



Universidad Michoacana de
San Nicolás de Hidalgo



Facultad de Economía “Vasco de Quiroga”
División de Estudios de Posgrado

T E S I S

**Huella Hídrica Azul y Sustentabilidad en la Agroindustria de Exportación en la
Región Bajío, Michoacán**

P R E S E N T A

M.C.A. Ana Rosa Rangel Argueta

*Para obtener el grado de
Doctora en Ciencias en Desarrollo y Sustentabilidad*

Director de Tesis

Dr. Hugo Amador Herrera Torres

Co-directora

Dra. Erandi Maldonado Villalpando

Sinodales

Dra. Hilda Rosalba Guerrero García Rojas

Dr. René Colín Martínez

Dr. Carlos Francisco Ortiz Paniagua



**Ciencia y
Tecnología**
Secretaría de Ciencia, Humanidades,
Tecnología e Innovación



Morelia, Michoacán, mayo del 2026.

Dedicatoria

“El desarrollo que destruye la vida no es desarrollo.”

— Franz Hinkelammert

A mi familia, por ser el origen y la fortaleza de cada uno de mis pasos, por su amor incondicional, su infinita paciencia y su confianza, incluso cuando el camino parecía incierto.

A los que me acompañaron en este proceso por su apoyo silencioso, por sus palabras oportunas y por recordarme una y otra vez que todo esfuerzo tiene sentido cuando se construye con propósito.

A los que ya no están, pero que siguen presentes en mi memoria y en cada meta conseguida, siendo un constante estímulo en este camino.

Y, por último, a la vida misma, por permitirme aprender, aguantar y culminar este camino.

Agradecimientos

Este trabajo no es solo el resultado de un esfuerzo individual, sino la suma de múltiples acompañamientos, aprendizajes y encuentros que han dado sentido a este camino.

Cada vez más, agradezco a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI), por el apoyo prestado y por hacer posible que este proyecto se desarrollara en un ambiente de formación y compromiso con el conocimiento.

A la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo y, en especial, a la Facultad de Economía “Vasco de Quiroga”, por abrirme sus puertas y brindarme un espacio donde no solo se obtiene conocimiento, sino también se desarrollan visiones críticas y comprometidas con la realidad.

Mi más sincero agradecimiento a mi director de tesis, el Dr. Hugo Amador Herrera Torres, por su guía, paciencia y confianza durante este proceso; por sus enseñanzas, que trascienden lo académico, y por acompañarme en cada etapa de este camino. De igual manera, a mi co-directora, la Dra. Erandi Maldonado Villalpando, por su compromiso, sus valiosas aportaciones y su constante acompañamiento, que enriquecieron de manera significativa el presente trabajo.

A mis sinodales: la Dra. Hilda Rosalba Guerrero García Rojas, el Dr. René Colín Martínez y el Dr. Carlos Francisco Ortiz Paniagua, por su tiempo, sus observaciones críticas y sus aportes, que permitieron fortalecer esta investigación desde distintas miradas.

A mi familia, por ser el pilar más firme en este camino. Gracias por tu amor incondicional, por tu paciencia cuando me ausento y por recordarme siempre por qué debo seguir adelante.

A mis amigos y a todas aquellas personas que la vida ha puesto en mi camino y que, con su presencia, sus palabras y su apoyo, han contribuido a mi crecimiento en todos los sentidos de mi vida. Cada encuentro ha dejado su huella y también hoy forma parte de este logro.

Finalmente, doy gracias a la vida por la oportunidad de aprender, de resistir y de transformar cada desafío en una posibilidad de crecimiento.

Resumen

Esta investigación doctoral analiza la huella hídrica azul como indicador para evaluar la presión sobre los recursos hídricos en la agroindustria exportadora del Bajío michoacano, especialmente en Zamora, Jacona, Tangancícuaro y Los Reyes, dedicados a la producción de berries y cultivos intensivos. El estudio sostiene que la expansión agroexportadora y la agricultura tecnificada han aumentado la extracción de agua subterránea, causando sobreexplotación de acuíferos, deterioro ambiental y vulnerabilidad territorial. La investigación adopta un enfoque de sustentabilidad fuerte, considerando el agua como un capital natural esencial. Integra aportes de la ecología política del agua, la economía ecológica, la gobernanza hídrica y la agroindustria 4.0 para interpretar dinámicas productivas, tecnológicas y socioambientales del modelo agroexportador actual. Se utiliza un enfoque mixto secuencial explicativo, combinando herramientas cuantitativas y cualitativas. La huella hídrica azul se calcula con metodologías del Water Footprint Assessment Manual, la norma ISO 14046 y modelos como CROPWAT y AquaCrop, considerando variables agroclimáticas, sistemas de riego y balances de acuíferos. Los resultados muestran que la tecnificación agrícola mejora la eficiencia hídrica, pero no reduce el consumo total de agua por el efecto rebote de la intensificación productiva. Se proponen estrategias de gobernanza, regulación territorial y agricultura inteligente para fortalecer la sustentabilidad hídrica regional.

Palabras clave: Huella hídrica azul; sustentabilidad, bajío de Michoacán; agroindustria 4.0; Berries.

Abstract

This doctoral research analyzes the blue water footprint as an indicator to assess the pressure on water resources in the exporting agroindustry of the Michoacán Bajío, especially in Zamora, Jacona, Tangancícuaro, and Los Reyes, dedicated to the production of berries and intensive crops. The study argues that the expansion of agro-export and technified agriculture has increased groundwater extraction, causing overexploitation of aquifers, environmental degradation, and territorial vulnerability. The research adopts a strong sustainability approach, considering water as an essential natural capital. It integrates contributions from political ecology of water, ecological economics, water governance, and 4.0 agro-industry to interpret the productive, technological, and socio-environmental dynamics of the current agro-export model. A sequential explanatory mixed-methods approach is used, combining quantitative and qualitative tools. The blue water footprint is calculated using methodologies from the Water Footprint Assessment Manual, the ISO 14046 standard, and models such as CROPWAT and AquaCrop, considering agroclimatic variables, irrigation systems, and aquifer balances. The results show that agricultural modernization improves water efficiency, but does not reduce total water consumption due to the rebound effect of productive intensification. Governance strategies, territorial regulation, and smart agriculture are proposed to strengthen regional water sustainability.

Keywords: Blue water footprint; sostenibilidad; Bajío de Michoacán; 4.0 agronegocio; arándanos.

ÍNDICE

Dedicatoria	2
Agradecimientos	3
Resumen	4
Abstract	5
ÍNDICE	6
Índice de tablas	7
Índice de figuras	8
Introducción	11
I. Planteamiento del problema	14
II. Justificación	16
III. Objetivos de la investigación	18
IV. Pregunta general y preguntas particulares	19
V. Hipótesis de investigación	19
VI. Marco teórico-conceptual	19
VII. Variables e indicadores	25
VIII. Metodología	26
IX. Alcances y Limitaciones	30
Capítulo I	33
Marco teórico y estado del arte de la huella hídrica y la sustentabilidad	33
1.1 Revisión de literatura sobre huella hídrica y sustentabilidad	33
1.1.1. Fundamentos teóricos de la huella hídrica	33
1.1.2. La agricultura mexicana enfocada en la exportación y la presión hidráulica	34
1.1.3. Sustentabilidad: desde el paradigma débil hacia un enfoque fuerte.	36
1.1.4. Dimensión social y ecología política del agua: una perspectiva comparativa.	39
1.1.5. La economía circular y la eficiencia en la utilización de recursos hídricos constituyen una combinación eficaz y efectiva.	40
1.2 Marco teórico de la huella hídrica, el capital natural y la sustentabilidad fuerte en sistemas que exportan productos agrícolas.	42
1.2.1. La agricultura a escala mundial y el consumo hídrico	43
1.2.3. Agua virtual y comercio a escala global.	45
1.2.4. Irrigación, eficacia y efecto rebote en la irrigación.	46
1.2.5. Agroindustria 4.0 y la digitalización del agua: una combinación estratégica para la transformación y digitalización del agua.	48
1.2.6. Dimensión social y equidad en el ámbito hídrico.	48
1.3 Enfoques metodológicos predominantes en la investigación sobre recursos hídricos en América Latina, México y Michoacán	48
1.3.1 El paradigma predominante: la gestión integrada de los recursos hídricos (IWRM)	48
1.3.2 Rigor metodológico y revisiones sistemáticas en estudios hídricos	49
1.3.3. Modelación hidrológica y cálculo de huella hídrica	50
1.3.4 Enfoques mixtos e interdisciplinarios en América Latina	51
1.3.5. SIG, teledetección y agricultura digital	51
1.3.6. Política ecológica del agua.	52
Capítulo II	54
Aspectos metodológicos de la investigación	54
2.1 Marco metodológico	57
2.2 Revisión crítica sobre el uso del estudio de caso en investigaciones ambientales	59
2.3 Etapas metodológicas de la investigación	62
2.3.1. Revisión documental	63
2.3.2. Delimitación territorial	69
2.3.3. Medición de la huella hídrica:	72
2.3.4. Análisis de la disponibilidad hídrica	73
2.3.5. Integración de hallazgos: Correlación entre el tipo de cultivo, el nivel tecnológico y la presión sobre el recurso hídrico	92
CAPÍTULO III	95
La agroindustria en el Bajío de Michoacán en el contexto de la revolución agroindustrial 4.0	95

3.1 Caracterización de la región del Bajío de Michoacán	95
3.2. Características principales de los municipios productores de berries en el Bajío y occidente de Michoacán	99
3.2.1. Los Reyes, Michoacán, México	99
3.2.2. Jacona Michoacán, México	102
3.2.3. Tangancícuaro Michoacán, México	105
3.2.4. Zamora Michoacán, México	108
3.3. Principales cultivos agroindustriales	115
3.4. Tecnologías aplicadas y nivel de adopción de la agroindustria 4.0	117
3.5. Diferencias en variedades de cultivos y su relación con el uso del agua y la eficiencia tecnológica	120
Capítulo IV	126
Resultados de la medición de la huella hídrica azul en cultivos agroindustriales	126
4.1 Análisis comparativo entre cultivos y su relación con las prácticas tecnológicas	126
4.1.1. Huella Hídrica Azul del arándano en los municipios de estudio	126
4.1.2. Huella Hídrica Azul de la frambuesa en los municipios de estudio	134
4.1.3. Huella hídrica azul del cultivo de fresa en los municipios de estudio	138
4.1.4. Huella Hídrica Azul del cultivo de zarzamora en los municipios de estudio	143
4.2. Relación entre la Huella Hídrica Azul y las prácticas tecnológicas por cultivo	148
4.2.1. Síntesis tecnológica comparativa	151
4.2.2. Resultados de la Huella Hídrica Azul en Jacona, Michoacán	152
4.2.3. Huella Hídrica Azul en Zamora, Michoacán	156
4.2.4. Huella hídrica azul en Los Reyes, Michoacán	160
4.2.5. Huella hídrica azul en Tangancícuaro, Michoacán	165
CAPÍTULO V	176
Impactos de la huella hídrica azul en la disponibilidad del agua	176
Capítulo VI	184
Estrategias para la gestión sustentable del agua en la agroindustria del Bajío de Michoacán. Hacia una gestión sustentable del agua en la agroindustria del Bajío en Michoacán.	184
Capítulo VII	191
Conclusiones generales	191
Referencias bibliográficas	196
Anexos	203
Anexo 1	203
Anexo 2	206

Índice de tablas

Tabla 1. Fases metodológicas de la investigación para el cálculo de la huella hídrica azul en el Bajío de Michoacán.....	27
Tabla 1.2.4. Comparación de sistemas de riego, eficiencia de aplicación y consideraciones de sustentabilidad en el uso del agua agrícola.....	44
Tabla 2.3.1.1. Resultados de la revisión bibliográfica en Scopus según categorías de búsqueda relacionadas con la huella hídrica y la sustentabilidad agroindustrial.....	60
Tabla 2.3.1.2. Síntesis de la literatura especializada sobre huella hídrica, sustentabilidad y agroindustria en México.....	61
Tabla 2.3.1.3. Sistematización de la literatura científica en Google Scholar sobre huella hídrica, sustentabilidad y agroindustria en México.....	63
Tabla 2.3.1.4. Referencias clave para el análisis de la huella hídrica, sustentabilidad y la agroindustria en México.....	64
Tabla 2.3.4. Abreviaturas, unidades y definición de variables empleadas en el cálculo de la Huella Hídrica Azul.....	85

Tabla 4.1.1. Huella hídrica azul (m ³ /ton) del cultivo de arándano en municipios del Bajío de Michoacán (2013–2023).....	123
Tabla 4.1.2. Huella hídrica azul (m ³ /ton) del cultivo de frambuesa en los municipios de Jacona, Los Reyes, Tangancícuaro y Zamora (2011–2023).....	129
Tabla 4.1.3. Huella hídrica azul (m ³ /ton) del cultivo de fresa en los municipios de Jacona, Los Reyes, Tangancícuaro y Zamora (periodo analizado).....	134
Tabla 4.1.4. Huella hídrica azul (m ³ /ton) del cultivo de zarzamora en los municipios de Jacona, Los Reyes, Tangancícuaro y Zamora (2011–2023).....	138
Tabla 4.2. Relación entre sistemas tecnológicos, huella hídrica azul y riesgo bajo el enfoque de sustentabilidad fuerte en cultivos de berries en el Bajío de Michoacán.....	143
Tabla 4.2.2. Huella hídrica azul (m ³ /ton) por cultivo (arándano, frambuesa, fresa y zarzamora) en el municipio de Jacona, Michoacán (periodo analizado).....	146
Tabla 4.2.3. Huella hídrica azul (m ³ /ton) por cultivo (arándano, frambuesa, fresa y zarzamora) en el municipio de Zamora, Michoacán (periodo analizado).....	150
Tabla 4.2.4. Huella hídrica azul (m ³ /ton) por cultivo (arándano, frambuesa, fresa y zarzamora) en el municipio de Los Reyes, Michoacán (2011–2023).....	154
Tabla 4.2.5. Huella hídrica azul (m ³ /ton) por cultivo (arándano, frambuesa, fresa y zarzamora) en el municipio de Tangancícuaro, Michoacán (2011–2023).....	158
Tabla 4.2.6. Dinámica de la tecnificación, comportamiento de la huella hídrica azul e implicaciones bajo el enfoque de sustentabilidad fuerte en municipios productores de berries del Bajío de Michoacán.....	161
Tabla 4.2.7. Síntesis comparativa de la Huella Hídrica Azul y desempeño relativo por cultivo en el Bajío michoacano.....	164
Tabla 5.1. Condición hidrológica de los acuíferos en municipios estratégicos del Bajío michoacano y su balance hídrico anual.....	170
Tabla 5.2. Matriz comparativa de casos de estudio cualitativos – Huella Hídrica y Sustentabilidad en Agroindustria.....	173

Índice de figuras

Imagen 1. Metodología de investigación sobre el cálculo de la huella hídrica azul en el Bajío de Michoacán.....	29
Figura 1.1.2. Componentes de la huella hídrica: verde, azul y gris en un sistema agrícola.....	33
Figura 1.1.3. Sustentabilidad débil y la sustentabilidad fuerte: representación conceptual de la relación entre la naturaleza, la sociedad y la economía.....	39
Figura 1.1.5. Economía circular y resiliencia en el sector del agua.....	38
Figura 1.2.1. Recursos de agua dulce renovables per cápita en el mundo 2020....	43
Figura 1.3.5. Sistema de producción tecnificada de berries bajo macrotúnel y acolchado plástico.....	50

Figura 1.3.6. Procedimientos para la evaluación y el cálculo de la huella hídrica azul, el indicador de presión hídrica azul (IPHA) y la productividad económica del agua.....	51
Figura 2.3. Flujo metodológico para el análisis de la huella hídrica y la sustentabilidad en la agroindustria.....	58
Figura 2.3.2. Justificación de la región del Bajío de Michoacán como área de estudio en el análisis de la huella hídrica y la agroindustria de berries.....	67
Figura 2.3.3. Esquema metodológico para la medición de la huella hídrica en la agroindustria del Bajío michoacano con base en el enfoque de Hoekstra et al. (2011).....	68
Figura 2.3.4.1. Metodología para el cálculo de la huella hídrica azul (HHA) en sistemas agrícolas basada en el enfoque de Hoekstra et al. (2011).....	70
Figura 2.3.4.2. Procedimiento para el cálculo de la huella hídrica azul.....	74
Figura 2.3.4.3. La huella hídrica azul como indicador de la sustentabilidad del agua.....	77
Figura 3.1. Mapa de relieve de municipios clave: estado de Michoacán, México (Tangancícuaro, Los Reyes, Jacona, Zamora).....	95
Figura 3.2.1. Mapa de distribución de acuíferos y productores de berries: municipio de Los Reyes, Michoacán, México.....	98
Figura 3.2.2. Mapa de distribución de acuíferos y productores de berries: municipio de Jacona, Michoacán, México.....	101
Figura 3.2.3. Mapa de distribución de acuíferos y productores de berries: municipio de Tangancícuaro, Michoacán, México.....	104
Figura 3.2.4. Mapa de distribución de acuíferos y productores de berries: municipio de Zamora, Michoacán, México.....	106
Figura 3.4. Tecnologías aplicadas y nivel de adopción de la agroindustria 4.0..	114
Figura 3.5. Variedades tradicionales vs. variedades modernas/mejoradas en el uso del agua.....	118
Figura 4.1.1. Resultado comparativo de la huella hídrica azul (m ³ /ton) del cultivo de arándano en los municipios de Jacona, Los Reyes, Tangancícuaro y Zamora (2011–2023).....	126
Figura 4.1.2. Resultado comparativo de la huella hídrica azul (m ³ /ton) del cultivo de frambuesa en los municipios de Jacona, Los Reyes, Tangancícuaro y Zamora (2011–2023).....	131
Figura 4.1.3. Resultado comparativo de la huella hídrica azul (m ³ /ton) del cultivo de fresa en los municipios de Jacona, Los Reyes, Tangancícuaro y Zamora (2011–2023).....	136
Figura 4.1.4. Resultado comparativo de la huella hídrica azul (m ³ /ton) del cultivo de zarzamora en los municipios de Jacona, Los Reyes, Tangancícuaro y Zamora (2011–2023).....	140
Figura 4.2.2. Huella hídrica azul (m ³ /ton) por cultivo (arándano, frambuesa, fresa y zarzamora) en el municipio de Jacona, Michoacán (2011–2023).....	148

Figura 4.2.3. Huella hídrica azul (m ³ /ton) por cultivo (arándano, frambuesa, fresa y zarzamora) en el municipio de Zamora, Michoacán (2011–2023).....	152
Figura 4.2.4. Huella hídrica azul (m ³ /ton) por cultivo (arándano, frambuesa, fresa y zarzamora) en el municipio de Los Reyes, Michoacán (2011–2023).....	155
Figura 4.2.5. Huella hídrica azul (m ³ /ton) por cultivo (arándano, frambuesa, fresa y zarzamora) en el municipio de Tangancícuaro, Michoacán (2011–2023).....	160

Introducción

La agroindustria exportadora en México ha atravesado, en décadas recientes, una considerable reestructuración, convirtiéndose en uno de los motores fundamentales del crecimiento económico en áreas rurales de importancia estratégica. El aguacate y, especialmente, las berries (arándano, frambuesa, fresa y zarzamora) son algunos de los cultivos que han resaltado en este proceso de especialización productiva. Se trata de cultivos con un alto valor comercial, orientados a mercados internacionales (Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural [SADER], 2023; Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera [SIAP], 2023). El Bajío de Michoacán se ha establecido como una región fundamental en este escenario, debido a que posee condiciones agroclimáticas beneficiosas, infraestructura productiva avanzada y un alto nivel de integración a cadenas globales de valor.

Sin embargo, este modelo intensivo de agroindustria ha conducido a un uso cada vez más sostenido y elevado de recursos naturales estratégicos, sobre todo del agua, cuya recolección proviene en gran parte de fuentes subterráneas y superficiales. La ampliación de la agricultura tecnificada ha causado, por lo tanto, una presión importante en los acuíferos regionales, lo que ha llevado a situaciones de explotación excesiva, reducción de los niveles de recarga y disputas socioambientales por el recurso (Comisión Nacional del Agua [CONAGUA], 2022; Martínez-Saldaña et al., 2021). Esta cuestión se vuelve más importante en un entorno de variabilidad climática, en el cual la disponibilidad de agua se torna cada vez más incierta y vulnerable.

En este contexto, el presente estudio se basa en la necesidad de examinar de forma completa la conexión entre el modelo agroexportador y la sustentabilidad hídrica, teniendo en cuenta no solo aspectos técnicos y productivos, sino también factores económicos, territoriales y socioambientales. En este sentido, se utiliza como instrumento principal el enfoque de la huella hídrica, en especial su elemento azul, que hace posible calcular la cantidad de agua dulce utilizada y retirada en los procesos productivos agrícolas (Hoekstra et al., 2011; Mekonnen & Hoekstra, 2011). Este indicador permite determinar comparaciones entre cultivos, municipios y grados de tecnificación, además de reconocer patrones en el empleo del recurso hídrico y la presión sobre este.

Además, el paradigma de la sustentabilidad fuerte, que entiende que el agua es un capital natural insustituible y esencial, sujeto a límites ecológicos que no pueden

ser sobrepasados sin poner en riesgo la viabilidad de los sistemas socioecológicos (Leff, 2014; Neumayer, 2003, 2010), es la base de esta investigación. Bajo este enfoque, la evaluación del uso del agua supera la simple eficiencia técnica, al integrar dimensiones como la justicia ambiental y territorial, junto con el principio de equidad intergeneracional. Estos componentes son esenciales para guiar una administración sustentable del recurso hídrico en contextos marcados por una intensidad productiva elevada.

Bajo este enfoque teórico, la tesis se organiza en siete capítulos interconectados que abordan de forma articulada y progresiva el problema de investigación. Inicialmente, el Capítulo 1, que aborda el marco teórico-conceptual y el estado del arte en relación con la huella hídrica y la sustentabilidad, establece los cimientos analíticos que respaldan la investigación. En la presente sección se lleva a cabo un análisis crítico de la literatura especializada en la huella hídrica, la agroindustria 4.0 y la sustentabilidad fuerte, incorporando perspectivas derivadas de la ecología política del agua y la economía ecológica (Boelens, 2014; Hoekstra et al., 2011; Leff, 2014). Así, se crea un marco de análisis que facilita la comprensión de las interacciones entre la utilización del agua, los procesos productivos y las dinámicas a nivel territorial.

El capítulo 2 se basa en esta fundamentación teórica. Los métodos de investigación describen el diseño metodológico que se ha elegido, basado en una perspectiva mixta con un enfoque cuantitativo predominante, pero también complementado con herramientas cualitativas. Las fases del cálculo de la huella hídrica azul mediante el modelo CROPWAT (Allen et al., 1998; Hoekstra et al., 2011) y la implementación del estudio de caso múltiple se explican en este capítulo. Además, se incluyen indicadores adicionales como el Indicador de Presión Hídrica Azul (IPHA) y la productividad económica del agua, lo que posibilita vincular el análisis técnico con las dimensiones territorial y económica. Por lo tanto, esta sección establece la base operativa que orienta el desarrollo empírico del estudio.

El capítulo 3 se basa en la metodología previamente establecida. En el contexto de la agroindustria 4.0, la agroindustria del Bajío de Michoacán proporciona una descripción integral de la región objeto de estudio. Este capítulo examina las siguientes dimensiones: las condiciones geológicas del territorio, la distribución de los cultivos, el nivel de modernización en la agricultura y las prácticas productivas más prevalentes. Se examina igualmente la implementación de tecnologías asociadas a la

agricultura 4.0, tales como el riego presurizado, la monitorización de factores agroclimáticos y la automatización de procesos productivos (Wolfert et al., 2017; Klerkx et al., 2019).

Esta caracterización facilita la comprensión de los fundamentos estructurales que establecen cómo se utiliza el agua en la región, lo cual constituye un puente analítico hacia la medición de la huella hídrica.

Siguiendo con lo anterior, el capítulo 4. Los resultados de la evaluación de la huella hídrica en los cultivos de berries en el Bajío presentan las conclusiones obtenidas a partir del cálculo de la huella hídrica azul. En esta sección, se muestran comparaciones entre cultivos y municipios, donde se detectan diferencias relevantes en la eficiencia del uso del agua y en la intensidad hídrica. También se estudia la relación entre el consumo de agua y el nivel de tecnificación, mostrando que aunque la innovación tecnológica optimiza la eficiencia del uso del agua, no disminuye necesariamente el volumen total consumido debido a causa de procesos de intensificación productiva (Grafton et al., 2018; Ramírez-Montoya et al., 2022).

Como resultado de estos descubrimientos, el capítulo 5. Los efectos de la huella hídrica azul en la disponibilidad del agua se adentra en las consecuencias que tiene el consumo de agua en la región. Este capítulo establece cómo se relacionan la huella hídrica, la disponibilidad del recurso y su impacto en el agua y en las dinámicas sociales y económicas locales. Así, se hacen evidentes las tensiones que hay entre el crecimiento del modelo agroexportador y la sustentabilidad hídrica, lo cual subraya la urgencia de replantear las estrategias de administración del recurso (CONAGUA, 2022; Mekonnen & Hoekstra, 2011).

El capítulo 6 se basa en el diagnóstico previo. El conjunto de medidas sugeridas en "Estrategias para la gestión sustentable del agua en la agroindustria de las berries del Bajío" se orienta hacia la optimización de la utilización del agua y el fortalecimiento de la gobernanza hídrica. Estas estrategias engloban la implementación de tecnologías eficientes, prácticas agrícolas sustentables y orientaciones de políticas públicas orientadas a la conciliación entre la productividad agrícola y la conservación del agua (Boulay et al., 2018; UNESCO, 2023). En este contexto, el capítulo expone propuestas que abordan los desafíos identificados en las secciones precedentes, con un enfoque robusto en la sustentabilidad.

Finalmente, el capítulo 7, denominado El debate y las conclusiones generales de la tesis, incorpora los descubrimientos más significativos del estudio, que se

contrastan con el marco teórico y la literatura especializada. Este capítulo ofrece un examen crítico de la viabilidad del modelo agroexportador en circunstancias de insuficiencia hídrica, destacando tanto sus restricciones como sus potencialidades. Adicionalmente, se evidencian las aportaciones más significativas de la investigación y se proponen líneas de investigación futuras destinadas a profundizar en el examen de la interrelación entre el agua, el territorio y el desarrollo sustentable.

Esta disertación contribuye a la comprensión holística del uso del agua en los sistemas agroindustriales de exportación, mediante la provisión de instrumentos analíticos y evidencia empírica que facilitan el examen de la sustentabilidad hídrica desde una perspectiva territorial. La investigación, al combinar perspectivas económicas, técnicas y socioambientales, no solo mide la cantidad de agua utilizada, sino que además analiza las consecuencias en cuanto a la gobernanza, la equidad y la viabilidad ecológica. De este modo, proporciona elementos esenciales para elaborar políticas públicas que se enfoquen en la administración sustentable del recurso hídrico en México.

I. Planteamiento del problema

En las últimas décadas, el crecimiento exponencial de la agroindustria de exportación en México, especialmente en áreas como la fértil región del Bajío de Michoacán, ha provocado una considerable presión sobre los recursos hídricos, principalmente mediante la implementación de sistemas de riego altamente demandantes que hacen uso de fuentes de agua superficial como de subterránea. Esta problemática es particularmente inquietante si tenemos en cuenta el incremento en la demanda a nivel mundial de productos agrícolas como el aguacate, las bayas y el jitomate, los cuales necesitan cantidades exorbitantes de agua para su cultivo, resultando en una huella hídrica considerable que pone en riesgo la sustentabilidad ecológica de las zonas donde se producen (Flores-López et al., 2020).

La huella hídrica, dividida en sus distintos elementos como el agua azul (proveniente de fuentes superficiales y subterráneas), el agua verde (que corresponde al agua de lluvia retenida en el suelo) y el agua gris (relacionada con la contaminación hídrica), se ha posicionado como un indicador fundamental para analizar el impacto que tiene la utilización del recurso hídrico en las actividades agrícolas. No obstante, la recolección de datos y su posterior evaluación en situaciones particulares, como la

relacionada con la industria agroalimentaria destinada a la exportación en la región del Bajío-Michoacán, todavía es limitada, está incompleta o no abarca la compleja interrelación entre los aspectos tecnológicos, socioambientales y políticos relacionados con el uso del recurso hídrico (Mekonnen & Hoekstra, 2011).

La revolución agrícola 4.0 ha introducido tecnologías innovadoras destinadas a optimizar de manera significativa la utilización de los recursos hídricos. Estas tecnologías incluyen el sistema de riego por goteo, sensores avanzados de humedad y sofisticadas plataformas digitales concebidas para una gestión óptima del agua. No obstante, la puesta en práctica de estas tecnologías innovadoras presenta variaciones significativas y se encuentra condicionada por una serie de factores, entre los que se incluyen el entorno económico, las particularidades culturales y la disponibilidad de una infraestructura apropiada. Esta intrincada circunstancia implica una marcada discrepancia en los índices de huella hídrica detectados entre varios productores y tipos de cultivos, lo que constituye un obstáculo considerable en la formulación e implementación de estrategias holísticas de sustentabilidad (Ramírez-Montoya et al., 2022).

Adicionalmente, el notable incremento de la huella hídrica azul en áreas con elevados índices de estrés hídrico ha precipitado conflictos vinculados a la administración del agua (por ejemplo, la explotación intensiva del acuífero del Valle de San Quintín, Baja California, vinculada al crecimiento de la agroindustria hortícola de exportación y sus consecuencias en el suministro urbano; la crisis hídrica en la cuenca Lerma–Chapala–Santiago, vinculada al uso intensivo para el riego agrícola; o el caso del acuífero de Doñana, España, afectado por la expansión del cultivo de frutos rojos en condiciones de escasez) (CONAGUA, 2020; Hoekstra & Mekonnen, 2012; WWF, 2021). Estos factores han inducido un deterioro progresivo de los acuíferos, una reducción significativa en la calidad del recurso hídrico y consecuencias adversas en su disponibilidad para otros propósitos, como la insuficiencia de agua potable.

Dentro del marco mexicano, la Comisión Nacional del Agua ha documentado que un porcentaje considerable de los acuíferos del país se encuentra en un estado de sobreexplotación, particularmente en regiones con prácticas de agricultura intensiva bajo riego. Esta circunstancia intensifica la tensión sobre el agua subterránea y suscita tensiones entre las aplicaciones agrícolas, urbanas y medioambientales (CONAGUA,

2020). Las investigaciones a nivel mundial sobre la huella hídrica han puesto de manifiesto que la producción agrícola orientada a la exportación posee la capacidad de transferir de manera virtualmente significativa grandes volúmenes de agua desde regiones con estrés hídrico hacia mercados externos, intensificando de esta manera las desigualdades territoriales en la accesibilidad del recurso (Hoekstra & Mekonnen, 2012). Además, en ecosistemas de importancia estratégica como Doñana, la extracción intensiva de agua subterránea para la producción de frutas ha sido identificada como un factor determinante en la degradación ecológica y en las disputas socioambientales entre productores agrícolas, autoridades y organizaciones ambientales (WWF 2021).

Todo ello plantea un desafío urgente: la generación de evidencia empírica y la territorialmente diferenciada que permita examinar la distribución y gestión de la huella hídrica en estos complejos agroindustriales, y las consecuencias que esto conlleva para la sustentabilidad hídrica a escala regional (CONAGUA, 2020).

En consecuencia, el objetivo principal de este estudio es examinar y cuantificar sistemáticamente la huella hídrica azul asociada a las cosechas agroindustriales del Bajío en Michoacán, con el objetivo de establecer su repercusión en la sustentabilidad hídrica de la región. Para alcanzar este objetivo, se utiliza una metodología estructurada que amalgama la estimación estandarizada de la huella hídrica con instrumentos tecnológicos inherentes a la agricultura 4.0, tales como el modelado hidrológico, el análisis digital de datos productivos y los sistemas de monitoreo agroclimático. Para establecer patrones de consumo hídrico, evaluar los niveles de eficiencia hídrica y cuantificar las repercusiones socioeconómicas y ambientales, se aspira a producir evidencia empírica robusta y geográficamente heterogénea. De acuerdo con la UNESCO (2023), el propósito de la investigación es suministrar recursos técnicos y científicos verificables que faciliten la formulación de políticas públicas, el fortalecimiento de la gobernanza hídrica y la toma de decisiones productivas orientadas hacia la responsabilidad ambiental y la eficiencia.

II. Justificación

La creciente demanda a nivel global de productos agroalimentarios mexicanos de alto valor comercial ha fomentado la expansión de la agroindustria de exportación en áreas estratégicas como el Bajío de México. Este procedimiento ha potenciado la

producción de frutas y aguacate; no obstante, ha intensificado la presión sobre el agua subterránea, particularmente en regiones con prácticas agrícolas intensivas y disponibilidad hídrica restringida (SADER, 2023; CONAGUA, 2024).

La huella hídrica azul facilita la estimación del volumen de agua superficial y subterránea consumida durante la etapa de producción agrícola. En los cultivos destinados a la exportación, este indicador es esencial, dado que desvela no solo la eficiencia ostensible del sistema, sino también su impacto ecológico sobre acuíferos y cuencas. Investigaciones contemporáneas en México corroboran que las sequías incrementan la dependencia del riego y intensifican la huella hídrica en la agricultura (Novoa et al., 2024).

En el contexto de Michoacán, estudios contemporáneos sobre el aguacate indican que la huella hídrica debe ser evaluada territorialmente, teniendo en cuenta factores como el clima, el rendimiento, las concesiones de agua y la disponibilidad efectiva del acuífero. Fuerte-Velázquez et al. (2024) ponen de manifiesto que la proporción entre agua verde y azul fluctúa en función del municipio, lo que subraya la necesidad de investigaciones diferenciadas para cultivos agroexportadores tales como frutas, aguacate y otros frutales.

La problemática hídrica del Bajío Michoacano se intensifica debido a la explotación excesiva de acuíferos de importancia estratégica. Para el acuífero Zamora, la CONAGUA reporta una recarga promedio anual de 308.5 hm³, una extracción de 180.2 hm³ y una disponibilidad negativa de -15.91 hm³, lo que corrobora un escenario de presión estructural sobre el recurso hídrico regional.

Bajo un sólido enfoque de sustentabilidad, la productividad económica en la agricultura no puede ser evaluada meramente en función del valor de mercado o del volumen exportado. Es imperativo realizar un análisis comparativo con los límites biofísicos, la disponibilidad hídrica y la capacidad de regeneración del ecosistema. La Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO) alerta que la administración sostenible del agua demanda colaboración intersectorial, gobernanza territorial y la salvaguarda simultánea de la seguridad alimentaria, los ecosistemas y medios de vida en áreas rurales (UNESCO, 2023).

La integración de indicadores tales como la productividad económica del agua (\$/m³) y el Indicador de Presión Hídrica Azul (IPHA) robustece el estudio doctoral, ya que facilita la correlación entre la eficiencia productiva, la rentabilidad territorial y la presión ecológica. Esta metodología trasciende la medición volumétrica aislada y

posibilita la evaluación de si la agroindustria exportadora opera dentro de parámetros que son compatibles con la sustentabilidad hídrica regional.

Además, las investigaciones contemporáneas en torno al metabolismo socioecológico del agua en cultivos de alto valor comercial evidencian la utilidad de integrar la disponibilidad, las necesidades hídricas, el valor productivo y el estrés relativo del agua. Escamilla et al. (2023) llevaron a cabo un análisis de cultivos como el aguacate y los berries, evidenciando que la expansión agrícola debe ser evaluada en relación con limitaciones territoriales y no meramente desde una perspectiva económica.

En consecuencia, este estudio adquiere importancia académica, ambiental y social al sugerir una metodología integrada para el análisis de la huella hídrica azul, la agroindustria 4.0, la productividad económica del agua y la presión territorial. Su contribución primordial radica en la producción de evidencia empírica para guiar políticas públicas, la tecnificación agrícola responsable y las estrategias de administración sostenible del agua en regiones agroexportadoras de México.

III. Objetivos de la investigación

Objetivo general

Analizar el impacto de la huella hídrica azul generada por la agroindustria de berries en la sustentabilidad de los recursos hídricos del Bajío de Michoacán, mediante una evaluación comparativa por cultivo y municipio que integre variables técnicas, productivas y tecnológicas bajo un enfoque de sustentabilidad fuerte.

Objetivos específicos

- La tarea consiste en calcular y contrastar la huella hídrica azul correspondiente a los cultivos de fresa, arándano, frambuesa y zarzamora en los municipios de Zamora, Tangancícuaro, Los Reyes y Jacona.
- Se realizará un análisis de la correlación entre el grado de adopción tecnológica (agroindustria 4.0) y la eficacia en la utilización del agua azul en los sistemas de producción de los frutos rojos (berries).
- El objetivo es identificar las repercusiones ambientales y económicas derivadas del consumo de agua azul en la disponibilidad regional del recurso hídrico, identificando componentes estratégicos para robustecer la administración sustentable del agua.

IV. Pregunta general y preguntas particulares

Pregunta general

¿Cuál es la repercusión de la huella hídrica azul producida por la agroindustria de las berries (frutos rojos) en la sustentabilidad de los recursos hídricos del Bajío de Michoacán, teniendo en cuenta las variedades tecnológicas y productivas entre los cultivos?

Preguntas específicas

- ¿Cómo se cuantifica comparativamente la huella hídrica azul en los cultivos de fresa, arándano, frambuesa y zarzamora en los municipios de Zamora, Tangancícuaro, Los Reyes y Jacona?
- ¿Existen variaciones notables en el consumo de agua azul vinculadas con el grado de adopción de tecnologías de la agroindustria 4.0 y las prácticas de gestión agrícola?
- ¿Cuáles son las repercusiones medioambientales, económicas y territoriales que la huella hídrica azul tiene en la disponibilidad regional del recurso hídrico en el Bajío de Michoacán?

V. Hipótesis de investigación

“La huella hídrica azul producida por la industria de berries tiene un impacto considerable en la sustentabilidad de los recursos hídricos del Bajío de Michoacán, evidenciándose diferencias estadísticamente notables entre los cultivos, las entidades municipales y los grados de adopción tecnológica”.

VI. Marco teórico-conceptual

Huella hídrica: medición y significado territorial

La huella hídrica (HH) representa un indicador integral concebido para medir el volumen total de agua dulce empleada, tanto directa como indirectamente, en la generación de bienes y servicios a lo largo de toda su cadena de valor. Esta metodología posibilita la superación de las mediciones convencionales de extracción o concesión de agua, al integrar el uso efectivo del recurso hídrico en términos volumétricos y territoriales (Hoekstra & Chapagain, 2008). Desde su conceptualización inicial, la huella hídrica se ha establecido como un estándar internacional para la evaluación de la apropiación humana del agua, especialmente en

sistemas agroindustriales de alta intensidad (Hoekstra et al., 2011).

