natural con 2.40 mg L^{-1} mientras que para Los Reyes el resultado fue de cero. Por lo tanto, la HH gris para Acuitzio fue de $783 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$ y para Los Reyes fue de $2140 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$ durante el ciclo de producción.

Estos resultados son mayores que los reportados por Peñaloza *et al.*, (2019) para los

cultivos de tomate y cebolla, siendo éstos de $9.14 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$ para el tomate en un ciclo otoño invierno y de $12.34 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$ en el ciclo primavera verano y para el ciclo otoño invierno de $26.3 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$ para la cebolla, lo anterior puede deberse a la diferencia en el manejo de los sistemas de producción, en cultivos a cielo abierto el cálculo de los contaminantes está dado por las cargas de NO_3^- que contiene el fertilizante. En los cultivos en hidroponía se tiene el dato de la aplicación directa del nutriente; el cálculo de la HH gris tomando en cuenta la carga de NO_3^- del fertirriego sería de $235 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$ para Acuitzio y $161 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$ para Los Reyes, en contraste con los resultados obtenidos en el presente estudio $783 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$ y $2140 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$ para Acuitzio y Los Reyes, con una diferencia significativa. Lo anterior evidencia la necesidad de adecuar la metodología general de la HH de acuerdo con las necesidades y características de los sistemas plastificados.

Por otro lado, el agua de escurrimiento donde se encuentran los NO_3^- para el cálculo de la HH gris, se propone ser interpretada como Agua Potencialmente Contaminante (APC), ésta puede tomar dos vías; la primera, percolar a los acuíferos contaminando el agua subterránea y la segunda, volatilizarse y convertirse en gas de efecto invernadero como óxido nitroso (N_2O). Gonzales-Estrada y Camacho-Amador (2017) refieren que, aunque las emisiones de N_2O son producidas por procesos naturales, la mayor parte de éstas son generadas por la lixiviación, volatilización y esorrentía de fertilizantes nitrogenados, generando, por ambas vías, un impacto ambiental. Dado que no existe información sobre lo anterior en estos tipos de cultivos, se opta por interpretar el agua de escurrimiento como APC.

Vázquez del Mercado y Lambarri (2017) también analizan la HH gris de los principales productos consumidos en México, en este rubro, el arándano se ubica en la tercera posición, como uno de los cultivos que mayor contaminación genera por encima de productos como:

pollo, trigo, frijol, leche, carne de res, carne de cerdo, naranja, mandarina, arroz, limón, lima, manzana, cebolla, aceite de palma, tomate, plátano, papa, toronja y piña (Figura 6).

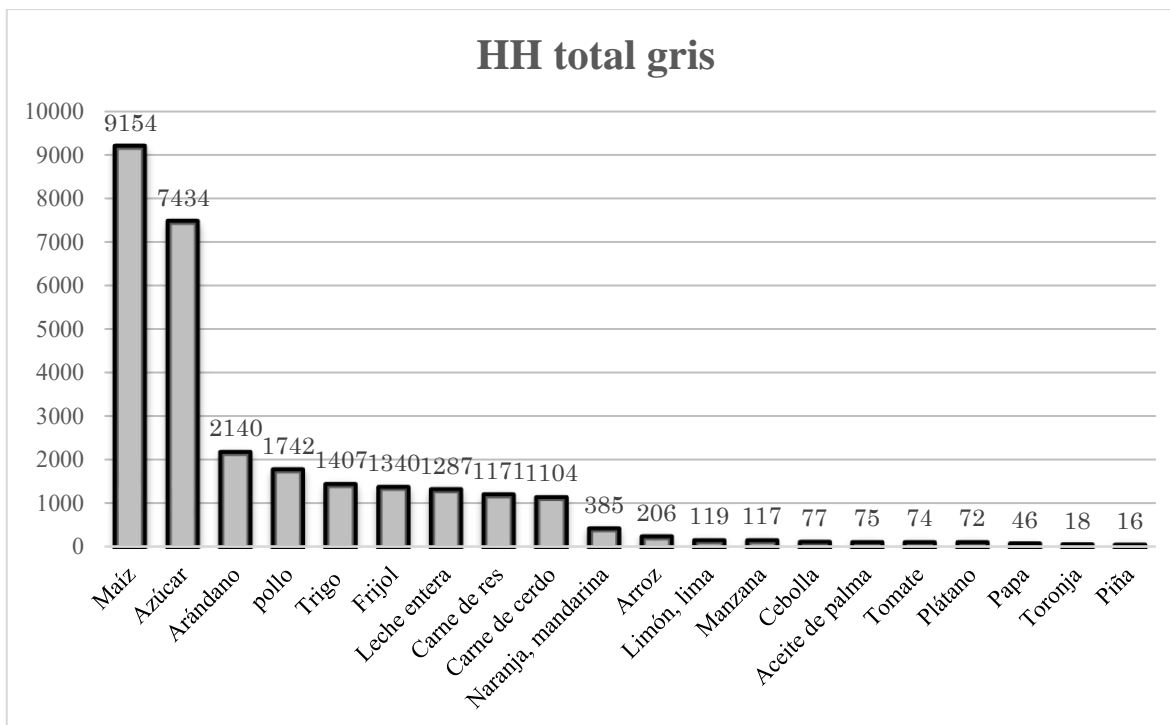


Figura 6. Huella hídrica gris de los principales productos consumidos en México (Vázquez del Mercado y Lambarri, 2017).

Lo anterior evidencia que, a pesar de la poca producción del arándano en comparación con los principales cultivos consumidos en México, produce mayor contaminación. Por otro lado, otro punto a resaltar es que el arándano no es consumido por la población mexicana, éste es un producto de exportación. El uso de fertilizantes ha sido benéfico para la producción agrícola ante la creciente demanda de alimentos, sin embargo, el uso excesivo de éstos ha aumentada la concentración de nitrógeno y fósforo en los sistemas naturales (Bennet *et al.*, 2001, Vitousek *et al.*, 2009), tanto el N como el P son esenciales para la vida y en la agricultura son elementales para la producción (Sutton *et al.*, 2013).

En este sentido, Obersteiner *et al.*, (2013) mencionan que el aumento en el N y el P ha repercutido en la pérdida de nutrientes de las tierras de cultivo y en problemas ambientales como la alteración en la calidad del agua, la contaminación de las aguas subterráneas, la pérdida de la biodiversidad y la eutrofización, por lo anterior resulta importante la evaluación que tienen estos impactos en la calidad y la cantidad del agua.

4.4 Estimación de la huella hídrica total

La HH total del proceso de producción del cultivo de arándano fue de 1263 m³ t⁻¹ para Acuitzio y 3357 m³ t⁻¹ para Los Reyes, la información global reportada por (Mekonnen y Hoekstra, 2011) para la HH azul y HH gris del cultivo de arándano a cielo abierto es de 334 m³ t⁻¹ y 170 m³ t⁻¹ respectivamente (Tabla 8).

Tabla 8. Comparación de los valores globales de Huella hídrica en arándano y de los sitios de estudio.

Sitio	HH azul (m³ t⁻¹)	HH gris (m³ t⁻¹)	HH total (m³ t⁻¹)
* Global	334	170	504
Acuitzio	487	776	1263
Los Reyes	1217	2140	3357

* Fuente: Mekonnen y Hoekstra (2011).

La HH azul del arándano a nivel global es inferior que la reportada para los sitios de estudio, en cuanto a la HH gris es también mayor en la producción plastificada en comparación con la reportada a nivel global. Es notoria la gran cantidad de agua que el arándano de exportación demanda, esto es dado por el tipo de sistema en el que se produce. Con lo anterior podemos concluir que los cultivos plastificados demandan y contaminan

más agua en comparación con los cultivos a cielo abierto.