Desde una perspectiva metodológica, la huella hídrica se caracteriza por tres elementos esenciales: el agua verde, que se refiere a la precipitación acumulada en el suelo y utilizada por los cultivos; el agua azul, que se refiere al volumen de agua superficial o subterránea extraída para riego u otros procesos productivos; y el agua gris, que simboliza el volumen necesario para absorber la carga contaminante producida durante la producción hasta alcanzar estándares de calidad ambiental aceptables (Hoekstra & Chapagain, 2008; Hoekstra et al., 2011). Esta clasificación facilita un reconocimiento más preciso de la presión aplicada a diversas fuentes hídricas, lo que posibilita evaluaciones diferenciadas en función de la disponibilidad regional y de la capacidad de recarga.

La relevancia analítica de esta clasificación radica en que no todos los elementos ejercen un impacto territorial uniforme. Aunque el agua verde se rige por el régimen natural de precipitación, el agua azul se extrae directamente de acuíferos o de cuerpos superficiales, lo cual puede favorecer situaciones de sobreexplotación cuando la tasa de extracción supera la recarga natural (Mekonnen & Hoekstra, 2011). En áreas agrícolas equipadas con sistemas de riego intensivo, como el Bajío de Michoacán, el componente azul adquiere una importancia estratégica considerable debido a su conexión directa con la disponibilidad física del recurso y a la competencia intersectorial por el agua (Comisión Nacional del Agua [CONAGUA], 2022)

En el ámbito agrícola, la huella hídrica se ha consolidado como un instrumento esencial para la valoración de la eficiencia en el uso del agua, teniendo en cuenta factores tales como la variedad de cultivos, el sistema de riego, las condiciones agroclimáticas y el rendimiento productivo (Mekonnen & Hoekstra, 2011). La puesta en marcha de esta estrategia permite la representación del consumo hídrico en términos normalizados, frecuentemente $\text{m}^3 \cdot \text{ton}^{-1}$ o $\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$, lo que facilita las comparaciones entre cultivos y territorios. Esta competencia comparativa adquiere una importancia específica en sistemas agroindustriales orientados hacia la exportación, en los que la competitividad económica puede ocultar costos ambientales asociados con la utilización intensiva del recurso hídrico.

Adicionalmente, la huella hídrica posee una importancia política y geográfica que trasciende su naturaleza técnica. El indicador, al correlacionar el volumen de agua

consumida con la ubicación geográfica de la producción, pone de manifiesto procesos de transferencia virtual de agua entre regiones productoras y consumidoras, fenómeno denominado comercio de agua virtual (Hoekstra & Chapagain, 2008). En el contexto de cultivos destinados a la exportación, esta dinámica puede conllevar que regiones con escasez de agua transfieran volúmenes significativos de agua incorporada en productos agrícolas hacia mercados internacionales, lo que puede desencadenar tensiones socioambientales a nivel local (Mekonnen & Hoekstra, 2011).

Desde un enfoque de sustentabilidad sólida, el análisis territorial de la huella hídrica facilita la evaluación de si el capital natural hídrico se está empleando dentro de límites ecológicos que permiten su regeneración. Cuando la huella hídrica azul sobrepasa la disponibilidad renovable del recurso, se ponen en marcha escenarios de presión hídrica estructural que ponen en riesgo la viabilidad ecológica y social a largo plazo (Lef, 2014). En este contexto, la cuantificación de la huella hídrica no se limita a ser un ejercicio técnico de cuantificación volumétrica, sino que se convierte en un instrumento estratégico para la formulación de políticas públicas enfocadas en la administración sustentable del agua en áreas agrícolas de elevada productividad.

Por lo tanto, la huella hídrica, específicamente su componente azul, se establece como un indicador esencial para entender la interrelación entre la agroindustria, el territorio y la sustentabilidad hídrica, al integrar dimensiones hidrológicas, productivas y socioeconómicas dentro de un marco analítico multidisciplinario.

Agroindustria 4.0: intensificación tecnológica y uso del agua

La agricultura del futuro, también denominada agroindustria 4.0, alude a la incorporación de tecnologías digitales de vanguardia —tales como sensores a distancia, sistemas de información geográfica, análisis de grandes volúmenes de datos (big data), inteligencia artificial, internet de las cosas (IoT) y sistemas de riego automatizado— en los procesos productivos agrícolas. Este enfoque tiene como objetivo la optimización de la productividad, la mejora de la trazabilidad y el incremento de la eficiencia en la utilización de insumos estratégicos, en particular el agua (Walter et al., 2017; Wolfert et al., 2017). Este modelo tecnológico se enmarca en la denominada cuarta revolución industrial aplicada al sector primario, que se distingue por la digitalización de la agricultura y la toma de decisiones fundamentada en datos en tiempo real (Klerkx et al., 2019).

Dentro del marco mexicano, la incorporación progresiva de tecnologías vinculadas a la agroindustria 4.0 ha facilitado la metamorfosis del modelo de exportación, particularmente en regiones de alta especialización como el Bajío de Michoacán. En esta región, cultivos de alta tecnología, tales como el aguacate y las berries, demandan sistemas de fertirriego presurizado, monitoreo de la humedad del suelo y control automatizado de variables productivas para preservar estándares de calidad orientados hacia mercados globales (SIAP, 2023). La digitalización en la agricultura ha facilitado un incremento en la precisión en la programación del riego y en la administración de nutrientes, lo que ha propiciado potenciales mejoras en la eficiencia hídrica (Wolfert et al., 2017).

No obstante, varias investigaciones indican que la integración de tecnologías de vanguardia no asegura de manera automática la sustentabilidad hídrica a largo plazo. Desde la perspectiva de la economía ambiental, el concepto conocido como "efecto rebote" o paradoja de la eficiencia indica que las mejoras tecnológicas tienen la capacidad de disminuir el consumo unitario de recursos, pero simultáneamente fomentar la expansión productiva, lo que a su vez incrementa el consumo total de agua (Grafton et al., 2018). En los sistemas agrícolas destinados a la exportación, dicha dinámica puede materializarse en la expansión de la superficie cultivada o en la intensificación de los ciclos productivos, lo que puede generar presiones adicionales sobre los acuíferos locales.

En América Latina, investigaciones recientes han evidenciado que la modernización tecnológica, si no se acompaña de regulaciones efectivas de extracción y gobernanza hídrica, puede intensificar procesos de sobreexplotación en regiones con estrés hídrico estructural (Grafton et al., 2018; Ramírez-Montoya et al., 2022). Desde esta perspectiva, la eficiencia técnica no siempre se asocia con la sustentabilidad ecológica, especialmente cuando el capital natural hídrico se percibe como un insumo sustituible y no como un límite biofísico (Leff, 2014).

Ramírez-Montoya et al. (2022) indican que la implementación de la digitalización agrícola en escenarios latinoamericanos ha propiciado avances en productividad y competitividad a nivel global; sin embargo, también ha agudizado las disparidades territoriales en el acceso al agua y ha consolidado modelos de especialización productiva dependientes de recursos naturales limitados. En consecuencia, la valoración del efecto de la agroindustria 4.0 debe superar los indicadores de rendimiento y tomar en cuenta métricas holísticas como la huella

hídrica azul, que facilitan el análisis de la presión real aplicada sobre fuentes superficiales y subterráneas.

Desde una perspectiva de sustentabilidad sólida, la integración tecnológica solo puede considerarse sustentable si se rige por los límites ecológicos de la disponibilidad hídrica regional y si contribuye a la reducción, y no a la expansión o el desplazamiento, de la presión sobre los acuíferos (Hoekstra et al., 2011; Leff, 2014). Por lo tanto, este estudio realiza un análisis crítico del papel de la agroindustria 4.0 en el Bajío de Michoacán, evaluando empíricamente si la tecnificación agrícola resulta en una disminución efectiva de la huella hídrica azul o si, en cambio, propicia dinámicas de intensificación productiva que ponen en riesgo la sustentabilidad hídrica territorial.

Sustentabilidad fuerte: límite ecológico y justicia ambiental

Desde finales del siglo XX, el concepto de sustentabilidad ha sido objeto de un extenso debate teórico y normativo. Aunque ciertas corrientes, frecuentemente vinculadas a enfoques económicos neoliberales, conceptualizan la sustentabilidad como una cuestión de eficiencia en la distribución de recursos y de sustitución entre capital natural y capital manufacturado, otros enfoques críticos postulan que determinados elementos del capital natural presentan restricciones biofísicas insuperables y no pueden ser sustituidos por la innovación tecnológica o expansión económica (Neumayer, 2010). Esta diferenciación ha propiciado la distinción entre la sustentabilidad débil y la sustentabilidad fuerte.

La sustentabilidad débil presupone que el capital natural puede ser reemplazado por capital producido, siempre que el valor agregado total se mantenga invariable. En contraposición, el enfoque de sustentabilidad fuerte postula que ciertos bienes ecológicos —tales como los acuíferos, la biodiversidad o los ciclos hidrológicos— representan capital natural esencial y, por ende, deben ser preservados dentro de los límites ecológicos seguros para asegurar la viabilidad de los sistemas socioecológicos (Neumayer, 2003). Bajo esta perspectiva, el agua supera su estatus de insumo productivo intercambiable, transformándose en un elemento estructural fundamental para la preservación ecológica y social de los territorios.

La sustentabilidad sólida implica también una dimensión ética y política. El enfoque no se limita a la preservación física del recurso hídrico, sino que incorpora principios de equidad intergeneracional, justicia distributiva y el reconocimiento del

derecho humano al agua, tal como lo ha ratificado la Asamblea General de las Naciones Unidas en el año 2010. En el marco de este escenario, la gestión hídrica debe garantizar un acceso equitativo entre las generaciones presentes y futuras, además de entre diversos estratos sociales, evitando que las dinámicas de mercado o los intereses corporativos comprometan la disponibilidad del recurso para las colectividades locales.

Esta perspectiva adquiere relevancia particular en regiones como el Bajío de Michoacán, donde la expansión del modelo agroexportador intensivo en agua se encuentra en contraste con territorios habitados por comunidades rurales que dependen de este recurso para su consumo doméstico y actividades productivas subyacentes. En circunstancias de estrés hídrico, la sustentabilidad robusta demanda una valoración no solo de la eficiencia técnica en el uso del agua, sino también de la distribución geográfica de las ventajas y costos ambientales asociados a la actividad agroindustrial.

Para una exploración más exhaustiva de dichas dinámicas, se incorpora el enfoque de la ecología política del agua, que se ocupa del examen de las relaciones de poder, la apropiación y el conflicto en relación con el control y distribución del recurso acuático. Bajo este enfoque, el agua trasciende su naturaleza meramente física para convertirse en un bien socialmente construido cuya gestión se ve atravesada por asimetrías institucionales, intereses económicos y contiendas territoriales (Boelens, 2014). La ecología política del agua facilita la comprensión de cómo, en contextos específicos, las políticas públicas y los marcos regulatorios pueden propiciar esquemas de concentración hídrica en sectores agroindustriales orientados hacia la exportación, en perjuicio de los usuarios locales o de ecosistemas vulnerables (Zwarteveen & Boelens).

En su totalidad, estos tres marcos teóricos —huella hídrica, agroindustria 4.0 y sustentabilidad fuerte— facilitan el tratamiento del fenómeno desde una perspectiva holística y sistémica. La huella hídrica ofrece una métrica cuantitativa del impacto volumétrico sobre el recurso; la agroindustria 4.0 ilustra las dinámicas de intensificación tecnológica y expansión productiva que pueden modificar los patrones de consumo hídrico; y la sustentabilidad fuerte, enriquecida con la ecología política del agua, establece los límites éticos, ecológicos y sociales requeridos para evaluar si el modelo agroexportador puede ser considerado auténticamente sustentable en

contextos de escasez estructural.

Por lo tanto, la integración de estas perspectivas posibilita superar una perspectiva meramente técnica de eficiencia productiva y progresar hacia un análisis territorial crítico que englobe dimensiones biofísicas, económicas y sociopolíticas del agua. Este marco teórico es esencial para la valoración de la viabilidad a largo plazo del modelo agroindustrial en regiones con elevada presión hídrica y para sustentar propuestas de gestión sustentable que honren los límites ecológicos y los derechos colectivos vinculados al recurso.

VII. Variables e indicadores

Variable dependiente

Se refiere al fenómeno que se pretende explicar o cuantificar. El comportamiento de la variable independiente es determinante. Incorpora elementos tales como la disponibilidad, calidad, el uso prudente del agua y la persistencia del recurso en la región a largo plazo.

Variable independiente

A medida que la agroindustria incrementa su huella hídrica, particularmente sin control y eficiencia tecnológica, disminuye la sustentabilidad del recurso hídrico en términos de disponibilidad y calidad en el Bajío de Michoacán.

Indicadores

Los indicadores de la huella hídrica azul y verde en la agroindustria de exportación en la región del Bajío de Michoacán y otras regiones agrícolas de México se centran en la cantidad y origen del agua utilizada durante todo el ciclo de producción agrícola. Estos indicadores permiten medir el impacto del uso del agua en la sustentabilidad hídrica, especialmente en productos agrícolas destinados a la exportación como aguacate, berries (fresas, arándanos) y tomate.

Huella Hídrica Azul (agua superficial o subterránea utilizada para riego)

Indicadores principales:

- ✓ Volumen de agua azul consumida por tonelada producida ($\text{m}^3/\text{tonelada}$).
- ✓ Índice de extracción de agua subterránea por hectárea cultivada.
- ✓ Relación entre agua extraída y recarga del acuífero (indicador de estrés hídrico).

- ✓ Dependencia del riego artificial en comparación con la lluvia.
- ✓ Porcentaje de agua azul destinada a cultivos de exportación frente al uso doméstico o ambiental.

VIII. Metodología

La elección del estudio de caso como estrategia metodológica primordial surge de la exigencia de una comprensión detallada de un territorio particular en el que confluyen presiones agrícolas, hídricas, tecnológicas y socioambientales. El Bajío de Michoacán se presenta como un escenario adecuado para este análisis, dado que en este territorio coexisten sistemas agroindustriales de exportación de alta tecnología, acuíferos con indicadores de sobreexplotación y dinámicas territoriales complejas.

El estudio de caso facilita la evaluación de fenómenos actuales en su contexto concreto, especialmente cuando las fronteras entre el fenómeno y su entorno no están claramente delimitadas (Yin, 2018). En el ámbito de las investigaciones socioambientales, esta estrategia adquiere particular relevancia, dado que facilita la integración de diversos niveles de análisis (local, municipal y regional) y diversas escalas de información (parcelaria, hidrológica y normativa). Esto promueve una comprensión sistémica de las interacciones entre cultivos, tecnologías, actores productivos y recursos naturales.

En el presente estudio se empleó un enfoque comparativo de casos múltiples, seleccionando unidades productivas y municipios representativos de la agroindustria de frutas de carácter berry con variados grados de incorporación tecnológica. La elección se basó en los siguientes criterios:

- Intensidad en la producción y relevancia en la exportación.- Acceso a datos agroclimáticos e hidrológicos.
- Diversidad en las tecnologías de riego, incluyendo el goteo convencional, el fertirriego automatizado y la monitorización digital.
- Ubicación geográfica en el Bajío Michoacano.

El propósito comparativo consistió en contrastar la huella hídrica azul ($m^3 \cdot ton^{-1}$ y $m^3 \cdot ha^{-1}$) entre cultivos (fresa, arándano, frambuesa y zarzamora) y entre municipios. Adicionalmente, se examinó su correlación con el grado de tecnificación agrícola y la presión hídrica regional.

Triangulación metodológica mediante triangulación metodológica mediante triangulación metodológica.

Con el objetivo de asegurar la robustez analítica y la validez interna, se instauró un protocolo de triangulación metodológica que integra instrumentos cuantitativos, espaciales y cualitativos.

El cálculo de la huella hídrica se realiza mediante la medición de la longitud de la huella.

Se empleó la metodología estandarizada del Manual de Evaluación del Footprint del Agua (Hoekstra et al., 2011), calculando el consumo de agua azul a través del cálculo del Consumo Hídrico del Cultivo (CWU) y el rendimiento en la producción.

El software CROPWAT (FAO) para la estimación de la evapotranspiración del cultivo (ETc), integrando datos climáticos de CLIMWAT y coeficientes de cultivo (Kc) por etapa fenológica.

Evaluación de la disponibilidad hídrica

El balance hídrico regional se calculó a partir de información oficial proporcionada por el SIAP y de estudios técnicos realizados en los acuíferos.

El Indicador de Presión Hídrica Azul (IPHA) fue desarrollado, estableciendo una correlación entre el consumo total agrícola de agua azul y la disponibilidad media anual de recursos renovables.

Fases metodológicas de la investigación

Las etapas de la investigación se organizan de forma articulada y secuencial para examinar en su totalidad la conexión entre la actividad agroindustrial, la huella hídrica y la sustentabilidad del recurso agua en el campo de estudio. Cada fase tiene un propósito particular, que va desde la revisión teórica y de documentos hasta el diseño de tácticas para una gestión sustentable, lo cual posibilita un enfoque metodológico robusto que combina análisis técnico, territorial y ambiental. Se describen a continuación las etapas que constituyen el desarrollo de la investigación. Como se muestra en la Tabla 1, la investigación se estructura en seis fases metodológicas que integran análisis técnico, territorial y de sustentabilidad.

Tabla 1. Procedimientos metodológicos en el estudio para el cálculo de la huella hídrica azul en el Bajío de Michoacán.

Fase	Descripción
1. Revisión de fuentes documentales.	Implementación de una sistematización de la literatura científica, bases de datos oficiales (SIAP, CONAGUA) y marcos normativos relacionados con la agroindustria, la huella hídrica y la sustentabilidad.
2. Demarcación territorial y delimitación geográfica.	La selección de municipios y cultivos representativos se realizará basándose en criterios de intensidad productiva, tecnificación y accesibilidad a la información.
3. Determinación de la huella hídrica azul.	Determinación de la huella hídrica azul de acuerdo con los parámetros establecidos .Hoekstra et al. (2011), realizaron una estimación de la ETc utilizando CROPWAT y distinguieron las etapas fenológicas y tecnologías de seguridad.
4. Evaluación de la disponibilidad hídrica	Estimación del balance hídrico y construcción del IPHA utilizando información oficial sobre disponibilidad y extracción.
5. Integración de los descubrimientos.	Existe una correlación entre el tipo de cultivo y el nivel de nutrientes. Tecnológico y la presión hídrica; creación de cartografía temática utilizando Sistemas de Información Geográfica.
6. Elaboración de estrategias	Elaboración de sugerencias tecnológicas y de administración sustentable del agua, adoptando un enfoque de fuerte sustentabilidad. Elaboración propia fundamentada en la metodología propuesta por Arjen Y. Hoekstra et al. (2011) y la implementación del modelo CROPWAT 8.0, incorporando datos provenientes de la plataforma SIAP.

Fuente: Elaboración propia fundamentada en la metodología propuesta por Arjen Y. De Hoekstra et al. (2011) y la implementación del modelo CROPWAT 8.0, incorporando datos provenientes de la plataforma SIAP.

De la tabla anterior se realiza la imagen 1. Metodología de la investigación, la cual nos muestra que la investigación se basa en una metodología sistemática para analizar la disponibilidad, el uso y la productividad del agua en el Bajío de Michoacán. El proceso metodológico se estructura en etapas interrelacionadas que abordan el fenómeno desde una perspectiva multidisciplinaria y territorial.

Se lleva a cabo un minucioso análisis documental, abarcando literatura científica, normativa y bases de datos especializadas, con el objetivo de establecer el marco teórico y contextual del estudio. La demarcación territorial se lleva a cabo mediante la selección de municipios y cultivos representativos, con el objetivo de centrar el análisis en zonas estratégicas de la región.

Se lleva a cabo un análisis de la disponibilidad hídrica a través del balance hídrico con el objetivo de identificar las condiciones y los grados de utilización del recurso. Se realiza un análisis econométrico, con el objetivo de valorar la productividad económica del agua en términos monetarios por unidad de volumen, lo cual facilita la evaluación de su eficiencia en el sistema productivo.

Se integran hallazgos de herramientas estadísticas y Sistemas de Información Geográfica (SIG) y el análisis de correlación entre variables relevantes. La investigación concluye con estrategias de gestión sustentable del agua, basadas en un proceso de triangulación analítica que integra información estadística, entrevistas y análisis espacial, fortaleciendo la validez de los resultados.

Este enfoque metodológico permite comprender el problema y contribuye al diseño de propuestas para la gestión sustentable de los recursos hídricos en la región.

Imagen 1. Procedimiento de investigación para el cálculo de la huella hídrica azul en el Bajío de Michoacán.



Fuente: se presenta una imagen generada por Inteligencia Artificial (Artlist,2026), fundamentada en la metodología propuesta por Arjen Y. Hoekstra et al (2011).

IX. Alcances y Limitaciones

Alcances

- Para este estudio, la huella hídrica azul se calculará en los cultivos agroindustriales más comunes en el Bajío de Michoacán: frambuesa, zarzamora, fresa y arándano.
- Detección de zonas con un estrés hídrico crítico, a través del uso de modelos como AWARE (agua disponible restante por área en una cuenca) y el WSI (índice de estrés hídrico).
- Examen de la calidad del agua relacionada con métodos de agricultura intensiva.
- Propuesta de tácticas y sugerencias para mitigar los efectos negativos que surgen de la gestión del agua en la región.
- Aportación científica para comprender la huella hídrica en áreas agrícolas de México, enfocándose particularmente en el Bajío de Michoacán.

Limitaciones

- Restringida a la región del Bajío de Michoacán y sin incluir todas las áreas agrícolas del Estado.
- La dependencia de datos adicionales, como los relativos al consumo de agua y la calidad del agua proporcionada por las autoridades, podría restringir la precisión y la actualización de los datos.
- El análisis puede verse afectado por la variabilidad del clima y de las estaciones, lo cual no siempre se puede controlar completamente.
- Acceso limitado a información confidencial acerca de las prácticas de administración del agua y el uso real de este recurso por parte de algunas empresas agroindustriales.
- El reto de medir los efectos sociales de forma cuantitativa reside en la necesidad de datos cualitativos (como las percepciones y las entrevistas), que podrían no estar totalmente disponibles.
- La incertidumbre de los escenarios futuros es atribuible a cambios en las condiciones ambientales, políticas y regulaciones que tienen el potencial de cambiar la disponibilidad y el uso del recurso hídrico disponible.

Problema de investigación	Pregunta general	Objetivo general	Hipótesis general	Preguntas particulares	Objetivos particulares	Variables	Indicadores	Metodología
El crecimiento de la agroindustria exportadora de berries en el Bajío de Michoacán ha incrementado la presión sobre los recursos hídricos debido al uso intensivo de agua azul para riego, provocando sobreexplotación de acuíferos, estrés hídrico y desequilibrios territoriales en un contexto de expansión tecnológica y agroindustria 4.0.	¿Cuál es la repercusión de la huella hídrica azul producida por la agroindustria de las berries en la sustentabilidad de los recursos hídricos del Bajío de Michoacán, teniendo en cuenta las variedades tecnológicas y productivas entre los cultivos?	Analizar el impacto de la huella hídrica azul generada por la agroindustria de berries en la sustentabilidad de los recursos hídricos del Bajío de Michoacán, mediante una evaluación comparativa por cultivo y municipio que integre variables técnicas, productivas y tecnológicas bajo un enfoque de sustentabilidad fuerte.	“La huella hídrica azul producida por la industria de berries tiene un impacto considerable en la sustentabilidad de los recursos hídricos del Bajío de Michoacán, evidenciándose diferencias estadísticamente notables entre los cultivos, las entidades municipales y los grados de adopción tecnológica”.	¿Cómo se cuantifica comparativamente la huella hídrica azul en los cultivos de fresa, arándano, frambuesa y zarzamora en los municipios de Zamora, Tangancicuaro, Los Reyes y Jacona?	Calcular y contrastar la huella hídrica azul correspondiente a los cultivos de fresa, arándano, frambuesa y zarzamora en los municipios de Zamora, Tangancicuaro, Los Reyes y Jacona.	Variable independiente: Huella hídrica azul.	• Volumen de agua azul consumida (m^3/ton y m^3/ha). • ETc y CWU. • Productividad agrícola. • Extracción de agua subterránea.	Enfoque mixto con predominio cuantitativo; estudio de caso múltiple; uso de CROPWAT 8.0, SIAP, CONAGUA, CLIMWAT y SIG.
				¿Existen variaciones notables en el consumo de agua azul vinculadas con el grado de adopción de tecnologías de la agroindustria 4.0 y las prácticas de gestión agrícola?	Analizar la correlación entre el grado de adopción tecnológica (agroindustria 4.0) y la eficacia en la utilización del agua azul en los sistemas de producción de berries.	Variable dependiente: Sustentabilidad de los recursos hídricos.	• Nivel de tecnificación. • Eficiencia de riego. • Productividad económica del agua ($\\$/\text{m}^3$). • Sistemas de fertirriego y monitoreo digital.	Análisis comparativo y correlacional; triangulación metodológica; análisis estadístico y territorial.
				¿Cuáles son las repercusiones medioambientales, económicas y territoriales que la huella hídrica azul tiene en la disponibilidad regional del recurso hídrico en el Bajío de Michoacán?	Identificar las repercusiones ambientales y económicas derivadas del consumo de agua azul en la disponibilidad regional del recurso hídrico, identificando componentes estratégicos para robustecer la administración sustentable del agua.	Variables intervinientes: disponibilidad hídrica, presión hídrica y tecnología agrícola.	• IPHA. • Balance hídrico. • Estrés hídrico. • Disponibilidad de acuíferos. • Calidad del agua. • Productividad económica del agua.	Evaluación hidrológica regional, análisis espacial con SIG, revisión documental y análisis territorial bajo el enfoque de sustentabilidad fuerte.

Capítulo I

Marco teórico y estado del arte de la huella hídrica y la sustentabilidad

“Siempre parece imposible hasta que se hace”

-Nelson Mandela-

En el presente capítulo se describe el estado del arte y el marco teórico para poder examinar la utilización del agua en la agroindustria de exportación, tal como se observa en el Bajío de Michoacán, donde la expansión agrícola intensiva plantea desafíos apremiantes en términos de sustentabilidad.

1.1 Revisión de literatura sobre huella hídrica y sustentabilidad

1.1.1. Fundamentos teóricos de la huella hídrica.

La huella hídrica (HH) ha adquirido consolidación como un indicador exhaustivo para la evaluación de la utilización humana del recurso hídrico en los sistemas productivos actuales. Esta métrica, definida como el volumen total de agua dulce empleada directa e indirectamente en la producción de bienes y servicios, facilita la cuantificación de la presión antropogénica sobre los recursos hídricos desde un enfoque territorial y global (Hoekstra & Chapagain, 2008). La formulación de su metodología fue formalizada por la Water Footprint Network y sistematizada en el Water Footprint Assessment Manual, en el que se establecen criterios estandarizados para su cálculo y comparación (Hoekstra et al., 2011).

La distinción entre las huellas hídricas azul, verde y gris representa una contribución fundamental al enfoque propuesto. La huella hídrica azul alude al consumo de agua superficial y subterránea derivada de ríos, lagos y acuíferos; la huella verde alude al agua pluvial acumulada en el suelo y empleada por las plantas; mientras que la huella gris cuantifica el volumen necesario para la absorción de contaminantes según los estándares de calidad (Hoekstra et al., 2011). Esta clasificación permite no solo valorar la cantidad consumida, sino también la presión que se ejerce sobre fuentes específicas y los posibles impactos en la calidad del recurso.

La agricultura representa aproximadamente el 92 % de la huella hídrica total de producción a nivel global, siendo el componente azul decisivo en zonas con riego

intensivo (Mekonnen & Hoekstra, 2011). Según investigaciones recientes, existe una relación entre la huella hídrica y las dinámicas del comercio mundial. En estos estudios se demuestra que los flujos de "agua virtual" ejercen presión hídrica desde las regiones importadoras hacia las exportadoras, que a menudo se encuentran en zonas con estrés hídrico (Dalin et al., 2017). Este fenómeno cobra un significado especial en economías como la mexicana, que dependen de la exportación agrícola.

1.1.2. La agricultura mexicana enfocada en la exportación y la presión hidráulica

La expansión de cultivos en México que apuntan a mercados internacionales, como aguacate, frutas y verduras, ha producido un cambio en los sistemas hidrológicos de las regiones. En Michoacán, el principal productor de aguacate del país y uno de los más destacados en la industria de frutos secos, la intensificación de la producción ha llevado a que se extraiga un volumen mucho mayor de agua subterránea (SIAP, 2023).

Las investigaciones fundamentadas en la teledetección y el aprendizaje automático han registrado una acelerada proliferación de invernaderos en el Bajío Michoacano, con especial énfasis en Zamora, Jacona y Tangancícuaro, lo que evidencia un incremento exponencial de superficies recubiertas con plástico vinculadas a sistemas de riego por goteo (Hartmann et al., 2021).

En el escenario particular del aguacate regado, se ha proyectado una huella hídrica total que oscila entre 1,580 y 2,355 L/kg, lo que sobrepasa la media mundial y suscita situaciones en las que la huella azul sobrepasa incluso los volúmenes oficialmente concedidos (Fuerte-Velázquez et al., 2014). Estos hallazgos demuestran un fenómeno de sobreexplotación estructural que pone en riesgo la disponibilidad futura del recurso.

La imagen ilustra de manera esquemática la distinción funcional y conceptual entre los componentes de la huella hídrica, siendo estos la huella hídrica verde, la huella hídrica azul y la huella hídrica gris; en un sistema agrícola. Se incluyen, además, los procesos de producción relacionados con el cultivo a los flujos naturales del agua. El diagrama ilustra, desde una perspectiva ecohidrológica, el papel del agua en diferentes circuitos del agroecosistema. En particular, enfatiza la manera en que se conectan la escorrentía, la evaporación y la transpiración, la precipitación, la infiltración y el riego (InduAmbiente, 2026).

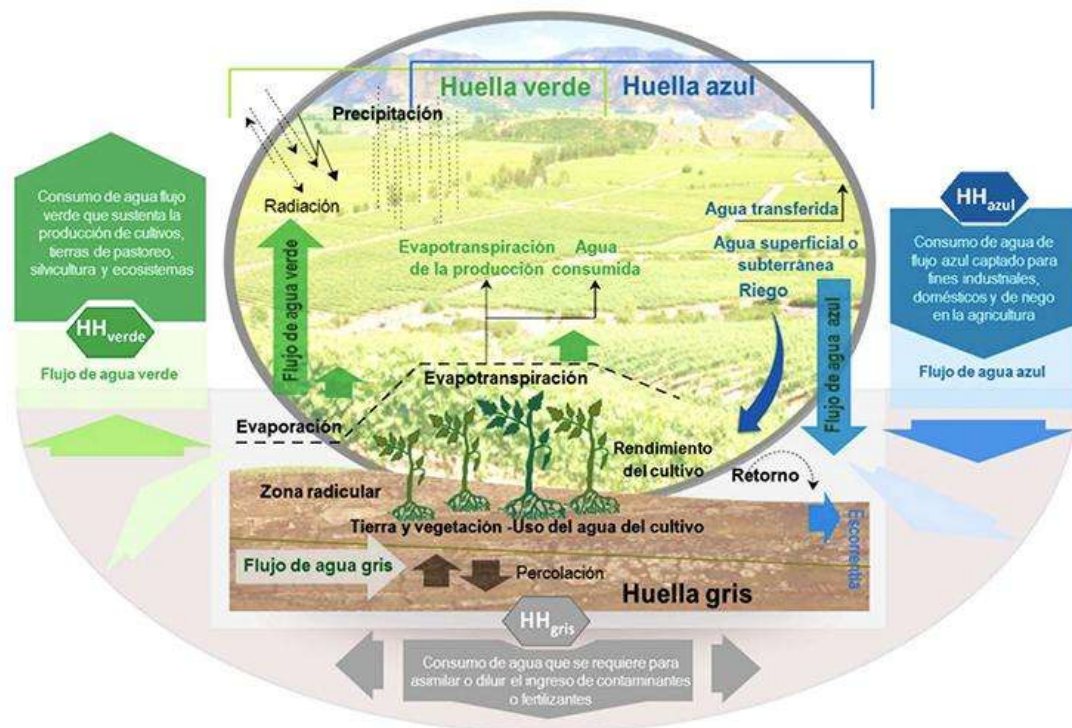
La huella hídrica verde está relacionada con el agua que, proveniente de la lluvia, se guarda en la tierra y es utilizada directamente por las plantas a través de su sistema radicular. Este componente está vinculado con procesos naturales como la evapotranspiración y la infiltración, y es particularmente relevante en los sistemas de agricultura estacional. La imagen señala que el flujo de agua verde es parte del ciclo hidrológico local y no necesita que se extraiga agua de fuentes subterráneas o superficiales. Esto implica un uso menos intensivo del agua en términos de la intervención humana (InduAmbiente, 2026).

La huella hídrica azul, por otro lado, está vinculada con la cantidad de agua que se extrae de fuentes subterráneas o superficiales para fines productivos, principalmente a través de sistemas de riego. El diagrama muestra que el flujo de agua azul es un proceso de transferencia externa hacia la siembra, lo cual implica la intervención tecnológica y las instalaciones hidráulicas. Este componente es fundamental en zonas donde se realiza la agricultura intensiva, ya que su uso excesivo puede generar presión sobre los acuíferos y los cuerpos de agua superficiales, lo cual afecta la disponibilidad para otros sectores (InduAmbiente, 2026).

Por otro lado, la huella hídrica gris se refiere a la cantidad de agua requerida para disolver los contaminantes producidos por el empleo de fertilizantes y agroquímicos hasta que se ajusten a las normas de calidad. Este flujo, de acuerdo con el diagrama, está vinculado tanto a los procesos de percolación como a los de escorrentía. Esto evidencia su vínculo con la contaminación difusa agrícola. En un sentido conceptual, la huella gris incorpora en la evaluación el aspecto cualitativo del recurso hídrico al considerar la capacidad de absorción del ecosistema y llevar el análisis más allá del consumo volumétrico (InduAmbiente, 2026).

La imagen, de manera integral, revela que la huella hídrica no solo se refiere al volumen de agua extraído, sino que es más bien un indicador sistémico que vincula procesos biofísicos, productivos y medioambientales. Los gráficos facilitan la distinción entre los flujos naturales y aquellos producidos por la actividad agrícola, evidenciando que el equilibrio entre el uso productivo, la aptitud de regeneración del recurso y la regulación de la contaminación es lo que define si un sistema es sustentable (InduAmbiente, 2026). La figura 1.1.2, a continuación muestra lo siguiente:

Figura 1.1.2. Componentes de la huella hídrica: verde, azul y gris en un sistema agrícola



Fuente: La figura ilustra los flujos de agua verde (precipitación y evapotranspiración), azul (agua superficial o subterránea utilizada para riego) y gris (volumen necesario para diluir contaminantes) dentro de un agroecosistema. Tomado de Huella eficaz, por InduAmbiente (2026), <https://www.induambiente.com/informe-tecnico/aguas/huella-eficaz>

La literatura académica ha destacado que la intensificación de la agricultura sin una gestión integrada del agua puede precipitar la reducción de los niveles de agua en los cursos de agua y, intensificar la susceptibilidad a sequías prolongadas (Vanham & Mekonnen, 2021). Bajo este enfoque, la huella hídrica no solo actúa como un indicador de la eficiencia productiva, sino también como un indicador de advertencia en relación con la resiliencia hidrológica del territorio.

1.1.3. Sustentabilidad: desde el paradigma débil hacia un enfoque fuerte.

La definición de sustentabilidad según la Comisión Mundial sobre Medio Ambiente y Desarrollo se define como la habilidad para atender las necesidades actuales sin poner en riesgo las futuras (WCED, 1987). Sin embargo, en el marco de

la discusión teórica se expusieron dos perspectivas diferentes: la sustentabilidad fuerte y la sustentabilidad débil.

La sustentabilidad débil sostiene que el capital manufacturado o tecnológico puede reemplazar al capital natural, siempre y cuando no haya una disminución importante del capital total. En cambio, la sustentabilidad fuerte defiende que ciertos componentes del capital natural, tales como los ciclos biogeoquímicos, la biodiversidad y los acuíferos, son indispensables e insustituibles (Neumayer, 2003). Daly (1996) enfatiza que el sistema económico tiene limitaciones absolutas para su crecimiento, debido a su base biofísica, y que una explotación desmesurada de los recursos naturales implica costos que no se pueden reparar.

La extracción intensiva de agua subterránea en áreas agrícnilas como el Bajío Michoacano plantea un problema crucial para la sustentabilidad fuerte: los acuíferos son un capital natural indispensable y su deterioro no se puede disminuir a través de la tecnificación del riego o de la inversión económica. Dentro de este contexto, la huella hídrica azul adquiere un carácter regulador, al evidenciar el nivel de apropiación de un recurso inmaterial.

La imagen muestra una comparación conceptual entre las perspectivas de sustentabilidad fuerte y débil, ilustrando visualmente las diferencias ontológicas y normativas en la conexión entre economía, sociedad y naturaleza. El primer esquema (el de la izquierda) ilustra la sustentabilidad débil con tres círculos que se superponen parcialmente —sociedad, economía y naturaleza— y cuya intersección central da como resultado el desarrollo sustentable. Esta representación está vinculada frecuentemente al enfoque propuesto por el Informe Brundtland en 1987, que sostiene que el desarrollo sustentable debe lograr un balance entre las dimensiones económica, social y ambiental sin poner en riesgo las necesidades de generaciones venideras (World Commission on Environment and Development [WCED], 1987).

En este modelo, se cree que las tres dimensiones son relativamente independientes y pueden reemplazarse unas a otras. La teoría de la sustentabilidad débil sostiene que el capital natural puede ser sustituido por el capital humano o tecnológico, siempre que la suma total del capital se mantenga constante. Esta visión está vinculada con los métodos económicos neoclásicos y con el concepto de que la innovación tecnológica puede disminuir la degradación del medio ambiente sin alterar, a nivel estructural, los patrones de crecimiento económico (Neumayer, 2003).

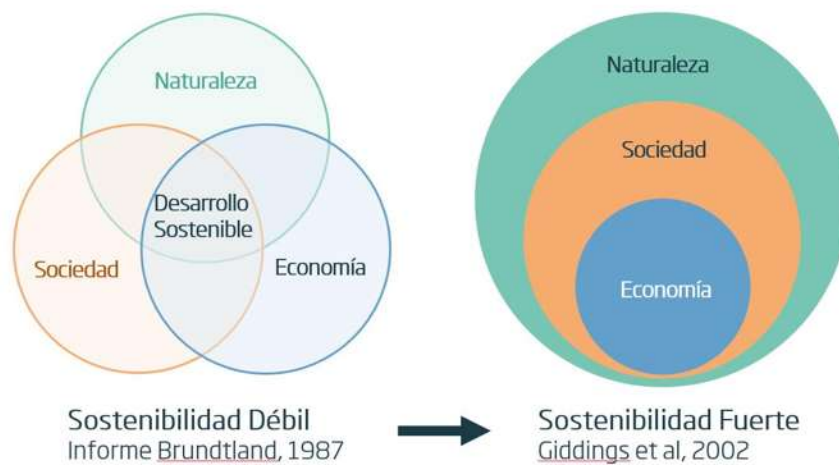
Por otro lado, el segundo esquema (a la derecha) muestra la sustentabilidad fuerte. En este modelo, la economía está contenida en la sociedad y esta última, a su vez, se encuentra dentro de la naturaleza. Esta representación subraya que la economía es un subsistema subordinado a los sistemas sociales y ecológicos, y que la biosfera determina límites biofísicos insustituibles para la actividad humana. Con esta perspectiva, el capital natural no es completamente sustituible por el capital producido, dado que algunos procesos ecológicos como la biodiversidad, la regulación climática o el ciclo del agua son condiciones estructurales para la existencia de los sistemas sociales y económicos (Daly, 1996; Neumayer, 2003).