4.5 Implicación de la huella hídrica azul en la sustentabilidad del recurso hídrico en las zonas de estudio

La falta de datos sobre la producción de arándano en las zonas estudiadas constituye una limitante para estimar el grado de Estrés Hídrico (EH) que la HH le genera a los recursos hídricos del estado, una manera de subsanar esta falta de datos fue a través de la metodología propuesta en la figura 4. Los resultados de dicha metodología nos llevaron a tomar en cuenta los pasos dos y tres para obtener un dato aproximado de la producción de los sitios de estudio, pese a lo anterior en seguida se enuncian los resultados particulares del grado de implicación en el estrés hídrico a nivel de municipio.

El dato de la producción en los municipios estudiados es inexistente en el SIAP, sin embargo, se encontró un informe técnico interno de la Universidad Autónoma de Chapingo donde refiere que para 2019 la mayor parte de la producción de frutillas del estado de Michoacán se concentraba en el distrito de desarrollo rural de Zamora (Chilchota, Peribán, Los Reyes, Tangancícuaro, Tingüindín y Tocumbo) en los cuales la superficie sembrada del arándano, fresa, frambuesa y zarzamora fue de 71.4 %, 70.9 %, 98.9 % y 73.6 %, respectivamente. Por otra parte, Tangancícuaro, Los Reyes, Salvador Escalante, Zitácuaro, Jiquilpan y Chilchota son los municipios con mayor superficie de arándano cultivado, con 324, 149, 80, 60, 50 y 50 ha, respectivamente. El resto de los municipios tienen superficies iguales o menores a 30 ha.

Aunque el informe no especifica en qué condiciones de producción se encuentran, tomando en cuenta el paso tres de la metodología indicada en la figura 4, podemos asumir que para

ambos sitios de estudio la superficie de producción bajo macrotúnel será de mínimo 30 ha, este dato se corroboró con el SIG. Los resultados arrojaron que para el municipio de Acuitzio para el año 2022 existían 192.99 ha de cultivos plastificados y para Los Reyes existían 1,017 ha de cultivos plastificados (figuras 7 y 8). El rendimiento de la producción total de 20 t ha⁻¹ fue obtenido de la principal empresa proveedora de macrotúneles para frutillas. Bajo este escenario, la producción de arándano de exportación bajo macrotúnel será de 600 t para ambos municipios (tabla 9).

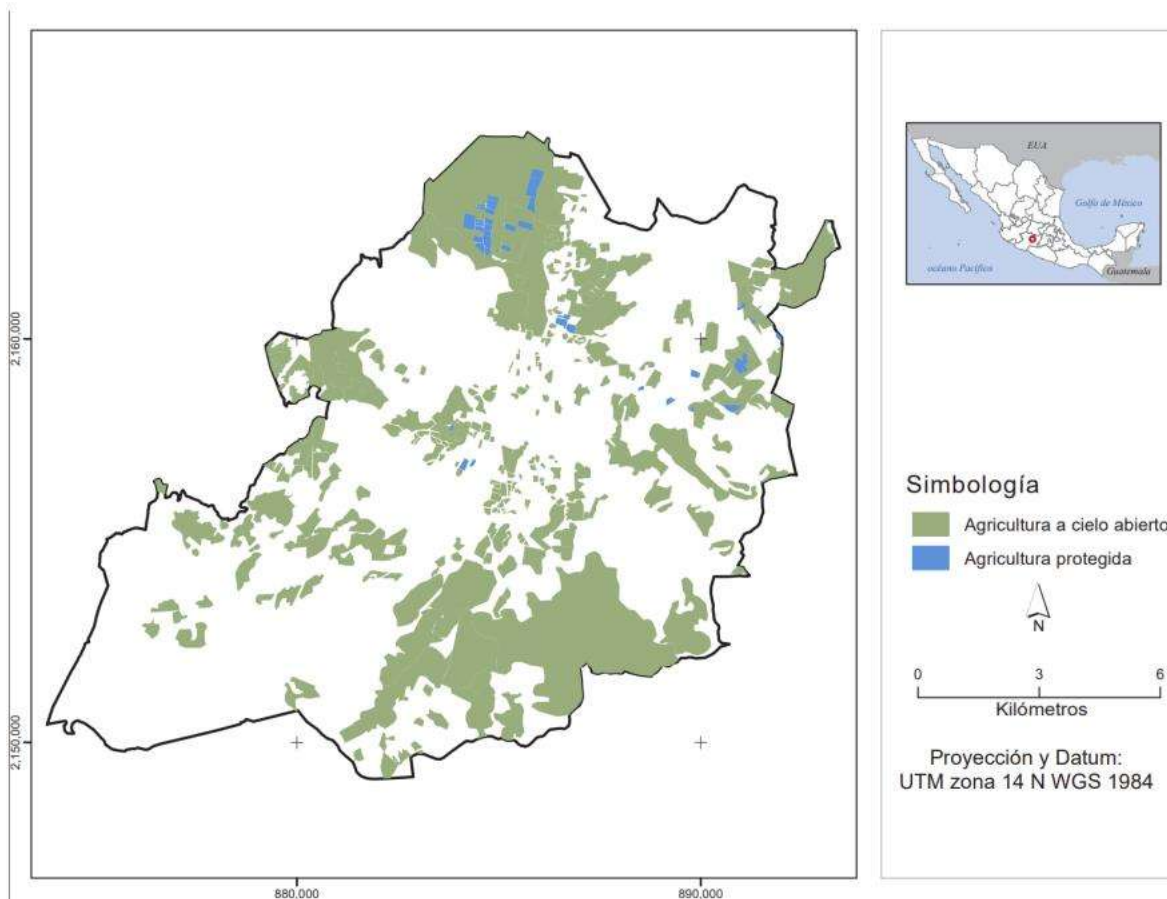


Figura 7. Cultivos plastificados en el municipio de Acuitzio en el año 2022 (Fuente: elaboración propia).