Según la sustentabilidad fuerte, el desarrollo económico debe realizarse dentro de las fronteras ecológicas del planeta. Este punto de vista ha sido reforzado por el marco de los límites planetarios, que señala umbrales críticos que comprometen la estabilidad del sistema terrestre si se superan (Steffen et al., 2015). Desde esta perspectiva, la administración de los recursos naturales, como el agua, no puede sustentarse solamente en criterios de eficiencia económica; también tiene que tener en cuenta la equidad entre generaciones y la resiliencia del ecosistema.

Los dos enfoques tienen diferencias notables en relación con la evaluación de los efectos medioambientales, tanto en términos de metodología como de políticas públicas. La sustentabilidad fuerte precisa que se mantengan de forma explícita los stocks esenciales de capital natural, en tanto que la sustentabilidad débil admite que se hagan compensaciones monetarias o tecnológicas a raíz del deterioro ambiental. Esta distinción es esencial en el contexto de la huella hídrica y la agroindustria exportadora, ya que determina si se puede justificar la sobreexplotación de acuíferos con base en criterios económicos o si debe considerarse como una transgresión a los límites ecológicos nacionales.

En resumen, la imagen muestra el cambio de un paradigma de equilibrio compensativo a uno de subordinación ecológica, en el que se establece que la economía depende de la integridad del medio ambiente. Esta transición es un pilar teórico crucial para los estudios que se enfocan en analizar la sustentabilidad en sistemas agroproductivos intensivos, se muestra la imagen 1.1.3. Sustentabilidad débil y sustentabilidad fuerte: representación conceptual de la relación entre naturaleza, sociedad y economía.

Figura 1.1.3. Sustentabilidad débil y la sustentabilidad fuerte: representación conceptual de la relación entre la naturaleza, la sociedad y la economía.



Fuente: imagen generada por IA Studio-nanobanana (2026), con la información que se describe en este apartado 1.1.3.

1.1.4. Dimensión social y ecología política del agua: una perspectiva comparativa.

La literatura contemporánea ha profundizado el examen de la sustentabilidad hídrica integrando aspectos sociales y políticos. La ecología política del agua postula que el acceso y el dominio del recurso se encuentran mediados por relaciones de poder y estructuras institucionales desiguales (Boelens et al., 2016) En zonas de cultivo intensivo, la acumulación de concesiones hídricas en manos de entidades agroindustriales exportadoras puede propiciar procesos de exclusión y conflictos socioambientales.

Rodríguez-de-Francisco y Boelens (2015) evidencian que las estrategias de mercadotecnia aplicadas al agua pueden intensificar las asimetrías territoriales si no se acompañan de una gobernanza participativa. Almeida et al. (2023) sostienen que los indicadores sociales vinculados al uso del agua son metodológicamente menos avanzados que los ambientales, lo cual puede conducir a una subestimación de los efectos distributivos.

En el Bajío de Michoacán, un territorio en el que coexisten demandas agrícolas, urbanas y ecosistémicas, la presión hídrica emanada del modelo agroexportador plantea retos en términos de justicia hídrica e intergeneracionalidad. Desde una perspectiva de sustentabilidad fuerte, el principio precautorio implica

priorizar la preservación del capital natural en detrimento de las ventajas económicas a corto plazo.

1.1.5. La economía circular y la eficiencia en la utilización de recursos hídricos constituyen una combinación eficaz y efectiva.

La literatura académica propone tácticas basadas en la gestión integrada y la economía circular cuando se presenta la sobreexplotación. La agricultura de precisión, la reutilización de aguas residuales tratadas y el uso de modelos de insuficiencia hídrica en el estudio del ciclo vital son instrumentos relevantes (UNEP, 2019). El modelo AWARE facilita la correlación entre el consumo volumétrico y la disponibilidad real del recurso, superando así las metodologías meramente cuantitativas (Boulay et al., 2018).

La imagen muestra la metodología de economía circular implementada en el sector del agua, evidenciando un modelo sistémico donde los sectores agrícola, industrial y urbano interactúan a través de flujos circulares de energía, nutrientes y agua. El esquema pone de relieve procesos importantes como restaurar, recuperar, suministrar y reutilizar, subrayando que disminuir los residuos, erradicar la contaminación y regenerar los sistemas naturales son elementos fundamentales para la resiliencia. Así, se deja de ver el agua como un recurso lineal de extracción-uso-descarga y se la incorpora a un ciclo cerrado que favorece la eficiencia energética, la recuperación de fertilizantes y biosólidos, y soluciones basadas en la naturaleza (AgrowAnalytics, 2026). Esto se demuestra en la siguiente imagen.

Figura 1.1.5. Economía circular y resiliencia en el sector del agua



Fuente: la imagen generada por el programa EdrawMax 2026, creada con la información de este apartado 1.1.4.

La sustentabilidad del agua va más allá de la simple disponibilidad de este recurso, porque incluye la habilidad del sistema para restaurar los ecosistemas, mejorar los procesos productivos y recuperar los flujos materiales, tal como señala el modelo analítico propuesto. Esta perspectiva es coherente con los principios de la economía circular y la gestión integrada del agua, ya que establece que la resiliencia se construye a partir de las conexiones entre los sectores productivos, la infraestructura y los sistemas naturales. En este contexto, se fomenta un uso del agua que no solamente es más eficiente, sino que también regenera y está dirigido a proteger sus funciones productivas y ecológicas (AgrowAnalytics, 2026).

Sin embargo, desde la perspectiva de la sustentabilidad fuerte, la eficacia tecnológica no es suficiente si no viene acompañada de restricciones ecológicas claras en el uso y la extracción del agua. En situaciones de estrés hídrico, se considera esencial disminuir el uso del agua para reforzar la resiliencia territorial y prevenir la

explotación excesiva de los sistemas acuíferos.

La revisión de la bibliografía especializada demuestra que la huella hídrica es un instrumento sólido para medir la presión sobre los recursos de agua en el sector agrícola. No obstante, su capacidad de explicación se expande de manera importante cuando se combina con los postulados de la economía ecológica y la sustentabilidad fuerte. Para el Bajío michoacano, la intensificación tecnológica, la ampliación agroexportadora y el aumento de la extracción de agua subterránea muestran una tensión estructural entre los límites biofísicos del área y las dinámicas del crecimiento económico.

En esta misma línea, es esencial aceptar que el capital hídrico natural no puede ser reemplazado. Esto significa avanzar hacia modelos productivos que respeten los índices de recarga de los acuíferos, fomenten una repartición justa del recurso y fortalezcan la capacidad de recuperación de los ecosistemas. Por lo tanto, el examen de la huella hídrica azul en la agroindustria de las berries no debe ser interpretado solo como una actividad técnica, sino también como un análisis estructural sobre la viabilidad intergeneracional del modelo regional de agroexportación.

1.2 Marco teórico de la huella hídrica, el capital natural y la sustentabilidad fuerte en sistemas que exportan productos agrícolas.

La huella hídrica en su calidad de categoría analítica de apropiación del recurso hídrico. La huella hídrica (HH) representa un indicador ambiental concebido para una evaluación holística del volumen total de agua dulce empleada, tanto directa como indirectamente, en la generación de bienes y servicios. Su contribución teórica reside en que facilita la cuantificación de la utilización humana del recurso hídrico desde un enfoque sistémico que enlaza producción, consumo y comercio internacional (Hoekstra & Chapagain, 2008). La huella hídrica, a diferencia de los indicadores tradicionales que solo se centran en la extracción o en la disponibilidad, incluye aspectos espaciales y funcionales del agua. Esto brinda una visión más completa de la presión que se ejerce sobre los ecosistemas acuáticos.

La metodología formalizada que presentan Hoekstra et al. (2011) identifica tres componentes fundamentales: la huella hídrica gris, verde y azul. La huella azul se refiere al volumen de agua subterránea y superficial que se utiliza y no vuelve al sistema hídrico inicial a lo largo del proceso de producción; la huella verde representa el agua pluvial acumulada en el suelo, que es empleada por las cosechas; y la huella gris indica el volumen necesario para diluir contaminantes hasta llegar a los niveles de

calidad ambiental. Esta diferenciación conceptual hace posible una identificación más exacta de cómo cada sistema productivo afecta al ciclo hidrológico.

Desde la óptica de la economía ecológica, el agua se entiende como un componente crucial del capital natural, que es una combinación de servicios ecosistémicos y recursos biofísicos que respaldan las actividades económicas (Daly, 1996). En este marco, la huella hídrica no debe ser vista solamente como un indicador de eficiencia técnica; también se debe considerar como una medida de uso de un recurso limitado, cuya regeneración depende de procesos naturales. Una sustentabilidad sólida depende de factores como el capital natural, las limitaciones biofísicas y una firme sustentabilidad.

La teoría de la sustentabilidad fuerte es la base de este estudio. Esta perspectiva se fundamenta en la suposición de que determinados elementos del capital natural, incluyendo los acuíferos, la biodiversidad y los ciclos hidrológicos, son críticos e insustituibles (Neumayer, 2003). A diferencia de la sustentabilidad débil, que acepta el reemplazo de capital natural por manufacturado siempre que no haya decrecimiento del capital total, la fuerte sostiene que hay límites ecológicos que no se pueden sobrepasar.

Según Daly (1996), la economía es un subsistema del ecosistema global, lo que significa que está sujeta a limitaciones termodinámicas. Según esta perspectiva, el uso de agua subterránea más allá del ritmo natural de recarga supone una reducción neta del capital natural, sin tener en cuenta el rendimiento económico obtenido.

La seguridad hídrica, que se entiende como la capacidad de una sociedad para garantizar un acceso sustentable al agua en términos de cantidad y calidad, es un prerequisite fundamental para el desarrollo sustentable (Bogardi & Szöllösi-Nagy, 2014).

En áreas agroexportadoras como el Bajío Michoacano, donde la productividad agrícola se halla fuertemente vinculada al riego, una sólida sustentabilidad implica priorizar la preservación de los acuíferos en detrimento de incrementos marginales de producción.

1.2.1. La agricultura a escala mundial y el consumo hídrico

La agricultura constituye cerca del 70 % de las fuentes globales de agua dulce y aproximadamente el 90 % del consumo total de alimentos (FAO, 2023; Mekonnen & Hoekstra, 2011). Este predominio es justificable por la necesidad de satisfacer las

demandas de la evapotranspiración de los cultivos en una diversidad de escenarios climáticos.

Según Godfray y Garnett (2014), el desafío actual consiste en producir más alimentos con menos presión sobre el medio ambiente, lo que ha dado lugar al surgimiento del concepto de intensificación sustentable. No obstante, cuando la expansión de la producción se basa en recursos hídricos que han sido explotados en exceso, las limitaciones estructurales dificultan esta estrategia.

En México, la agricultura de exportación ha establecido su función estratégica en la creación de divisas y la creación de empleo. No obstante, la expansión de cultivos tales como el aguacate y los frutos del bosque ha agudizado la presión sobre los acuíferos regionales, especialmente en Michoacán (SIAP, 2023).

El mapa muestra la distribución mundial de los recursos de agua dulce renovables per cápita en metros cúbicos durante 2020, lo cual pone de manifiesto que existen notorias disparidades geográficas en cuanto a la disponibilidad de agua. La categorización por rangos, que va desde más de 30,000 metros cúbicos hasta menos de 100 metros cúbicos por persona, posibilita la identificación de áreas con relativa abundancia y también de zonas que son estructuralmente propensas al estrés hídrico.

Se percibe que naciones con densidad poblacional baja y grandes reservas naturales, como Canadá, Rusia y ciertos territorios amazónicos de América del Sur, tienen la disponibilidad per cápita más alta. En contraste, las zonas del norte de África, Oriente Medio y las áreas de Asia Central se encuentran en las categorías más bajas, lo cual muestra situaciones de escasez estructural que son empeoradas por factores demográficos, climáticos y de presión sobre los recursos.

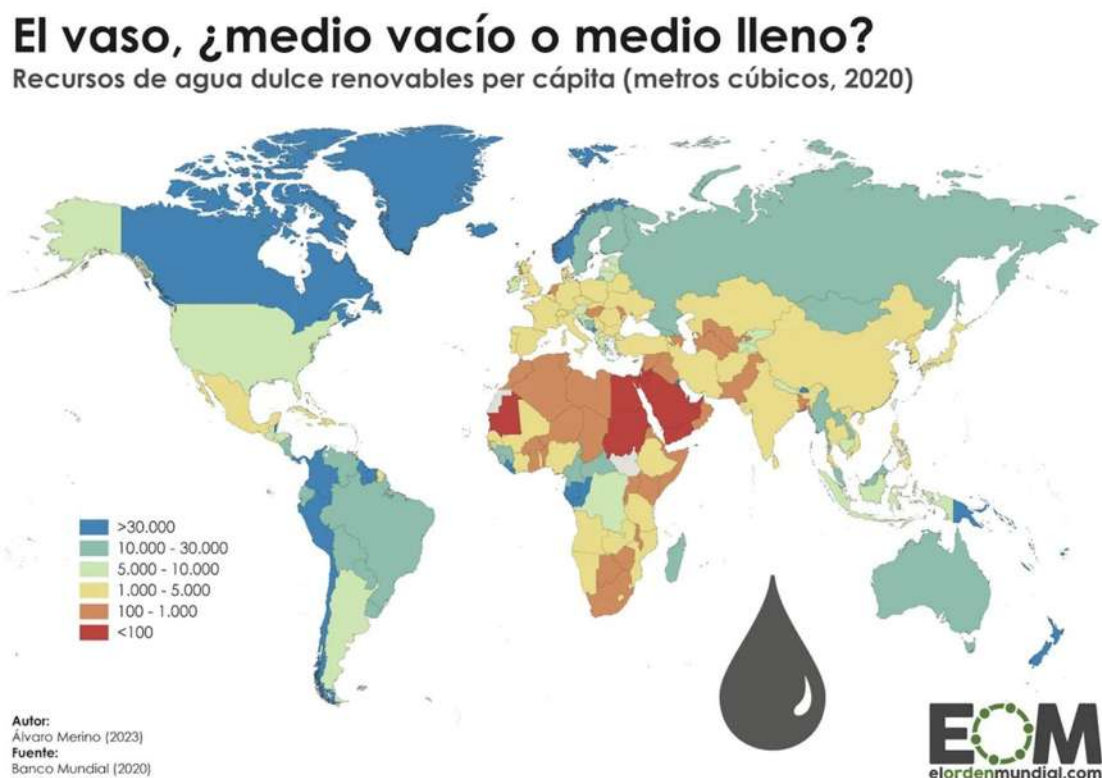
En América Latina, se evidencia una notable diversidad en la disponibilidad de agua. Aunque Brasil y algunas naciones andino-amazónicas poseen altos niveles de recursos renovables per cápita, otras naciones tienen volúmenes intermedios que podrían verse amenazados por cambios demográficos, la expansión agrícola y el cambio climático. Esta discrepancia evidencia que la seguridad hídrica no siempre es el efecto de la disponibilidad física del recurso, ya que otros elementos como la gobernanza, la infraestructura y la distribución geográfica influyen de manera significativa.

El mapa revela que, desde una perspectiva firme sobre la sustentabilidad, es

esencial considerar los límites biofísicos de las áreas al proyectar el desarrollo. La disponibilidad per cápita es el principal indicador para examinar la presión que se ejerce sobre el capital natural del agua y anticipar circunstancias de sobreexplotación. Según la literatura mundial, el estrés hídrico grave ocurre en zonas donde los valores son inferiores a 1,000 m³ por persona; esto supone un riesgo para la producción agrícola, la estabilidad económica y social y el abastecimiento urbano.

En síntesis, la cartografía revela que el problema del agua dulce no es homogéneo ni meramente climático, sino que resulta de la interacción entre los patrones de uso productivo, la repartición poblacional y la disponibilidad natural. Este diagnóstico es esencial para las investigaciones de la agroindustria de exportación y la huella hídrica, sobre todo en situaciones donde la presión sobre acuíferos tiene el potencial de afectar la resiliencia ecosistémica.

Figura 1.2.1. Recursos de agua dulce renovables per cápita en el mundo, 2020.



Fuente: fuente elaborada por Álvaro Merino (2023).

1.2.3. Agua virtual y comercio a escala global.

El término agua virtual enriquece el análisis de la huella hídrica al tomar en cuenta el volumen de agua incorporado en productos comercializados a nivel internacional (Hoekstra & Chapagain, 2008). Dalin et al. (2017) evidenciaron que el

comercio agrícola tiene la capacidad de transferir presión hídrica desde regiones de importación hacia territorios de exportación, originando así dinámicas de sobreexplotación a nivel local.

En el contexto mexicano, el incremento en la demanda global de productos agrícolas ha propiciado la expansión de la frontera agrícola, con repercusiones notables en la disponibilidad hídrica y la preservación forestal (Álvarez-Berríos & Aide, 2015). Desde una perspectiva de sustentabilidad fuerte, esta dinámica suscita una tensión estructural entre el desarrollo económico y la preservación del capital natural.

1.2.4. Irrigación, eficacia y efecto rebote en la irrigación.

La irrigación desempeña el papel primordial en la implementación de la huella hídrica azul en el ámbito agrícola. Los sistemas avanzados, tales como el riego por goteo, han evidenciado una mejora significativa en la eficiencia en la utilización del agua (Rodríguez-Díaz et al., 2010). No obstante, Perry et al. (2017) alertan de que la optimización de la eficiencia no necesariamente disminuye el consumo total debido al fenómeno conocido como efecto rebote: el ahorro relativo puede fomentar la ampliación del campo cultivado.

Este fenómeno pone de manifiesto que la eficiencia tecnológica debe complementarse con políticas de gestión integrada y restricciones de extracción para asegurar una sustentabilidad efectiva.

Tabla 1.2.4. Comparación de sistemas de riego, eficiencia de aplicación y consideraciones de sustentabilidad en el uso del agua agrícola

Tipo de riego	Descripción técnica	Eficiencia aproximada de aplicación	Ventajas principales	Limitaciones técnicas y consideraciones de sustentabilidad
Riego por gravedad (superficial)	Sistema tradicional basado en el flujo del agua sobre la superficie del terreno, aprovechando la pendiente natural sin requerir presión adicional. Incluye modalidades como surcos, melgas e inundación (Burt et al., 2015).	40 % – 60 % (Perry et al., 2017)	Bajo costo de instalación y mantenimiento; tecnología accesible para pequeños productores.	Presenta pérdidas significativas por evaporación, escurrimiento superficial y percolación profunda (FAO, 2012). Desde el enfoque de la huella hídrica azul, puede incrementar el consumo total y la presión sobre

				acuíferos en regiones con escasez hídrica.
Riego por aspersión	Aplicación del agua en forma de lluvia artificial mediante sistemas presurizados con tuberías y aspersores (Rodríguez-Díaz et al., 2010).	60 % – 75 % (Allen et al., 1998)	Distribución más uniforme; adaptable a distintas condiciones topográficas y tipos de suelo.	Puede presentar pérdidas por evaporación y deriva por viento. Mejora la eficiencia respecto al riego superficial, pero aún implica pérdidas en climas cálidos y secos.
Riego por goteo (microirrigación)	Sistema presurizado que, a través de emisores de bajo caudal, proporciona agua directamente a la zona radicular (FAO, 2012).	85 % – 95 % (Rodríguez-Díaz et al., 2010)	Alta eficiencia; minimiza la evaporación y el escurrimiento; adecuada para cultivos de alto valor comercial (berries, aguacate, hortalizas).	Es posible que produzca un "efecto rebote hídrico", en el que el ahorro relativo fomenta la ampliación de la superficie cultivada (Perry et al., 2017). Desde la sustentabilidad fuerte, son necesarios límites de extracción que garanticen la recarga natural.
Riego subterráneo (subsuperficial)	Aplicación de agua bajo la superficie mediante tuberías enterradas o sistemas capilares controlados (Ayars et al., 2015).	Similar o superior al goteo (>90 %)	Reduce evaporación superficial; control preciso de la humedad en el perfil del suelo.	Alta inversión inicial y requerimientos técnicos especializados; viable en sistemas altamente tecnificados.
Riego automatizado y agricultura de precisión	Integración de tecnologías digitales (IoT, sensores, SIG, modelos predictivos) para el monitoreo en tiempo real de la humedad del suelo y la evapotranspiración (Klerkx et al., 2019).	Variable, optimizable (>90 % en condiciones óptimas)	Optimización del uso del agua; reducción potencial de la huella hídrica azul bajo gestión integrada.	La eficiencia tecnológica no garantiza una reducción absoluta del consumo. Desde la sustentabilidad fuerte, debe evaluarse en función de la conservación del capital natural hídrico.

Fuente: La eficiencia de la aplicación se refiere al porcentaje del agua aplicada que el cultivo realmente emplea. La selección del sistema de riego debe ser considerada no solo de acuerdo con criterios de productividad, sino también considerando la disponibilidad de agua a nivel regional, las limitaciones ecológicas y principios sólidos de sustentabilidad. Creación propia fundamentada en Richard G. Allen et al.

(1998), FAO (2012), Charles Perry et al. (2017), Rodríguez-Díaz et al. (2010), Ayars et al. (2015), Klerkx et al. (2019) y Burt et al. (2015).

1.2.5. Agroindustria 4.0 y la digitalización del agua: una combinación estratégica para la transformación y digitalización del agua.

La agroindustria 4.0 incorpora tecnologías como sensores a distancia, inteligencia artificial y big data con el objetivo de optimizar los procesos de producción (Klerkx et al., 2019). Desde una perspectiva hídrica, estas herramientas facilitan el seguimiento en tiempo real de la humedad del suelo y las necesidades de riego.

Sin embargo, desde una perspectiva de sustentabilidad fuerte, la digitalización debe ser evaluada en función de los principios de conservación del capital natural. La eficiencia tecnológica no puede reemplazar la necesidad de adherirse a las tasas de recarga y a los límites ecológicos.

1.2.6. Dimensión social y equidad en el ámbito hídrico.

La sustentabilidad no debe restringirse a criterios de naturaleza biofísica. La ecología política del agua subraya la mediación del acceso al recurso hídrico por medio de relaciones de poder (Boelens et al., 2016). Rodríguez-de-Francisco y Boelens (2015) destacan que, si no se añaden a los mecanismos de mercado estructuras de gobernanza participativa, las desigualdades pueden agudizarse.

En zonas de producción agrícola, la acumulación de concesiones relacionadas con el agua puede provocar conflictos entre la sociedad y el medioambiente, así como incrementar la vulnerabilidad a nivel comunitario. La igualdad distributiva e intergeneracional se considera un elemento esencial del análisis desde una perspectiva sólida de sustentabilidad.

1.3 Enfoques metodológicos predominantes en la investigación sobre recursos hídricos en América Latina, México y Michoacán

1.3.1 El paradigma predominante: la gestión integrada de los recursos hídricos (IWRM)

La Gestión Integrada de Recursos Hídricos (IWRM, por sus siglas en inglés) se destaca como uno de los enfoques más significativos en la gestión e investigación de recursos hídricos en América Latina. Este paradigma surge como una respuesta a la fragmentación sectorial en la administración hídrica y propone que, para lograr eficiencia, equidad y sustentabilidad en la gestión del agua, es imperativo coordinar

variables sociales, económicas, ambientales, institucionales e hidrológicas. El IWRM se basa en la combinación de información socioinstitucional (como la participación comunitaria, el acceso y los marcos regulatorios) con datos ambientales y físicos (calidad del agua, la recarga, la disponibilidad y la precipitación). Este proceso se lleva a cabo mediante la articulación de la gobernanza hídrica y la planificación territorial a través de un enfoque sistémico (Global Water Partnership [GWP], 2000; Pahl-Wostl et al., 2013).

En el ámbito latinoamericano, se han logrado progresos importantes en la ejecución de la IWRM; sin embargo, su puesta en marcha depende de la cooperación multinivel entre los organismos públicos, privados y comunitarios, así como de la capacidad institucional. Los estudios comparativos señalan que, aunque el marco conceptual es muy conocido, su implementación enfrenta retos vinculados a la vulnerabilidad regulatoria, los desbalances de poder y las restricciones presupuestarias, sobre todo en zonas donde se realiza agricultura intensiva con fines exportadores (Pahl-Wostl et al., 2013).

El enfoque IWRM genera el Índice de Salud del Lago Fresco (FHI), que es una herramienta metodológica. Este procedimiento permite la valoración colectiva de la capacidad ecológica de los sistemas acuáticos, el suministro de servicios ecosistémicos y la eficiencia del gobierno. La implementación en cuencas de Latinoamérica ha mostrado diferencias entre áreas con una fuerte actividad agrícola y una resiliencia institucional escasa, lo que indica la importancia de combinar indicadores biofísicos con evaluaciones participativas (Bezerra et al., 2022).

1.3.2 Rigor metodológico y revisiones sistemáticas en estudios hídricos

Con el objetivo de consolidar la validez científica de las investigaciones en el campo de los recursos hídricos, se ha consolidado la implementación de revisiones sistemáticas estructuradas que se rigen por criterios claros de inclusión y exclusión. Las pautas de Environmental Evidence postulan que la transparencia metodológica, la reproducibilidad y la coherencia interpretativa son elementos cruciales para prevenir sesgos y robustecer la fiabilidad de los estudios ambientales (Haddaway et al., 2018).

Dentro de este contexto, la demarcación temporal entre 2000 y 2025 facilita la captura del período de mayor expansión agroindustrial en el Bajío-Michoacán, evidenciado por el incremento exponencial de cultivos como el aguacate y los frutos de la estación. La orientación geográfica hacia los sistemas agroexportadores

garantiza relevancia territorial, mientras que la elección temática enfocada en la huella hídrica azul y verde facilita la evaluación de la presión real sobre los acuíferos, en consonancia con la teoría de sustentabilidad fuerte que reconoce límites biofísicos insuperables (Neumayer, 2003).

La implementación del marco PICO (Population, Intervention, Comparator, Outcome) potencia la sistemática en la elección de literatura científica, especialmente en estudios relacionados con la eficiencia de riego, la tecnificación agrícola y la huella hídrica. Este marco metodológico promueve la definición conceptual y optimiza la consistencia entre los objetivos de investigación y la evidencia empírica existente (Haddaway et al., 2018)

1.3.3. Modelación hidrológica y cálculo de huella hídrica

Dentro del contexto cuantitativo, la determinación de la huella hídrica agrícola se destaca como uno de los procedimientos metodológicos más extendidos. Esta metodología fusiona la modelización hidrológica con la información climática, edafológica y productiva con el objetivo de calcular la evapotranspiración del cultivo (ETc), los requerimientos netos de riego y el consumo hídrico por unidad de producto. Sistemas como CROPWAT, AquaCrop y WaterStat facilitan la simulación de escenarios distintos en función del cultivo, la región y la tecnología de riego (Mekonnen & Hoekstra, 2011; Food and Agriculture Organization of the United Nations [FAO], 2018).

Se han utilizado ampliamente estos modelos para estimar la huella de agua de cultivos con alto valor comercial, como las frutas y el aguacate, que suelen tener un consumo de agua por kilogramo de producción mayor que los promedios mundiales. La cuantificación volumétrica facilita la identificación de áreas de estrés hídrico y la evaluación de la eficiencia productiva, aunque no siempre logra capturar la dimensión distributiva o institucional del recurso (Vanham & Mekonnen, 2021).

Desde un enfoque de sustentabilidad fuerte, la modelización hidrológica desempeña un papel crucial al facilitar la comparación entre la demanda hídrica y la disponibilidad renovable local, lo que pone de manifiesto situaciones en las que el capital natural hídrico está siendo deteriorado más allá de su potencial de regeneración (Steffen et al., 2015).

1.3.4 Enfoques mixtos e interdisciplinarios en América Latina

La investigación en Latinoamérica ha incorporado métodos mixtos que combinan la modelación hidrológica con el análisis institucional y el trabajo de campo cualitativo, debido a las restricciones de los enfoques que son solamente cuantitativos. Esta perspectiva interdisciplinaria posibilita el análisis de la manera en que las decisiones sobre la asignación de agua están mediadas por estructuras de poder, marcos regulatorios y concentración productiva (Swyngedouw, 2009).

Para comprender las controversias asociadas con la expansión agrícola en México, Brasil y Perú, las investigaciones más recientes han incorporado el examen de documentos, la realización de entrevistas semiestructuradas y la evaluación de políticas públicas. Estas investigaciones evidencian que la presión hídrica no es meramente un producto de la variabilidad climática, sino también una consecuencia de las dinámicas políticas y económicas vinculadas a las cadenas de producción agroexportadora (Rodríguez-de-Francisco & Boelens, 2015)

1.3.5. SIG, teledetección y agricultura digital

La investigación en México, especialmente en Jalisco, Guanajuato y Michoacán, ha empleado la teledetección y los Sistemas de Información Geográfica (SIG) con el fin de trazar un mapa sobre la expansión agrícola y relacionarla con la disponibilidad de agua. Según Delgado-Ramos y Romo (2021), estas herramientas permiten examinar las áreas donde los acuíferos están siendo sobreexplotados, así como las alteraciones en la utilización del suelo relacionadas con cultivos de exportación.

La incorporación de sensores remotos, imágenes satelitales y plataformas digitales es un componente de la transición hacia la agricultura 4.0. Sin embargo, según la literatura, la eficiencia técnica no asegura la sustentabilidad si no se combina con límites biofísicos y una gobernanza efectiva, porque puede producirse un efecto rebote relacionado con la expansión territorial (Ray et al., 2022).

La imagen ilustra un sistema de producción agrícola que emplea tecnología, el cual se basa en estructuras de macro túnel o malla sombra, las cuales suelen ser empleadas en cultivos intensivos como los de berries. Esta clase de infraestructura posibilita el control parcial de variables microclimáticas como la temperatura, la humedad, la radiación solar y la protección frente a fuertes lluvias o granizo, lo que contribuye a mantener una producción estable y a mejorar la calidad del fruto.

También se nota el empleo de camas elevadas con acolchado de plástico, una práctica vinculada a la optimización del manejo del suelo, la disminución de evaporación directa, el control de malezas y el perfeccionamiento de la eficiencia en el riego por goteo. Este modelo productivo es un tipo de agricultura tecnificada enfocada en la exportación, que se distingue por su elevada inversión en infraestructura, por producir más rendimiento por unidad de superficie y por utilizar agua azul de manera intensiva.

Desde el punto de vista de la huella hídrica, la tecnificación puede mejorar el rendimiento del agua al disminuir las pérdidas por escurrimiento y evaporación; no obstante, también puede fomentar la ampliación del área cultivada, lo que podría aumentar el volumen total de extracción de agua si no se maneja con principios sólidos de sustentabilidad. Por lo tanto, la tecnificación debe ser analizada no solamente por su eficiencia técnica, sino también por el efecto que tiene en la disponibilidad de agua a nivel regional.

Figura 1.3.5. *Sistema de producción tecnificada de berries bajo macrotúnel y acolchado plástico*



1.3.6. Política ecológica del agua.

La ecología política del agua ha sido definida como un enfoque analítico para examinar cómo los discursos de modernización agrícola y eficiencia apoyan la concentración hídrica. Esta corriente académica explora la interrelación entre el territorio, los recursos y el poder, evidenciando que las dinámicas de mercado y las estructuras institucionales determinan el acceso al agua (Zwarteveen & Boelens 2014).

Este enfoque facilita la exploración de la interrelación entre el progreso económico en el sector agrícola y las controversias medioambientales y sociales asociadas con el agua en regiones agroexportadoras como Michoacán-Bajío, y enfatiza la importancia de integrar la justicia hídrica en el análisis de la sustentabilidad (Boelens et al., 2016).

Convergencia respecto a las metodologías aplicables al Bajío-Michoacán: Para llevar a cabo el análisis de la huella hídrica en Bajío-Michoacán, resulta esencial integrar la modelización hidrológica, la evaluación institucional, la ecología política y el análisis de Sistemas de Información Geográfica (SIG). Esta incorporación posibilita la articulación de la eficiencia técnica, los límites biofísicos y la equidad distributiva en el contexto de una sólida sustentabilidad. Esto contribuye a desarrollar tácticas de gobernanza adaptativa que salvaguarden el capital hídrico natural en contextos agroexportadores.

Figura 1.3.6. *Procedimientos para la evaluación y el cálculo de la huella hídrica azul, el indicador de presión hídrica azul (IPHA) y la productividad económica del agua.*



Fuente: Implementado a partir de metodologías de evaluación de la huella hídrica fundamentadas en el enfoque de la Red de Huella de Agua (WFN).

Capítulo II

Aspectos metodológicos de la investigación

“Nuestros primeros esfuerzos son puramente instintivos, de una imaginación vívida e indisciplinada”

-Nikola Tesla-

El estudio titulado Huella Hídrica Azul y Sustentabilidad en la Agroindustria de Exportación en la Región Bajío, Michoacán adopta un enfoque metodológico mixto secuencial con predominio cualitativo e integración estratégica de herramientas cuantitativas. Este diseño permite analizar integralmente las dinámicas productivas, tecnológicas y socioambientales vinculadas al uso del agua en la agroindustria exportadora de berries del Bajío michoacano.

La investigación se concentra particularmente en los cultivos de frambuesa, arándano, fresa y zarzamora, desarrollados en municipios estratégicos como Jacona, Zamora, Peribán, Tangancícuaro y Los Reyes. Estas localidades representan espacios territoriales con elevada especialización agroexportadora y creciente presión sobre los recursos hídricos, derivada de la expansión agrícola intensiva y de la incorporación de tecnologías de producción orientadas al mercado internacional.

Desde la perspectiva epistemológica, el estudio se fundamenta en el paradigma interpretativo-comprensivo, integrando simultáneamente análisis cuantitativos relacionados con el cálculo de la huella hídrica azul. Este procedimiento metodológico sigue las directrices establecidas por el Water Footprint Assessment Manual (Hoekstra et al., 2011) y los lineamientos internacionales definidos en la norma ISO 14046 (ISO, 2014), fortaleciendo el rigor técnico y científico de la investigación.

La combinación de herramientas cualitativas y cuantitativas fortalece la profundidad analítica en investigaciones socioambientales complejas, particularmente en estudios relacionados con la sustentabilidad hídrica y la agricultura intensiva. Creswell y Plano Clark (2018) sostienen que los métodos mixtos permiten integrar diferentes niveles de análisis, favoreciendo la interpretación contextual de fenómenos territoriales asociados al uso, la gestión y la presión sobre los recursos naturales estratégicos.

En una primera etapa metodológica, se desarrolla un análisis cualitativo orientado a describir las características organizativas, tecnológicas y territoriales de las unidades productivas agrícolas. Esta fase incluye la identificación de sistemas de producción, esquemas de tecnificación, modalidades de riego y estrategias de manejo hídrico implementadas en los cultivos de berries, permitiendo comprender las dinámicas productivas regionales desde una perspectiva integral.

Posteriormente, se implementa una fase cuantitativa enfocada en el cálculo de la huella hídrica azul por municipio y tipo de cultivo. Para ello, se consideran variables técnicas fundamentales, entre ellas la evapotranspiración de referencia (ET0), los coeficientes de cultivo (Kc), el rendimiento agrícola expresado en toneladas por hectárea y la superficie cultivada, permitiendo estimar el volumen de agua consumido por tonelada producida.

La articulación entre ambas fases metodológicas se concreta mediante un proceso de triangulación analítica que integra resultados técnicos, territoriales y socioambientales. Esta estrategia posibilita interpretar la relación existente entre la productividad agrícola, la presión hídrica y la gobernanza regional del agua desde una perspectiva de sustentabilidad fuerte, vinculando dimensiones económicas, ecológicas y sociales dentro de un mismo marco interpretativo.

La estrategia de estudio de caso múltiple resulta pertinente debido a que facilita la comparación entre diversos contextos municipales y sistemas agrícolas presentes en la región agroexportadora del Bajío michoacano. Yin (2018) señala que este enfoque permite identificar diferencias estructurales, tecnológicas y territoriales entre casos específicos, fortaleciendo la comprensión integral de fenómenos complejos asociados con el uso intensivo del agua.

En este contexto, cada municipio es considerado como un caso analítico independiente, mientras que cada cultivo representa una subunidad de análisis dentro del sistema regional agroexportador. Esta estructura metodológica permite examinar diferencias relacionadas con sistemas de riego, niveles de tecnificación agrícola, certificaciones agroindustriales y estrategias de eficiencia hídrica implementadas por las unidades productivas de berries.

La región del Bajío michoacano fue seleccionada como área de estudio debido a la elevada concentración de agroindustria exportadora y al incremento sostenido de

la presión sobre acuíferos y fuentes superficiales de agua. Estas condiciones convierten al territorio en un espacio estratégico para analizar el uso consuntivo del agua azul y sus implicaciones sobre la sustentabilidad territorial y la seguridad hídrica regional.

La huella hídrica azul constituye un indicador fundamental para evaluar el volumen de agua superficial y subterránea utilizado durante los procesos productivos agrícolas (Hoekstra et al., 2011). Su aplicación metodológica permite analizar la relación entre competitividad agroexportadora, eficiencia productiva y presión ambiental, aportando evidencia científica relevante para comprender las consecuencias territoriales derivadas de la agricultura intensiva orientada a mercados internacionales.

El cálculo de la huella hídrica azul se realiza conforme al marco conceptual internacional propuesto por Hoekstra et al. (2011) y a su compatibilidad metodológica con la norma ISO 14046 (ISO, 2014). Esta articulación garantiza consistencia técnica, comparabilidad internacional y rigor científico en la estimación de los volúmenes de agua consumidos por tonelada producida dentro de sistemas agrícolas intensivos de exportación.

Asimismo, la metodología implementada permite relacionar los resultados de la huella hídrica azul con indicadores asociados al desempeño ambiental y a la presión hídrica territorial. Esta integración facilita la evaluación de los impactos derivados de la agroindustria exportadora sobre los acuíferos, los ecosistemas y la disponibilidad regional del recurso hídrico, fortaleciendo el análisis interdisciplinario desde una perspectiva de sustentabilidad robusta.

Finalmente, este capítulo presenta de manera sistemática el marco metodológico adoptado, la fundamentación del estudio de caso múltiple, las etapas operativas del proceso investigativo y las principales limitaciones del diseño metodológico. La articulación de estos elementos establece una base científica sólida para analizar la sustentabilidad hídrica en la agroindustria exportadora de berries del Bajío michoacano y contribuir al diseño de políticas públicas orientadas a la gestión sustentable del agua.

2.1 Marco metodológico

La presente investigación adopta un enfoque metodológico mixto secuencial explicativo, integrando inicialmente herramientas cuantitativas orientadas a medir objetivamente el uso del recurso hídrico. Posteriormente, incorpora instrumentos cualitativos destinados a interpretar los resultados desde perspectivas territoriales, sociales e institucionales. Este diseño responde a la complejidad inherente de los sistemas agroindustriales exportadores contemporáneos.