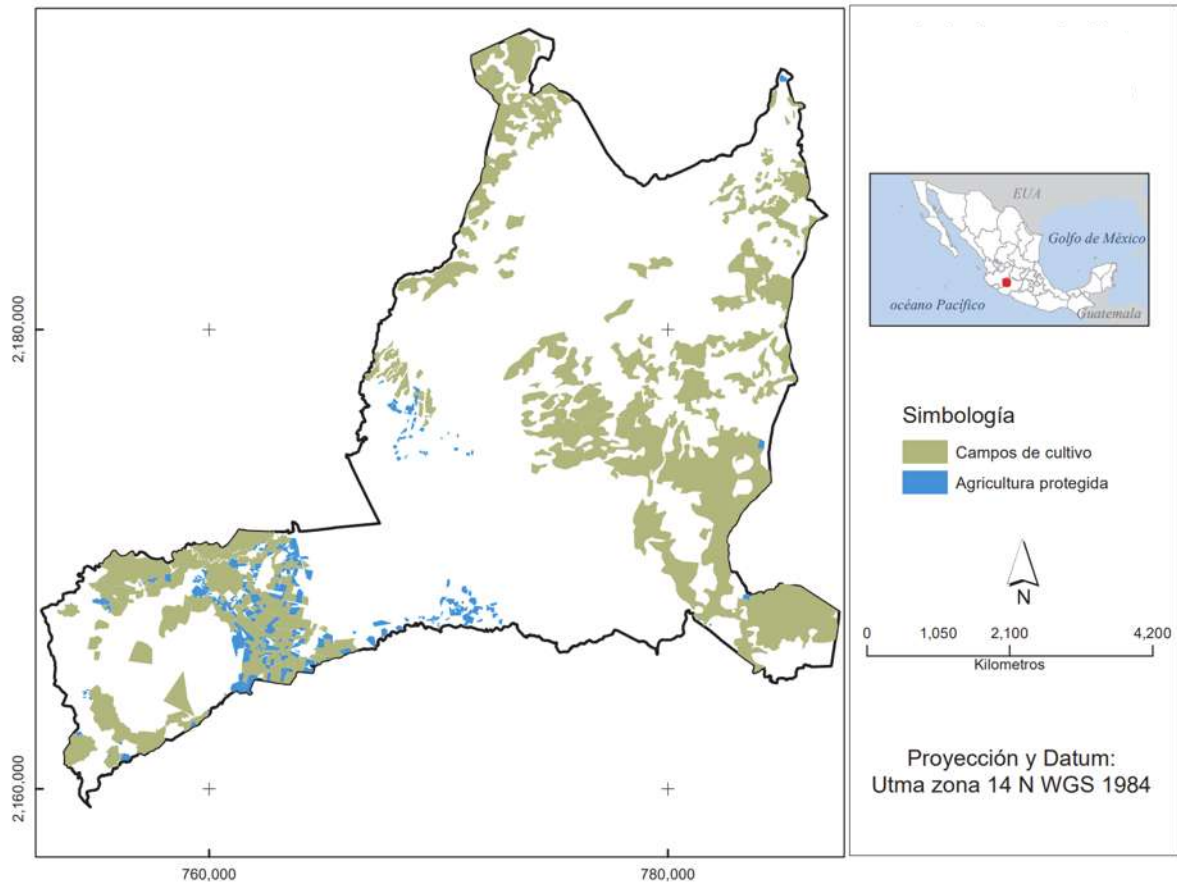


Figura 8. Cultivos plastificados en el municipio de Los Reyes en el año 2022 (Fuente: elaboración propia).

Tabla 9. Diferencias entre coberturas de cultivos para los sitios de estudio.

Uso de suelo	Acuitzio 1995 (ha)	Acuitzio 2022 (ha)	Los Reyes 1995 (ha)	Los Reyes 2022 (ha)
Campo de cultivo	7404.85	5791.78	16614.74	11762.60
Agricultura plastificada	0	152.99	0	1016.83

Los datos de las concesiones de agua subterránea para uso agrícola en la zona de Acuitzio son de 2,371,106 m³ año⁻¹ (REDPA, 2022), por lo tanto, la cantidad total de agua

subterránea utilizada en un ciclo de producción en este municipio es de 292,200 m³, lo que representa un estrés hídrico bajo (tabla 10).

Tabla 10. Grado de estrés hídrico en la zona de Acuitzio

HH azul (m³ t⁻¹)	Agua subterránea concesionada (m³ año⁻¹)	Producción de la zona (t)	Apropiación del agua azul (m³)	Apropiación de agua azul (%)	Estrés hídrico
487	2,371,106	600	292,200 m ³	12.32	bajo

Para la zona de Los Reyes, las concesiones de agua subterránea para uso agrícola son de 3,538,040.73 m³ año⁻¹ esto indica que el cultivo de arándano en esta zona genera un estrés hídrico moderado al acuífero (tabla 11).

Tabla 11. Grado de estrés hídrico en la zona de Los Reyes.

HH azul (m³ t⁻¹)	Agua subterránea concesionada (m³ año⁻¹)	Producción de la zona (t)	Apropiación del agua azul (m³)	Apropiación de agua azul (%)	Estrés hídrico
1217	3,538,040.73	600	730,200	20.63	Moderado

Los resultados anteriores indican un estrés hídrico, generado en las zonas de estudio moderado y bajo para Los Reyes y Acuitzio respectivamente. Cabe mencionar que este grado de estrés hídrico es únicamente el que genera el arándano, sin embargo, la competencia de este cultivo por el agua es directamente con el aguacate. Fuerte (2022) indica que el grado de estrés hídrico generado por el aguacate para este municipio desde el 2012 hasta el 2017 ha avanzado de grave a severo y usa el 50 % del agua concesionada. Si a este grado de EH se le agrega el grado de EH que genera el arándano, el EH de este

municipio es muy elevado haciéndolo un punto crítico para la seguridad hídrica de estos municipios.

4.6 Implicación de la huella hídrica azul en la sustentabilidad del recurso hídrico a en Michoacán

Para el cálculo de la HH azul a una escala directa, es necesario contar con los datos de UAC. No obstante, dada la falta de estos datos en otros municipios, es necesario realizar una aproximación de la implicación de la HH azul en los acuíferos a nivel estatal, es necesario llevar a cabo el paso tres de la figura 4. En este sentido se asume que los resultados de la HH azul para los dos sitios de estudio $487 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$ y $1217 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$ para Acuitzio y Los Reyes respectivamente, serán los mismos para los principales municipios productores de arándano tomando en cuenta las similitudes en sus características climáticas bajo agricultura plastificada. De esta manera para los municipios de Ario, Salvador Escalante, Tacámbaro y Zitácuaro la HH azul será igual a la de Acuitzio, mientras que para los municipios de Tangancícuaro y Jiquilpan la HH azul será la misma que la de Los Reyes (Tabla 12).

Tabla 12. Grado de estrés hídrico de los principales municipios productores en Michoacán de arándano.

Municipio	Producción (t)	Rendimiento (t ha ⁻¹)	Agua		Estrés hídrico (%)
			subterránea concesionada (m ³ año ⁻¹)	HH azul (m ³ año ⁻¹)	
Tangancícuaro	6.10	6.10	10,290,912.40	7423.7	0.07
Jiquilpan	400	8.0	4,555,609.88	406,800	10.68

Ario	470	25.0	6,124,405.95	228,890	3.73
Salvador Escalante	1750	25	6,243,916.71	852,250	13.64
Tacámbaro	150	7.50	4,608,696.10	73,050	1.58
Zitácuaro	426.32	7.11	1,333,597.55	207,617.8 4	15.56

Fuente: SIAP-REPDA.

Estos resultados indican que el cultivo de arándano tiene un EH bajo. Sin embargo, de acuerdo con lo observado en campo y lo comentado por productores, actualmente existe una transición de cultivos, de aquellos con una derrama económica menor (chile, jitomate y pepino) a cultivos con una derrama económica mayor como las frutillas. Lo anterior generará cada año un EH más severo, poniendo en riesgo la seguridad hídrica de los municipios hacia donde está creciendo el arándano y las frutillas en general. En este sentido, Falkenmark y Rockström (2006) y Tovar *et al.*, (2017) proponen establecer políticas que permitan un ordenamiento agrícola del territorio que tenga como objetivo fundamental aprovechar al máximo la oferta climática de las regiones, principalmente la oferta hídrica proveniente de las lluvias, y de esta manera disminuir la presión sobre los sistemas hídricos superficiales utilizados para el riego agrícola. La mayoría de los países promueven políticas agrarias en las cuales la construcción de infraestructura para riego es el eje fundamental (Pimentel *et al.*, 1997), por ejemplo, en Alemania la preocupación por la escasez de agua que la actividad agrícola genera a algunas zonas de este país, ha hecho que el gobierno invierta en plantas tratadoras de aguas residuales para reciclar el agua y mitigar el estrés hídrico que la agricultura le produce a los cuerpos de agua, priorizando de esta manera que el agua de mejor calidad debe ser utilizada para la población y no para la

agricultura. No obstante, Rockström *et al.*, (1999) sostienen que, a pesar de la importancia del agua como proveedor de servicios ecosistémicos, ésta ha sido descuidada en las políticas agrarias principalmente en los países en vías de desarrollo.

4.7 Implicación de la huella hídrica gris en el nivel de contaminación del recurso hídrico

El nivel de contaminación del agua que el arándano de exportación en condiciones de plasticultura le genera a los cuerpos de agua subterráneos en las zonas de estudio fue bajo. El nivel de contaminación que este cultivo genera en los recursos hídricos de los municipios donde se produce el arándano en el estado, a la fecha de realización de este estudio fue bajo en todos (tabla 13).

Tabla 13. Nivel de contaminación de agua de los principales municipios productores de arándano en Michoacán.

Municipio	Producción (t)	Rendimiento (t ha⁻¹)	Agua subterránea concesionada	HH gris (m³)	Nivel de contaminación %
Tangancícu	6.10	6.10	10,290,912.40	3763.7	0.07
aro					
Jiquilpan	400	8.0	4,555,609.88	246,800	5.41
Ario	470	25.0	6,124,405.95	42,300	0.69
Pátzcuaro	290	29.0			
Salvador	1750	25	6,243,916.71	157,500	2.45
Escalante					

Tacámbaro	150	7.50	4,608,696.10	13,500	0.29
Zitácuaro	426.32	7.11	1,333,597.55	38,368.8	2.87

Aunque para el estado, la interpretación de este indicador refiere que los recursos hídricos de los cuales dependen las poblaciones y los propios sistemas de producción tienen una HH gris sustentable, surge la necesidad de evaluar la HH gris de todos los cultivos que se producen en un área determinada con el objetivo de conocer los datos reales y poder conocer el grado real de sustentabilidad de una zona. Estimaciones indican que tan sólo en el año 2000, cerca de dos terceras partes de las cuencas del planeta registraban una huella hídrica gris no sustentable, es decir, que la capacidad de asimilación de los contaminantes ha sido agotada con lo que las concentraciones presentes de N y P exceden los estándares internacionales de calidad del agua resultado de la contaminación por nitrógeno (N) y fósforo (P) (Liu *et al.*, 2012). La tendencia de crecimiento de este tipo de cultivos y al aumento en la aceleración de la producción del cultivo, resulta importante evaluar constantemente el NCA en las zonas de producción, todo esto con el fin de tener más y mejores datos que ayuden a la legislación de normas que mitiguen el impacto ambiental que la agricultura protegida genera y tener un mejor manejo del agua en el ámbito local.

4.8 Propuesta para la disminución de la huella hídrica

Los resultados indican que la supervivencia de las plántulas fue igual para los dos sustratos (96.6 %), una planta marchita por cada 30, los valores de la temperatura máxima de los sustratos fueron de 22.9 y 23.8 °C en fibra convencional y biocarbón respectivamente ($p=0.121435$), el número de frutos por planta fueron de 112.8 en fibra de coco y 106.8 con

biocarbón ($p=0.863135$), lo que sugiere que no hay efecto significativo entre ambos sustratos. La fruta en peso húmedo indicó una producción similar en los sustratos, $68.1 \text{ g planta}^{-1}$ y $60.2 \text{ g planta}^{-1}$, para fibra de coco y biocarbón, respectivamente ($p= 0.726359$). Respecto a la concentración de los NO_3^- , en el fertirriego fue de 1087 mg L^{-1} , con un aporte de 8 mg L^{-1} de NO_3^- del agua utilizada para el riego. La concentración del agua infiltrada fue de 614 mg L^{-1} para la fibra convencional y 321 mg L^{-1} en sustrato alternativo ($p= 0.028151$). El análisis de los resultados sugiere que el biocarbón es una alternativa para reducir la HH y, por ende, el potencial de contaminación de los cuerpos de agua por arrastre de NO_3 , esto se da por las características del biocarbón para eliminar contaminantes en aguas residuales de la agricultura (Major *et al.*, 2009), aunado a que el uso de biocarbón como sustrato reduce aproximadamente el 50 % de la huella gris, este representa una alternativa como sustrato eficiente y con una demanda de agua menor que la fibra de coco.

4.9 Implicación social de la huella hídrica.

Los resultados obtenidos en este estudio indican que el crecimiento de este tipo de sistemas tecnificados requiere esencialmente agua de buena calidad, que garantice la calidad de exportación y en donde no tengan que competir con otros cultivos. La figura 9 muestra el patrón de crecimiento en el estado de Michoacán, donde se observa que la mayoría de los municipios productores de arándano para el riego se abastecen con agua de acuíferos que cuentan con un déficit en su disponibilidad media anual de agua, lo que los hace insostenibles.

1996, sin embargo, no se tiene información sobre el inicio de la tecnificación del sistema de producción. Las figuras 7, 8, 10, 11 y la tabla 9 muestran el cambio que se ha ido dando en la tecnificación de estos sistemas de producción de este cultivo en los sitios de estudio a lo largo de 27 años. Esta tecnificación, si bien, confiere ventajas a los productores y una importante derrama económica, repercute en lo ambiental, podemos decir que, a mayor derrama económica, mayor impacto ambiental generan este tipo de cultivos.

La legislación Mexicana, si bien cuenta con normas en materia agrícola, a la realización del presente estudio, no existen normas o leyes que controlen la implementación y el crecimiento de la agricultura plastificada, básicamente esta tecnificación cambia y se intensifica de un sistema de producción abierto a uno cerrado queda a consideración de los productores, por lo que resulta importante tener estudios que avalen el impacto ambiental de estos sistemas con el fin de tener políticas públicas que regularicen el crecimiento de los cultivos plastificados.

Existe una amplia competencia documentada por el agua entre las actividades agrícolas y las actividades humanas en específico en el centro occidente de México, en donde podemos inferir que esta competencia la ganan las actividades agrícolas ya que estas están usando el agua de mejor calidad.

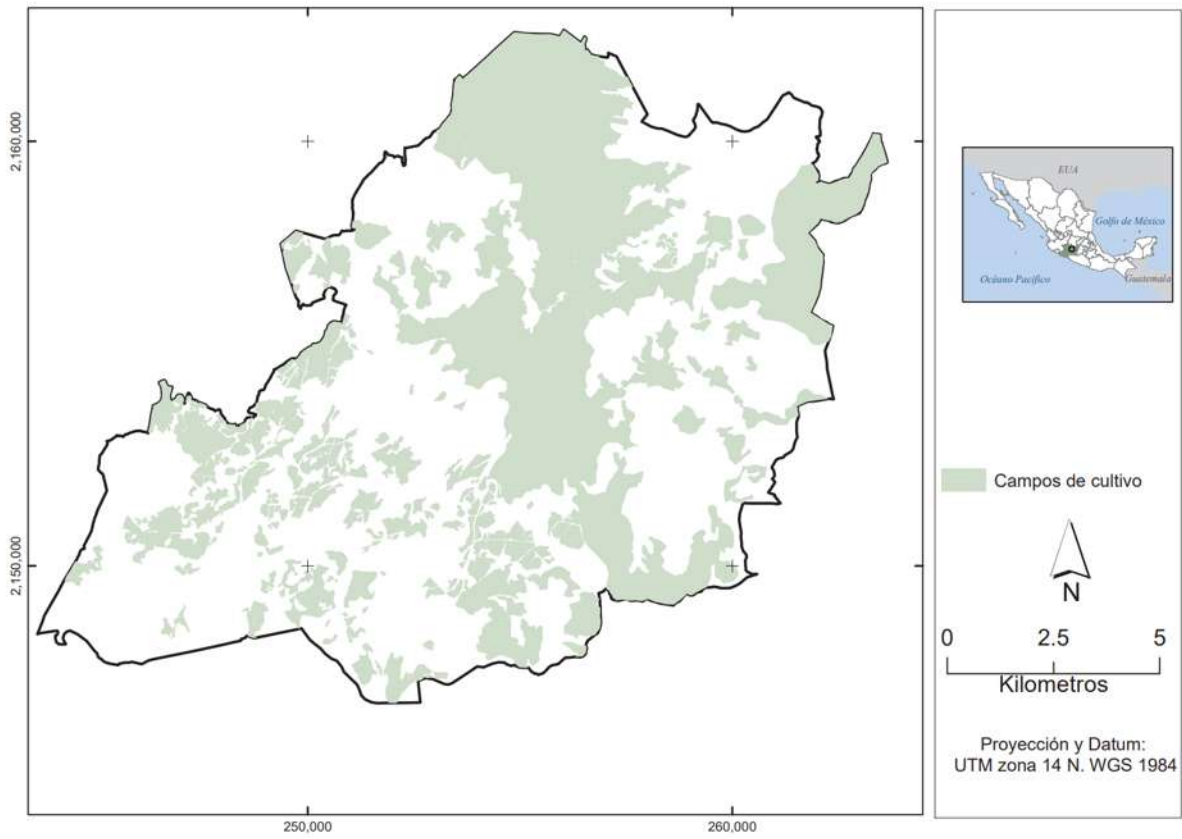


Figura 10. Campos de cultivo en el municipio de Acuitzio en el año 1995 (Fuente: elaboración propia).