El enfoque secuencial explicativo permite articular diferentes dimensiones analíticas para comprender fenómenos complejos relacionados con la sustentabilidad hídrica y la agroindustria de exportación. Creswell y Plano Clark (2018) sostienen que este diseño metodológico fortalece la interpretación integral de los hallazgos cuantitativos mediante análisis cualitativos contextualizados, favoreciendo una comprensión más profunda de las dinámicas territoriales.

Durante la etapa cuantitativa se desarrolla el cálculo de la huella hídrica azul conforme al Water Footprint Assessment Manual (Hoekstra et al., 2011) y en concordancia metodológica con la norma ISO 14046 (ISO, 2014). Esta fase permite estimar el volumen de agua superficial y subterránea utilizado por tonelada producida dentro de sistemas agrícolas intensivos de exportación.

Asimismo, la fase cuantitativa incorpora variables relacionadas con la disponibilidad regional del agua, las características de los acuíferos y la eficiencia de las tecnologías de riego implementadas en los cultivos analizados. Se consideran sistemas tecnificados como goteo, fertirriego y producción en sustrato, evaluando su relación con los niveles de consumo hídrico y el desempeño productivo territorial.

El análisis cuantitativo integra además variables agroclimáticas, superficies sembradas y rendimientos agrícolas obtenidos de instituciones oficiales como la Comisión Nacional del Agua y el Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. La utilización de información proveniente de organismos gubernamentales garantiza consistencia estadística, confiabilidad metodológica y solidez técnica en el procesamiento de los datos utilizados.

Los resultados cuantitativos obtenidos se interpretan posteriormente mediante una fase cualitativa basada en entrevistas semiestructuradas dirigidas a productores agrícolas y actores institucionales vinculados con la gestión hídrica regional. Este procedimiento permite contextualizar los indicadores técnicos dentro de las dinámicas

sociales, productivas y organizativas presentes en los territorios agroexportadores del Bajío michoacano.

De igual manera, la investigación incorpora revisión de políticas públicas relacionadas con el agua y la agricultura, complementadas con análisis territorial apoyado por herramientas de georreferenciación. Esta integración metodológica facilita comprender no solamente los volúmenes de agua consumidos, sino también las estructuras institucionales y las estrategias de gobernanza implementadas para administrar el recurso hídrico regional.

La metodología adoptada se vincula con investigaciones socioambientales que enfatizan la necesidad de integrar indicadores técnicos con enfoques analíticos relacionados con la gobernanza y la sustentabilidad territorial. Yin (2018) señala que los estudios de caso permiten comprender fenómenos complejos dentro de contextos específicos, fortaleciendo la interpretación de procesos socioambientales vinculados al uso intensivo del agua.

Desde la perspectiva epistemológica, la investigación se fundamenta en el paradigma crítico-interpretativo, el cual reconoce que los problemas ambientales no pueden explicarse únicamente mediante métricas técnicas. La administración del agua en territorios agroexportadores involucra relaciones de poder, desigualdades en el acceso al recurso, conflictos territoriales y estructuras institucionales complejas que condicionan la sustentabilidad regional.

En este contexto, la huella hídrica azul se analiza no solamente como un indicador volumétrico, sino además como una manifestación de procesos económicos, regulatorios y sociales asociados a la agroindustria exportadora. Boelens (2014) sostiene que la gestión hídrica está influida por dinámicas políticas y territoriales que determinan la distribución y la apropiación del recurso en espacios agrícolas intensivos.

La delimitación territorial comprende municipios estratégicos del Bajío michoacano con elevada participación en la exportación agroindustrial, entre ellos Los Reyes, Zamora, Tangancícuaro y Jacona. Estos territorios presentan una marcada especialización en berries y una fuerte dependencia de sistemas de riego tecnificado, situación que incrementa considerablemente la presión sobre los acuíferos y las fuentes superficiales regionales.

La selección de estos municipios responde a su relevancia económica dentro de la cadena de valor agroexportadora y a las crecientes problemáticas relacionadas

con la disponibilidad hídrica. El análisis territorial permite identificar diferencias productivas, tecnológicas y ambientales entre localidades, fortaleciendo la comprensión de los impactos asociados con la expansión agrícola intensiva en el Bajío michoacano.

El periodo de análisis comprende los años 2015 a 2024, intervalo caracterizado por la expansión de las exportaciones agrícolas, modificaciones regulatorias en materia hídrica y una creciente variabilidad hidrometeorológica. Esta temporalidad facilita desarrollar análisis longitudinales sobre tendencias productivas, consumo hídrico y transformaciones territoriales vinculadas con la agroindustria exportadora regional.

La elección de este periodo también responde a la disponibilidad sistemática de información estadística, climática y agrícola proveniente de fuentes oficiales y literatura científica indexada. La integración de estas bases de datos fortalece la robustez metodológica de la investigación y permite desarrollar comparaciones territoriales consistentes relacionadas con la sustentabilidad hídrica regional y sectorial.

En conclusión, la metodología implementada posibilita integrar mediciones técnicas del consumo hídrico con análisis críticos relacionados con gobernanza, sustentabilidad y la justicia hídrica territorial. Esta articulación ofrece una perspectiva integral sobre las consecuencias derivadas de la agroindustria exportadora en el Bajío michoacano, contribuyendo al debate académico y al diseño de políticas públicas sustentables.

2.2 Revisión crítica sobre el uso del estudio de caso en investigaciones ambientales

La decisión de seleccionar el estudio de caso como estrategia principal se fundamenta en la necesidad de analizar detalladamente un área geográfica particular en la cual se entrelazan diversas presiones provenientes de la actividad agrícola, la gestión del agua y el avance tecnológico. Esta metodología innovadora y detallada permite llevar a cabo un exhaustivo análisis contextualizado de las complejas relaciones interdependientes entre diversos actores involucrados, las tecnologías empleadas, los diferentes cultivos cultivados y la gestión de los recursos naturales disponibles (Yin, 2018).

El uso del término "innovadora" en este método está justificado porque, según lo que Yin (2018) dice sobre el estudio de caso, va más allá de simplemente describir

fenómenos. Permite incluir una variedad de fuentes probatorias (entre ellas datos cualitativos y cuantitativos, entrevistas, documentos oficiales e imágenes satelitales), lo que ayuda a entender el fenómeno de manera rica y holística. El análisis de fenómenos actuales dentro de su contexto real es especialmente importante en estudios socioambientales complejos, como la huella hídrica en la agroindustria (Yin, 2018), donde intervienen factores políticos, técnicos, sociales y ambientales.

La conexión entre la teoría y la práctica mediante una estructura metodológica que posibilite incorporar modelos teóricos (como la economía circular, la gobernanza de las aguas o la sustentabilidad fuerte) al análisis empírico.

La concentración en varias unidades de análisis permite no solo investigar la tecnología o el cultivo, sino también a los participantes (consumidores, autoridades y productores), la infraestructura y las dinámicas territoriales, todo ello dentro de un marco cohesionado.

La realización de un estudio de caso sistémico ayuda a identificar la complejidad real en contextos como el Bajío de Michoacán, donde hay una fuerte demanda de agua, presión internacional por las exportaciones y escasez de recursos naturales, en lugar de dividir el análisis en variables independientes. Esto lo define como una metodología innovadora, especialmente en el ámbito de la sustentabilidad agroindustrial y hídrica.

En investigaciones ambientales, el análisis de casos específicos resulta sumamente beneficioso al permitir la integración de múltiples niveles de análisis (local, regional y nacional) y la consideración de diversas escalas de datos (parcelas, cuencas hidrográficas, políticas públicas y regulaciones ambientales) (Yin, 2018; Flyvbjerg, 2006).

Dentro del campo de la investigación ambiental, la implementación del estudio de caso ha evidenciado su relevancia, dado que facilita la integración de diversos niveles de análisis (local, regional y nacional), así como escalas diferenciadas de datos. Estas escalas abarcan desde las unidades productivas (parcelas), hasta sistemas complejos como cuencas hidrográficas, marcos normativos e instrumentos de política pública (Yin, 2018; Flyvbjerg, 2006). Esta habilidad para enfrentar la complejidad del fenómeno ambiental dentro de su contexto tangible y dinámico se revela

especialmente valiosa en investigaciones que buscan entender las interrelaciones entre prácticas agrícolas, consumo de agua y sustentabilidad.}

Se seleccionaron cuidadosamente tres casos de estudio representativos del sector agroindustrial exportador en la región bajío de Michoacán mientras se desarrollaba esta investigación. Estos ejemplos muestran una variedad de grados tecnológicos y tipos de cultivos, incluyendo el aguacate, la fresa y el brócoli. Cada una de estas cosechas representa un método particular de producción agroindustrial, con características propias en cuanto a la demanda técnica, el uso del recurso hídrico y su valor en los mercados internacionales (Yin, 2018; Flyvbjerg, 2006).

La intención principal de esta comparación entre escenarios es analizar y comparar la huella hídrica azul generada por cada cultivo, considerando la cantidad de agua que se ha extraído de fuentes subterráneas y superficiales para su crecimiento. Además, se busca distinguir las tácticas de gestión del agua aplicadas en cada escenario, valorando su grado de efectividad y coherencia con los principios de la sustentabilidad a largo plazo, dentro del marco conceptual de la economía circular y la sustentabilidad fuerte (Yin, 2018; Flyvbjerg, 2006).

Para llevar a cabo esta investigación, se seleccionaron meticulosamente tres casos de estudio que son ejemplos representativos de la diversidad en el sector agroindustrial. Estos casos incluyen una diversidad de cultivos y niveles tecnológicos, entre los que se encuentran el aguacate, la fresa y el brócoli, por ejemplo. El propósito fundamental de este análisis comparativo es examinar y comparar la huella hídrica azul de cada uno, además de las tácticas de gestión puestas en marcha para asegurar su sustentabilidad a largo plazo (Yin, 2018; Flyvbjerg, 2006).

La capacidad del análisis de casos en estudios ambientales para examinar fenómenos complejos desde un punto de vista contextual, integrando dimensiones sociales, biofísicas e institucionales, se evidencia a través de una evaluación crítica. Se identifican sesgos en la elección de casos y limitaciones en la generalización de los resultados, lo que requiere un diseño metodológico que sea riguroso, transparente y que se base en la triangulación de datos. Si se combina con criterios de validez científica y enfoques mixtos, el estudio de caso es una estrategia importante para las investigaciones socioambientales.

Las fases metodológicas de la investigación, que organizan el proceso operativo y analítico del estudio, se determinan. Estas fases traducen los objetivos a la

práctica, incorporan instrumentos de análisis cualitativo y cuantitativo y garantizan que el diseño metodológico sea coherente en lo que respecta a la huella hídrica azul y a la sustentabilidad en el sector agroindustrial de las bayas en el Bajío de Michoacán.

2.3 Etapas metodológicas de la investigación

Las etapas metodológicas de la investigación son la estructura que guía el desarrollo del estudio, asegurando la coherencia entre los objetivos, las técnicas de análisis y los resultados. En este trabajo, las fases se estructuran de forma secuencial y combinan un enfoque mixto que mezcla métodos cuantitativos (como los indicadores de productividad y la presión del agua y la huella hídrica azul) con una evaluación cualitativa a nivel territorial e institucional. Este modelo posibilita que se realice una estimación de la utilización y la presión ejercida sobre los recursos hídricos en el sector agroindustrial de berries en el Bajío de Michoacán, así como que se entienda cómo funcionan las dinámicas socioambientales que impactan su sustentabilidad. De este modo, se garantiza un análisis integral del fenómeno.

2.3.1. Revisión documental: Recolección y sistematización de información científica, técnica y normativa sobre agroindustria, agua y sustentabilidad como en las plataformas Google Scholar, Scopus, Web of Science y ScienceDirect,

2.3.2. Delimitación territorial: Selección de zonas y agroindustrias para el estudio de caso mediante criterios de representatividad y disponibilidad de datos.

2.3.3. Medición de la huella hídrica: aplicación de metodologías establecidas por Hoekstra (2011), diferenciando el agua verde, azul y gris por cultivo, temporada y tecnología.

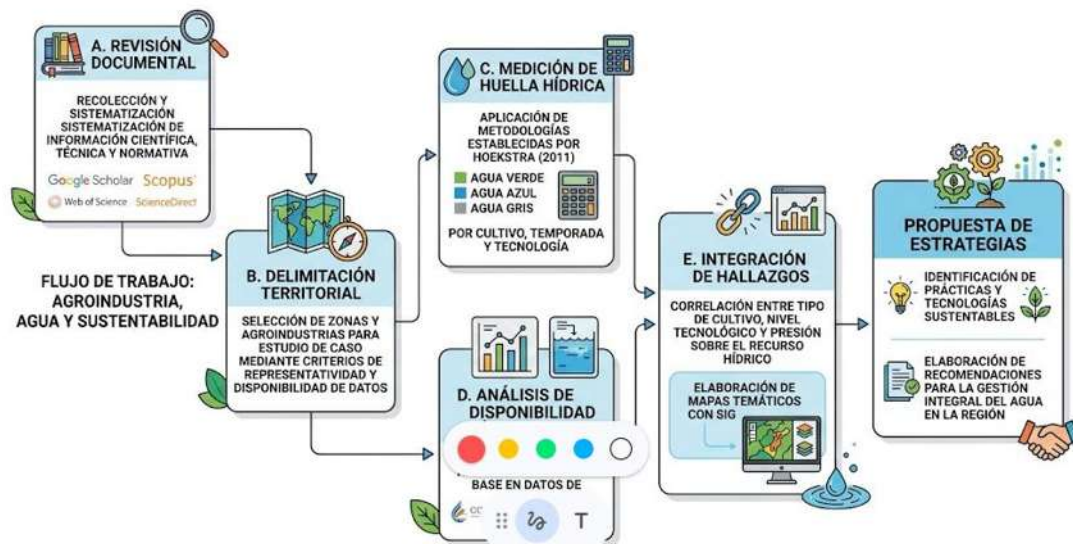
2.3.4. Análisis de la disponibilidad hídrica: estimación del balance hídrico regional con base en datos de CONAGUA, SADER-SIAP.

2.3.5. Integración de hallazgos: correlación entre el tipo de cultivo, el nivel tecnológico y la presión sobre el recurso hídrico. Elaboración de mapas temáticos con SIG.

La figura sintetiza el flujo metodológico de la investigación, con etapas secuenciales que incluyen revisión documental, delimitación territorial, medición de la huella hídrica, análisis de disponibilidad, integración de hallazgos y formulación de estrategias. Este esquema visualiza la interrelación entre los componentes

cuantitativos y cualitativos del estudio, facilitando la comprensión del análisis de la huella hídrica azul y la sustentabilidad en la agroindustria del Bajío de Michoacán.

Figura 2.3. Flujo metodológico para el análisis de la huella hídrica y la sustentabilidad en la agroindustria.



Fuente: Elaboración propia con base en Hoekstra et al. (2011) y literatura científica especializada sobre evaluación de la huella hídrica y gestión sustentable del agua.”

2.3.1. Revisión documental

La investigación se inicia con una revisión sistemática de documentos, enfocada en la recopilación, análisis y sistematización de datos científicos, técnicos y normativos relacionados con la agroindustria de exportación, la administración del agua y la sustentabilidad. La investigación bibliográfica se realiza utilizando motores de búsqueda especializados, como Google Scholar, Scopus, Web of Science y ScienceDirect, así como bases de datos académicas indexadas. Se priorizan los artículos que tienen número DOI (identificación del artículo), las revistas que están incluidas en el Sistema de Información de Revistas (SJR) y la documentación proveniente de organismos internacionales.

Se utilizan términos clave combinados a través de operadores booleanos (AND, OR), como: "blue water footprint", "water footprint agriculture", "berries irrigation efficiency", "water governance Mexico", "sustainable agroindustry" y "aquifer overexploitation. Asimismo, se utilizan documentos técnicos, como el Manual de Evaluación del Footprint del Agua (Hoekstra et al., 2011) y la norma ISO 14046,

además de los informes oficiales proporcionados por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) y el Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP).

Los datos recopilados se organizan en matrices sistemáticas que incluyen: el autor, el año, la finalidad, la metodología, las variables analizadas, los hallazgos más destacados y su importancia para la investigación. Este procedimiento garantiza la rigurosidad de los métodos, el seguimiento académico y la actualización en términos científicos.

Se documenta a continuación la revisión documental a través de cadenas de búsqueda que se muestra a continuación.

General:

("water footprint" OR "huella hídrica") AND ("sustainability" OR "sustentabilidad") AND ("agroindustry" OR "agroindustria") AND ("export crops" OR "cultivos de exportación") AND (Mexico OR Michoacán OR "Bajío mexicano")

"Huella hídrica" AND "agroindustria de exportación" AND "Bajío de Michoacán" AND "sustentabilidad"

a. Huella hídrica en agroindustria de exportación

("water footprint" OR "huella hídrica") AND ("agroindustry" OR "agroindustria" OR "agribusiness") AND ("export crops" OR "cultivos de exportación") AND (Mexico OR Michoacán OR "Bajío mexicano")

b. Tecnologías 4.0 en agricultura y uso del agua

("precision agriculture" OR "smart farming" OR "agriculture 4.0" OR "agricultura 4.0") AND ("water use efficiency" OR "eficiencia del uso del agua") AND ("irrigation" OR "tecnificación del riego") AND (Mexico OR "Bajío de Michoacán")

c. Sustentabilidad hídrica en sistemas agroindustriales

("water sustainability" OR "sustentabilidad hídrica") AND ("agroindustrial systems" OR "sistemas agroindustriales") AND ("environmental impact" OR "impacto ambiental") AND (Mexico OR Latin America)

d. Impacto social y ecológico del uso del agua

("social impact" OR "conflicts over water" OR "acceso al agua" OR "conflictos hídricos") AND ("agriculture" OR "agroindustria") AND ("environmental justice" OR "justicia ambiental") AND (Mexico OR Michoacán OR Bajío)

e. Evaluación de la huella hídrica y políticas públicas

("water footprint assessment" OR "evaluación de huella hídrica") AND ("public policy" OR "políticas públicas") AND ("agriculture" OR "agroindustry") AND ("water governance" OR "gobernanza del agua") AND (Mexico)

En la siguiente tabla se presentan los resultados de los artículos encontrados en las cadenas de búsqueda de Scopus.

Tabla 2.3.1.1. Resultados de la revisión bibliográfica en Scopus según categorías de búsqueda relacionadas con la huella hídrica y la sustentabilidad agroindustrial

Categoría de búsqueda	Descripción temática	Número aproximado de artículos
Consulta general amplia	Búsqueda exploratoria inicial sobre huella hídrica, agua y sustentabilidad en sistemas productivos	~2,000
Búsqueda específica en huella hídrica y sustentabilidad	Refinamiento de resultados enfocados en la relación entre huella hídrica y sustentabilidad ambiental	~120
a) Huella hídrica en agroexportación	Estudios sobre consumo de agua en sistemas agrícolas orientados a mercados internacionales	~800
b) Agricultura 4.0 y eficiencia hídrica	Investigaciones sobre tecnologías digitales, riego inteligente y optimización del uso del agua	~450
c) Sustentabilidad hídrica en agroindustria	Análisis integrales del uso del agua en sistemas agroindustriales desde un enfoque sustentable	~600
d) Impacto social y ecológico del agua	Estudios sobre efectos sociales, territoriales y ambientales del uso del recurso hídrico	~300
e) Huella hídrica y políticas públicas	Investigaciones sobre gobernanza del agua, regulación y políticas para la gestión hídrica	~500

Fuente: Elaboración propia con base en la sistematización de resultados obtenidos en la base de datos Scopus, mediante el uso de cadenas de búsqueda relacionadas con huella hídrica, sustentabilidad y agroindustria.

De los cuales, se estuvieron revisando los siguientes artículos por su relevancia con el objetivo de investigación en la Tabla 2.3.1.2.

Tabla 2.3.1.2. Síntesis de la literatura especializada sobre huella hídrica, sustentabilidad y agroindustria en México

Línea temática	Alcance de la literatura revisada	Número aproximado de estudios	Observaciones analíticas y criterios de selección
Huella hídrica en cultivos de exportación del Bajío de Michoacán	Investigaciones centradas en la cuantificación del consumo hídrico en cultivos como aguacate, berries y limón en municipios estratégicos de la región	~30	Predominan estudios de enfoque cuantitativo; se priorizan aquellos con desagregación territorial y aplicación de metodologías estandarizadas
Eficiencia en el uso del agua en agricultura 4.0 en México	Estudios orientados al uso de tecnologías avanzadas para la optimización hídrica en sistemas agrícolas	~120	Se identifican aportes relevantes en sensores, telemetría e inteligencia artificial; se sugiere priorizar investigaciones con validación empírica
Impactos ambientales asociados al uso del agua en sistemas agrícolas de Michoacán	Análisis sobre efectos ecológicos derivados del uso intensivo del recurso hídrico	~70	Incluye estudios sobre la calidad del agua, el uso de agroquímicos y el monitoreo en cuencas como Lerma-Bajío; se recomienda integrar enfoques de evaluación integral
Conflictos socioambientales por el agua en regiones agroindustriales mexicanas	Literatura sobre tensiones sociales vinculadas al acceso y uso del agua en contextos productivos	~40	Se abordan problemáticas de estrés hídrico, competencia por el recurso y justicia ambiental; relevante para el enfoque de sustentabilidad fuerte
Evaluación de la sustentabilidad hídrica en la agroindustria mexicana	Estudios que integran indicadores, certificaciones y análisis de desempeño hídrico en cadenas agroexportadoras	~80	Se identifican enfoques multicriterio y análisis policéntricos; se sugiere articular con marcos de gobernanza del agua

Tecnologías para la reducción de la huella hídrica en cultivos de exportación	Investigaciones sobre innovación tecnológica aplicada a la gestión eficiente del agua	~60	Incluye riego de precisión, reúso de aguas residuales y monitoreo satelital; se priorizan estudios con evidencia empírica y aplicabilidad regional
---	---	-----	--

Fuente: Elaboración propia a partir de la sistematización de literatura científica indexada en bases de datos especializadas como Scopus, considerando criterios de pertinencia temática, actualidad y rigor metodológico.

En el caso de la búsqueda en Google Scholar se realizaron las siguientes:

Google Scholar

- a) “Huella hídrica y cultivos de exportación en el Bajío de Michoacán”
- b) “Uso eficiente del agua en la agricultura 4.0 en México”
- c) “Impactos ambientales de productos agrícolas en Michoacán por uso del agua”
- d) “Conflictos sociales por el agua en zonas agroindustriales mexicanas”
- e) “Evaluación de la sustentabilidad hídrica en la agroindustria mexicana”
- f) “Tecnologías para reducir la huella hídrica en cultivos de exportación”

En la tabla 2.3.1.3., se muestra la lista de artículos de investigación encontrados, de acuerdo con

Tabla 2.3.1.3. Sistematización de la literatura científica en Google Scholar sobre huella hídrica, sustentabilidad y agroindustria en México

Línea temática de búsqueda	Número estimado de estudios	Criterios de selección y enfoque analítico
Huella hídrica en cultivos de exportación en el Bajío de Michoacán	~50	Se priorizan estudios con desagregación municipal (aguacate, berries), con aplicación de metodologías cuantitativas y análisis territorial
Eficiencia en el uso del agua en agricultura 4.0 en México	~200	Selección de investigaciones con evidencia empírica sobre tecnologías (sensores, automatización, IA), con énfasis en casos aplicados en Michoacán

Impactos ambientales del uso del agua en sistemas agrícolas de Michoacán	~120	Inclusión de estudios sobre calidad del agua, contaminación por agroquímicos y evaluaciones en cuencas regionales
Conflictos socioambientales por el agua en regiones agroindustriales mexicanas	~80	Análisis de casos documentados en el Bajío, considerando disputas por el recurso entre actores productivos y comunidades locales
Evaluación de la sustentabilidad hídrica en la agroindustria mexicana	~150	Se integran estudios sobre indicadores, certificaciones y evaluación de desempeño hídrico en cadenas agroalimentarias
Tecnologías para la reducción de la huella hídrica en cultivos de exportación	~90	Se priorizan investigaciones sobre innovación tecnológica (riego de precisión, reúso de agua, monitoreo), con aplicaciones en contextos locales

Fuente: Elaboración propia a partir de la revisión sistemática de literatura indexada en Google Scholar, considerando criterios de pertinencia temática, actualidad y aplicabilidad al contexto agroindustrial del Bajío de Michoacán.

De la tabla anterior se realizó un filtrado de los artículos que son de mayor relevancia para esta investigación; se muestran en la tabla 2.3.1.4. Artículos de mayor interés para esta investigación de Google Scholar.

Tabla 2.3.1.4. Referencias clave para el análisis de la huella hídrica, sustentabilidad y la agroindustria en México

Eje temático	Referencia (autor, año)	Enfoque del estudio	Aporte relevante para la investigación
Huella hídrica en cultivos de exportación	Fuerte-Velázquez et al. (2024); Fuerte-Velázquez y Gómez-Tagle (2024)	Evaluación de la huella hídrica en sistemas agroexportadores (aguacate)	Proveen evidencia empírica reciente a escala regional en Michoacán, útil para análisis comparativos
Componentes de la huella hídrica (azul, verde y gris)	Gómez-Tagle et al. (2022); Mekonnen y Hoekstra (2011, 2014)	Desarrollo metodológico y cuantificación global de la huella hídrica	Fundamentan el marco metodológico del cálculo de huella hídrica

Agricultura 4.0 y eficiencia hídrica	Carrillo-Navarrete et al. (2021); Navarro-Herrera et al. (2023); Díaz et al. (2022)	Uso de sensores, inteligencia artificial y monitoreo digital	Evidencian el potencial de la tecnificación en la reducción del consumo hídrico
Escasez hídrica y dimensión económica del agua	Rosa et al. (2020); Romero-Lankao et al. (2018)	Relación entre escasez, economía del agua y sistemas agrícolas	Aportan bases para el análisis de productividad económica del agua
Gobernanza del agua y conflictos socioambientales	Pineda y Scott (2019); Wilder et al. (2020); Flores-Berrones et al. (2022)	Análisis de conflictos, justicia ambiental y gestión del agua	Permiten incorporar el enfoque de sustentabilidad fuerte y ecología política
Impactos ambientales del uso del agua	Torres-García et al. (2022); Martínez-Salvador et al. (2021)	Evaluación de calidad del agua, contaminación y balance hídrico	Evidencian efectos ecológicos asociados a la agroindustria
Políticas públicas y gestión hídrica en México	Jiménez-Cisneros y Galizia (2019); Comisión Nacional del Agua (2021)	Evaluación de políticas, regulación y modernización del riego	Contextualizan el marco institucional y normativo del uso del agua
Innovación tecnológica para la gestión del agua	Zarco-Tejada et al. (2014); Pedrero y Alarcón (2009); Perry y Steduto (2017)	Agricultura de precisión, reúso de agua y modernización del riego	Proveen alternativas tecnológicas para mejorar la eficiencia hídrica
Sustentabilidad hídrica y cambio climático	Sáenz-Luna et al. (2021); García-García et al. (2020)	Evaluación de la sustentabilidad del recurso hídrico bajo escenarios de presión	Refuerzan el análisis de resiliencia y disponibilidad hídrica

Fuente: Elaboración propia a partir de la revisión de literatura científica indexada en Google Scholar, considerando criterios de pertinencia temática, actualidad y contribución al análisis de la huella hídrica en sistemas agroindustriales.

2.3.2. Delimitación territorial

La demarcación territorial desempeña un papel estratégico en el diseño metodológico, dado que establece la pertinencia, la representatividad y la validez contextual de los hallazgos derivados. En este contexto, la elección de la región del Bajío de Michoacán como área de investigación se fundamenta en criterios técnicos, productivos, hidrogeológicos y de disponibilidad sistematizada de información, lo que facilita la elaboración de un análisis riguroso sobre la huella hídrica azul en la agroindustria de exportación.

Inicialmente, la región Bajío de Michoacán se distingue por su significativa representación en la producción y exportación de frutas a escala nacional e internacional, especialmente en cultivos como la fresa, la zarzamora, la frambuesa y el arándano. Algunos municipios, como Jacona, Zamora, Tangancícuaro, Los Reyes y Tanhuato, han pasado por un proceso de especialización en el sector hortofrutícola que ha sido constante durante los últimos veinte años. Se han establecido como puntos estratégicos dentro de la cadena de exportación agropecuaria del país. Este dinamismo de producción está relacionado con la inversión en infraestructura para el riego tecnificado, el establecimiento de sistemas intensivos de cultivo y la vinculación con cadenas de valor a nivel mundial, lo que hace que esta región sea un lugar ideal para analizar la relación entre el consumo del agua y la competitividad agroindustrial (Grajales-Nishimura et al., 2021).

Desde un enfoque metodológico, la justificación de la elección territorial se encuentra también en la disponibilidad y consistencia de información cuantitativa oficial, en particular datos referentes a la superficie sembrada, rendimiento por hectárea, volúmenes de producción y valor económico producido por cultivo.

Esta información puede ser adquirida a través del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). De manera similar, los datos relativos a la disponibilidad promedio anual de agua, concesiones, recargas y estado de los acuíferos se derivan de registros técnicos de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) y investigaciones especializadas realizadas por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). Esta convergencia de fuentes gubernamentales asegura la fiabilidad estadística y la trazabilidad metodológica en la estimación de la huella hídrica azul.

Además, la región exhibe condiciones hidrogeológicas de particular relevancia para el análisis, dado que numerosos acuíferos han sido categorizados bajo planes de restricción o sobreexplotación. Esta situación hace que sea más urgente evaluar la presión que la agroindustria intensiva ejerce sobre los recursos hídricos subterráneos. En este contexto, la delimitación territorial no solo se basa en criterios de productividad, sino que conlleva también el análisis de territorios donde la relación entre la extracción y la recarga hídrica es un componente esencial para la sustentabilidad regional.

La delimitación espacial en la investigación, bajo un enfoque crítico-

interpretativo, también abarca dimensiones institucionales y sociales. La expansión de industrias agroexportadoras en esas zonas ha provocado alteraciones en la estructura agrícola, el acceso al agua y la administración local del recurso, dando lugar a dinámicas territoriales intrincadas que requieren un análisis contextual. En consecuencia, el Bajío Michoacano es una zona donde se unen la presión ambiental, el avance económico y la intensificación tecnológica; esto permite un análisis integral de cómo interactúan la huella hídrica azul y la sustentabilidad.

Asimismo, la uniformidad agroclimática entre los municipios elegidos posibilita comparaciones entre ellos mediante parámetros metodológicos coherentes. Por otro lado, las diferencias en el ámbito tecnológico, la escala de producción y la organización de las empresas hacen más fácil detectar variaciones en el rendimiento ambiental y la eficiencia hídrica. Esta amalgama de paralelismos estructurales y discrepancias productivas consolida la validez analítica del estudio de caso múltiple.

En resumen, la justificación para la delimitación territorial del Bajío de Michoacán se fundamenta en:

- ✓ Su importancia estratégica en el sector agropecuario de exportación de frutas silvestres;
- ✓ La accesibilidad de datos oficiales de confianza y sistematizados;
- ✓ La manifestación de condiciones hidrogeológicas que ponen de manifiesto la presión ejercida sobre los acuíferos; y la presencia de condiciones que evidencian la presión sobre los acuíferos.
- ✓ El análisis de la relación entre la competitividad agroindustrial y la sustentabilidad hídrica es de relevancia socioambiental.

En consecuencia, esta elección geográfica no es arbitraria, sino que se fundamenta en criterios metodológicos robustos que aseguran consistencia entre los objetivos de investigación, las hipótesis propuestas y el alcance analítico del estudio.

De lo anterior se interpreta en la siguiente imagen:

Figura 2.3.2. Justificación de la región del Bajío de Michoacán como área de estudio en el análisis de la huella hídrica y la agroindustria de berries



Fuente: Elaboración propia con base en información de SIAP, CONAGUA y IMTA, integrando variables de producción agroindustrial, disponibilidad hídrica y contexto socioambiental.

2.3.3. Medición de la huella hídrica:

En el presente estudio, la cuantificación de la huella hídrica se lleva a cabo siguiendo el marco metodológico sugerido por Hoekstra et al. (2011), que simboliza la norma internacional para valorar el uso consuntivo y la polución del agua en procesos productivos. Esta técnica permite descomponer el consumo de agua en tres componentes separados: agua azul, agua gris y agua verde, lo que brinda una visión integral del impacto hídrico relacionado con la producción agrícola. Asimismo, la puesta en práctica de la metodología está en consonancia con los principios establecidos por la normativa ISO 14046, garantizando así coherencia con el análisis del rendimiento ambiental y el enfoque del ciclo de vida.

De acuerdo con Hoekstra et al. (2011), la huella hídrica verde (HHV) se refiere al volumen de agua pluvial acumulada en el suelo y consumida por evapotranspiración a lo largo del ciclo agrícola. Este componente adquiere una relevancia particular en los sistemas agrícolas de temporal; no obstante, en la región Bajío de Michoacán, distinguida por su alta tecnificación y riego intensivo en frutas,

su contribución relativa tiende a ser inferior en comparación con la huella azul.

El eje central de este estudio es la huella hídrica azul (HHA), definida como el volumen de agua superficial o subterránea extraída y consumida durante el proceso productivo, es decir, aquella que no retorna a la misma cuenca bajo condiciones equivalentes de tiempo y calidad (Hoekstra et al., 2011).

En el contexto de la agroindustria enfocada en la exportación de frutas del Bajío Michoacano, la HHA cobra relevancia específica por la dependencia estructural a los sistemas de riego por goteo, fertirriego y sistemas en sustrato. Estos implican una extracción continua de acuíferos regionales. Siguiendo el método establecido por Hoekstra et al. (2011), la huella hídrica azul se mide mediante la combinación de variables tecnológicas, productivas y biofísicas.

Figura 2.3.3. Esquema metodológico para la medición de la huella hídrica en la agroindustria del Bajío michoacano con base en el enfoque de Hoekstra et al. (2011)



Fuente: Elaboración propia con base en la metodología de Arjen Y. Hoekstra et al. (2011), integrando variables de evapotranspiración (ET_o), coeficiente de cultivo (K_c), rendimiento agrícola y tecnologías de riego, mediante el uso de CROPWAT 8.0 y fuentes oficiales como SIAP

2.3.4. Análisis de la disponibilidad hídrica

Metodología para el cálculo de la huella hídrica azul

En el presente estudio, la estimación de la huella hídrica azul se basa en el marco conceptual y metodológico sugerido por Hoekstra et al. (2011), teniendo en cuenta el estándar internacional para la cuantificación del uso consuntivo del agua en procesos productivos agrícolas. Esta metodología diferencia los elementos verde, azul y gris de la huella hídrica, facilitando la distinción entre el agua pluvial acumulada en el suelo, el agua superficial y subterránea extraída para riego, y el volumen necesario para la dilución de contaminantes.

La metodología también se alinea con los principios estipulados en la norma ISO 14046:2014, asegurando consistencia con el análisis de rendimiento ambiental y el enfoque del ciclo de vida en la administración del recurso hídrico (International Organization for Standardization [ISO], 2014).

El software CROPWAT versión 8.0, desarrollado por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), incorpora el modelo Penman-Monteith FAO-56 para el cálculo de la evapotranspiración de referencia (ET₀) (Allen et al., 1998). La evapotranspiración del cultivo (ET_c) se estima usando información climática diaria, que incluye la humedad relativa, la temperatura, las precipitaciones, la velocidad del viento y la radiación solar. También se toman en cuenta los parámetros fenológicos y edafoclimáticos. Esta técnica permite calcular con precisión el consumo de agua real por cultivo y por ciclo agrícola, diferenciando la parte cubierta por precipitaciones efectivas (huella verde) de la que requiere extracción de fuentes tanto superficiales como subterráneas (huella azul).

La huella hídrica azul, que se mide como el volumen de agua de riego utilizada por tonelada producida (m³/ton), es un indicador fundamental para medir la eficiencia del uso del agua en sistemas agrícolas de alta intensidad. El cálculo, basado en el rendimiento agrícola y en la demanda neta de riego, permite una correlación directa entre la presión ejercida sobre los acuíferos regionales y el rendimiento productivo, especialmente cuando hay sobreexplotación.

Finalmente, la evaluación de cómo se sostiene el uso del agua en función de su disponibilidad regional mejora cuando se combinan el Índice de Estrés Hídrico y la huella hídrica total. Esto permite un análisis global de la competitividad agroindustrial y de la sustentabilidad territorial (Hoekstra et al., 2011; Pfister et al., 2009). La metodología empleada para el cálculo de la huella hídrica azul incorpora variables

climáticas, agronómicas y tecnológicas, siguiendo el enfoque propuesto por Hoekstra et al. (2011), como se muestra en la figura 2.3.4. siguiente:

Figura 2.3.4.1. Metodología para el cálculo de la huella hídrica azul (HHA) en sistemas agrícolas basada en el enfoque de Hoekstra et al. (2011)



Fuente: La creación propia se basa en la metodología de Arjen Y. Hoekstra et al. (2011), la norma ISO 14046:2014 y en el empleo del modelo CROPWAT 8.0, que incorpora factores climáticos (ET_0), coeficientes de cultivo (K_c), precipitación efectiva (P_{eff}) y parámetros relacionados con la edafología y el clima.

La huella hídrica azul se caracteriza como la cantidad de agua dulce superficial o subterránea consumida durante el proceso productivo que no retorna inmediatamente al mismo cuerpo de agua, normalizada por la producción obtenida (Hoekstra et al., 2011). En el ámbito agrícola, su cálculo se fundamenta en la estimación del requerimiento de riego del cultivo y su correlación con el rendimiento agrícola, conforme al estándar metodológico establecido por la Red de Footprint del Agua (WFN).

1-. Evapotranspiración de referencia (ET_0)

La evapotranspiración de referencia (ET_0) representa la demanda evaporativa de la atmósfera y se estima mediante el método Penman–Monteith FAO, expresa

$$ET_o = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T+273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 u_2)}$$

Ecuación 1.

Donde:

ET_o = evapotranspiración de referencia (mm/día)

Δ= pendiente de la curva de presión de vapor

R_n= radiación neta en la superficie del cultivo

G= flujo de calor del suelo

γ= constante psicrométrica

T = temperatura media del aire (°C)

u₂ = velocidad del viento a 2 m (m/s)

e_s-e_a = déficit de presión de vapor

En la práctica, este valor se obtiene directamente de CROPWAT o CLIMWAT.

2-. Evapotranspiración del cultivo (ET_c)

La evapotranspiración del cultivo se calcula a partir de la relación entre la evapotranspiración de referencia y el coeficiente del cultivo, de acuerdo con la expresión:

$$ET_c = K_c \times ET_o$$

Ecuación 2.

Donde:

ET_c = evapotranspiración del cultivo (mm/día)

K_c = coeficiente de cultivo (adimensional)

ET_o= evapotranspiración de referencia (mm/día)

3-. Precipitación efectiva (P_{eff})

La precipitación efectiva es la fracción de la lluvia que realmente queda disponible para el cultivo. Según FAO:

$$P_{eff} = f(P)$$

Ecuación 3.

Donde:

P_{eff} = precipitación efectiva (mm)

P = precipitación total (mm)

La función f depende del método FAO y se calcula automáticamente en CROPWAT.

4-. Requerimiento de riego (IR)

El requerimiento neto de riego corresponde al déficit hídrico del cultivo:

$$IR = ET_c - P_{eff}$$

Ecuación 5.

Donde:

IR= requerimiento de riego (mm)

ET_c = evapotranspiración del cultivo (mm)

P_{eff} = precipitación efectiva (mm)

Este valor representa el consumo de agua azul en términos de lámina de riego.

La huella hídrica azul se basa en el volumen total de agua azul consumida, calculado como:

$$V_{azul} = \sum (IR \times A)$$

Ecuación 6.

Donde:

V_{azul} = volumen de agua azul consumida (m^3)

IR = requerimiento de riego acumulado (mm)

A = superficie cultivada (m^2)

Conversión de unidades: $1 \text{ mm} \times 1 \text{ m}^2 = 0,001 \text{ m}^3$

Por tanto:

$$V_{azul}(m^3) = \frac{\sum (IR [mm] \times A [m^2])}{1000}$$

Ecuación 7.

6-. Producción agrícola (Y)

La producción total del cultivo se calcula como:

$$Y = A_{cosechada} \times Rend \quad \text{Ecuación 8.}$$

Donde:

Y = producción total (ton o kg)

Acosechada = superficie cosechada (ha)

Rend = rendimiento del cultivo (ton/ha)

7-. Huella Hídrica Azul por unidad de producto (HHA)

De acuerdo con el estándar WFN, la Huella Hídrica Azul se define como:

$$HHA = \frac{V_{azul}}{Y} \quad \text{Ecuación 9.}$$

Donde:

HHA= huella hídrica azul (m³/ton o m³/kg)

Vazul= volumen total de agua azul consumida (m³)

Y= producción agrícola total (ton o kg)

8-. Huella Hídrica Azul total del cultivo

Cuando se requiere expresar la huella hídrica total del sistema productivo:

$$HHA_{total} = V_{azul} \quad \text{Ecuación 10.}$$

Este valor se utiliza para:

- ✓ análisis por cuenca
- ✓ presión hídrica regional
- ✓ comparaciones interanuales

La representación denominada "*Procedimiento para el Cálculo de la Huella Hídrica Azul*" expone de forma esquemática y secuencial las fases metodológicas necesarias para calcular este indicador en sistemas de agricultura. El esquema comienza con la determinación de los objetivos y el alcance, en los que se especifican variables como el cultivo, la zona de estudio y la unidad de análisis (m³/ton), enfocándose especialmente en la huella hídrica azul.

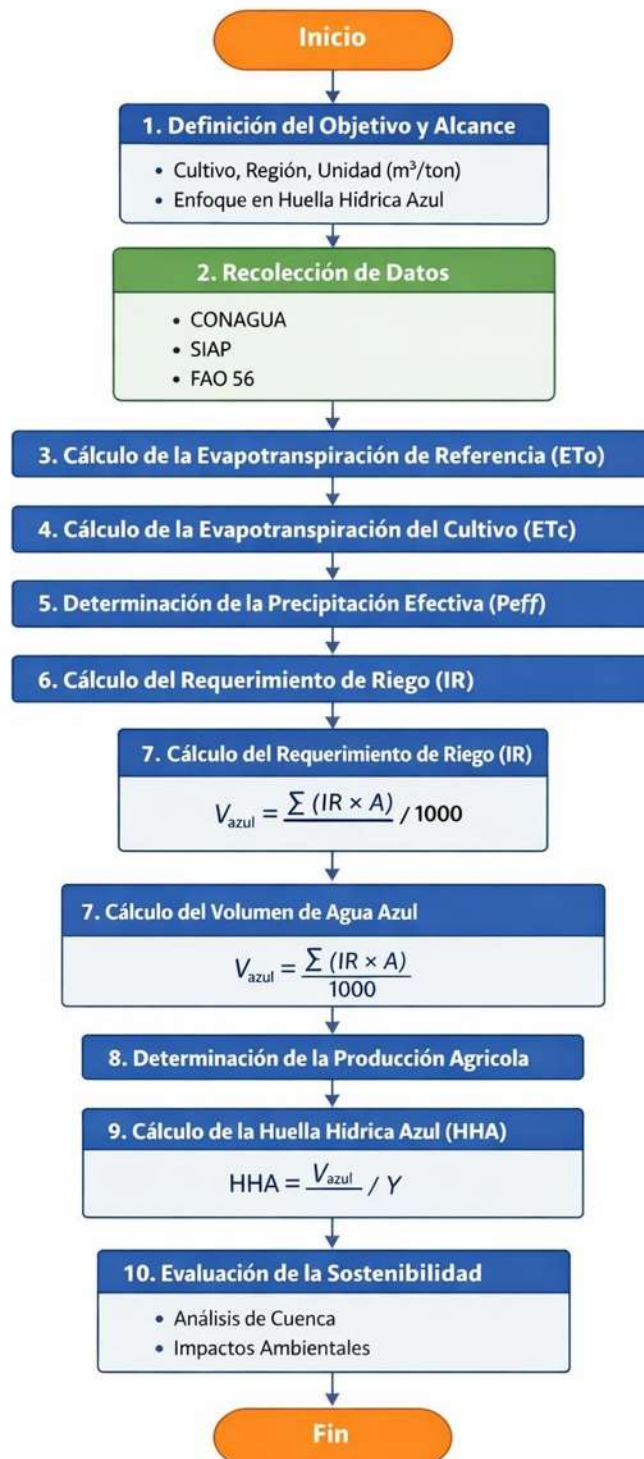
A continuación, se incorporan las técnicas de recolección de datos, destacando el uso de fuentes oficiales como la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), el Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP) y las directrices de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO 56). Esto garantiza que los datos empleados sean válidos y consistentes.

En las etapas posteriores, el método se centra en calcular variables hidrológicas fundamentales, empezando con la evapotranspiración de referencia (ET_o), después la evapotranspiración del cultivo (ET_c) y finalmente la precipitación efectiva (P_{eff}). Estos componentes ayudan a calcular la necesidad de riego (IR), que es el elemento esencial para establecer el volumen de agua azul empleada (V_{azul}), teniendo en cuenta tanto la superficie cultivada como las demandas hídricas. La producción agrícola (Y) se incorpora a continuación con el fin de determinar la huella hídrica azul (HHA) mediante la correlación entre el rendimiento del cultivo y el volumen de agua consumido.

Finalmente, el proceso culmina con una etapa de evaluación de la sustentabilidad, durante la cual se consideran elementos como el análisis de cuenca y los efectos ambientales relacionados. Esto hace posible que el cálculo técnico esté conectado con la gestión integral del recurso acuático. En su totalidad, el modelo evidencia una metodología en consonancia con los estándares internacionales para la evaluación de la huella hídrica, integrando variables biofísicas y productivas en un enfoque sistémico (Hoekstra et al., 2011; Allen et al., 1998).

Figura 2.3.4.2. Procedimiento para el cálculo de la huella hídrica azul

Procedimiento para el Cálculo de la Huella Hídrica Azul



Fuente: Elaboración propia con base en Hoekstra et al. (2011) y Allen et al. (1998).

Métodos del análisis cuantitativo de la huella hídrica por cultivo

La huella hídrica azul (WF(b)) se caracteriza como el volumen total de agua dulce derivada de fuentes superficiales o subterráneas, destinado al riego y otras aplicaciones asociadas con la producción agrícola, expresado normalizadamente por unidad de producto ($\text{m}^3 \text{ ton}^{-1}$). Desde una perspectiva matemática, se determina como la proporción entre el consumo hídrico azul acumulado durante el ciclo productivo (CWU(b)) y el rendimiento del cultivo (Y, ton ha^{-1}).

El cálculo del CWU(b) se realiza a través de la suma diaria de la evapotranspiración azul (ET(azul)), definida como la diferencia entre la evapotranspiración del cultivo (ET(c)) y la precipitación efectiva (Peff), a lo largo de todo el ciclo agrícola. Posteriormente, este valor se transforma de milímetros a metros cúbicos por hectárea, multiplicándolo por 10. Un número considerable de investigaciones recientes implementadas en sistemas agroindustriales mexicanos han utilizado el software CROPWAT v8.0.

Este software incorpora el método Penman-Monteith FAO-56 para calcular la evapotranspiración de referencia (ET0) y los coeficientes de cultivo (Kc). Este software emplea datos climáticos diarios, parámetros edáficos y variables fenológicas para modelar con precisión la dinámica hídrica del cultivo (Allen et al., 1998; Hoekstra et al., 2011). Esta metodología posibilita una estimación coherente del volumen de agua de riego consumido por tonelada producida y permite una evaluación comparativa de diversos sistemas de producción.

La metodología se fundamenta en el examen de extensas series temporales climáticas y en la incorporación de datos oficiales referentes al rendimiento agrícola, las propiedades del suelo y las concesiones de agua, lo que asegura su reproducibilidad y validez científica.

El valor final de WF(b) se establece dividiendo el CWU(b) ($\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$) por la productividad específica del cultivo. A modo de ejemplo, si el consumo es de 1 500 $\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$ y la productividad es de 10 ton ha^{-1} , se obtiene una huella hídrica azul de 150 $\text{m}^3 \text{ ton}^{-1}$. Para determinar la sustentabilidad, se compara la huella anual con los volúmenes entregados por la autoridad hídrica y se calcula un Índice de Estrés Hídrico (WSI), que establece una relación entre el consumo y la disponibilidad. Valores superiores a 1 indican una extracción que sobrepasa los límites sustentables,

lo que indica un peligro de sobreexplotación (Pfister et al., 2009; Hoekstra et al., 2011). Asimismo, el uso de contextos comparativos entre el riego tradicional y los sistemas tecnificados, como el monitoreo inteligente o el goteo, hace más fácil calcular las reducciones en la huella hídrica azul y posibilita evaluar su contribución a la sustentabilidad y la eficiencia a escala regional.

Esta perspectiva muestra el progreso metodológico presente en América Latina, donde se está fomentando una visión integral sobre la gestión del agua y sus efectos territoriales y ecológicos mediante la integración de herramientas técnicas complejas con enfoques críticos sociambientales.

El gráfico titulado "La huella hídrica azul como indicador de la sustentabilidad del agua" presenta un esquema detallado de la metodología utilizada en los sistemas agrícolas de América Latina entre 2011 y 2023, subrayando la progresión en el examen del uso del agua y su vinculación con la sustentabilidad.

En la sección preliminar, la huella hídrica azul (WF(b)) se define como el volumen total de agua superficial y subterránea extraída para riego por unidad de producción (m^3/ton), expresado mediante la relación entre el consumo acumulado de agua azul (CWU(b)) y el rendimiento del cultivo (Y), lo cual se alinea con los estándares internacionales sugeridos por la metodología de la Red de Huella de Agua (Hoekstra et al., 2011).

La figura subsiguiente expone la base de datos y el enfoque empírico, fundamentado en series climáticas extensas (promedios 2011-2023), así como en información derivada de fuentes oficiales como el Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP) y la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), además de registros hidrogeológicos como el REPDA. Adicionalmente, se integran variables edáficas y climáticas para consolidar la estimación del consumo hídrico, facilitando así la realización de evaluaciones comparativas entre sistemas productivos y territorios distintos.

El índice WSI (Water Stress Index) se introduce en la sección derecha del esquema para evaluar la sustentabilidad hídrica, calculado como la relación entre la huella hídrica azul y la disponibilidad anual de agua. Se señala que los valores que exceden 1 evidencian condiciones de explotación excesiva e insustentabilidad, especialmente en el empleo de agua subterránea, un hecho que se alinea con las recientes investigaciones sobre el estrés hídrico y los límites ecológicos del recurso

(Pfister et al., 2009; Mekonnen & Hoekstra, 2011).

En última instancia, la figura integra un elemento de consistencia metodológica y tecnológica, contrastando sistemas de riego convencionales con metodologías avanzadas como el riego por goteo y la implementación de inteligencia artificial. La tecnificación facilita una disminución cuantificable de la huella hídrica azul y una optimización en la eficiencia de la utilización del agua, contribuyendo a una evaluación holística de la sustentabilidad territorial. En su totalidad, el esquema condensa la combinación de variables biofísicas, tecnológicas y de gestión en el examen del uso consuntivo del agua en el sector agrícola.

Figura 2.3.4.3. La huella hídrica azul como indicador de la sustentabilidad del agua



Fuente: Elaboración propia con base en Hoekstra et al. (2011), Pfister et al. (2009, 2023) y Mekonnen y Hoekstra (2011).

1. Preparación del insumo

1.1 Se crea un archivo de Excel con los siguientes elementos:

1.1.1. Datos de entrada (datos secundarios de organizaciones oficiales de la SADER, la SIAP y la CONAGUA)

1.1.2. Mapa de suelos del Bajío de Michoacán

1.1.3. Tablas y gráficos del manual "The water footprint assessment manual: Setting the Global Standard"

1.1.4. Resultados

2.1. Crear carpetas para almacenar módulos para el software CROPWAT (datos e insumo base para el cálculo de la HHA)

1.2.1. Clima (para esta carpeta se requiere utilizar el software CLIMWAT, extensión y complemento de CROPWAT)

1.2.2. Precipitación (para esta carpeta se requiere utilizar el software CLIMWAT, extensión y complemento de CROPWAT)

1.2.3. Cultivo

1.2.4. Suelo

1.2.5. RAC (Requerimiento de Agua Cultivo)

Fuente: los puntos anteriores son datos de entrada para el cálculo de la HHA

2. Recolección de datos de entrada:

Manual de la FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura) y artículos científicos sobre estos estudios.

2.1. Coeficiente de cultivo (K_c): $K_{cinicial}$, K_{cmedio} , K_{cfinal}

2.2. Altura del cultivo de la investigación (arándano, fresa, frambuesa y zarzamora en los municipios de Zamora, Jacona, Tangancicuaro y Los Reyes)

2.3. Etapas fenológicas: duración en días (fenómenos biológicos en relación con el clima)

2.4. Profundidad raticular máxima (mayor distancia vertical que alcanzan las raíces de una planta individual en el perfil del suelo para extracción del agua)

2.5. Factor de agotamiento (P): indispensable para el programa CROPWAT

2.6. Factor de respuesta al rendimiento (K_y): coeficiente utilizado en agronomía y manejo del riego para cuantificar la sensibilidad de un cultivo específico al déficit hídrico.

3. Obtención de los datos climaticos desde CLIMWAT

3.1. CLIMWAT es un software recomendado por ser el complemento de CROPWAT, cabe mencionar que no se actualiza y tiene estaciones meteorológicas de todo el país de México, para el caso de estudio que tenemos se toma la estación meteorológica de Guadalajara por estar cerca de la zona geográfica de estudio.

3.2. Exportar la información en la carpeta que se creó en el punto 1.2.1.

4. Carga de datos climáticos para el cálculo de HHA.

4.1. Abrir el programa complementario de CROPWAT que es CLIMWAT y seleccionar la estación de Guadalajara, se guardan los datos en la carpeta creada del clima como está en el punto 1.2.1, la imagen se muestra a continuación:

4.2. Posteriormente, abrir el módulo CLIMA en CROPWAT: abrir >seleccionar archivo exportado de CLIMWAT y se obtiene: Temperatura mínima/máxima, humedad relativa, viento, radiación y Evapotranspiración de referencia (ET_o): pérdida de agua por evaporación del suelo y transpiración de las plantas en condiciones ideales. Se muestra en la siguiente imagen:

5. Precipitación efectiva (P_{eff})

5.1. Abrir módulo PRECIPITACIÓN: se selecciona el método>FAO (cuando se inicia, da por defecto el método USDA)

5.2. Hacer clic en el archivo de precipitación, en el cual, el sistema genera la precipitación efectiva mensual (P_{eff}). En las siguientes imágenes se muestra este procedimiento.

6. Definición de datos o apartado de cultivo

De acuerdo con la información calculada y referenciada, se comienza a llenar los apartados que aparecen. Estos puntos son los siguientes:

6.1. Nombre del cultivo

6.2. Fecha de siembra.

6.3. K_c_{inicial}, K_c_{media} y K_c_{final}

6.4. Etapa fenológicos

6.5. Profundidad radicular por etapa

6.6. Factor P (agotamiento crítico) por etapas (obtenidos gráficamente)

6.7. Ky (factor respuesta rendimiento)

6.8. Altura del cultivo

Para el cálculo del punto 6.6., gráficamente y con los valores requeridos para ingresar los datos en el programa de CROPWAT, se determina de la siguiente manera:

6.6.1. Crear un documento de Excel con los datos del punto 6, donde en cada renglón y columna se coloquen las fórmulas y gráficas de la FAO para obtener el valor del factor de agotamiento, como se muestra en las siguientes figuras:

Para calcular el factor de agotamiento, tomamos el valor de p, mismo que se obtiene de la literatura; es un valor teórico. Una vez que tengamos el valor de p, nos vamos a la gráfica para poder obtener el valor de ETo. Con la flecha verde nos indica el valor de evapotranspiración del cultivo, la línea amarilla nos indica el factor de agotamiento y la línea o flecha naranja nos indica en qué posición debe estar nuestra p teórica para poder dar con el valor buscado.

En la intersección de las flechas amarilla, verde y naranja nos da el valor de ETo o ETo, que será colocado en la tabla para el cálculo de ETc o ETc.

7. Caracterización del suelo

7.1. Determinar la textura del suelo de los municipios interesados de Michoacán (bajío), se ingresa en el programa de CROPWAT lo siguiente:

- ✓ Capacidad de campo en %
- ✓ Punto de marchitez %
- ✓ Humedad disponible %
- ✓ Conductividad hidráulica (in/hr>mm/día)

8. Cálculo del requerimiento de agua del cultivo (RAC)

8.1. Se abren los módulos simultáneamente del programa CROPWAT, siendo los puntos 4,5,6 y 7):

- ✓ Clima
- ✓ Precipitación
- ✓ Cultivo
- ✓ Suelo

8.2. Una vez que estén abiertos estos módulos, se hace clic en el módulo llamado “RAC” (Requerimiento de Agua del Cultivo), dando como resultado calculado por el programa CROPWAT lo siguiente:

- ✓ ETc diaria en unidades milímetros por día (mm/d)
- ✓ Precipitación efectiva (Pe_{eff})
- ✓ Requerimiento de riego (IR)

8.3. Para nuestro estudio, se requiere la columna del resultado de IR (requerimiento de riego) sustituyendo en la fórmula de la huella hídrica azul (HHA) el valor que se requiere.

Se muestra en la siguiente tabla el resultado del programa CROPWAT, del cual se muestran los cálculos, donde se obtiene un valor de la suma de ETc mm/décadas, para realizar el cálculo de la Huella Hídrica Azul (HHA) con los valores que nos da el SIAP.

ARÁNDANO							
Mes	Decada	Etapas	Kc	ETc	ETc	Prec. efec	Req. Riego
			coef	mm/día	mm/dec	mm/dec	mm/dec
Dic	1	Inic	0.50	1.31	13.10	0.00	13.10
Dic	2	Inic	0.50	1.24	12.40	0.00	12.40
Dic	3	Inic	0.50	1.28	14.10	0.00	14.10
Ene	1	Inic	0.50	1.31	13.10	0.00	13.10
Ene	2	Des	0.51	1.37	13.70	0.00	13.70
Ene	3	Des	0.55	1.63	17.90	0.00	17.90
Feb	1	Des	0.59	1.92	19.20	0.00	19.20
Feb	2	Des	0.63	2.23	22.30	0.00	22.30
Feb	3	Des	0.67	2.55	20.40	0.00	20.40
Mar	1	Des	0.70	2.88	28.80	0.00	28.80
Mar	2	Des	0.75	3.26	32.60	0.00	32.60
Mar	3	Des	0.79	3.65	40.10	0.00	40.10
Abr	1	Med	0.82	4.02	40.20	0.00	40.20
Abr	2	Med	0.82	4.25	42.50	0.00	42.50
Abr	3	Med	0.82	4.30	43.00	0.10	42.90
May	1	Med	0.82	4.41	44.10	0.00	44.10
May	2	Fin	0.82	4.48	44.80	0.00	44.80
May	3	Fin	0.81	4.17	45.90	2.10	43.70
Jun	1	Fin	0.80	3.84	38.40	27.10	11.30
Jun	2	Fin	0.79	3.57	35.70	40.30	0.00
Jun	3	Fin	0.78	3.38	33.80	46.90	0.00
Jul	1	Fin	0.77	3.20	32.00	55.80	0.00
Jul	2	Fin	0.76	3.02	30.20	64.60	0.00
Jul	3	Fin	0.75	2.95	32.40	59.50	0.00
Ago	1	Fin	0.74	2.88	28.80	53.10	0.00
Ago	2	Fin	0.73	2.81	28.10	49.70	0.00
Ago	3	Fin	0.72	2.71	5.40	8.20	5.40
Suma					773.10	407.50	522.70

Como referencia de las abreviaturas son las siguientes:

Tabla 2.3.4. Abreviaturas, unidades y definición de variables empleadas en el cálculo de la Huella Hídrica Azul

Abreviatura	Unidad	Definición
HH	m ³ /ton	Huella Hídrica. Indicador que cuantifica el volumen total de agua dulce consumida directa o indirectamente para producir una unidad de producto agrícola.
UAC	m ³ /ha	Uso de Agua del Cultivo. Volumen total de agua azul consumida por el cultivo durante su ciclo productivo, expresado por unidad de superficie.
R	ton/ha	Rendimiento del cultivo. Cantidad de producto agrícola obtenido por unidad de superficie cultivada.
ETazul	mm o m ³ /ha	Evapotranspiración del agua azul. Fracción de la evapotranspiración total del cultivo que es satisfecha mediante riego proveniente de fuentes superficiales o subterráneas.
Kc	adimensional	Coeficiente del cultivo. Factor que ajusta la evapotranspiración de referencia (ET _o) a las condiciones específicas del cultivo según su etapa fenológica.
ET _o	mm/día o mm/periodo	Evapotranspiración de referencia. Tasa de evapotranspiración de una superficie de referencia (pasto) bajo condiciones climáticas estándar.
P	adimensional	Factor de agotamiento crítico del agua disponible en el suelo. Representa la fracción de agua que puede ser extraída del suelo sin afectar el rendimiento del cultivo.
Ky	adimensional	Factor de respuesta del rendimiento al déficit hídrico. Indica la sensibilidad del rendimiento del cultivo ante reducciones en la evapotranspiración.

2.3.4. Análisis de la disponibilidad hídrica.

El procedimiento de elección de datos representa un componente crucial en la evaluación de la Huella Hídrica Azul (HHA), dado que su rigurosidad metodológica determina la validez, la comparabilidad y la reproducibilidad de los resultados derivados. En el presente estudio, la elección de datos se llevó a cabo siguiendo criterios conceptuales, espaciales, productivos y metodológicos claramente

establecidos, que se encuentran en consonancia con los lineamientos del enfoque estandarizado para la evaluación de la huella hídrica y con el propósito principal del estudio.

2.3.4.1. Demarcación espacial y productiva del sistema de estudio delineado.

Como criterio inicial para la selección, se estableció una delimitación territorial precisa para la región del Bajío en el estado de Michoacán, concretamente en los municipios de Jacona, Zamora, Los Reyes y Tangancícuaro. Esta delimitación se debe a la elevada concentración de producción agrícola y agroindustrial de frutas destinadas al mercado internacional, junto con la importancia hidrológica de la región en lo que respecta a la presión sobre los recursos hídricos disponibles.

El sistema productivo analizado fue restringido a la agroindustria y la agricultura de exportación de los cultivos de frambuesa, arándano, fresa y zarzamora. Este estándar doble —territorial y productivo— hizo posible que se excluyeran datos de áreas, cosechas y sistemas agrícolas sin una conexión directa con el objeto de estudio, asegurando de esta manera la relevancia y coherencia del análisis.

2.3.4.2. Definición teórica de la huella hídrica y énfasis en la Huella Hídrica Azul.

El segundo parámetro de elección de datos se basó en la definición conceptual de la Huella Hídrica como un indicador de uso del agua. Aunque la totalidad de la huella hídrica se compone de los elementos verde, azul y gris, en el presente estudio se otorgó prioridad exclusiva al análisis de la Huella Hídrica Azul, dada su importancia para la evaluación de la presión directa sobre las fuentes de agua superficial y subterránea empleadas en el riego agrícola.

Por lo tanto, se excluyeron de forma intencionada los datos vinculados a la huella hídrica verde —vinculada al consumo de agua pluvial— y a la huella hídrica gris —vinculada a la contaminación del recurso hídrico—, enfocando la selección exclusivamente en la información requerida para cuantificar el consumo de agua azul.

2.3.4.3. La identificación del tipo de indicador y las necesidades de información correspondientes.

La Huella Hídrica Azul se define como un indicador de utilización, cuyo propósito es cuantificar el volumen de agua azul efectivamente consumido durante el proceso productivo. Dentro de este marco metodológico, se escogieron exclusivamente datos que facilitaran la cuantificación de volúmenes de agua vinculados a la evaporación, la incorporación en el cultivo y las pérdidas no

retornables al sistema hidrológico.

Por lo tanto, se tomaron en cuenta exclusivamente variables que se pueden expresar en unidades volumétricas (m^3) y que son directamente atribuibles al proceso de riego agrícola. Todos los datos que representaran exclusivamente extracción potencial, disponibilidad teórica o estimaciones no relacionadas con el consumo real fueron excluidos del análisis.

2.3.4.4. La elección de variables para el cálculo de la Huella Hídrica Azul se realizará mediante la selección de variables específicas.

Conforme a la formulación metodológica de la Huella Hídrica Azul, se estableció como parámetro que los datos seleccionados facilitaran una estimación coherente de los componentes de evaporación del agua azul, la incorporación del agua en el cultivo y el flujo de retorno perdurable. Para alcanzar este objetivo, las variables seleccionadas debían satisfacer simultáneamente los siguientes criterios: estar asociadas con el riego agrícola, representar el consumo efectivo de agua, encontrarse desagregadas por cultivo y municipio, y facilitar su normalización en términos de volumen por unidad de producto (m^3/ton).

Este criterio garantizó la coherencia entre los datos obtenidos y la ecuación de cálculo de la HHA, además de garantizar la comparabilidad entre los cultivos y los territorios examinados.

2.3.4.5. Evaluación metodológica de las fuentes hidrológicas oficiales a través de un proceso de valoración.

A lo largo del procedimiento de selección, se realizó un análisis meticuloso de la información hidrológica disponible en fuentes oficiales, particularmente de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), integrando datos del Distrito de Riego 061 y de la región hidrológica correspondiente a Zamora y Jacona. A pesar de que estas fuentes constituyen el marco normativo en el campo de la gestión hídrica, se identificaron limitaciones relacionadas con la escala espacial, la desagregación por cultivo y la disponibilidad de información concerniente al consumo invernal.

Estas limitaciones impidieron la aplicación directa de estos datos para la estimación minuciosa de la Huella Hídrica Azul a nivel municipal y agrícola, lo que impulsó la priorización de fuentes complementarias con un nivel de detalle productivo superior.

- ✓ La utilización de datos productivos como fundamento operativo del cálculo.

- ✓ Aplicación de información productiva como fundamento operativo del cálculo.
- ✓ Aplicación de información productiva como fundamento operativo del cálculo.

Se eligió la información estadística agrícola procedente del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP), a pesar de las restricciones encontradas en las fuentes hidrológicas. Esta fuente cumple con los requisitos de oficialidad, continuidad en el tiempo, desagregación por espacio y especificidad por tipo de cultivo, lo que permite correlacionar la producción agrícola con el uso del agua azul.

El Índice de Seguridad y Salud en la Agricultura (SIAP) incluye las variables elegidas: la superficie cultivada, la superficie recogida, el rendimiento y la producción total. Para la normalización del uso de agua y para determinar la Huella Hídrica Azul en términos de metros cúbicos por tonelada producida, estas variables son cruciales.

2.3.4.6. La incorporación del rendimiento agrícola como variable clave en la ecuación agrícola.

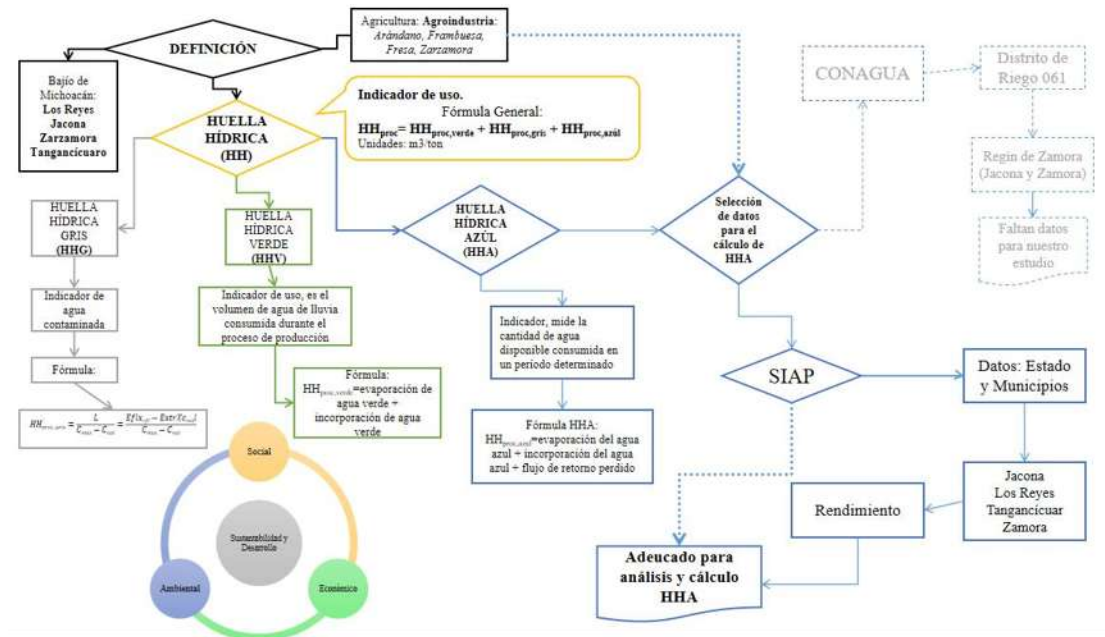
Dado que el rendimiento agrícola representa la relación directa entre el consumo de agua y la producción final, se incorporó como un elemento fundamental en los criterios de selección de datos. En este marco, solamente se consideraron datos que permitieran determinar una relación precisa entre la cantidad de agua consumida, el cultivo específico, la jurisdicción municipal y la cantidad producida.

Este principio asegura que la Huella Hídrica Azul refleje apropiadamente la eficiencia del sistema productivo en términos de agua, lo que permite hacer comparaciones territoriales y productivas coherentes.

2.3.4.7. Se procederá a la verificación final de la información seleccionada.

En última instancia, los datos seleccionados se sometieron a un proceso de validación metodológica para corroborar su consistencia con la definición de Huella Hídrica Azul, su compatibilidad con la formulación de cálculo utilizada, su oficialidad, su veracidad y su reproducibilidad. Únicamente los datos que satisfacen estos criterios fueron evaluados como apropiados para el análisis y cálculo de la Huella Hídrica Azul en la producción agroindustrial de frutas en el Bajío de Michoacán.

Lo anterior descrito se muestra en la imagen siguiente.



2.3.5. Integración de hallazgos: Correlación entre el tipo de cultivo, el nivel tecnológico y la presión sobre el recurso hídrico

La incorporación de los hallazgos derivados de este estudio facilita la identificación de una correlación estructural entre la naturaleza del cultivo, el grado de tecnificación agrícola y la presión ejercida sobre el recurso hídrico, especialmente en escenarios agroexportadores como el Bajío de Michoacán. Desde la óptica de la huella hídrica azul (HHA), los cultivos de alto valor comercial, tales como el arándano y la frambuesa, exhiben una mayor intensidad en el consumo de agua subterránea por unidad de producción, atribuible a sus requisitos hídricos particulares, ciclos de producción largos y condiciones de cultivo controladas. Este fenómeno es diferente al de cultivos como la fresa, que generalmente muestran una menor huella hídrica relativa (Mekonnen & Hoekstra, 2011).

En este marco, el análisis comparativo revela que la presión sobre los acuíferos no se determina solo a partir del volumen total de extracción, sino que es el resultado de las demandas hídricas del cultivo y su distribución geográfica. Por lo general, las ciudades que tienen un alto nivel de producción intensiva, como Zamora y Jaona, muestran tasas más altas de presión hídrica; esto se evidencia en indicadores como el Índice de Estrés Hídrico (WSI) y el Indicador de Presión Hídrica Azul (IPHA). Estos resultados concuerdan con estudios que sugieren que el aumento de la agricultura enfocada en la exportación puede causar desequilibrios entre la

disponibilidad y el uso del agua, específicamente en zonas con escasa recarga natural (Pfister et al., 2009; Hoekstra et al., 2011).

Asimismo, la eficiencia con la que se emplea el agua muestra que el nivel tecnológico es un elemento fundamental. Los sistemas de riego tecnificado, como el fertirriego, el riego por goteo y la aplicación de herramientas o sensores de agricultura con alta precisión, muestran una reducción significativa en el consumo unitario de agua en relación con los sistemas tradicionales. Esto es lo que sugieren las pruebas empíricas. No obstante, dicha eficiencia relativa no siempre se manifiesta en una reducción absoluta de la presión hídrica, atribuible al fenómeno de rebote vinculado con la ampliación de la superficie cultivada y al aumento de la productividad, fenómeno extensamente documentado en la literatura referente a la eficiencia hídrica (Grafton et al., 2018).

Además, la combinación de información proveniente de fuentes oficiales como la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) y el Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP), en conjunción con herramientas metodológicas como CROPWAT (FAO), facilitó la estimación del balance hídrico regional y la cuantificación del consumo consuntivo de agua en función de variables climáticas, edáficas y de producción. Esta metodología pone de manifiesto que la presión hídrica se deriva de una interacción compleja entre elementos biofísicos y socioeconómicos, en la que la disponibilidad natural del recurso se encuentra condicionada por dinámicas de mercado, políticas públicas y modelos de producción intensiva (CONAGUA, 2023; SADER, 2022).

Desde la perspectiva de la sustentabilidad fuerte, estos descubrimientos posibilitan postular que el agua, en su calidad de capital natural esencial y no reemplazable, presenta restricciones biofísicas que no pueden ser mitigadas exclusivamente a través de mejoras tecnológicas o aumentos en la eficiencia productiva. Por ende, la correlación detectada entre la variedad de cultivos, el nivel tecnológico y la presión hídrica sugiere la necesidad de transitar hacia modelos de gobernanza hídrica más holísticos, que integren principios de equidad, regulación territorial y límites ecológicos en la expansión agroindustrial (Neumayer, 2010; Pahl-Wostl et al., 2013).

En conclusión, los hallazgos empíricos indican que los cultivos de mayor rentabilidad económica no necesariamente son los más eficaces en cuanto al uso sustentable del agua, y que la tecnificación, a pesar de su relevancia, no representa

una solución suficiente por sí misma. En cambio, es imperativa una integración entre la innovación tecnológica, la planificación territorial y la administración integrada de los recursos hídricos para mitigar la presión sobre los acuíferos y progresar hacia un modelo agroindustrial genuinamente sustentable.

En síntesis, la metodología expuesta en este capítulo demostró que la huella hídrica azul no es simplemente un indicador técnico del uso del agua, sino también una herramienta relevante para comprender los vínculos entre la producción agroindustrial, la disponibilidad de agua y la sustentabilidad territorial. La conexión hallada entre la presión sobre los acuíferos, el tipo de cultivo y el grado de tecnología indica que los sistemas agrícolas intensivos en el Bajío de Michoacán tienen una gran dependencia del agua. La eficiencia tecnológica, a pesar de su importancia, no soluciona los problemas que surgen del uso excesivo y de la producción en aumento.

En esta situación, es crucial ir más allá de la evaluación que solo se basa en la cantidad de agua. Debemos incluir aspectos tecnológicos, económicos y de gobernanza que ayuden a entender la complejidad del sistema agroindustrial. Desde esta perspectiva, el próximo capítulo explora la agroindustria en el Bajío de Michoacán dentro de la revolución agroindustrial 4.0. Se analiza cómo el uso de tecnologías digitales, la automatización y la agricultura de precisión cambian las formas de producción y su relación con el uso eficiente y sustentable del agua.

CAPÍTULO III

La agroindustria en el Bajío de Michoacán en el contexto de la revolución agroindustrial 4.0

“La verdadera educación consiste en obtener lo mejor de uno mismo”

-Mahatma Gandhi-

La región del Bajío, específicamente los municipios de Zamora, Jacona, Tangancícuaro y Los Reyes, ha consolidado una posición estratégica como epicentro de la agroindustria mexicana de exportación, atribuible a su especialización productiva en cultivos de alto valor comercial y demanda internacional, como el aguacate, la fresa, la zarzamora y el brócoli. Esta posición se atribuye a una amalgama de elementos agroecológicos favorables, una infraestructura de riego de vanguardia, un capital corporativo orientado hacia la exportación y una vinculación con cadenas de suministro a nivel mundial.

Esta combinación ha permitido a la entidad posicionarse entre los productores y exportadores predominantes de hortalizas y frutas del país (Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural [SADER], 2022; Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera [SIAP], 2023). Desde un enfoque estructural, Michoacán aporta una proporción significativa al valor total de las exportaciones agroalimentarias de México, particularmente en los sectores de frutas y aguacate, lo cual ha alterado el ambiente rural y la dinámica socioeconómica de la región (SIAP, 2023).

3.1 Caracterización de la región del Bajío de Michoacán

El Bajío, situado en la región noroccidental de la entidad, se erige actualmente como uno de los territorios agroindustriales más dinámicos del occidente mexicano, tanto por su aportación al valor bruto de la producción agrícola como por su integración en las cadenas globales de exportación de hortalizas. Localidades como Zamora, Jacona, Tangancícuaro, Chilchota y Yurécuaro se caracterizan por una productividad elevada vinculada a suelos de origen volcánico con una capacidad de retención hídrica óptima, una disponibilidad relativa de agua subterránea y unas condiciones climáticas templadas subhúmedas que propician la agricultura intensiva de alto valor comercial (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera [SIAP], 2023; Comisión Nacional del Agua [CONAGUA], 2023.)

La especialización en aguacate y frutas como la frambuesa, el arándano, la fresa y la zarzamora ha sido posible gracias a esta estructura geográfica. Esto ha

permitido establecer un modelo agroexportador que está orientado principalmente hacia los mercados de Europa y América del Norte (Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural [SADER], 2022).

Se considera que los procesos de reconfiguración agrícola son la causa de la migración hacia modelos productivos muy especializados, desde una perspectiva estructural, asociados con la globalización agroalimentaria y la intensificación tecnológica. Delgado-Ramos (2015) destaca que la proliferación de monocultivos destinados a la exportación en México ha inducido una transformación significativa en las regiones rurales, propiciando dinámicas de concentración productiva y ejerciendo presión sobre los bienes comunes naturales. En lo que respecta al Bajío Michoacano, este proceso ha sido complementado por la implementación progresiva de sistemas de riego presurizado (predominantemente goteo y microaspersión), fertirriego tecnificado y el uso intensivo de infraestructura protegida (macrotúneles e invernaderos), lo que ha propiciado un incremento significativo en la productividad física por hectárea (SIAP, 2023).