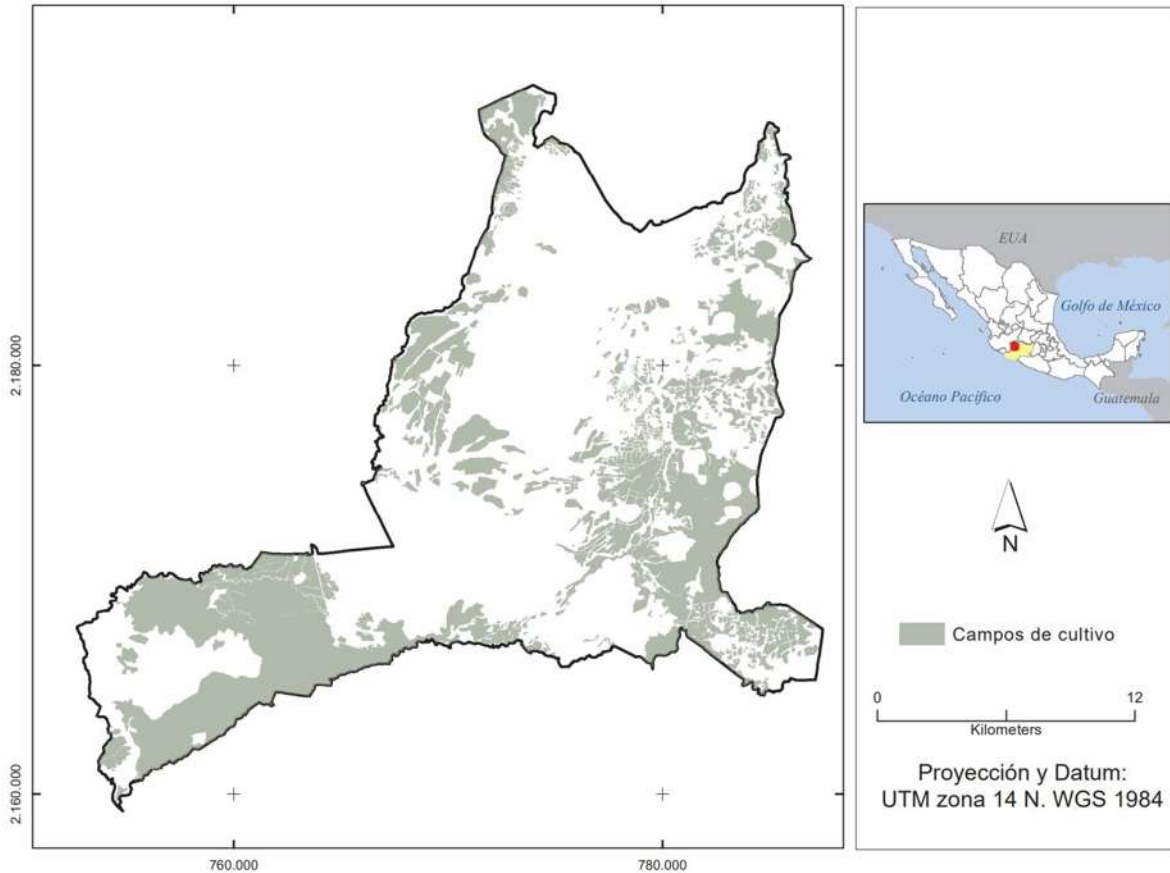


Figura 11. Campos de cultivo en el municipio de Los Reyes en el año 1995 (Fuente: elaboración propia).

Los resultados de la calidad del agua analizada indican que la concentración de elementos como nitratos, fosfatos, carbonatos, sulfatos y otros, así mismo en lo que respecta a los metales pesados fueron inferiores a los límites permisibles de la Norma Oficial Mexicana (NOM-127-SSA1-2021). Estos valores indican que la calidad de agua de riego es óptima para la producción de arándanos y para el consumo humano. Resulta evidente que el cultivo de frutillas compite de manera directa con el agua que demanda la población para usos domésticos. En algunas regiones del mundo se han identificado problemas en torno al abasto, calidad y cantidad del agua que la población sufre para satisfacer las necesidades

básicas en cuestión de alimentos, industria y el sostenimiento de sistemas naturales (Postel, 2000).

Los valores de los *ICAs* de Acuitzio fueron de 42.18 y de 34.45 para la zona de Los Reyes (Tablas 14 y 15). A partir de estos valores, y de acuerdo con la tabla 14, se evidencia que el agua de riego utilizada en los cultivos de arándano es un agua de excelente calidad, la cual, no es aprovechada por la población.

Tabla 14. Valor de los *ICAs* para la zona de Acuitzio.

Parámetro	Valor permisible por la NOM-127-SSA1- 2021 mg/L	Estándar OMS	Resultado del pozo Acuitzio Mg/L	<i>qi</i>	Peso relativo	<i>sli</i>
pH	6.5-8.5		7.94	93.41	0.10	9.34
Cl ⁻	250		25.31	10.12	0.078	0.78
SO ₄ ²⁻	400		62.55	15.63	0.131	2.04
Na ⁺	200		58.51	29.25	0.078	2.28
K ⁺	-	12	10.83	90.25	0.052	4.69
HCO ₃ ⁻	-	120	118.68	98.99	0.026	2.57
Ca ₂ ⁺	-	75	11.42	15.22	0.078	1.18
Mg ₂ ⁺	-	50	6.89	13.78	0.078	1.07
NO ₃ ⁻	10		2.60	26	0.131	3.40
Dureza	500		52.43	10.48	0.10	1.04
PO ₄ ³⁻	10		10.53	105.3	0.131	13.79
Total					1	*42.18

*Valor del *ICA*.

Tabla 15. Valor de los ICAs para la zona de Los Reyes.

Parámetro	Valor permisible por la NOM-127-SSA1- 1994 mg/L	Estándar OMS	Resultado del pozo Los Reyes mg/L	qi	Peso relativo	sli
pH	6.5-8.5		7.27	85.52	0.10	8.52
Cl ⁻	250		18.40	7.36	0.078	0.57
SO ₄ ²⁻	400		0	0	0.131	0
Na ⁺	200		9.73	4.86	0.078	0.37
K ⁺	-	12	54.05	450.41	0.052	23.42
HCO ₃ ⁻	-	120	72.92	60.76	0.026	1.57
Ca ₂ ⁺	-	75	0	0	0.078	0
Mg ₂ ⁺	-	50	0	0	0.078	0
NO ₃ ⁻	10		0	0	0.131	0
Dureza	500		0	0	0.10	0
PO ₄ ³⁻	10		0	0	0.131	0
Total					1	*34.45

*Valor del ICA.