La interacción con complejas redes de certificación y logísticas a nivel mundial también hace que la consolidación agroindustrial a escala regional sea razonable. De acuerdo con protocolos como GlobalG.A.P. y las certificaciones de calidad requeridas por los mercados globales, las entidades exportadoras operan bajo regulaciones de inocuidad y fitosanitarias, lo cual ha fortalecido la capacidad de rastreo y el lugar competitivo del producto michoacano (SADER, 2022). De manera simultánea, la incorporación de tecnologías inherentes a la denominada Agricultura 4.0 —sensores de humedad del suelo, estaciones meteorológicas automatizadas, análisis de grandes volúmenes de datos, plataformas digitales de seguimiento y empleo de drones para monitoreo fitosanitario— ha iniciado una reconfiguración de los procesos de toma de decisiones en el ámbito agronómico (Wolfert et al., 2017; Zhang et al., 2002).

La Agricultura 4.0, conceptualizada dentro del marco de la Cuarta Revolución Industrial (Schwab, 2016), conlleva la digitalización de los sistemas productivos a través de la implementación del Internet de las Cosas (IoT), la inteligencia artificial y la automatización de vanguardia. Diversas investigaciones han evidenciado que estas tecnologías facilitan la optimización de la aplicación de agua y fertilizantes, disminuyen las pérdidas derivadas de la evapotranspiración no productiva y potencian la eficiencia técnica del riego (Wolfert et al., 2017). En regiones que experimentan un

incremento en el estrés hídrico, tal como se observa en diversas subcuencas del estado de Michoacán, la digitalización del riego puede contribuir a la mejora de la productividad económica del agua, entendida como el valor producido por unidad de volumen extraído (Hoekstra et al., 2011).

No obstante, en el Bajío michoacano, la modernización de la agricultura no ha sido uniforme ni neutral desde un punto de vista social. Existen disparidades importantes en el acceso a capital tecnológico entre los productores de pequeña y gran escala, lo cual ha reforzado modelos de concentración productiva y desequilibrios territoriales. La modernización tecnológica, sin una infraestructura regulatoria robusta, podría agravar la extracción de acuíferos y el proceso de sobreexplotación hídrica en México (CONAGUA, 2023; Mekonnen & Hoekstra, 2011). Asimismo, Rueda Estrada y Aranda (2018) informan que la expansión de monocultivos agroexportadores en Michoacán ha ocasionado una reducción en las áreas destinadas a cultivos tradicionales, lo cual ha tenido un efecto adverso en la diversidad productiva y la soberanía alimentaria a escala local.

Los efectos del cambio climático se añaden a estos retos estructurales. La literatura académica ha destacado que la región occidental de México experimenta una variabilidad incrementada en los patrones de precipitación y una mayor prevalencia de eventos extremos, factores que intensifican la susceptibilidad de los sistemas agrícolas de alta intensidad (Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC], 2021). En este contexto, la gestión efectiva del agua se vuelve crucial, particularmente considerando que el sector agrícola representa la mayor parte del uso consuntivo en el país (CONAGUA, 2023). La degradación gradual de los acuíferos y la dependencia de agroquímicos constituyen peligros adicionales para la sustentabilidad ecológica a escala regional.

Como respuesta a esta situación, se han documentado prácticas emergentes de transición agroecológica que combinan tecnologías digitales con métodos sustentables de gestión del agua, diversificación de la producción y control biológico de plagas (Valencia-Ramos & Vargas, 2021). Estos procedimientos demuestran que la agroindustria 4.0 tiene la capacidad de vincularse con sólidos principios de sustentabilidad, siempre que se integre en marcos normativos apropiados y políticas públicas enfocadas en la equidad territorial, la preservación de recursos y la inclusión social.

Por lo tanto, la caracterización holística de la agroindustria en el Bajío de Michoacán no se puede limitar al análisis de indicadores de productividad o exportaciones. Es crucial tener en cuenta tanto los factores sociales, territoriales y ambientales como la presión que se ejerce sobre los acuíferos, la huella hídrica azul, la productividad económica del agua y las repercusiones distributivas de la digitalización en el campo. Solo mediante esta perspectiva sistémica se podrá examinar de forma crítica el verdadero efecto que la revolución agroindustrial 4.0 tiene en la región y cómo contribuye efectivamente a la sustentabilidad a largo plazo.

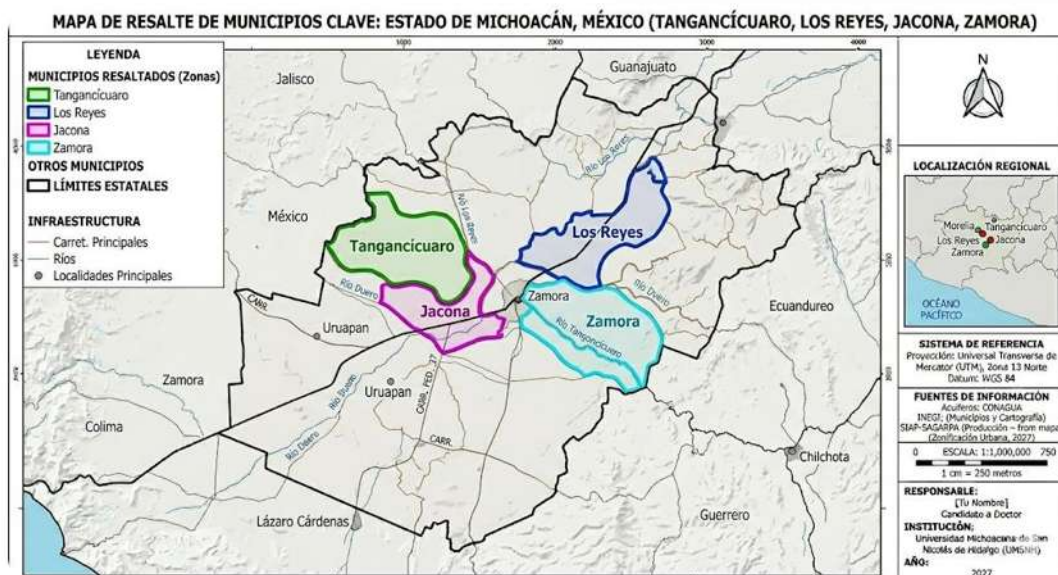
La demarcación territorial de los municipios más productivos en cuanto a frutas de la zona del Bajío michoacano, que son Tangancícuaro, Los Reyes, Jacona y Zamora, está representada en el "Mapa de resalte de municipios clave: estado de Michoacán, México". Este mapa enfatiza su ubicación estratégica dentro del ámbito regional y estatal. A través de un sistema de codificación por colores, se consigue una identificación exacta de los municipios de Zamora, Jacona, Los Reyes y Tangancícuaro; esto permite valorar su cercanía geográfica, la interconexión territorial entre ellos y su localización en una región agrícola con alta especialización.

El mapa muestra que, desde un punto de vista geográfico, estos municipios forman una franja agroindustrial continua, marcada por su cercanía a infraestructura vital como las vías de comunicación principales y las redes hidrográficas. Estos elementos son cruciales para el progreso del sector agrícola intensivo y la agroexportación. La posibilidad de producción en la zona se ve fortalecida por la presencia de ríos y la conexión vial, lo que simplifica el acceso a los recursos hídricos y la distribución logística hacia mercados locales e internacionales. Estos municipios están localizados en una zona con actividad agrícola destacable en el occidente de México, cerca de entidades como Guanajuato y Jalisco.

La representación cartográfica también permite deducir que la concentración geográfica de estos municipios tiene un impacto acumulativo sobre los recursos naturales, especialmente sobre los sistemas hídricos compartidos y los acuíferos. La cercanía entre zonas con producción intensiva, debido a su estructura geográfica, puede tener un impacto significativo en el análisis de la huella hídrica azul. Esto se debe a que puede agravar los efectos de la explotación excesiva del agua subterránea y dar lugar a dinámicas competitivas por el recurso y posibles conflictos socioambientales. En esta situación, el mapa deja de ser solo descriptivo y se

convierte en una herramienta analítica para comprender cómo están interconectados la producción agroindustrial, el territorio y la sustentabilidad hídrica.

Figura 3.1. *Mapa de relieve de municipios clave: estado de Michoacán, México (Tangancicuaro, Los Reyes, Jacona, Zamora)*



Fuente: Elaboración propia con base en datos de INEGI, CONAGUA y SIAP.

3.2. Características principales de los municipios productores de berries en el Bajío y occidente de Michoacán

3.2.1. Los Reyes, Michoacán, México

El municipio de Los Reyes se sitúa en la región occidental de Michoacán, entre las coordenadas 19°30' y 19°49' de latitud norte y los meridianos 102°15' y 102°36' de longitud oeste, con una altitud que oscila entre 900 y 3,400 metros sobre el nivel del mar. La amplitud altitudinal proporciona una heterogeneidad ecológica significativa, dado que amalgama regiones templadas y semicálidas, además de laderas volcánicas, llanuras y zonas de transición serrana. El clima de este territorio se caracteriza por temperaturas que oscilan entre 10 y 24 °C y precipitaciones que oscilan entre 1,100 y 1,300 mm. Los suelos predominantes son Andosol, Vertisol, Luvisol y Phaeozem, con una estructura territorial en la que la agricultura y el bosque ocupan proporciones significativas. Desde un enfoque agroecológico, estas condiciones otorgan a Los Reyes un espacio particularmente propicio para berries que demandan humedad relativa, suelos profundos y temperaturas moderadas,

especialmente para la zarzamora y la frambuesa (INEGI, 2010).

En el ámbito agrícola, Los Reyes ha creado un perfil que se enfoca de manera notable en la exportación. La literatura académica ha determinado que este municipio es uno de los centros históricos y contemporáneos más importantes de la zarzamora en México, al grado que estudios fitopatológicos lo categorizan como el productor nacional principal durante varios años de referencia. La confirmada existencia de huertos de frambuesa, registrada en estudios actuales, demuestra que el municipio no se limita a concentrar la producción, sino que también promueve la diversificación dentro del conjunto de las berries. Desde la perspectiva productiva, esto implica una especialización orientada hacia el mercado externo, fundamentada en sistemas tecnificados, macrotúneles, fertirriego y una lógica de alta intensidad agrícola (Contreras-Pérez et al., 2019; Villalvazo-Valdovinos et al., 2024)

Desde una perspectiva económica, esta especialización ha establecido a Los Reyes como un territorio estratégico dentro de la cadena de valor global de las frutas de hoja verde. La investigación en torno a la agroexportación en Michoacán revela que el corredor productivo de esta región se integró con celeridad con capitales comerciales e industriales, lo que resultó en la generación de ingresos, la creación de empleo y captación de inversión. Sin embargo, también se evidenció una dependencia significativa de los mercados internacionales, de la intermediación empresarial y de estándares privados de calidad. En términos más precisos, la dinámica económica del municipio no puede interpretarse meramente como expansión local, sino como integración subordinada en cadenas de exportación de alta exigencia y desigualdad (Crespo Stupková, 2016; Hernández Robledo & Ramírez Miranda, 2025).

Desde el punto de vista social, Los Reyes registra un total de 78,935 residentes en 2020; una proporción significativa reside en áreas rurales y mantiene condiciones de pobreza y marginación que coexisten con la actividad agroindustrial. Según la ficha municipal, hay 41,609 personas bajo condiciones de pobreza, siendo mayormente habitantes que viven fuera del centro urbano. Este hecho es relevante porque muestra que el aumento de las exportaciones no se ha traducido de manera inmediata en un bienestar uniforme; por el contrario, la productividad agrícola, el trabajo temporal y la permanencia de vulnerabilidades sociales coexisten, lo cual es común en las zonas que se dedican a la producción de frutillas para exportación (CPLADEM, 2022).

En lo que respecta al medio ambiente, Los Reyes presenta ventajas naturales

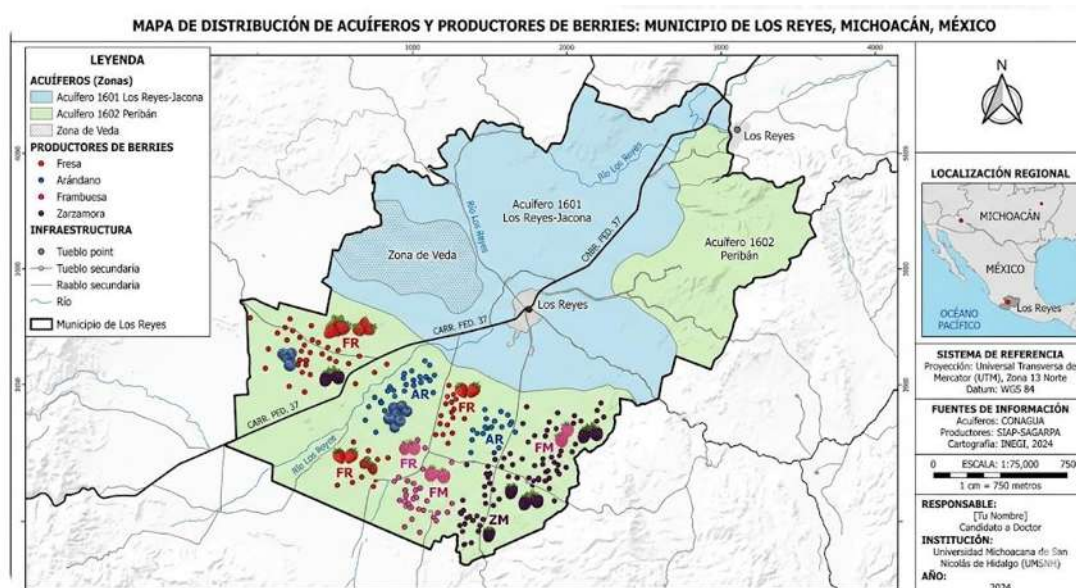
para las berries, pero también implica riesgos de acumulación. La hidrografía de esta región se vincula con las regiones Balsas y Lerma-Santiago, con corrientes perennes como Apupátaro e Itzicuaró, proporcionando una disponibilidad hídrica relativa. No obstante, la intensificación del monocultivo, junto con la utilización creciente de agroquímicos y plásticos agrícolas, incrementa la presión sobre los suelos, el agua y la cobertura vegetal. Por lo tanto, para cultivos como la zarzamora y la frambuesa, el municipio proporciona condiciones altamente competitivas. Sin embargo, también demanda estrategias de gestión sustentable que regulen la erosión, los residuos de acolchado, la contaminación difusa y el uso excesivo de agua subterránea (INEGI, 2010; Hartman et al., 2022).

La figura titulada “*Mapa de distribución de acuíferos y productores de berries: municipio de Los Reyes, Michoacán, México*” es la representación espacial integrada de los recursos hídricos subterráneos y la ubicación de las unidades productivas de frutas dentro del territorio municipal. Mediante la demarcación de los acuíferos —en particular el acuífero 1601 Los Reyes–Jacona y el acuífero 1602 Peribán—, y la identificación de áreas de veda, el mapa facilita la representación visual del entorno hidrogeológico en el que se lleva a cabo la actividad agroindustrial.

Desde una perspectiva productiva, la distribución de los cultivos (fresa, arándano, frambuesa y zarzamora) pone de manifiesto una concentración notable en las regiones meridional y en el suroeste del municipio, que coincide con áreas de infraestructura vial e hidráulica. Esto señala que, para mantener la producción de alta intensidad, se necesita directamente el acceso al agua. La correlación fundamental entre la actividad agrícola y el acceso al agua se ve enfatizada por la dicotomía espacial entre zonas productivas y acuíferos, en particular en áreas reguladas como las de veda.

La representación gráfica, desde el punto de vista de la sustentabilidad, indica que una gran concentración de productores en áreas específicas podría ejercer presiones concentradas sobre los acuíferos, lo que podría elevar el riesgo de una explotación excesiva del agua subterránea. En este contexto, el mapa se presenta como un instrumento analítico pertinente para entender la interrelación entre el territorio, la producción agroindustrial y la administración hídrica, facilitando la identificación de áreas críticas para la planificación hídrica y la ejecución de estrategias de gestión sustentable.

Figura 3.2.1. *Mapa de distribución de acuíferos y productores de berries: municipio de Los Reyes, Michoacán, México*



Fuente: Elaboración propia con base en datos de CONAGUA, SIAP e INEGI.

3.2.2. Jacona Michoacán, México

Jacona es un municipio integrante del valle agrícola vinculado a Zamora y se destaca como uno de los más significativos en el corredor berriero del noroeste de Michoacán. El área de 118.69 km² de este territorio se encuentra dentro del sistema volcánico transversal. Desde una perspectiva física, su hidrografía se vincula con los ríos Duero, Celio y Zapadores, así como con presas y manantiales. Por otro lado, su clima se caracteriza por ser templado y tropical, con precipitaciones estivales que ascienden a aproximadamente 800 mm anuales. Según la información municipal, los suelos, predominantemente de carácter chernozem, se utilizan primordialmente para fines agrícolas y ganaderos. La idoneidad territorial de Jacona para la producción intensiva de berries, particularmente en sistemas de agricultura protegida (Gobierno Municipal de Jacona, 2021; CPLADEM, 2022), es evidente.

Desde una perspectiva agrícola, Jacona se ubica en el mismo espacio funcional que Zamora, compartiendo una estructura productiva predominantemente dominada por la fresa, seguida de la frambuesa y la zarzamora. Una reciente investigación sobre la teledetección y la utilización del suelo en el Valle de Zamora revela que, durante los años 2018, 2021 y 2024, la fresa persistió como la berry predominante en Jacona y Zamora, y que la producción bajo prácticas de agricultura protegida comenzó a ocupar una proporción cada vez mayor del territorio cultivado. Este hecho reviste

especial relevancia dado que evidencia una transformación tecnológica: el municipio ya no puede ser concebido meramente como un productor tradicional, sino como un espacio de reconversión hacia sistemas de mayor intensidad, con macrotúneles, acolchados y riego presurizado (Villaseñor-Reyes et al., 2026).

Dentro del contexto económico, Jacona se favorece de su proximidad con la región conurbada de Zamora y de su incorporación en redes agroindustriales y logísticas. La proliferación de las berries en este municipio ha propiciado la creación de empleo, la captación de inversiones y la vinculación con mercados de exportación; no obstante, también ha robustecido una estructura productiva que se halla dependiente de capital, tecnología e insumos externos. Esto implica que su competitividad no se fundamenta exclusivamente en la fertilidad del valle, sino en la habilidad para soportar los costos ascendentes de infraestructura, certificación y acceso al agua de riego (Crespo Stupková, 2016; Villaseñor-Reyes et al., 2026).

En términos demográficos, Jacona registró un total de 68,781 residentes en el año 2020. La ficha del municipio señala que 35,962 personas viven en condiciones de pobreza, a pesar de tener un nivel de marginación bastante reducido. Este indicador muestra una compleja estructura social: por un lado, se aprecian niveles más altos de acceso a servicios e integración urbana en comparación con otros municipios con mayor ruralidad; por otro lado, la pobreza continúa presente en una zona donde la agricultura comercial y la agroindustria tienen un rol importante. En este contexto, Jacona ilustra una paradoja regional: un crecimiento agroexportador caracterizado por beneficios dispares y una base laboral que persiste en la dependencia de empleos agrícolas estacionales y de baja estabilidad (CPLADEM, 2022).

En términos ambientales, Jacona experimenta una presión ascendente sobre los cuerpos de agua y el suelo. La misma investigación realizada en el Valle de Zamora señala que la producción de frutas en Jacona y Zamora ha progresado hacia sistemas de producción protegidos, y que la fresa se identifica como el principal consumidor de agua entre las especies frutales examinadas. Adicionalmente, la superficie agrícola de este valle se sitúa en la planicie fértil adyacente al río Duero, lo que intensifica la competencia por el recurso hídrico y la susceptibilidad a la sobreexplotación, contaminación difusa y modificaciones en el uso del suelo. Por consiguiente, a pesar de que Jacona proporciona condiciones ideales para la fresa y una adaptación óptima para la frambuesa y la zarzamora, su viabilidad futura depende de una gestión hídrica

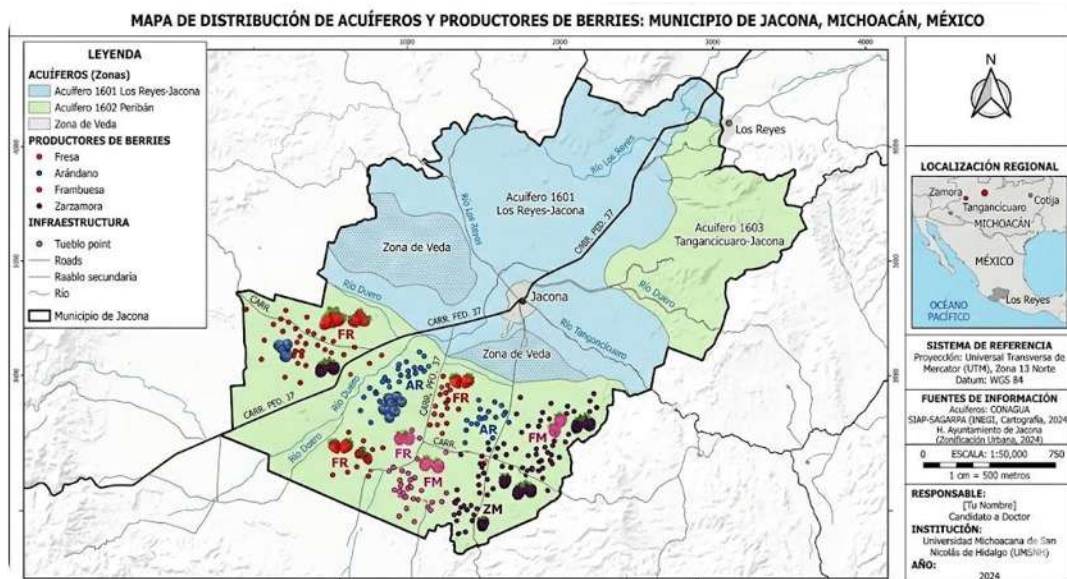
más rigurosa y de una tecnificación que no intensifique la presión territorial preexistente (Villaseñor-Reyes et al., 2026; Flores Lázaro et al., 2017).

La correlación espacial entre la localización de los sistemas productivos de frutas y la estructura hidrogeológica del territorio se ilustra en el gráfico "Mapa de distribución de acuíferos y productores de berries: municipio de Jacona, Michoacán, México". El acuífero 1601 Los Reyes–Jacona y el acuífero 1603 Tangancicuaro–Zamora son los que tienen mayor impacto sobre la región, según lo resalta el mapa. También se indican zonas de veda que marcan restricciones en la extracción de agua subterránea, lo cual evidencia un ambiente de gestión hídrica regulada.

En el área del sur del municipio se observa una notable concentración de cultivos, especialmente de frambuesa, fresa, arándano y zarzamora. En esta misma zona hay también una infraestructura vial e hidráulica relevante. Esta distribución espacial señala que la actividad agroindustrial está fuertemente relacionada con el acceso al agua y con la logística, lo cual respalda un modelo de producción intensivo centrado en la agroexportación.

Desde el punto de vista de la sustentabilidad, la intersección entre las zonas productivas y los acuíferos, especialmente en áreas donde hay restricciones para extraer, permite deducir que existe una presión significativa sobre los recursos hídricos subterráneos. La necesidad de implementar tecnologías que optimicen el uso del agua y estrategias integrales de manejo del agua se hace más urgente a medida que aumenta la concentración de unidades productivas en esas áreas, lo cual puede incrementar el riesgo de sobreexplotación. En este marco, la cartografía resulta un factor fundamental para el análisis territorial de la huella hídrica azul y la planificación sustentable dentro de los sistemas agroindustriales.

Figura 3.2.2. Mapa de distribución de acuíferos y productores de berries: municipio de Jacona, Michoacán, México



Fuente: Elaboración propia con base en datos de CONAGUA, SIAP e INEGI.

3.2.3. Tangancicuaro Michoacán, México

El municipio de Tangancicuaro se sitúa entre las coordenadas geográficas 19°45' y 20°00' de latitud norte y los meridianos 102°05' y 102°25' de longitud oeste, con altitudes que oscilan entre 1,600 y 3,400 metros sobre el nivel del mar. La ubicación geográfica entre valles y regiones altas le confiere una estructura fisiográfica contrastante, en la que coexisten llanuras aluviales con relieves de origen volcánico. Se caracteriza por temperaturas que oscilan entre 10 y 20 °C y precipitaciones que oscilan entre 900 y 1,100 mm, y los suelos más representativos incluyen Vertisol, Luvisol, Andosol, Cambisol y Phaeozem. Desde una perspectiva geográfica, este municipio presenta condiciones favorables para la agricultura intensiva, aunque también presenta límites biofísicos bien definidos, dado que una porción significativa del territorio no se encuentra adecuada para el empleo agrícola mecanizado continuo (INEGI, 2010).

Desde un punto de vista agrícola, Tangancicuaro comparte el funcionamiento del corredor productivo vinculado al río Duero y al distrito de riego a nivel regional. La aptitud para la producción de frutas se deriva de tres factores: la presencia de suelos fértiles en regiones bajas, la presencia de clima templado-subhúmedo y la disponibilidad de agua para la agricultura intensiva. A pesar de que en la literatura contemporánea la precisión estadística se concentra predominantemente en Zamora y Jacona, el análisis del distrito de riego revela que Tangancicuaro se encuentra dentro del espacio cultivable vinculado al sistema hídrico del Valle de Zamora. Por

consiguiente, desde una perspectiva funcional, se puede conceptualizar como un municipio con condiciones propicias para la fresa en áreas de valle y para la zarzamora, la frambuesa y el arándano, en esquemas diversificados y de tecnificación en ascenso (INEGI, 2010; Villaseñor-Reyes et al., 2026).

En el ámbito económico, Tangancícuaro ha consolidado su posición en el circuito regional de frutillas debido a su proximidad con mercados, entidades de empaque y rutas de exportación del corredor Zamora-Jacona. Sin embargo, su papel económico se ha caracterizado por ser más bien complementario y expansivo: proporciona terreno agrícola, mano de obra y espacio de expansión para un modelo productivo que tiende a expandirse en áreas periurbanas y rurales. Esta dinámica se alinea con la interpretación regional de la agroexportación de frutillas en Michoacán, en la que la expansión se materializa a través de vínculos territoriales cada vez más extensos y adaptables, no exclusivamente en los municipios históricamente dominantes (Hernández Robledo & Ramírez Miranda, 2025).

En el aspecto social, Tangancícuaro contaba con una población de 35,256 habitantes en el año 2020. La ficha municipal indica que 22,395 individuos se encuentran en condiciones de pobreza, con un nivel de marginación reducido. Este modelo evidencia un municipio en el que la actividad agrícola posee una relevancia estructural, pero donde la incorporación en la agroexportación no ha logrado mitigar las disparidades sociales existentes. No obstante, una considerable proporción de la dinamización local continúa residiendo en la población rural y en el empleo agrícola, lo que torna imprescindible examinar no solo los rendimientos o las exportaciones, sino también la distribución de ingresos, el acceso a servicios y la estabilidad del trabajo rural (CPLADEM, 2022).

En términos ambientales, Tangancícuaro experimenta una tensión análoga a la que experimenta el resto del corredor berriero. En esta región, la hidrografía está basada en su mayor parte en la cuenca del río Duero. El 44.61% de su territorio es agrícola y el resto está compuesto por áreas boscosas, selváticas y de pastizales. Esta composición muestra una dualidad intrínseca: por un lado, el municipio cuenta con una base natural para expandir cultivos de gran valor; por otro, cualquier expansión que no esté regulada de berries puede intensificar la presión sobre el agua, el suelo y la cobertura vegetal. Para una perspectiva doctoral orientada hacia la sustentabilidad, Tangancícuaro debe ser interpretado como un territorio fronterizo agroindustrial, en el

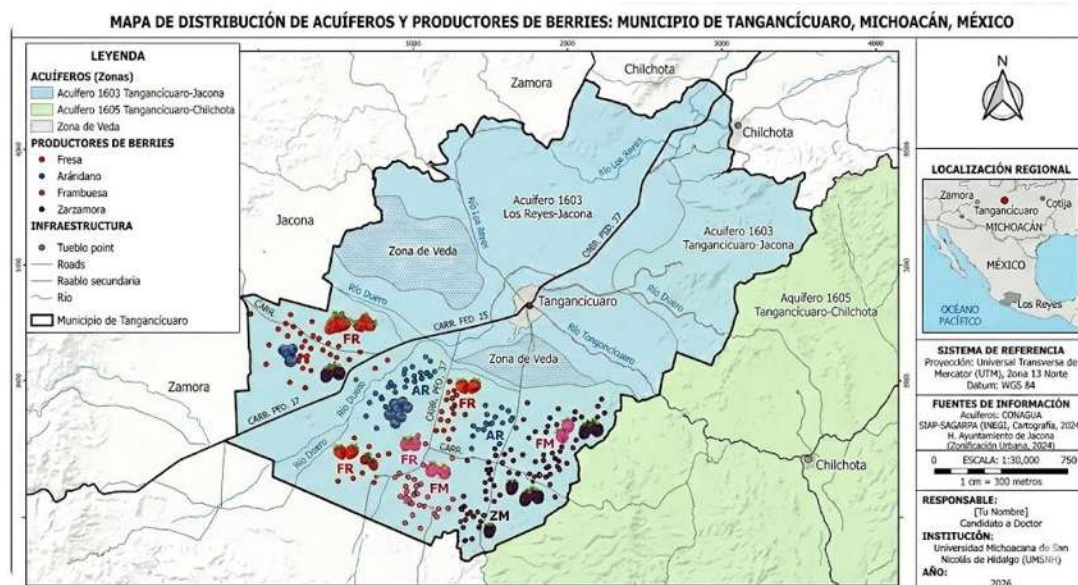
que la competitividad agrícola no puede ser aislada de la preservación de recursos y del ordenamiento territorial (INEGI, 2010; Hartman et al., 2022).

La figura titulada “*Mapa de distribución de acuíferos y productores de berries: municipio de Tangancícuaro, Michoacán, México*” presenta la disposición geográfica de los acuíferos predominantes y la ubicación de las unidades de producción de frutas en el municipio, lo el análisis de la interrelación entre la actividad agroindustrial y el sistema hídrico subterráneo. El mapa muestra la identificación de los acuíferos 1603 Los Reyes-Jacona y 1605 Tangancícuaro-Chilchota, así como de zonas vedadas que muestran restricciones en la extracción de agua, lo que indica una regulación y una presión sobre el recurso hídrico.

Los cultivos más comunes —arándano, frambuesa, fresa y zarzamora— están localizados principalmente en la parte sur del municipio, que es donde se encuentra también la infraestructura vial e hidráulica más importante. Esta disposición geográfica evidencia una fuerte dependencia de los sistemas de irrigación y del acceso a recursos hídricos subterráneos para mantener la producción intensiva, que es un rasgo característico de la agroindustria exportadora en el área.

Desde la óptica de la sustentabilidad hídrica, en particular en áreas con restricciones para extraer agua, el solapamiento entre las regiones productivas y los acuíferos sugiere una presión significativa sobre el recurso hídrico. La acumulación de productores en áreas específicas puede intensificar los procesos de sobreexplotación, lo que pone de relieve la importancia de establecer tecnologías y estrategias para una gestión integral del agua que mejoren la eficiencia hídrica. El mapa se presenta como un instrumento esencial para el análisis territorial de la huella hídrica azul y la identificación de áreas críticas para la planificación sustentable en el Bajío de Michoacán.

Figura 3.2.3. *Mapa de distribución de acuíferos y productores de berries: municipio de Tangancícuaro, Michoacán, México*



Fuente: Elaboración propia con base en datos de CONAGUA, SIAP e INEGI.

3.2.4. Zamora Michoacán, México

Zamora se distingue como una de las localidades más emblemáticas del sistema agroindustrial de frutas en Michoacán. Se sitúa entre los paralelos 19°56' y 20°07' de latitud norte y los meridianos 102°07' y 102°25' de longitud oeste, ostentando altitudes que oscilan entre 1,600 y 2,400 metros sobre el nivel del mar. Se caracteriza por una llanura aluvial con suelos de los tipos Vertisol y Phaeozem, acompañada de un clima semicálido subhúmedo con precipitaciones que oscilan entre 700 y 1,000 mm. Estas condiciones históricamente han consolidado este espacio como uno de los más adecuados para la agricultura intensiva de riego, especialmente para la fresa. Sin embargo, en décadas recientes, esta práctica ha experimentado una diversificación hacia otras frutas y sistemas protegidos (INEGI, 2010).

Desde una perspectiva agrícola, Zamora es el núcleo histórico de la capital fresera en Michoacán. Los estudios sobre la evolución del valle zamorano señalan que a mediados de la centuria pasada, la zona se convirtió en la mayor productora de fresas del territorio nacional y luego pasó a una nueva fase de diversificación, reestructuración e intensificación de su producción frutal. Asimismo, estudios recientes señalan que la fresa sigue siendo la berry más importante en Zamora, al igual que en Jacona. Le siguen la frambuesa y la zarzamora, con un aumento en la agricultura protegida. Las investigaciones técnicas que se han llevado a cabo en la zona, incluso, han documentado sistemas de producción de fresa con macrotúneles, sustrato y fertirriego que son muy avanzados, lo cual confirma la modernización

productiva del municipio (Hernández Robledo & Barón León, 2020; Villaseñor-Reyes et al., 2026; Aguilar Tlatelpa et al., 2019)

Desde el punto de vista económico, Zamora se erige como un epicentro agroindustrial de primer nivel. No solo se enfoca en la producción agrícola, sino también en la infraestructura, el procesamiento, la comercialización, la mano de obra y la coordinación de la exportación. Su relevancia a nivel regional se atribuye a la densidad de empresas, a la proximidad logística y al rol del valle como un espacio intensivo para la acumulación agrícola. No obstante, esta robustez económica se encuentra también vinculada a una considerable dependencia del agua de riego, de los mercados externos y de estructuras productivas que demandan una inversión continua en tecnología e insumos (Crespo Stupková, 2016; Flores Lázaro et al., 2017).

En términos demográficos, Zamora registró un total de 204,860 residentes en 2020, lo que lo establece como el municipio con mayor población entre los municipios bajo estudio. La ficha municipal indica la existencia de 101,272 individuos en condiciones de pobreza, incluso cuando su grado de marginación es extremadamente bajo. Este contraste es particularmente notable: revela que un municipio con considerable actividad económica y una sólida integración agroindustrial aún conserva una proporción significativa de su población en condiciones de vulnerabilidad. Para una interpretación territorial crítica, se requiere una diferenciación entre el crecimiento económico agregado y el bienestar social efectivamente distribuido (CPLADEM, 2022)

La esfera ambiental de Zamora puede ser, probablemente, la más delicada. La hidrografía de la región se encuentra dominada por la subcuenca del río Duero, y numerosos estudios indican que la agricultura intensiva de frutas, en particular la fresa, ejerce una considerable presión sobre el agua. Un estudio de evaluación económica del riesgo indica que el análisis realizado en el valle se enfocó específicamente en la producción de fresa y en el impacto de la disponibilidad y calidad del agua en la productividad. En estudios geomáticos más recientes, se indica que la proliferación de la agricultura protegida y el consumo hídrico vinculado convierten a este valle en un área de importancia crítica. Adicionalmente, la subsidencia y el fallamiento superficial en Zamora han sido asociados con procesos de explotación excesiva del agua subterránea en un contexto predominantemente agrícola. En resumen, Zamora proporciona condiciones óptimas para la fresa y una base altamente propicia para la

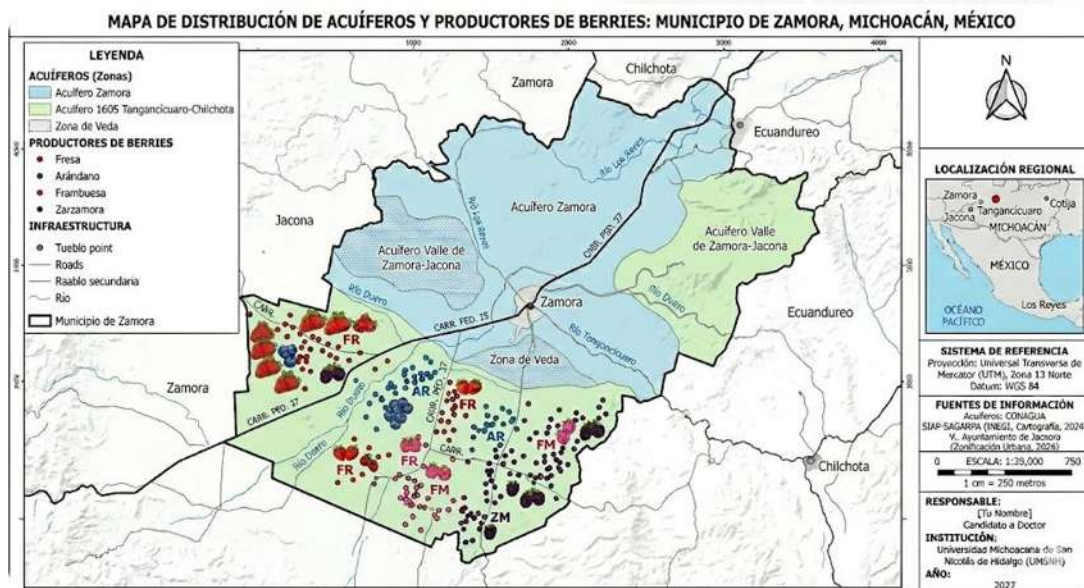
frambuesa, la zarzamora y, de forma más reciente, el arándano; sin embargo, su persistencia como territorio agroexportador depende de una gobernanza hídrica de mayor rigurosidad (Flores Lázaro et al., 2017; Villaseñor-Reyes et al., 2026; Hernández Madrigal et al., 2024).

La figura titulada “*Mapa de distribución de acuíferos y productores de berries: municipio de Zamora, Michoacán, México*” muestra la correlación espacial entre la disposición geográfica de los sistemas de producción de frutas y la estructura hidrogeológica del territorio. El mapa señala primordialmente el acuífero Zamora y el acuífero Valle de Zamora–Jacona, junto con áreas de veda que señalan limitaciones en la extracción de agua subterránea, lo que evidencia un contexto de presión y regulación sobre el recurso hídrico en la región.

La concentración de los cultivos —fresa, arándano, frambuesa y zarzamora— es notable en la región meridional del municipio, donde también se evidencia la existencia de infraestructuras fundamentales como carreteras, redes hidráulicas y núcleos poblacionales. La accesibilidad al agua subterránea y el progreso de la agroindustria intensiva están estrechamente interrelacionados según esta estructura geográfica, con un enfoque especial en la exportación de frutas.

Desde el punto de vista de la sustentabilidad, la superposición entre las zonas productivas y los acuíferos, sobre todo en áreas que están bajo veda, sugiere una presión importante sobre el recurso hídrico. Que en zonas específicas haya una alta concentración de productores señala un elevado consumo de agua subterránea, lo que puede favorecer la sobreexplotación y disminuir la disponibilidad hídrica a largo plazo. En este contexto, el mapa se erige como un instrumento esencial para el examen territorial de la huella hídrica azul, al facilitar la identificación de áreas críticas en las que es imperativo implementar estrategias de administración eficaz del agua y tecnologías de riego sustentables.