En cuanto a los elementos traza analizados, el laboratorio reportó los resultados como <LCL, lo que indica que la concentración de éstos fue inferior al límite de detección del método, lo que corrobora la excelente calidad del agua con la que es regado el arándano.

De acuerdo con datos del INEGI el municipio de Acuitzio cuenta con una población de 11,301 habitantes, la Organización Mundial de la Salud (OMS) recomienda una cantidad

aproximada de agua potable de 100 L al día por habitante para cubrir las necesidades básicas de higiene y alimentos, es decir que para que la población de Acuitzio satisfaga sus necesidades de agua potable se requieren 1,130,100 L diarios de agua y para la producción de arándano en un día se requieren de 20,700 L de agua, con estos datos podemos inferir que únicamente la producción de la huerta estudiada priva a 207 personas de poder satisfacer sus necesidades del vital líquido.

En el caso de Los Reyes la población es de 78,935 personas (INEGI, 2020) es decir que la demanda de agua potable para que la población satisfaga sus necesidades de higiene y alimentos es de 7,893,500 L diarios. Si la producción de la huerta requiere de 67,165 L de agua diarios, esto indica que la huerta priva diariamente a 672 personas de agua de buena calidad.

Los resultados del AV del arándano arrojaron que el 85 % del fruto es agua lo que indica que en una tonelada 850 kg es agua de excelente calidad que se exporta a diferentes partes del mundo. Lo anterior constituye punto crítico ya que esa agua no es utilizada por la población y el arándano tampoco se queda en territorio nacional, sino que es enviado a diferentes partes del mundo, este punto crítico, dado el crecimiento exponencial de la producción del arándano, irá en aumento, aunado a que no solo el punto crítico es eso, también, los resultados indican que este cultivo contamina las aguas nacionales, dejando un impacto ambiental alto y el producto final, producto de alta calidad, aprobado bajo los estándares más rigurosos no se queda dentro del país.

Por lo anterior es conveniente tener datos duros sobre el impacto y la implicación que la producción en sistemas cerrados le genera a los recursos naturales de las zonas en donde se

establecen, con el fin de que estos coadyuven en la formulación de una legislación que regule el crecimiento e impacto de los cultivos plastificados, priorizando el cumplimiento del derecho al agua que la ONU establece y la satisfacción de las necesidades de la población actual sin que se tenga que poner en riesgo que futuras generaciones puedan satisfacer las suyas.

5. Conclusiones

El cultivo de arándano de exportación bajo agricultura protegida tuvo una HH alta, en ambas zonas de estudio, en comparación con lo reportado para sistemas a cielo abierto.

El cultivo de arándano en la zona de Los Reyes tuvo una HH azul y gris considerablemente mayor a la HH azul y gris en comparación con la zona de Acuitzio.

El modelo de producción bajo agricultura protegida determina la evapotranspiración del cultivo, incidiendo directamente en la HH azul.

La metodología general de la HH debe ser modificada de acuerdo con las características propias de los sistemas de producción.

La producción del arándano genera un punto crítico a los recursos hídricos de las zonas donde se establecen estos cultivos, en consecuencia, se atenta contra la sustentabilidad y el uso justo del recurso agua.

El biocarbón derivado de los olotes de maíz como sustrato presenta un potencial para su reutilización durante varios ciclos en cultivos semiperennes en hidroponía. El biocarbón reduce significativamente el escurrimiento de nitratos en comparación con la fibra de coco, lo que representa una alternativa para reducir la huella hídrica gris y es probable que pueda reducir la contaminación en aguas superficiales de las cuencas del centro del país. disminuir la HH que generan estos cultivos.

Es necesario tomar una responsabilidad compartida, en la que los consumidores elaboren productos sostenibles que minimicen la HH de sus productos y que garanticen que el agua que extraen de la zona de captación sea sustentable, para esto la responsabilidad del gobierno sería capacitar, apoyados de la academia y de estudios que hayan comprobado la disminución de la cantidad de agua sin bajar la calidad del producto en uno de los muchos

programas que implementan a productores.

Este trabajo constituye un primer esbozo sobre el impacto que la producción del arándano de exportación bajo agricultura protegida le genera a los recursos hídricos del estado, sin embargo, también constituye solo una parte de este impacto, queda bastante que estudiar, bastante conocimiento por generar en diferentes áreas como social, económico, ambiental, político, hídrico, agrícola, edafológico e impacto ambiental con el fin de generar las bases que ayuden a detectar y tratar este impacto.

6. Referencias

- Alvarez, A., Morábito, J. A y Schilardi, C. (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. Mendoza: Universidad Nacional de Cuyo.
- Arévalo, D., Sabogal, J., Lozano, J.G., Martínez, J.S. 2012. Una mirada a la agricultura de Colombia desde su huella hídrica. *World Wildlife Fund*. Cali, Colombia. 54 p
- Arreguín Cortés, F., López Pérez, M., Marengo Mogollón, H., & Tejeda González, C. (2007). Agua virtual en México. *Tecnología Y Ciencias Del Agua*, 22(4), 121-132.
- Bennett, E. M., Carpenter, S. R., & Caraco, N. F. (2001). Human impact on erodable phosphorus and eutrophication: a global perspective: increasing accumulation of phosphorus in soil threatens rivers, lakes, and coastal oceans with eutrophication. *BioScience*, 51(3), 227-234. [https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2001\)051\[0227:HIOEPA\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2001)051[0227:HIOEPA]2.0.CO;2)
- Bernal, M. A. M. (2023). Regiones productoras de arándano en México. *ProducePay*. *Impulsando al Productor, de la Siembra a la Venta*. <https://es.producepay.com/blog/produccion-de-arandano-en-mexico-principales-regiones/>
- Brown R. M., Mcclelland N. I., Deininger R. A., and Tozer R. G. (1970). A water quality index- do we dare? *water and sewage works*. October. p. 339-343.
- Bueno, S.E., Marceleño, S., Nájera O. y De Haro, R. (2019). Implementación del método

de escasez en la determinación de la huella hídrica en la zona costera de San Blas, México. *Tecnura*, 23(62), 45-54. <https://doi.org/10.14483/22487638.15796>

Burman, & Pochop, L. O. (1994). *Evaporation, evapotranspiration and climatic data*. Elsevier. *Water Management* 72 (2), 81–96.

Bulsink, F., Hoekstra, A. Y., & Booij, M. J. (2009). The water footprint of Indonesian provinces related to the consumption of crop products. UNESCO-IHE.

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

Carbajal, B. y Partida, J.C., 2022.Graves daños en el ambiente por el cultivo extensivo de “berries”. *La Jornada*, 8/07/2022

<https://www.jornada.com.mx/noticia/2022/07/06/recursos/graves-danos-en-el-ambiente-por-el-cultivo-extensivo-de-berries-5682>

Chapagain, A K, & Orr, S. (2009). An improved water footprint methodology linking global consumption to local water resources: a case of Spanish tomatoes. *Journal of environmental management*, 90(2), 1219–28.

Chapagain, A.K., & Hoekstra, A.Y. (2007). The water footprint of coffee and tea consumption in the Netherlands. *Ecological Economics* 64 (1), 109–118.

CONAGUA. (2018) *Estadísticas del agua en México* Gerencia de Planificación

Hídrica. Sistema Nacional de Información del Agua (SINA). Disponible en:
https://sina.conagua.gob.mx/publicaciones/EAM_2018.pdf

CONAGUA. (2020). Disponibilidad media anual de aguas subterráneas. Subdirección General Técnica, gerencia de aguas subterráneas, subgerencia de información geográfica del agua. Disponible en:
https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/sections/Disponibilidad_Acuiferos.html

DOF 2022. NOM-127-SSA1-2021. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua.

Dune, T. & L.B. Leopold. (1995). Water in environmental planning. W.H. Freeman and Company. New York

Esquivel Alcántara, A., & Salgado Vega, M. del C. (2020). Huella hídrica de once productos de origen animal de México y Estados Unidos. En factores críticos y estratégicos en la interacción territorial desafíos actuales y escenarios futuros: vol. II. Universidad Nacional Autónoma de México y Asociación Mexicana de Ciencias para el Desarrollo Regional A.C, Coeditores.

Falkenmark, Malin & Rockström, Johan. (2006). The new blue and green water paradigm: breaking new ground for water resources planning and management. *journal of water resources planning and management-asce - j water resour plan man-asce*. 132. 10.1061/(ASCE)0733-9496(2006)132:3(129).

Falkenmark, M., and Rockström, J. (2004). Balancing water for man and nature: The new approach to ecohydrology, EarthScan, U.K.

FAOSTAT, (2020). Food and Agriculture Organization of the United Nations Statistics Division. Disponible en: <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QI>

Farias, J.R.B.; Bergamaschi, H.; Martins, S.R (1986). Evapotranspiração no interior de estufas plásticas. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, Santa Maria, v.2, p.17-22.

Fernández, M.D., Bonachela, S., Gázquez, J.C., Thompson, R., Granados, M.R., López, J.C., (2010). Evaluación de la ecuación fao penman- monteith para la estimación de la evapotranspiración de referencia en invernadero en clima mediterráneo. XXVIII Congr. Nac. Riegos 33–34.

Fernandes C., Cora J.E. and Araujo J.A.C.D., (2003) Reference evapotranspiration estimation inside greenhouses, *Scientia Agricola*, 3(60), 591-594.

Fernandez M.D. (2000). Necesidades hídricas y programación del riego en cultivos hortícolas en invernaderos de Almería, tesis doctoral, Espana, Universidad de Almeria

Flores, J., Ojeda-Bustamante, W., López, I., Rojano, A., & Salazar, I. (2007). Requerimientos de riego para tomate de invernadero. *Terra Latinoamericana*, 25(2), 127-134.

Foley, J. A., DeFries, R., Asner, G. P., Barford, C., Bonan, G., Carpenter, S. R., ... & Snyder, P. K. (2005). Global consequences of land use. *science*, 309(5734), 570-574.

Franke, N.A., Boyacioglu,H.,&Hoekstra, A.Y. (2013). Grey water footprint accounting.

TIER 1 supporting guidelines. UNESCO-IHE. The Netherlands. Disponible en:
https://www.waterfootprint.org/resources/Report65-GreyWaterFootprint-Guidelines_1.pdf

Fuerte-Velazquez, D. J. (2022). Evaluación de la huella hídrica en la producción de aguacate y fresa en municipios de la Subcuenca de Cointzio. Un Análisis de Vulnerabilidad Hídrica (tesis doctoral). Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo.

Gómez-Tagle AF, Gómez-Tagle A, Fuerte-Velázquez DJ, Barajas-Alcalá AG, Quiroz-Rivera F, Alarcón-Chaires PE, Guerrero-García-Rojas H. Blue and green water footprint of agro-industrial avocado production in central Mexico. *Sustainability*. 2022; 14(15):9664. <https://doi.org/10.3390/su14159664>

González-Estrada, A., & Amador, M. C. (2017). Emisión de gases de efecto invernadero de la fertilización nitrogenada en México. *Revista Mexicana De Ciencias Agrícolas*. <https://doi.org/10.29312/remexca.v8i8.698>

Grupo Consultor de Mercados Agrícolas, con información del Banco de México,
<https://blueberriesconsulting.com/los-numeros-que-reposicionan-a-mexico-en-la-industria-global-del-arandano/>

Harmato V.M., Saloke M.S. and Babel Tantan H.J. (2004). Water requirements of drip irrigated tomatoes grown in greenhouse in tropical environment, *Agricultural Water Management*, 71, 225-242

Hoekstra AY y Hung PQ. (2002). Virtual water trade: A quantification of virtual water flows between nations in relation to international crop trade. Value of Water Research Series N°. 11, Delft, The Netherlands: UNESCO-IHE. p. 165.

Hoekstra AY, Chapagain AK, Aldaya MM, Mekonnen MM. (2011). The water footprint assessment manual: setting the global standar [Internet]. London/Washington: Earthscan; Disponible en: Disponible en: https://waterfootprint.org/media/downloads/TheWaterFootprintAssessmentManual_2.pdf.

Hoekstra, A. Y. y Chapagain, A. K. (2008). Globalization of water: Sharing the planet's freshwater resources, blackwell publishing, Oxford.

INEGI (2020). Panorama sociodemografico de México 2020 Michoacán de Ocampo. Disponible en: https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/702825197902.pdf

INEGI (2010) México en cifras disponible en: https://www.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos_geograficos/16/16001.pdf

Liu C, Kroeze C, Hoekstra AY (2012). Past and future trends in grey water footprints of anthropogenic nitrogen and phosphorous inputs to major world rivers. Ecological Indicators, 18:42-49.

Martínez-Paz J, Pellicer-Martínez F, Colino J. A (2014) probabilistic approach for the

socioeconomic assessment of urban river rehabilitation projects. *Land Use Policy*, 2014;36:468-477

Martins, G.; Castellane, P.D.; Volpe, C.A. (1994). Influência da casa-de-vegetação nos aspectos climáticos e em época de verão chuvoso. *Horticultura Brasileira*, v.12, p.131-135.

Major, J., Steiner, C., Downie, A., Lehmann, J., & Joseph, S. (2009). Biochar effects on nutrient leaching. *Biochar for environmental management*. In: Lehmann, J., & Joseph, S. (Eds.). *Biochar for environmental management: science, technology and implementation*.

Mekonnen, M. M. y Hoekstra, A. Y. (2010). A global and high-resolution assessment of the green, blue and grey water footprint of wheat, *hydrology and earth system sciences*, vol. 14, pp. 1259-1276.

Mekonnen, M. M., & Hoekstra, A. Y. (2010). The green, blue and grey water footprint of crops and derived crops products value of water research report series No.47, UNESCO-IHE, Delft.

Mekonnen, M.M. y Hoekstra, A.Y. (2011). National water footprint accounts: The green, blue and grey water footprint of production and consumption”, en *Value of Water Research Report Series No. 50, Apéndice IX, The water footprint of national consumption per country (Mm³ /yr)*, UNESCO-IHE, Delft, Países Bajos.

Morales-Novelo, J. A., & Rodríguez-Tapia, L. (2020). Sustentabilidad de la huella hídrica en la cuenca del valle de México. *Tecnología Y Ciencias Del Agua*, 11(4), 58–100.

<https://doi.org/10.24850/j-tyca-2020-04-03>

Navas, G. (2023). Los números que reposicionan a México en la industria global del arándano Blueberries Consulting. Blueberries Consulting. <https://blueberriesconsulting.com/los-numeros-que-reposicionan-a-mexico-en-la-industria-global-del-arandano/>

Obersteiner, M., Peñuelas, J., Ciais, P., Van Der Velde, M., & Janssens, I. A. (2013). The phosphorus trilemma. *Nature Geoscience*, 6(11), 897-898. <https://doi.org/10.1038/ngeo1990>

Orgaz, F., Fernandez, M.D., Bonachela, S., Gallardo, M., Fereres, E., (2005). Evapotranspiration of horticultural crops in an unheated plastic greenhouse. United Nations World Water Development Report 3: Water in a Changing World,

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

Peñaloza-Sánchez, A. M., Bustamante-González, A., Vargas-López, S., Jaramillo-Villanueva, J. L., & Quevedo-Nolasco, A. (2020). Huella hídrica de los cultivos de cebolla (*Allium cepa* L.) y tomate de cáscara (*Physalis ixocarpa* Brot.) en la región de Atlixco, Puebla, México / Water footprint of onion (*Allium cepa* L.) and husk tomato (*Physalis ixocarpa* Brot.) crops in the region of Atlixco, Puebla, Mexico. *Tecnología Y Ciencias Del Agua*, 11(5), 1-30. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2020-05-01>

Perales Rivas, M. A., Zarate, J. L., Angon Torres, M. P., Uribe, A., Robles Morúa, A., & Medina Orozco, L. E. (2018). Evaluación de impacto ambiental de la producción de berries en el occidente de México 2018–2020 (N.º 2). Universidad Autónoma De Chapingo.