Figura 2.3.4. *Mapa de distribución de acuíferos y productores de berries: municipio de Zamora, Michoacán, México*



Fuente: Elaboración propia con base en datos de CONAGUA, SIAP e INEGI.

Para comprender las dinámicas socioambientales, productivas y espaciales que determinan la especialización agrícola contemporánea, resulta esencial la caracterización territorial y agroindustrial de los municipios del Bajío de Michoacán dedicados a la producción de frutas. Durante las últimas décadas, regiones como Tangancicuaro, Zamora, Jacona y Los Reyes han experimentado una transformación significativa hacia modelos de producción intensiva enfocados en la exportación de cultivos de alto valor, particularmente la frambuesa, el arándano, la zarzamora y la fresa. Esta circunstancia les ha habilitado para consolidarse como un nodo estratégico en las cadenas agroalimentarias a nivel global (SIAP, 2023; Secretaría de Economía, 2022).

Desde un punto de vista geográfico, la región presenta condiciones agroecológicas excepcionalmente favorables, caracterizadas por suelos de origen volcánico, climas subhúmedos y templados, junto con una disponibilidad relativa de agua subterránea. Esta circunstancia ha facilitado la aparición de sistemas productivos altamente tecnificados. Sin embargo, estas ventajas comparativas han estado vinculadas con procesos de intensificación agrícola que han intensificado la presión sobre los recursos naturales, particularmente el agua. Este fenómeno ha propiciado circunstancias de debilidad hídrica asociadas con la utilización intensiva del riego en cultivos destinados a la exportación (INEGI, 2020; CONAGUA, 2023).

La incorporación de la región en los mercados globales ha sido impulsada en el ámbito económico mediante el fortalecimiento de la agroindustria de frutas y

verduras, a través de empresas exportadoras que coordinan la producción, el acopio, el empaque y la distribución. Este procedimiento ha generado considerables beneficios económicos; no obstante, ha exacerbado la dependencia de modelos productivos que demandan una considerable cantidad de insumos y demandan un volumen considerable de recursos hídricos. Esto plantea preguntas sobre la sustentabilidad de estos sistemas a largo plazo (Secretaría de Economía, 2022; SIAP, 2023).

Desde el punto de vista social, la agroindustria ha cambiado las dinámicas en las zonas rurales, creando trabajo y posibilidades económicas; sin embargo, también ha causado situaciones de precariedad laboral, desigualdad y presión sobre los servicios esenciales en las comunidades agrícolas. Estas alteraciones resaltan la complejidad inherente a los sistemas agroalimentarios actuales, en los cuales se combinan intereses económicos, condiciones territoriales y restricciones medioambientales (INEGI, 2020; Secretaría de Desarrollo Rural de Michoacán, 2022).

El aumento en la producción ha llevado a un crecimiento importante de la huella hídrica azul desde una perspectiva ambiental. Esta idea se refiere a la cantidad de agua superficial y subterránea que se emplea en los procesos productivos de la agricultura. Este indicador revela la relación directa entre la presión ejercida sobre los acuíferos locales, sobre todo el sistema Zamora-Jacona, y la proliferación de las plantaciones de frutas. Esta aseveración enfatiza la importancia de establecer estrategias de gestión del agua que se basen en firmes principios de sustentabilidad y barreras ecológicas (Hoekstra et al., 2011; CONAGUA, 2023).

El análisis del territorio y de la agroindustria en los municipios de la región del Bajío de Michoacán que producen berries muestra un patrón común. Este se caracteriza por tener una especialización significativa en la producción, un vínculo con mercados globales y una demanda cada vez mayor sobre los recursos hídricos. Los datos existentes revelan que, si bien la modernización en el sector agrícola ha contribuido a maximizar la producción, este avance no ha sido suficiente para garantizar que el recurso hídrico sea sustentable. La intensificación del uso de agua y la expansión de las zonas cultivables han causado un impacto acumulativo en los acuíferos de la zona (IMTA, 2021; CONAGUA, 2023).

En este contexto, la huella hídrica azul se convierte en un indicador esencial para estudiar la sustentabilidad de los sistemas agroindustriales. Este indicador muestra que no necesariamente una mayor eficiencia técnica conlleva una reducción

en el consumo total de agua. Sin embargo, en muchos casos, la modernización de la producción ha implicado un aumento en la necesidad de agua, lo que enfatiza la necesidad urgente de replantear los métodos de gestión del agua desde una perspectiva territorial e integral (Hoekstra et al., 2011).

Ante estos desafíos, se hace indispensable implementar modelos de producción más eficaces. Para optimizar el manejo del agua y reducir la huella hídrica en la agroindustria orientada a la exportación, es esencial integrar herramientas para gestionar datos, tecnologías digitales y sistemas de monitoreo en tiempo real. La Agricultura 4.0 se presenta como una alternativa estratégica que posibilita combinar la sustentabilidad ecológica con la eficiencia en la producción. Esto se logra a través de la implementación de tecnologías como sensores, automatización, análisis de grandes volúmenes de datos y sistemas de riego de precisión (FAO, 2017).

Así, el estudio realizado en esta sección no solo facilita la comprensión de las dinámicas territoriales contemporáneas, sino que también sienta las bases para la próxima parte, donde se explorará la función de la Agricultura 4.0 como un medio para la gestión sustentable del agua en la agroindustria de berries, dentro de un enfoque de sustentabilidad fuerte que busca la conservación del recurso hídrico y la equidad entre generaciones.

No obstante, esta tendencia de exportación agropecuaria está vinculada de manera intrínseca con una creciente presión sobre los recursos hídricos subterráneos y superficiales. La aplicación de métodos de riego tecnificado en cultivos intensivos en agua ha causado que los niveles de extracción en acuíferos estratégicos aumenten. Algunos de estos acuíferos presentan, según los diagnósticos oficiales (Comisión Nacional del Agua [CONAGUA] 2023), condiciones comprometidas o sobreexplotación. En este contexto, la gestión eficiente de los recursos hídricos se convierte en un componente fundamental para la sustentabilidad regional, sobre todo si consideramos que el sector agrícola representa cerca del 76% del consumo anual de agua a nivel nacional (CONAGUA, 2023). Muchos estudios han advertido que, si no se instauran mecanismos de gobernanza hídrica robustos, existe el riesgo de que la actividad agrícola aumente y genere desequilibrios entre la sustentabilidad medioambiental y la productividad económica (Hoekstra et al., 2011).

La denominada Revolución Agroindustrial 4.0 se manifiesta en este contexto, definida como la integración sistemática de tecnologías digitales, automatización

avanzada, sensores a distancia, Internet de las Cosas (IoT), análisis masivo de datos (big data) y sistemas de agricultura de precisión en los procesos productivos de la agricultura. Este modelo tecnológico, conceptualmente derivado de la Cuarta Revolución Industrial, propone una transformación holística de las cadenas de producción agroalimentaria a través de la digitalización de las decisiones agronómicas y la optimización de insumos esenciales (Schwab, 2016; Wolfert et al., 2017). En el contexto agrícola, estas innovaciones posibilitan la monitorización en tiempo real de variables edafoclimáticas, el ajuste de las láminas de riego basándose en balances hídricos, la modelización de la evapotranspiración del cultivo y la reducción de pérdidas derivadas de percolación o evaporación no productiva (Zhang et al., 2002).

La adopción de la agricultura de precisión, mediante la implementación de sensores de humedad del suelo, estaciones meteorológicas automatizadas, imágenes satelitales y algoritmos predictivos, posibilita la aplicación diferenciada de agua y fertilizantes en función de las necesidades particulares de cada parcela (Zhang et al., 2002). Este aumento no solo optimiza la productividad física por metro cuadrado, sino también la productividad económica del agua, un indicador clave en zonas donde el estrés hídrico está aumentando. Según la FAO (2022), se ha demostrado en la literatura mundial que la digitalización agrícola tiene el potencial de reducir el uso de agua en los sistemas de riego presurizado; este descenso puede ser diferente dependiendo del tipo de cultivo y del nivel de tecnificación.

La transición a los modelos de Agricultura 4.0 es especialmente relevante en el contexto específico del Bajío Michoacano, ya que la producción de berries se ha intensificado mediante el uso de macrotúneles, fertirriego y sistemas de goteo. En este marco, es esencial tener un control estricto del riego para maximizar el rendimiento y la calidad de lo que se exporta. La integración de plataformas para el seguimiento del agua con procesos estandarizados que calculan la huella hídrica, como el sugerido por Hoekstra et al. (2011), simplifica la conexión entre la innovación tecnológica y los indicadores objetivos del rendimiento medioambiental.

La norma ISO 14046, además, establece lineamientos para la evaluación de la huella hídrica como herramienta de gestión ambiental en empresas y cadenas de suministro dentro del marco normativo global (International Organization for Standardization [ISO], 2014). La aplicación de la trazabilidad hídrica y la certificación ambiental en las agroindustrias exportadoras del Bajío representa una

oportunidad estratégica para aumentar la competitividad a escala internacional.

La adopción de tecnologías 4.0 genera también consecuencias diferenciadas desde un punto de vista socioeconómico. Por un lado, promueve la actualización del sector y mejora la eficacia técnica; por otro lado, plantea retos en cuanto a las disparidades tecnológicas y al acceso desigual a las inversiones en productores de pequeña escala (World Bank, 2019). Por lo tanto, es necesario concebir la digitalización en la agricultura como un cambio estructural que afecta a la gestión del agua, a la igualdad territorial y también a la capacidad de resiliencia socioambiental.

3.3. Principales cultivos agroindustriales

La región del Bajío de Michoacán ha experimentado una transformación significativa en su estructura agroproductiva en las últimas dos décadas, caracterizada por el establecimiento y desarrollo de cultivos especializados destinados a la exportación, los cuales han logrado posicionarse con éxito en el exigente y competitivo mercado internacional. Dentro de este grupo de frutas y vegetales, es importante resaltar la presencia de las deliciosas bayas, como la fresa, la zarzamora y el arándano, que han ganado popularidad en los últimos años. Además, no podemos dejar de mencionar la versátil y saludable presencia del aguacate, así como la exótica presencia del mango, aunque en menor proporción. Estas frutas han logrado posicionarse en el mercado y han logrado desplazar en cierta medida a cultivos tradicionales como el maíz y el frijol. Esta notable transformación ha sido ampliamente favorecida por la creciente demanda a nivel mundial, la firma de tratados de libre comercio y las excepcionales condiciones agroclimáticas que caracterizan a la región (Delgado-Ramos, 2015; SIAP, 2023).

La fresa, que se distingue por su versatilidad y exquisitez, es hoy en día uno de los productos representativos del corredor agrícola que comprende las poblaciones de Jacona, Zamora y Tangancícuaro. En esta zona, se ha implementado un modelo de producción que es muy productivo y está a la vanguardia tecnológica. Este modelo incluye el cultivo bajo estructuras plásticas, la utilización de sistemas de fertirriego automatizados y un estricto control fitosanitario que es supervisado por selectivos sensores. Gracias a la aplicación de técnicas avanzadas de agricultura de precisión (García-Peña et al., 2020), el rendimiento medio de los cultivos ha crecido significativamente en las últimas décadas: del nivel de 25 toneladas por hectárea en los años noventa hasta más de 35 toneladas por hectárea hoy. Este tipo de cultivo, que

se distingue por su gran cantidad de exportación a los mercados de Canadá y Estados Unidos, también es una relevante fuente de ingresos para los agricultores locales. Los recursos hídricos subterráneos de la zona han sido sometidos a una presión significativa debido a esta circunstancia.

El cultivo de arándano y zarzamora, frutas que se producen primordialmente en los municipios michoacanos de Peribán, Tangancícuaro y Los Reyes, ha visto un crecimiento considerable en cuanto a su área cultivada y la introducción de tecnología agrícola avanzada. Para asegurar que se cumplan los estrictos estándares de inocuidad requeridos a nivel mundial, son instrumentos fundamentales la aplicación de sustratos artificiales de calidad superior, la monitorización exacta del clima en invernaderos y la implementación de modernas plataformas digitales de trazabilidad. La necesidad de monitorear detalladamente el suministro de agua en estas cosechas con alta demanda hídrica ha promovido la adopción generalizada de tecnologías avanzadas, como el riego por goteo inteligente y los sistemas de seguimiento en tiempo real (Valencia-Ramos & Vargas, 2021; López-Beltrán et al., 2022).

El aguacate, aunque está más distribuido en el sur de Michoacán, ha conseguido crecer en zonas del Bajío debido a la alta rentabilidad que supone exportarlo, sobre todo a mercados como Japón, Estados Unidos y algunas naciones europeas. Este cultivo, no obstante, muestra un elevado requerimiento de agua, estimado en un rango de 1.000 a 1.500 metros cúbicos por tonelada producida, lo que ha suscitado inquietud por la sobreexplotación de los acuíferos y disputas por el recurso hídrico en áreas de crecimiento reciente (Magaña et al., 2022; Rueda Estrada & Aranda, 2018). La modernización de este cultivo implica la implementación de estaciones meteorológicas automatizadas, sensores de humedad del suelo de última generación y avanzadas plataformas de gestión agronómica especializada.

Finalmente, es importante destacar que el cultivo del mango ha logrado establecerse de manera sustentable en la región del Bajío michoacano, especialmente en áreas que presentan variaciones climáticas significativas. En estos lugares, se ha implementado una interesante combinación de técnicas agroecológicas y procesos de certificación orgánica para garantizar la calidad y la sustentabilidad de la producción de esta fruta tan apreciada. A pesar de que la implementación de tecnología ha sido relativamente limitada en comparación con la industria de las berries, se pueden identificar casos sobresalientes de innovación en procesos de poscosecha, sistemas de

empaques y cadenas logísticas de exportación, especialmente en proyectos colaborativos entre diferentes actores del sector (Castellanos & Juárez, 2020).

Estos cultivos conforman un patrón de producción agroexportadora de elevada sofisticación tecnológica que se integra en el marco de la agricultura del futuro, aunque también debe hacer frente a desafíos de índole estructural vinculados con la preservación de los recursos hídricos, la distribución equitativa del territorio y la evolución de las estructuras socioagrarias arraigadas en la tradición.

3.4. Tecnologías aplicadas y nivel de adopción de la agroindustria 4.0

La implementación y adopción de tecnologías avanzadas relacionadas con la agricultura 4.0 en la región del Bajío de Michoacán ha experimentado un notable incremento en los últimos diez años, especialmente en los cultivos destinados a la exportación, tales como los berries y el aguacate. La agricultura 4.0, también conocida como agricultura de precisión, se caracteriza por la implementación de tecnologías avanzadas como el Internet de las cosas (IoT), la robótica, la teledetección y la computación en la nube, con el fin de mejorar la eficiencia y sustentabilidad de las operaciones agrícolas. Estas innovaciones posibilitan una administración más exacta y adaptada a cada caso de los cultivos, lo que favorece la toma de decisiones fundamentadas en datos y disminuye el impacto medioambiental del trabajo agrícola. Esta transformación ha sido motivada por la urgente necesidad de cumplir adecuadamente con los exigentes criterios internacionales de trazabilidad, inocuidad alimentaria, calidad y eficiencia hídrica que se han instaurado a nivel mundial (López-Beltrán, Torres-Ruiz y Morales-Casillas, 2022).

Es relevante destacar la puesta en marcha de sistemas de riego tecnificado por goteo con fertirrigación, que pertenecen a las tecnologías más extendidas y empleadas hoy en día en el sector agrícola. Estos han probado ser mucho más eficaces y ventajosos que los métodos tradicionales de riego basados en la gravedad. La posibilidad de ajustar la cantidad exacta de agua y nutrientes a aplicar en el campo agrícola se ve facilitada por la instalación de estaciones meteorológicas automáticas y sensores de humedad en el terreno. Esto significa que las pérdidas causadas por la evaporación del agua y el lavado de nutrientes se reducen considerablemente. Dado que la correcta administración del agua es esencial para asegurar la calidad de la fruta y extender su durabilidad posterior a la cosecha (García-Peña, Martínez-Rodríguez y López-Ruiz, 2020), este procedimiento de control del riego tiene una importancia

especial en la producción de arándano y fresa.

La representación titulada "Tecnologías aplicadas y nivel de adopción de la agroindustria 4.0" muestra una categorización progresiva del grado en que se integran las tecnologías en los sistemas agroindustriales, dividida en cuatro escalones: inicial, medio, avanzado y total. En la fase inicial, se distinguen procesos de mecanización y digitalización elemental, que se caracterizan por la utilización de maquinaria contemporánea equipada con sistemas de posicionamiento global (GPS), sensores climáticos y registros digitales, lo que constituye una fase de transición hacia la agricultura tecnificada.

En el nivel intermedio, la representación gráfica ilustra la integración de conectividad e inteligencia restringida, en la que se integran instrumentos como drones para el seguimiento de cultivos, sistemas de cartografía satelital, plataformas en la nube y redes de comunicación, facilitando una administración más eficaz de la información agrícola. A continuación, el nivel avanzado se refiere a la agricultura de precisión implementada, en la que se incorporan sistemas automatizados de riego, sensores de humedad, inteligencia artificial y análisis de datos, con el objetivo de optimizar la utilización de insumos y recursos, especialmente el agua.

En última instancia, el nivel global simboliza la consolidación de la agroindustria 4.0, que se distingue por sistemas de alta integración y autonomía, tales como granjas inteligentes con Internet de las Cosas (IoT), análisis masivo de datos (big data), tecnología blockchain y procesos automatizados de toma de decisiones. En su totalidad, la figura ilustra una transición tecnológica que no solo potencia la productividad, sino que también tiene consecuencias directas en la eficiencia en la utilización del agua y en la minimización de la huella hídrica en sistemas agroindustriales. Este aspecto es fundamental para progresar hacia modelos de sustentabilidad en situaciones de presión hídrica.

Figura 3.4. *Tecnologías aplicadas y nivel de adopción de la agroindustria 4.0*



Fuente: Elaboración propia con base en literatura sobre agricultura de precisión y agroindustria 4.0.

En la actualidad se ha notado un incremento significativo en la aplicación de tecnologías avanzadas de monitoreo a distancia, como los drones y las cámaras multiespectrales. Estas herramientas posibilitan la detección de carencias nutricionales, situaciones de estrés por falta de agua, presencia de plagas o enfermedades de manera más detallada y veloz. Estos sistemas altamente especializados se complementan de manera eficiente con avanzadas plataformas digitales de gestión agronómica, las cuales permiten la integración y el análisis detallado de una amplia gama de datos, incluyendo información climática, fenológica y de mercado, con el objetivo de facilitar y optimizar la toma de decisiones estratégicas en tiempo real. Aunque su implementación y adopción es aún incipiente entre pequeños productores, en empresas medianas y grandes representan un eje central de competitividad y sustentabilidad en el mercado actual (González-Camacho et al., 2018; Sánchez-Raya & García-Mata, 2021).

En cuanto a la gestión apropiada de la producción después de la cosecha, cabe mencionar que muchas compañías agroindustriales han puesto en marcha con éxito sistemas automatizados modernos para realizar actividades como el empaque, la refrigeración y la selección de los productos. Estos sistemas están conectados con sofisticadas herramientas de trazabilidad que se fundamentan en tecnología blockchain o en sistemas ERP (siglas en inglés de planificación de recursos empresariales), lo cual posibilita una administración más clara y eficaz de toda la cadena de abastecimiento. Esta novedosa tecnología posibilita la verificación de

todos los procedimientos, desde la etapa inicial en el terreno hasta el momento en que el producto llega al comprador definitivo, asegurando la transparencia y el acatamiento de las normativas fitosanitarias de Estados Unidos y de Europa, según lo establecido por la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos y la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (OCDE-FAO, 2021). Sin embargo, es relevante recordar que la inversión inicial y los requisitos de formación técnica especializada siguen siendo barreras importantes para el proceso de expansión de estas tecnologías en pequeñas compañías o agrupaciones locales.

La adopción de tecnologías avanzadas 4.0 en diversos sectores de la región muestra variaciones notables. Aunque un significativo 80% de las empresas agrícolas que se dedican a la exportación utiliza alguna forma de sistema de riego tecnificado, solo una pequeña parte (menos del 30%) emplea herramientas de inteligencia artificial y plataformas sofisticadas para recopilar y analizar datos (citadas). De acuerdo con investigaciones recientes (Magaña et al., 2022; López-Beltrán et al., 2022), la adopción de tecnologías nuevas suele concentrarse en unidades productivas que tienen más acceso a capital e infraestructura y están conectadas con cadenas de valor globalizadas. Esto evidencia de manera clara la urgencia de desarrollar políticas concretas y apropiadas para apoyar el proceso de digitalización en la industria agropecuaria, considerando las notorias desigualdades estructurales en términos de acceso a tecnología avanzada, recursos económicos y programas de capacitación especializada.

3.5. Diferencias en variedades de cultivos y su relación con el uso del agua y la eficiencia tecnológica

La amplia diversidad genética presente en las diferentes variedades de cultivos agroindustriales en la región del Bajío de Michoacán juega un papel fundamental en la adecuada administración y conservación de los limitados recursos hídricos disponibles, especialmente en situaciones críticas de falta de agua y la explotación excesiva de los acuíferos. Las notables diferencias entre las diversas variedades de un mismo cultivo —por ejemplo, en el caso de la fresa (*Fragaria* × *ananassa*), con variedades tan distintas como Festival, Albion o San Andreas— no solo tienen un impacto significativo en la calidad del fruto, los ciclos de producción y la rentabilidad, sino que también influyen de manera considerable en la cantidad de agua requerida y

en la eficacia en el aprovechamiento del recurso hídrico disponible (Estrada-Lugo et al., 2019; Valencia-Ramos & Vargas, 2021).

Diversas variedades de arándano, tales como Biloxi, Emerald y Ventura, son ampliamente cultivadas en la región del Bajío debido a su capacidad para adaptarse a las condiciones climáticas cálidas y su excelente desempeño en sistemas hidropónicos. Esta elección no solo se basa en su resistencia al calor, sino también en su capacidad de ser cultivadas de manera sustentable, lo que contribuye a la reducción significativa de la huella hídrica azul. Este éxito se obtiene mediante la implementación de soluciones nutritivas recirculantes y un sistema de monitoreo automatizado, que asegura una utilización eficaz del agua y una producción más sustentable en el tiempo. El rendimiento de las cosechas agrícolas se puede optimizar de manera notable gracias a esta innovación tecnológica, que disminuye significativamente el gasto de agua. Esto es particularmente ventajoso en terrenos no aptos para la agricultura tradicional. Además, facilitar el cultivo en áreas donde la disponibilidad de agua subterránea es limitada, lo que representa una ventaja crucial para la sustentabilidad de la producción alimentaria a largo plazo (García-Gaytán et al., 2020; López-Beltrán et al., 2022).

En el caso del aguacate (*Persea americana*), las variedades Hass y Mendez difieren tanto en su temporalidad de cosecha como en la cantidad de agua requerida por tonelada de fruta producida. Hass, más extendida y con mayor valor comercial, presenta un requerimiento hídrico promedio de hasta 1,500 m³/ton, mientras que Mendez, una variedad de maduración temprana, puede adaptarse mejor a esquemas de manejo de riego controlado. No obstante, ambas variedades demandan una gestión hídrica tecnificada para mitigar su impacto ambiental en regiones de alta vulnerabilidad hídrica como Peribán y Tancítaro (Magaña et al., 2022; Rueda Estrada & Aranda, 2018).

Las zarzamoras, también conocidas como moras, pertenecen al género *Rubus* spp. y se han desarrollado variedades sin espinas que se caracterizan por su alta densidad de plantación, como es el caso de las variedades Tupi y Chester. Esta adaptación facilita un control agronómico más preciso y una gestión del agua más eficiente mediante la técnica de fertirrigación por goteo, lo que contribuye a optimizar el rendimiento de los cultivos. Los agricultores altamente tecnificados de la región del Bajío han adoptado con rapidez estas diversas variedades de semillas debido a su

notable productividad y a su total adecuación a las exigencias de certificación GlobalG.A.P., que fomentan un empleo responsable y sustentable de los recursos hídricos (FAO, 2021; Valencia-Ramos & Vargas, 2021).

La cantidad de producción agrícola que se obtiene por cada metro cúbico de agua consumido, conocido como rendimiento hídrico, puede fluctuar considerablemente entre diferentes tipos de cultivos e incluso dentro del mismo sistema tecnológico de riego.

Es fundamental considerar esta variabilidad al planificar estrategias de manejo del agua en la agricultura. Esta disparidad de criterios ha propiciado una inclinación hacia la elección de variedades enfocadas en la optimización del uso del agua, en la cual se tienen en cuenta no solo los aspectos relacionados con la producción y el comercio, sino también las particularidades hidrológicas específicas de la región y la infraestructura tecnológica disponible en cada explotación agrícola (González-Camacho et al., 2018). En este sentido, la revolución agroindustrial 4.0 en la región del Bajío de Michoacán se encuentra estrechamente ligada a decisiones agronómicas fundamentadas en indicadores de sustentabilidad hídrica y en la implementación de tecnologías innovadoras.

Como conclusión de este capítulo, la implementación y adopción de tecnologías innovadoras vinculadas a la agroindustria 4.0 en la región del Bajío de Michoacán se presenta como una valiosa oportunidad estratégica para llevar a cabo una profunda modernización de los sistemas productivos, lo cual permitirá satisfacer de manera eficiente y efectiva las demandas cada vez más exigentes del mercado internacional. No obstante, es fundamental que su puesta en marcha se realice de manera gradual y planificada, considerando una estrategia global que ponga énfasis en la protección y preservación del medio ambiente, en particular en lo que respecta a la gestión adecuada de los recursos hídricos y la promoción de la biodiversidad. Solamente mediante un adecuado equilibrio entre la constante búsqueda de avances tecnológicos y el compromiso activo con la protección del entorno social y ambiental, se logrará erigir un patrón agroindustrial que sea capaz de mantener su competitividad y sustentabilidad en el transcurso de los años venideros.

La figura titulada “*Variedades tradicionales vs. Variedades modernas/mejoradas en el uso del agua*” ilustra que se establece un contraste entre dos paradigmas productivos agrícolas, distinguidos por su grado tecnológico y

eficiencia hídrica. En el lado izquierdo, correspondiente a las variedades tradicionales, se identifica un sistema que se distingue por la utilización intensiva de agua, una eficiencia tecnológica reducida y métodos de riego tradicionales, lo que se traduce en una demanda hídrica incrementada y rendimientos inferiores por unidad de recurso empleado. Asimismo, se destaca la escasa accesibilidad a los datos para tomar decisiones, lo que restringe la posibilidad de mejorar el uso del agua en esos sistemas.

En cambio, la sección de la derecha muestra las variedades contemporáneas o mejoradas, que están relacionadas con un método de agricultura de alta precisión. Este último incorpora tecnologías como el monitoreo satelital, sensores de humedad, herramientas digitales y el riego automatizado para gestionar eficazmente las cosechas. Este modelo permite una utilización del agua muy eficiente, optimiza el riego y ofrece mayor resistencia a situaciones de sequía, lo cual muestra un cambio hacia sistemas productivos más sustentables.

Desde un punto de vista analítico, la imagen muestra un proceso de cambio tecnológico que conecta directamente la mejora de la productividad y la reducción de la huella hídrica con los avances en el ámbito agrícola. Esta modificación es esencial en situaciones de insuficiencia hídrica, puesto que evidencia que la integración de tecnologías de vanguardia puede aportar de manera significativa a la reducción de la presión sobre los recursos hídricos, en consonancia con los principios de la agricultura sustentable y la agroindustria 4.0.

Figura 3.5. *Variedades tradicionales vs. variedades modernas/mejoradas en el uso del agua*



Fuente: Elaboración propia con base en literatura sobre eficiencia hídrica y agricultura de precisión.

En síntesis, el análisis indica que la agroindustria de la región del Bajío en Michoacán atraviesa una etapa de transformación. En este periodo, se fusionan el incremento de la producción y la aplicación de tecnologías novedosas. Esto ha incrementado la competencia y la eficiencia de la agricultura, pero a su vez ha intensificado el estrés sobre los recursos hídricos, en particular los acuíferos de la zona. En este marco, la huella hídrica azul es un indicador crucial para comprender el vínculo entre la producción agraria y la sustentabilidad. Esto contribuye a distinguir diferencias significativas entre zonas, cultivos y tecnologías. El segmento siguiente se centra en los resultados de la evaluación de la huella hídrica azul en cultivos agroindustriales, fundamentándose en este marco. Su propósito es analizar el uso de agua por cada cultivo y municipio, examinar su eficiencia en el consumo de agua y hacer comparaciones para comprender con mayor claridad la presión que existe sobre el recurso hídrico en el área de estudio.

Capítulo IV.

Resultados de la medición de la huella hídrica azul en cultivos agroindustriales

“El esfuerzo de un inventor consiste, esencialmente, en salvar vidas”

-Nikola Tesla-

Los datos recopilados en el estudio de la huella hídrica azul en los cultivos agroindustriales del Bajío de Michoacán muestran disparidades notables entre las distintas especies cultivadas, los diversos grados de tecnificación y las variadas estrategias de riego implementadas. El aguacate, que se caracteriza por tener una gran demanda de agua, fue el cultivo con mayor huella hídrica azul por kilogramo producido. La fresa y el brócoli, otros dos productos que requieren una cantidad importante de agua para crecer adecuadamente, le siguieron de cerca. El volumen de agua requerido para el riego varía en función de la eficiencia de los diversos sistemas de irrigación utilizados, además de las propiedades específicas del terreno y las condiciones climáticas que se dan en cada zona. En términos generales, se ha notado que los sistemas de tecnificación más avanzados, como el riego por goteo automatizado, han llevado a las unidades productivas a emplear menos agua azul en comparación con las que continúan utilizando métodos tradicionales. Este hecho enfatiza lo importante que es la innovación tecnológica para lograr una gestión del agua más sustentable a largo plazo.

4.1 Análisis comparativo entre cultivos y su relación con las prácticas tecnológicas

4.1.1. Huella Hídrica Azul del arándano en los municipios de estudio

A partir de la metodología implementada para el cálculo de la Huella Hídrica Azul (HHA), cuantificada en metros cúbicos por tonelada ($\text{m}^3 \cdot \text{ton}^{-1}$), la comparación intermunicipal del cultivo de arándano en Jacona, Los Reyes, Tangancícuaro y Zamora permite identificar discrepancias estructurales en la utilización del agua azul en la región de estudio. La presión hídrica relativa, calculada a partir del consumo hídrico azul acumulado (CWU(b) dividido entre el rendimiento del cultivo (Y), representa un indicador estratégico para evaluar la expansión de la agroindustria de exportación.

La tabla evidencia una diferenciación territorial patente en la HHA del arándano: los valores positivos más significativos se encuentran en Los Reyes y Tangancícuaro, mientras que Jacona y Zamora presentan valores nulos en la totalidad de la serie. Desde una perspectiva temporal, Tangancícuaro manifiesta un comienzo

más precoz de la huella azul en 2013 (475.18 m³/ton), mientras que Los Reyes se despliega a partir de 2014 (522.70 m³/ton) y alcanza sus niveles máximos en 2015 (768.68 m³/ton) y 2016 (759.74.) Subsecuentemente, ambos municipios evidencian una disminución progresiva y para el periodo 2022-2023, los valores descienden a niveles significativamente inferiores: 202.52-198.52 m³/ton en Los Reyes y 253.74-248.79 m³/ton en Tangancícuaro.

Este comportamiento indica que la producción de arándano bajo riego no se distribuye de manera homogénea en el Bajío de Michoacán, sino que se encuentra influenciada por procesos de especialización territorial, disponibilidad de infraestructura de riego, avance en la tecnificación agrícola y diversa consolidación agroexportadora. Conforme a la literatura referente a la huella hídrica, estas variaciones son previsibles, dado que la huella hídrica agrícola (HHA) depende simultáneamente del consumo consuntivo de agua azul, de la evapotranspiración del cultivo y del rendimiento por hectárea. Por lo tanto, territorios con prácticas productivas divergentes pueden generar huellas notablemente divergentes incluso en el caso de un cultivo idéntico.

La premisa fundamental es que los valores de 0.00 m³/ton no deben ser interpretados automáticamente como una ausencia tangible de consumo hídrico, sino como un dato que requiere una revisión metodológica. En las investigaciones sobre la huella hídrica, un valor nulo puede indicar al menos tres factores: la ausencia de producción comercial documentada, la ausencia de superficie cosechada/rendimiento válido para el año, o bien las restricciones en la integración de las bases de datos productivas e hidrológicas. En consecuencia, para una disertación doctoral, resulta incorrecto postular que Jacona y Zamora "no consumen agua azul" para el arándano, sino que no exhiben huella azul calculada en la serie disponible. Este hecho debe ser corroborado mediante registros de SIAP, padrones productivos, superficies bajo riego y evidencia de campo. La importancia de esta precisión radica en que la literatura académica señala que la huella hídrica es particularmente sensible a la calidad del dato de entrada, particularmente a los rendimientos, calendarios fenológicos, láminas de riego y supuestos de balance hídrico.

El segundo descubrimiento significativo es que Los Reyes exhibe la intensidad hídrica unitaria más elevada durante la etapa de expansión del cultivo, particularmente en el periodo comprendido entre 2014 y 2018. Desde una perspectiva técnica, un alto

contenido de agua azul por tonelada sugiere que el consumo de agua azul fue elevado en relación con el rendimiento logrado. Esta circunstancia puede ser atribuida a múltiples factores no excluyentes: plantaciones jóvenes con baja productividad inicial, mayor dependencia del riego, ineficiencias en la distribución o aplicación, necesidades adicionales derivadas de la gestión agronómica, o una menor estabilidad productiva durante los primeros años de formación. La evidencia a nivel global referente al arándano corrobora precisamente dicha variabilidad: Pannunzio et al. registraron en arándano comercial variaciones significativas en la huella hídrica total, que oscilan entre 212 y 4066 m³/ton, vinculadas con factores como el cultivo, la edad de la plantación, el rendimiento y la utilización adicional de agua para la protección contra heladas. Por lo tanto, los valores registrados en Los Reyes y Tangancícuaro se sitúan dentro de un rango plausible para este cultivo, aunque evidencian diferencias internas significativas en la eficiencia hídrica.

Por otro lado, Tangancícuaro exhibe un comportamiento diferenciado: inicia con una HHA relativamente alta en 2013 (475.18 m³/ton), experimenta una disminución gradual hasta alcanzar 380.98 m³/ton en 2017 y posteriormente exhibe una ligera recuperación en 2018–2019, antes de experimentar una caída nuevamente en 2022–2023. Esta evolución indica un proceso de adaptación productiva más estable que el experimentado en Los Reyes. Desde una perspectiva interpretativa, podría sugerir una correlación más estrecha entre la aplicación de agua y el rendimiento adquirido, o bien una curva de aprendizaje tecnológico más coherente. La literatura existente en relación con el riego de arándano corrobora esta hipótesis: cuando la gestión se aproxima a las necesidades reales de evapotranspiración del cultivo, es posible preservar rendimientos y calidad sin sobrecargas. Ortega-Farías et al. descubrieron que la aplicación de aproximadamente el 100% de la ET_c resultó en un ahorro de agua de entre 20% y 27% en comparación con un riego de 125% ET_c, sin diferencias significativas en rendimiento y calidad. Este hallazgo consolida la noción de que una administración del riego más rigurosa puede disminuir la huella azul unitaria sin comprometer la productividad.

Sin embargo, desde un enfoque robusto de sustentabilidad, una reducción de la HHA por tonelada no debe ser celebrada de forma acrítica. Una huella reducida puede atribuirse a un incremento en la eficiencia, así como a un incremento en el rendimiento que “diluzca” el consumo hídrico por tonelada, sin que necesariamente se reduzca la extracción total de agua subterránea o superficial. En términos académicos,

la optimización del indicador unitario no asegura de manera autónoma una reducción en la presión territorial ejercida sobre acuíferos y corrientes. Por consiguiente, la literatura contemporánea subraya la necesidad de que la huella hídrica se complemente con indicadores de escasez o presión, dado que el mismo volumen consumido tiene implicaciones distintas dependiendo de la disponibilidad local. La metodología AWARE enfatiza que la repercusión del consumo está condicionada por la disponibilidad residual de agua para otros usuarios humanos y ecosistémicos. Por lo tanto, un consumo de 250 m³/ton puede ser relativamente tolerable en un territorio con amplia disponibilidad, pero críticamente problemático en una región con sobreexplotación o competencia intensa por el recurso.

En este contexto, la conducta observada entre 2022 y 2023 —con valores significativamente inferiores en Los Reyes y Tangancícuaro— requiere un análisis metódico. Esta puede simbolizar una mejora significativa en la eficiencia hídrica derivada de la tecnificación, el fertirriego, la optimización de la programación del riego o la ampliación de la experiencia del productor. Sin embargo, también puede ser una respuesta a variaciones en el rendimiento, alteraciones en la superficie efectivamente cosechada, ajustes en la base de datos o modificaciones en el patrón de cultivo. Mekonnen y Hoekstra evidencian que la huella hídrica de los cultivos fluctúa espacialmente en función del clima, el suelo y el manejo. Sin embargo, los parámetros globales sugeridos por Mekonnen y Hoekstra sugieren que la reducción de la huella por tonelada es viable cuando se optimizan las prácticas y la productividad. No obstante, dichos autores señalan que los valores de referencia deben ser contextualizados regionalmente, dado que los factores que determinan la huella no son meramente climáticos, sino también tecnológicos y organizativos.

Implementando la perspectiva técnica de la experiencia evidenciada en el documento anexo, esta tabla debe ser interpretada también bajo criterios de trazabilidad metrológica, control de calidad del dato y validación de resultados. El perfil del anexo demuestra formación en metrología, análisis estadístico, sistemas de gestión de calidad y evaluación normativa, lo que metodológicamente justifica la exigencia de: consistencia entre la superficie sembrada y cosechada, comprobación de rendimientos atípicos, identificación de años con datos ausentes, homogeneidad en unidades y criterios de cálculo, así como validación cruzada con fuentes oficiales y observación territorial. Dicha metodología consolida la solidez doctoral del análisis,

dado que transforma la interpretación desde una mera lectura descriptiva hacia una valoración de la fiabilidad del dato y sus consecuencias para la gobernanza hídrica.

Tabla 4.1.1. *Huella hídrica azul (m^3/ton) del cultivo de arándano en municipios del Bajío de Michoacán (2013–2023)*

ARÁNDANO				
Resultado del Cálculo de la Huella Hídrica Azul (HHA)				
m^3/ton				
AÑO	Jacona	Los Reyes	Tangancícuaro	Zamora
2011	0.00	0.00	0.00	0.00
2012	0.00	0.00	0.00	0.00
2013	0.00	0.00	475.18	0.00
2014	0.00	522.70	454.52	0.00
2015	0.00	768.68	450.60	0.00
2016	0.00	759.74	384.62	0.00
2017	0.00	706.35	380.98	0.00
2018	0.00	657.48	433.78	0.00
2019	0.00	568.15	434.14	0.00
2020	0.00	0.00	0.00	0.00
2021	0.00	0.00	0.00	0.00
2022	0.00	202.52	253.74	0.00
2023	0.00	198.52	248.79	0.00

Fuente: Elaboración propia con base en los datos procesados mediante CROPWAT 8.0 y estadísticas agrícolas de SIAP.