Pérez Cruz, O. A. (2018). Análisis de la cadena productiva del arándano en México y Chile. *Portes: Revista Mexicana de Estudios Sobre la Cuenca del Pacifico*, 12(23).

Pérez Cruz, O.A. (2015). PYMES mexicanas: Impacto de la primera crisis global del siglo XXI. *Recai* 4 (9): 1-4. Disponible en: <http://recai.uaemex.mx/index.php/recai/article/view/108/80>.

Pimentel, D., Houser, J., Preiss, E., White, O., Fang, H., Mesnick, L., Barsky, T., Tariche, S., Schreck, J., & Alpert, S. (1997). Water resources: Agriculture, the environment, and society. *bioScience*, 47(2), 97–106. <https://doi.org/10.2307/1313020>

Postel, S. L. (2000). Entering an era of water scarcity: The challenges ahead. *Ecological applications*, 10(4), 941–948. <https://doi.org/10.2307/2641009>

Postel, S., Daily, G. C., & Ehrlich, P. R. (1996). Human appropriation of renewable fresh water. *Science*, 271(5250), 785–788. <https://doi.org/10.1126/science.271.5250.785>

REPDA (2022). Base de datos de títulos y permisos de aguas nacionales y sus bienes públicos inherentes. Disponible en: <https://app.conagua.gob.mx/consultarepda.aspx>

Ríos, F. J. L., Torres, M. M., Castro, F. R., Torres, M. M. A., & Ruiz, T. J. (2015). Determinación de la huella hídrica azul en los cultivos forrajeros del DR-017, Comarca Lagunera, México. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias*

UNCUYO, 47(1), 93-107.

Rockström, J., & Gordon, L. (2001). Assessment of green water flows to sustain major biomes of the world: Implications for future Ecohydrological Landscape Management. *Physics and chemistry of the earth*, 26(11-12), 843-851. [https://doi.org/10.1016/s1464-1909\(01\)00096-x](https://doi.org/10.1016/s1464-1909(01)00096-x)

Rockström, J., Gordon, L., Folke, C., Falkenmark, M., & Engwall, M. (1999). Linkages among water vapor flows, food production, and terrestrial ecosystem services. *Conservation Ecology*, 3(2). <https://doi.org/10.5751/es-00142-030205>

Rosas, O.F. (2016). *Perspectivas. Temporada mundial de los berrys, 2016-2017*. RCounselling Group. 4° Seminario de Berrys. Temuco, Chile. Disponible en: http://www.fedefruta.cl/2016/wp-content/uploads/2016/12/1430-1500_Rosas-1.pdf.

Sadat-Noori, M., Ebrahimi, K., & Liaghat, A. (2014). Groundwater quality assessment using the water quality index and GIS in saveh-nobaran aquifer, Iran. *Environmental Earth Sciences*, 71(9), 3827–3843. <https://doi.org/10.1007/s12665-013-2770-8>

Saravanan, K., Srinivasamoorthy, K., Prakash, R., Gopinath, S., & Suma, C. S. (2015). An evaluation of hydrogeochemistry of groundwater in upper vellar sub – basin using mineral stability and solute transport modelling. *Aquatic Procedia*, 4, 1119–1125. <https://doi.org/10.1016/j.aqpro.2015.02.142>

Seckler, D.; Amarasinghe, U.; Molden, D.; de Silva, R.; Barker, R. (1998). *World water demand and supply, 1990 to 2025: Scenarios and issues*. Colombo, Sri Lanka:

International Irrigation Management Institute (IIMI); IWMI. vi, 40p. (IIMI Research Report 19 / IWMI Research Report 19) [doi: 10.3910/2009.019]

SEDRUA (2019). Cultivo de arándano en México, reto superado. Disponible en: <https://www.gob.mx/agricultura/articulos/cultivo-del-arandano-en-mexico-reto-superado>

Seguí- Amórtegui, L. A., García Vega, D., & Guerrero Garcí-a Rojas, H. R. (2017). Huella hídrica: análisis como instrumento estratégico de gestión para el aprovechamiento eficiente de los recursos hídricos. *Ciencia Nicolaita*, (69). <https://doi.org/10.35830/cn.vi69.342>

SIAP (2020). Anuario Estadístico de la Producción Agrícola. Disponible en: <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>

SIAP (2019). Anuario Estadístico de la Producción Agrícola. Disponible en: <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>

Shu, Rui & Cao, Xinchun & Wu, Mengyang. (2021). Clarifying regional water scarcity in agriculture based on the theory of blue, green and grey water footprints. *Water Resources Management*. 35. 10.1007/s11269-021-02779-6.

Sutton, M. A., Bleeker, A., Howard, C. M., Erisman, J. W., Abrol, Y. P., Bekunda, M., ... & Zhang, F. S. (2013). Our nutrient world. The challenge to produce more food and energy with less pollution. Edinburgh, NERC/Centre for Ecology & Hydrology, 114 pp. Disponible en: <https://nora.nerc.ac.uk/id/eprint/500700>

Tovar-Hernández, N. A., Trujillo-González, J. M., Muñoz-Yáñez, S. I., Torres-Mora, M.

- A., & Zarate, E. (2017). Evaluación de la sostenibilidad de los cultivos de arroz y palma de aceite en la cuenca del río Guayuriba (Meta, Colombia), a través de la evaluación de huella hídrica. *Orinoquia*, 21(1), 52. <https://doi.org/10.22579/20112629.394>
- 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](https://doi.org/10.1007/s11367-012-0529-1)
- Vázquez del Mercado, A. R., & Lambarri, B. J. (2017). Huella hídrica en México: Análisis y perspectiva. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Velasco-Muñoz, J. F., Aznar-Sánchez, J. A., Belmonte-Ureña, L. J., & Román-Sánchez, I. M. (2018). Sustainable water use in agriculture: A review of worldwide research. *Sustainability*, 10(4), 1084. <https://doi.org/10.3390/su10041084>
- Viala E. (2008). Water for food, water for life a comprehensive assessment of water management in agriculture. *Irrigation and Drainage Systems*, 22(1): 127-129
- Vitousek, P. M., Naylor, R., Crews, T., David, M. B., Drinkwater, L. E., Holland, E., ... & Zhang, F. S. (2009). Nutrient imbalances in agricultural development. *Science*, 324(5934), 1519-1520. DOI: 10.1126/science.1170261
- WWAP (Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos) (2009) The WWAP, UNESCO Publishing, París, y Earthscan, Londres.
- Zárate, E. & Kuiper, D. (2013). Evaluación de huella hídrica del banano para pequeños productores en Perú y Ecuador. Good Stuff Internacional: Suiza.

Zárate, J. I., Angon-Torres, M. P, Uribe, A. (2018) Evaluación del impacto ambiental de la producción de berries en el occidente de México Centro Regional Universitario Universidad Autónoma de Chapingo

Zeng, Z., Liu, J., Koeneman, P. H., Zarate, E., & Hoekstra, a. Y. (2012). Assessing water footprint at river basin level: a case study for the Heihe River Basin in northwest China. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(8), 2771–2781.