En resumen, los hallazgos indican que el arándano no es un cultivo homogéneo en cuanto a su demanda de agua azul en el Bajío de Michoacán. La evidencia sugiere una concentración geográfica del consumo hídrico en Los Reyes y Tangancícuaro, con una etapa de elevada intensidad hídrica entre 2013 y 2019 y una disminución reciente que podría estar vinculada a modificaciones tecnológicas o a mejoras en la productividad. No obstante, desde una perspectiva crítica, la contribución primordial de esta tabla no se limita a evidenciar las variaciones en la HHA, sino que también pone de manifiesto que la expansión agroindustrial del arándano se desarrolla en áreas territoriales heterogéneas, con variados grados de dependencia del agua azul y con potenciales implicaciones diferenciadas sobre la sustentabilidad regional. Por consiguiente, en el manuscrito doctoral se recomienda expresar estos hallazgos utilizando el IPHA, la AWARE/WSI, la productividad económica del agua y la evidencia cualitativa de gestión del riego. Esto permite que el

debate no se circunscriba a la eficiencia productiva, sino que incorpore la presión tangible sobre la disponibilidad hídrica y la factibilidad socioambiental del modelo agroexportador.

La representación gráfica pone de manifiesto una heterogeneidad temporal y una diferenciación territorial en la huella hídrica azul (HHA) del cultivo de arándano en los municipios de Jacona, Los Reyes, Tangancícuaro y Zamora. En términos generales, se distinguen tres patrones claramente delineados: (1) municipios que no registran huella hídrica (Jacona y Zamora), (2) un municipio con una elevada variabilidad y picos elevados (Los Reyes), y (3) un municipio que exhibe un comportamiento relativamente estable, aunque con fluctuaciones moderadas (Tangancícuaro).

Inicialmente, a lo largo de toda la serie, Jacona y Zamora exhiben valores constantes de cero. Desde una perspectiva metodológica rigurosa, esto no debe interpretarse como una falta de consumo hídrico, sino como una restricción en la disponibilidad, integración o validación de datos productivos y/o hídricos. La literatura académica señala que los cálculos de huella hídrica muestran una alta sensibilidad a la calidad de los datos de entrada —en particular la superficie cosechada, el rendimiento y las láminas de riego—, lo que conlleva que los valores nulos suelen representar vacíos estadísticos en lugar de condiciones reales del sistema productivo (Mekonnen & Hoekstra, 2011).

El municipio de Los Reyes exhibe la intensidad hídrica más elevada, registrando valores que oscilan entre 750 y 780 m³/ton durante el periodo 2015-2016, seguida de una tendencia descendente hasta 2019. Esta conducta indica una etapa inicial de expansión productiva caracterizada por una elevada ineficiencia hídrica, potencialmente vinculada a plantaciones de menor edad, tecnificación insuficiente o una sobreaplicación de riego. Subsecuentemente, la disminución progresiva de la HHA podría ser interpretada como un proceso de adaptación técnica y optimización de la gestión hídrica, en consonancia con investigaciones que evidencian que la implementación de sistemas de riego basados en la evapotranspiración (ETc) puede disminuir considerablemente el consumo de agua sin comprometer el rendimiento (Ortega-Farías et al., 2021). No obstante, la disminución abrupta registrada en 2020 —cuando los valores descendieron a cero— sugiere nuevamente problemas de inconsistencia en los datos o interrupciones en la producción documentada.

Por el contrario, Tangancícuaro exhibe una trayectoria más estable, registrando valores que oscilan entre cerca de 380 y 480 m³/ton durante la mayor parte del periodo de estudio. Esta reducción en la variabilidad sugiere una eficiencia relativa en la utilización del agua o una administración más homogénea del cultivo, lo cual se alinea con pruebas empíricas que sugieren que los sistemas productivos con un control técnico más riguroso del riego tienden a disminuir la variabilidad de la huella hídrica (Lovarelli et al., 2016). Sin embargo, la dinámica interanual no es estrictamente lineal, lo que evidencia la influencia de factores climáticos, productivos y tecnológicos en la dinámica anual.

La representación gráfica integra ecuaciones de regresión lineal junto con sus correspondientes coeficientes de determinación (R^2), los cuales facilitan la evaluación de la capacidad explicativa de la tendencia lineal a lo largo del tiempo.

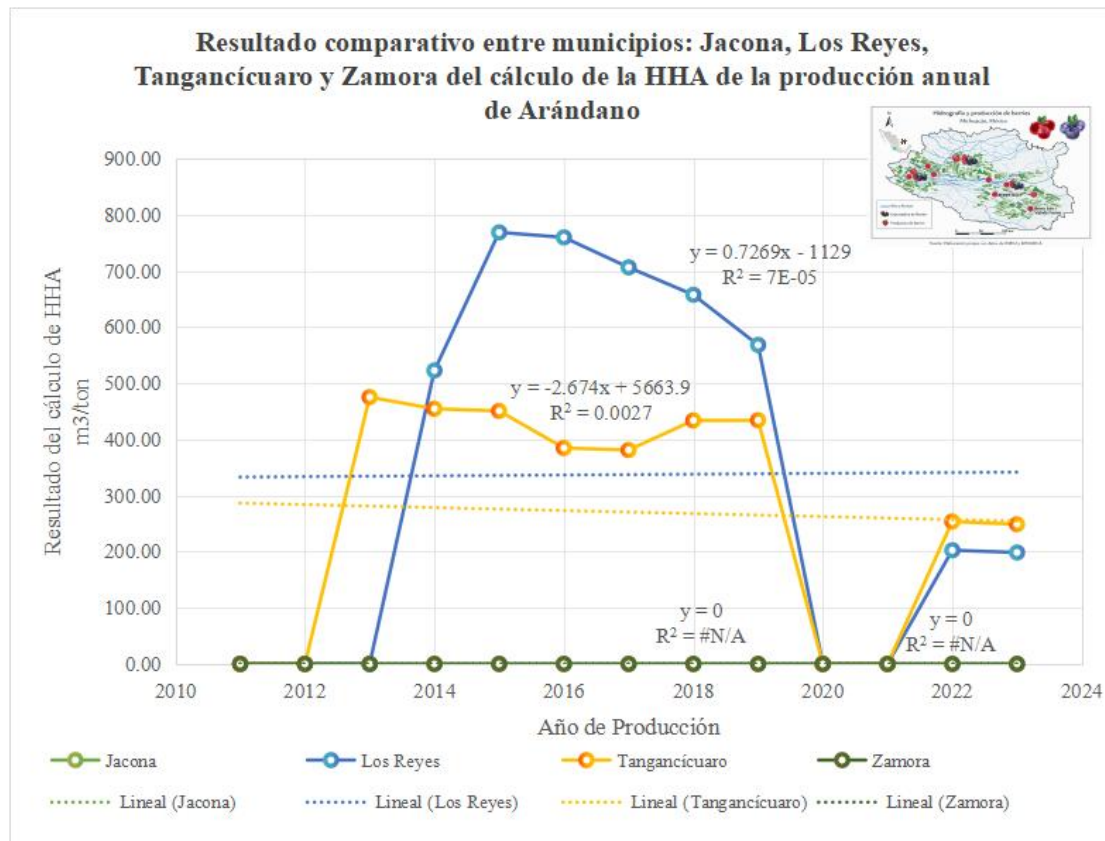
Para los Reyes, la ecuación $y=0.7269x-1129$ presenta un $R^2 = 7E-05$, lo que indica que menos del 0,01% de la variabilidad de la HHA es explicada por el tiempo. Este valor extremadamente bajo pone de manifiesto que la tendencia lineal es casi inexistente y que el comportamiento de la HHA está predominantemente influenciado por factores no lineales, tales como modificaciones tecnológicas, fluctuaciones climáticas, estrategias de gestión del cultivo o incluso inconsistencias en la información. Desde una perspectiva estadística, esto sugiere que no existe una correlación significativa entre el transcurso del tiempo y la progresión de la huella hídrica en este municipio, lo que implica que cualquier interpretación fundamentada exclusivamente en la tendencia temporal sería metodológicamente insuficiente.

En el caso de Tangancícuaro, la ecuación $y=-2.674x+5663.9$ con un $R^2 = 0.0027$ indica igualmente una muy baja capacidad explicativa del modelo lineal (0.27%). A pesar de que la pendiente negativa indica una tendencia marginal hacia la reducción de la huella hídrica a lo largo del tiempo, el valor de R^2 corrobora que dicha tendencia no posee relevancia estadística. En consecuencia, el comportamiento observado se atribuye a dinámicas de mayor complejidad que no pueden ser capturadas a través de un modelo lineal simple.

Para Jacona y Zamora, donde los valores son constantes en cero, el modelo lineal arroja $y = 0$, $y = 0$ y un R^2 no definido (N/A), esto se alinea con la

inexistencia de variabilidad en los datos. No obstante, desde un punto de vista crítico, esto fortalece la hipótesis de deficiencias de información o falta de registros válidos, más que una condición tangible de ausencia de consumo hídrico.

Figura 4.1.1. Resultado comparativo de la huella hídrica azul (m^3/ton) del cultivo de arándano en los municipios de Jacona, Los Reyes, Tangancicuaro y Zamora (2011–2023)



Fuente: Elaboración propia con base en los datos de SIAP (2023) procesados mediante CROPWAT 8.0.

Desde el punto de vista de la sustentabilidad fuerte, estos descubrimientos demuestran que la interpretación de la eficiencia hídrica no se debe limitar a valores unitarios (m^3/ton), sino que tiene que considerar tanto la presión total sobre los recursos hídricos como el contexto territorial. Una disminución de la huella hídrica por tonelada puede deberse a mejoras en la eficiencia o a incrementos en el rendimiento, sin que esto implique necesariamente una reducción en la cantidad total de agua extraída. Boulay et al. (2018) han registrado ampliamente este fenómeno en sus estudios sobre la productividad del agua y la huella hídrica.

Además, al integrar la metodología derivada de la experiencia profesional en el documento anexo, es imperativo subrayar la importancia de garantizar la calidad de los datos, la trazabilidad metrológica y la validación de los resultados. La capacitación en sistemas de gestión de calidad, análisis estadístico y regulaciones insinúa que estos hallazgos deben ser sometidos a procesos de verificación rigurosos, que abarcan:

- ✓ Validación de la consistencia entre la superficie sembrada y la cosechada para verificar la consistencia entre ambas superficies.
- ✓ Detección de valores atípicos o discontinuidades, tal como se observó en 2020.
- ✓ Integración de unidades y métodos de cálculo homogeneizados.
- ✓ Implementación de triangulación con fuentes oficiales (SIAP, CONAGUA).
- ✓ Evaluación de la incertidumbre inherente a los cálculos efectuados.

Este método potencia la solidez científica del análisis y previene interpretaciones sesgadas derivadas de datos incompletos o inconsistentes, en consonancia con los principios de calidad estipulados en normas internacionales como ISO/IEC 17025 y metodologías de evaluación ambiental.

En este contexto, el gráfico no solo pone de manifiesto las variaciones territoriales en la huella hídrica del arándano, sino que también pone de manifiesto la complejidad del sistema agroindustrial y la imperiosa necesidad de incorporar análisis cuantitativos que tengan en cuenta criterios de calidad, gobernanza hídrica y sustentabilidad territorial.

4.1.2. Huella Hídrica Azul de la frambuesa en los municipios de estudio

Los hallazgos de la huella hídrica azul (HHA) en la producción de frambuesa demuestran una evolución temporal con una tendencia general hacia la reducción, aunque con diferencias significativas entre las distintas jurisdicciones municipales. Durante el periodo inicial (2011-2015), los valores se concentran aproximadamente en 500 m³/ton en las localidades de Jacona, Los Reyes y Zamora, mientras que Tangancícuaro exhibe valores notablemente inferiores (220 m³/ton), lo que sugiere, desde fases tempranas, una eficiencia relativa superior o condiciones productivas diferenciadas. Esta conducta se alinea con la literatura existente, la cual postula que la HHA está condicionada por factores tales como el rendimiento, la gestión del riego y las condiciones edafoclimáticas (Mekonnen & Hoekstra, en 2011).

Desde 2016, se evidencia una mayor heterogeneidad intermunicipal, con un aumento en Zamora (con un volumen de hasta 576.95 m³/ton) y una disminución en Jacona y Los Reyes, lo que evidencia una transición tecnológica no homogénea en la región. Estas oscilaciones se alinean con investigaciones que indican que la huella hídrica en sistemas agrícolas intensivos se caracteriza por variaciones en las prácticas de riego, la productividad y las condiciones climáticas (Lovarelli et al., 2016).

Durante el período reciente (2020–2023), se observa una disminución y una estabilización aparente en la HHA en todos los municipios (≈242-294 m³/ton). Aunque esto podría ser interpretado como una mejora en la eficiencia hídrica, la repetición precisa de valores durante varios años puede indicar potenciales restricciones en la calidad o actualización de los datos, por lo que estos hallazgos deben ser evaluados con prudencia. La bibliografía señala que la HHA es poco probable que se mantenga constante en sistemas reales debido a la variabilidad climática y productiva (Mekonnen & Hoekstra, 2011).

Tabla 4.1.2. Huella hídrica azul (m³/ton) del cultivo de frambuesa en los municipios de Jacona, Los Reyes, Tangancícuaro y Zamora (2011–2023)

FRAMBUESA				
Resultado del Cálculo de la Huella Hídrica Azul (HHA)				
m ³ /ton				
AÑO	Jacona	Los Reyes	Tangancícuaro	Zamora
2011	512.15	512.15	221.93	512.15
2012	504.39	504.39	512.15	504.39
2013	512.15	512.15	221.93	504.39
2014	493.19	510.58	226.08	512.15
2015	475.57	516.12	218.30	485.99
2016	423.54	301.27	383.53	576.95
2017	349.13	300.59	211.03	529.67
2018	399.16	318.56	217.30	430.10
2019	381.77	295.91	221.20	318.56
2020	256.08	294.60	246.59	256.08
2021	252.20	293.95	242.11	251.25
2022	252.20	293.95	242.11	251.25
2023	252.20	293.95	242.11	251.25

Fuente: Elaboración propia con base en datos de SIAP (2023) y CONAGUA (2022), mediante cálculos realizados con CROPWAT 8.0.

Desde la perspectiva de la experiencia técnica en metrología y control de calidad documentada en el anexo, estos hallazgos demandan procesos de validación, trazabilidad y análisis de consistencia, especialmente durante años con valores recurrentes o alteraciones abruptas, con el objetivo de asegurar la fiabilidad del análisis y su interpretación científica precisa.

En su totalidad, la tabla indica una mejora relativa en la eficiencia hídrica del cultivo de frambuesa. Sin embargo, también pone de manifiesto la necesidad de complementar el análisis con indicadores de presión hídrica (tales como IPHA o AWARE), dado que una reducción en la HHA no necesariamente conlleva una reducción en la presión sobre los recursos hídricos en términos absolutos (Boulay et al., 2018).

La progresión temporal de la huella hídrica azul (HHA) en la agricultura de la frambuesa en las jurisdicciones municipales de Jacona, Los Reyes, Tangancícuaro y Zamora pone de manifiesto un proceso no lineal de ajuste productivo, caracterizado por una tendencia general decreciente y una variabilidad interanual diferenciada. Esta conducta señala que la eficiencia en el uso del agua no es solo resultado de un avance gradual a través del tiempo, sino de la combinación de factores territoriales, productivos y tecnológicos que generan caminos diversos entre las diferentes administraciones locales.

En contraste, los municipios de Jacona y Zamora muestran una reducción continua de la HHA, pasando de niveles superiores a 500 m³/ton a cifras alrededor de los 250 m³/ton en años recientes. Este patrón concuerda en parte con la teoría de Lovarelli et al. (2016), quienes sostienen que es posible mejorar la eficiencia hídrica en sistemas de agricultura intensiva mediante el uso de tecnologías más precisas para el riego y el incremento de la productividad. No obstante, desde una óptica crítica, esta disminución no tiene por qué ser considerada de manera automática como un signo de sustentabilidad. Según señalan Mekonnen y Hoekstra (2011), en contextos de expansión agrícola, la huella hídrica por unidad de producto puede reducirse sin que esto implique una disminución proporcional del volumen total de agua consumida.

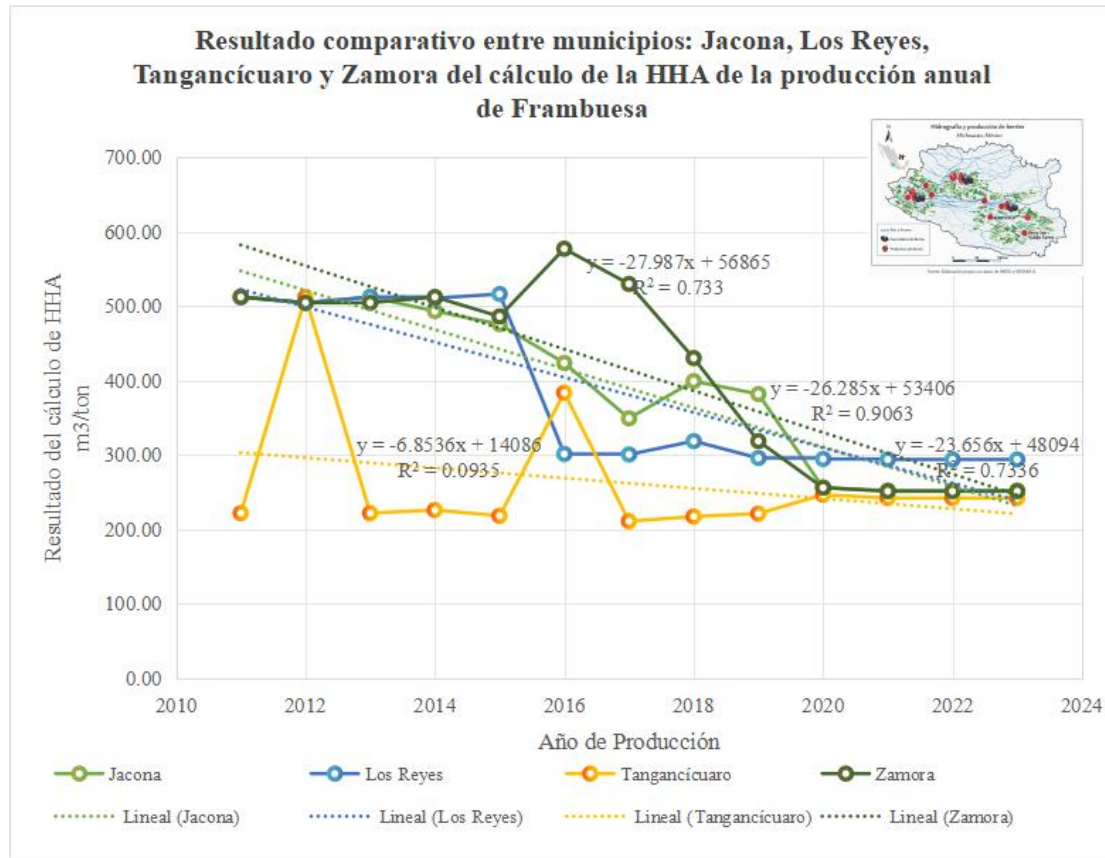
En cambio, Los Reyes presenta un cambio de estructura más drástico, especialmente desde 2016, cuando la HHA sufre una disminución relevante. Esta clase de comportamiento señala la posible incorporación de innovaciones tecnológicas o modificaciones en el manejo agronómico. No obstante, también podría

estar relacionado con cambios en el desempeño o incluso con modificaciones en los criterios de registro de datos. En cambio, Tangancícuaro presenta una inestabilidad más alta, con variaciones significativas durante el periodo analizado; esto indica que la gestión del recurso hídrico es menos uniforme o que hay mayor vulnerabilidad a elementos externos, como los cambios climáticos o la variedad en las prácticas de producción.

La interpretación se hace más profunda al analizar los coeficientes de determinación (R^2). Tangancícuaro ($R^2 \approx 0.09$) muestra un comportamiento muy irregular, donde la tendencia lineal no es suficiente para describir la dinámica observada, mientras que Zamora ($R^2 \approx 0.90$) presenta una tendencia bien marcada y explicada en gran medida por el tiempo. En esta situación, los valores intermedios de Jacona y Los Reyes ($R^2 \approx 0.73$) indican que, aunque existe una tendencia a la baja, no puede ser considerada únicamente fruto del paso del tiempo, lo cual sugiere la influencia de factores adicionales que no están incluidos en el modelo. Esta situación se refiere a la propuesta de Boulay et al. (2018), que enfatizan que los indicadores hídricos deben ser analizados junto con las variables relacionadas con la disponibilidad, el contexto territorial y la presión ejercida sobre los recursos, ya que su comportamiento no es completamente lineal ni independiente.

Desde un punto de vista metodológico, y considerando la experiencia acumulada en metrología, validación de métodos y control de calidad que se detalla en el documento anexo, es imprescindible enfatizar que la interpretación de estos hallazgos tiene que ir acompañada con una evaluación exhaustiva de la trazabilidad y consistencia de los datos. Cambios repentinos en la serie o patrones muy estables pueden señalar no solo transformaciones específicas en el sistema de producción, sino también limitaciones en la recolección, procesamiento o actualización de los datos. En este sentido, es fundamental incorporar los procedimientos de verificación cruzada con fuentes oficiales, análisis de incertidumbre y validación estadística para fortalecer el análisis.

Figura 4.1.2. Resultado comparativo de la huella hídrica azul (m^3/ton) del cultivo de frambuesa en los municipios de Jacona, Los Reyes, Tangancícuaro y Zamora (2011–2023)



Fuente: Elaboración propia con base en datos de SIAP (2023) y CONAGUA (2022), mediante cálculos realizados con CROPWAT 8.0.

Para concluir, el gráfico demuestra que la reducción de la huella hídrica azul en la frambuesa es resultado de una dinámica compleja que no puede explicarse solo mediante tendencias lineales. Este hecho pone de relieve la importancia de incluir perspectivas analíticas más extensas que consideren cómo se relacionan la gobernanza territorial, la disponibilidad del agua y la eficiencia en términos productivos. Por lo tanto, el coeficiente R^2 no solo permite evaluar la calidad del ajuste estadístico, sino que también funciona como un indicador indirecto de cuán complejo es el sistema. Esto revela la importancia de realizar análisis multivariados más detallados para entender de manera integral la sustentabilidad del agua en el agroecosistema.

4.1.3. Huella hídrica azul del cultivo de fresa en los municipios de estudio

Los hallazgos derivados del cálculo de la huella hídrica azul (HHA) para el cultivo de fresa en las jurisdicciones municipales de Jacona, Los Reyes, Tangancicuaro y Zamora ponen de manifiesto una diferenciación territorial significativa en el consumo de agua azul, así como una estabilidad relativa en determinados patrones productivos. En términos generales, se constata que

Tangancícuaro concentra los valores más elevados de HHA, registrando valores que fluctúan entre aproximadamente 79 y 85 m³/ton. Por otro lado, Jacona exhibe valores moderados que se sitúan entre 81 y 84 m³/ton. Finalmente, Los Reyes registra valores nulos en toda la serie examinada, lo que introduce un componente crucial en la interpretación de los hallazgos.

Inicialmente, la uniformidad de los valores observada en Tangancícuaro indica un sistema productivo relativamente estable en cuanto al consumo hídrico por unidad de producto. Esta estabilidad puede ser concebida como el producto de una gestión agronómica consolidada, potencialmente vinculada al empleo de tecnologías de riego más uniformes o a condiciones edafoclimáticas propicias. No obstante, desde una perspectiva crítica, la escasa variabilidad podría sugerir la utilización de parámetros medios en el cálculo o una sensibilidad reducida del modelo a fluctuaciones interanuales. Este aspecto es pertinente dado que la literatura referente a la huella hídrica indica que este indicador tiende a responder a fluctuaciones climáticas, alteraciones en la evapotranspiración y fluctuaciones en el rendimiento (Mekonnen & Hoekstra, 2011).

En contraste, Jacona exhibe valores ligeramente inferiores pero igualmente estables, lo que indica una eficiencia hídrica equiparable a la de Tangancícuaro, aunque con una potencial disminución en la utilización del agua. Esta convergencia entre ambos municipios podría atribuirse a la implementación de prácticas agrícolas análogas, especialmente en el empleo de sistemas de riego por goteo y la gestión intensiva del cultivo, característicos de la agroindustria de frutas en el Bajío de Michoacán. Sin embargo, la discrepancia marginal en los valores podría indicar fluctuaciones en el rendimiento, dado que la huella hídrica azul se manifiesta como una correlación entre el consumo de agua y la producción resultante.

En contraste, el caso de Los Reyes, que se distingue por tener valores estables de 0.00 m³/ton, es un punto crítico que requiere una interpretación metodológica más estricta. Desde una perspectiva técnica, es extremadamente improbable que un cultivo intensivo como la fresa no demuestre un uso de agua azul. Por ende, estos valores deben ser entendidos como una ausencia de datos válidos, incongruencias en la base de datos o limitaciones para integrar información productiva e hidrológica. Estas anomalías han sido identificadas en estudios de huella hídrica como un problema común cuando no se consigue una adecuada correspondencia entre los modelos de cálculo y las bases de datos agrícolas (Lovarelli et al., 2016). Por lo tanto, estos

valores no deben ser incorporados en comparaciones sin haber pasado antes por un proceso de validación.

En última instancia, los valores observados en Zamora (entre 83 y 85 m³/ton) confirman la idea de un sistema de producción relativamente uniforme en el área, pero con una ligera inclinación hacia niveles más altos de consumo de agua en comparación con Jacona. Este comportamiento puede estar relacionado con cambios en la calidad del suelo, en la intensidad de producción o en las estrategias de gestión del riego que se han puesto en práctica.

Desde el punto de vista de la sustentabilidad fuerte, es importante destacar que los valores de HHA en las fresas son relativamente bajos en comparación con otras cosechas, como las frambuesas o los arándanos; sin embargo, esto no implica necesariamente una disminución en la presión sobre los recursos hídricos. Según la bibliografía académica, la eficiencia hídrica por cada unidad de producto puede ocultar efectos importantes si se considera la escala territorial y el aumento de la superficie cultivada (Boulay et al., 2018). Por lo tanto, estas conclusiones deben ser analizadas junto con indicadores de presión y disponibilidad del agua, como el IPHA o el AWARE.

Asimismo, es fundamental implementar procesos de la verificación de consistencia, rastreo de datos y evaluación de incertidumbre en estos hallazgos, sobre todo en circunstancias en las que se identifican constantes o valores fuera de lo común. Esto se logra a través del uso de un enfoque metodológico basado en la experiencia con metrología, validación de sistemas y métodos para administrar la calidad. Esta técnica, además de fortalecer la validez científica del análisis, previene también que los resultados se interpreten de manera sesgada debido a las limitaciones en la calidad de la información.

En síntesis, la tabla muestra que la producción de fresa en el Bajío de Michoacán presenta una huella hídrica azul relativamente estable y moderada; sin embargo, hay diferencias importantes en ciertos municipios que necesitan atención metodológica. Esta conducta pone de manifiesto la urgente necesidad de abordar el análisis de la huella hídrica desde un enfoque integral que combine la calidad de los datos, la eficacia productiva y la sustentabilidad territorial.

Tabla 4.1.3. Huella hídrica azul (m³/ton) del cultivo de fresa en los municipios de Jacona, Los Reyes, Tangancícuaro y Zamora (periodo analizado)

FRESA				
Resultado del Cálculo de la Huella Hídrica Azul (HHA)				
m ³ /ton				
AÑO	Jacona	Los Reyes	Tangancícuaro	Zamora
2011	117.42	0.00	154.68	117.42
2012	88.64	0.00	88.64	88.64
2013	85.42	0.00	85.42	85.42
2014	83.89	0.00	126.05	83.89
2015	86.36	0.00	79.63	84.65
2016	84.45	0.00	79.52	84.09
2017	81.96	0.00	83.39	82.46
2018	84.53	0.00	83.31	89.30
2019	83.08	0.00	83.98	83.39
2020	87.00	0.00	85.42	85.42
2021	85.78	0.00	84.42	84.82
2022	90.28	0.00	83.31	85.12
2023	85.90	0.00	82.73	85.54

Fuente: Elaboración propia con base en datos de SIAP (2023) y CONAGUA (2022), mediante cálculos realizados con CROPWAT 8.0.

La representación gráfica de la Huella Hídrica Azul (HHA) del cultivo de fresa en las jurisdicciones municipales de Jacona, Los Reyes, Tangancícuaro y Zamora manifiesta una dinámica relativamente estable con tendencias decrecientes, acompañada de fluctuaciones aisladas que evidencian variaciones en la administración hídrica y en las condiciones productivas del territorio. En términos generales, los valores de HHA se encuentran sobre todo entre 80 y 95 m³/ton. Esto muestra un comportamiento más uniforme en comparación con otros cultivos como el arándano o la frambuesa, que se caracterizan por su variabilidad más alta.

En el marco de Jacona y Zamora, a lo largo del periodo analizado se observa una tendencia levemente decreciente, que podría interpretarse como un aumento gradual en la eficiencia del uso del agua. Sin embargo, este descenso es marginal y se mantiene dentro de un rango relativamente estable, lo que indica que el sistema productivo ha alcanzado cierto nivel de estabilización tecnológica, probablemente relacionado con la aplicación consolidada de sistemas de riego presurizado y prácticas agrícolas estandarizadas. Esta estabilidad concuerda con los descubrimientos registrados en la literatura, que indican que cultivos intensivos, como la fresa, bajo condiciones de tecnificación, suelen mostrar variaciones más pequeñas en su huella hídrica (Lovarelli et al., 2016).

Tangancícuaro muestra una variabilidad más alta, especialmente en los

primeros años, cuando se registran cifras muy elevadas (≈ 150 m³/ton), que luego bajan y se estabilizan alrededor de 80–90 m³/ton. Este comportamiento indica una etapa preliminar de ineficiencia hídrica o adaptación productiva, seguida de una fase de optimización en la utilización del recurso. Este patrón se alinea con los procesos de incorporación tecnológica en sistemas agrícolas, en los que las fases iniciales frecuentemente conllevan un uso menos eficaz del agua; esta situación se rectifica con el avance de la experiencia y la adopción de prácticas óptimas.

Por el contrario, Los Reyes exhibe valores constantes de 0.00 m³/ton, lo cual representa una anomalía significativa desde una perspectiva metodológica. Este hallazgo no debe ser interpretado como una falta de consumo de agua, sino como una posible carencia de datos, inconsistencias en la base de datos o restricciones en la integración de variables productivas e hidrológicas. La presencia de estos valores compromete la comparabilidad del análisis e intensifica la necesidad de procedimientos estrictos para verificar datos.

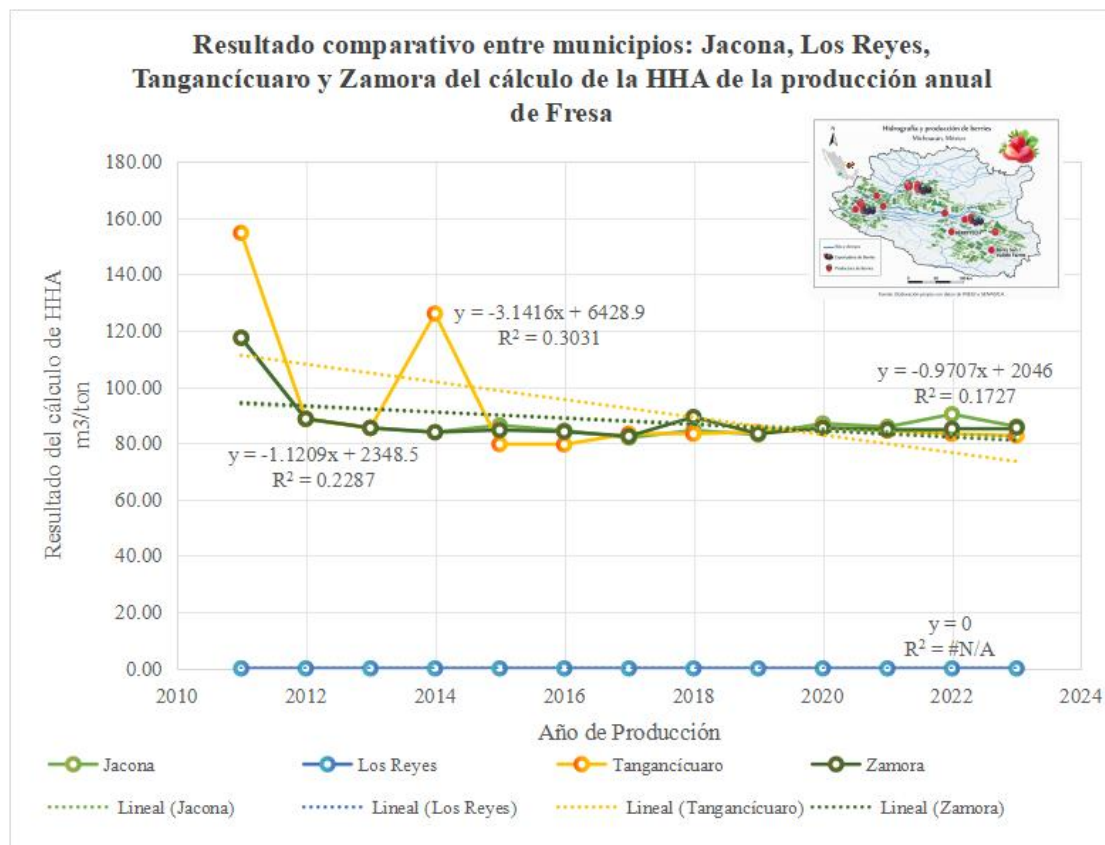
Los coeficientes de determinación (R^2) se analizan para reforzar la interpretación de estas dinámicas. En términos generales, los valores de R^2 varían entre bajo y moderado (Tangancícuaro ≈ 0.30 ; Jacona ≈ 0.23 ; Zamora ≈ 0.17), lo que indica que la tendencia lineal solo explica una pequeña parte de la variabilidad que se ha observado. Esto indica que el comportamiento de la HHA no puede ser únicamente atribuido al paso del tiempo, sino que se ve influenciado por diversos elementos, como las condiciones climáticas, el desempeño variable, los métodos de gestión de riego y la accesibilidad del recurso hídrico. En este escenario, si el valor de R^2 es bajo, significa que el modelo lineal no tiene la capacidad para captar la complejidad del sistema; en cambio, los valores más altos indican una tendencia más constante y previsible.

Estos descubrimientos, desde una perspectiva crítica, concuerdan con lo que Mekonnen y Hoekstra (2011) sostuvieron: la huella hídrica es un indicador muy sensible a variables biofísicas y productivas, lo cual hace que sea difícil que se alinee con patrones lineales simples. Además, Boulay y colaboradores (2018) subrayan que la interpretación de indicadores hídricos debe tener en cuenta el contexto territorial y la disponibilidad del recurso, dado que la eficiencia relativa no necesariamente se traduce en sustentabilidad.

Con la integración de un enfoque metodológico fundamentado en la experiencia en metrología, validación de métodos y sistemas de gestión de calidad, es

esencial subrayar que la fiabilidad del análisis se halla condicionada por la calidad, consistencia y trazabilidad de los datos empleados. La identificación de valores invariables o atípicos, tal como se observa en el caso de Los Reyes, demanda una revisión exhaustiva de las fuentes de información, junto con la implementación de protocolos de control de calidad, análisis de incertidumbre y validación estadística.

Figura 4.1.3. Resultado comparativo de la huella hídrica azul (m^3/ton) del cultivo de fresa en los municipios de Jacona, Los Reyes, Tangancicuaro y Zamora (2011–2023)



Fuente: Elaboración propia con base en datos de SIAP (2023) y CONAGUA (2022), mediante cálculos realizados con CROPWAT 8.0.

En síntesis, el gráfico muestra que la huella hídrica azul en la producción de fresa tiene una tendencia a estabilizarse y a mejorar ligeramente la eficiencia, aunque tiene un ámbito limitado para explicarla con modelos lineales. Esto evidencia la urgencia de enriquecer el análisis con perspectivas más integrales que incorporen variables adicionales y posibiliten una mejor comprensión de la sustentabilidad hídrica en el sector agroindustrial.

4.1.4. Huella Hídrica Azul del cultivo de zarzamora en los municipios de estudio

Los hallazgos derivados del cálculo de la huella hídrica azul (HHA) para el cultivo de zarzamora en las jurisdicciones municipales de Jacona, Los Reyes, Tangancícuaro y Zamora evidencian una dinámica temporal compleja, caracterizada por una tendencia general decreciente, acompañada de una transición estructural en la eficiencia hídrica del sistema agroindustrial. Este comportamiento señala que se está llevando a cabo un proceso de ajuste productivo en el que se combinan factores territoriales, agronómicos y tecnológicos.

En el periodo inicial (2011-2015), los valores de HHA muestran una variabilidad notable entre municipios y una intensidad hídrica significativa, sobre todo en las zonas de Zamora y Los Reyes, donde se observan cifras que rebasan los 300 m³/ton. En cambio, Tangancícuaro muestra desde el principio valores significativamente más bajos; esto sugiere que tiene una posible eficiencia relativa más alta o condiciones climáticas y edáficas más favorables. Este patrón coincide con lo que dice la literatura académica, la cual señala que la interacción entre las prácticas de gestión del riego, el rendimiento y la evapotranspiración determina la huella hídrica, ocasionando variaciones significativas incluso dentro de una misma zona productiva (Mekonnen & Hoekstra, 2011).

Desde 2016, se observa una reducción importante en la HHA en todos los municipios, especialmente en Los Reyes y Jacona, donde esta cae por debajo de 150 m³/ton a partir de 2017. Esta disminución puede ser interpretada como indicativa de un incremento en la eficiencia hídrica, potencialmente vinculado a la implementación de tecnologías de riego de mayor precisión, tales como el goteo tecnificado, el uso de sensores de humedad o la optimización del fertirriego. No obstante, desde un punto de vista crítico, es imperativo tener en cuenta que esta reducción podría estar afectada por modificaciones en el rendimiento agrícola, dado que la HHA es un indicador relativo que se rige por la relación entre el consumo de agua y la producción obtenida.

Durante el reciente periodo (2017–2023), los valores de HHA tienden a estabilizarse en un intervalo más reducido ($\approx$ 130-170 m³/ton), lo que indica que el sistema productivo ha alcanzado un grado de madurez tecnológica en lo que respecta a la administración del agua. Sin embargo, dicha aparente estabilidad no necesariamente connota una condición de sustentabilidad, dado que, tal como indican Boulay et al. (2018), una reducida huella hídrica por unidad de producto puede coexistir con una presión significativa sobre los recursos hídricos, teniendo en cuenta la escala de producción y la disponibilidad local del agua.

Un elemento significativo es la convergencia de valores entre municipios en años recientes, lo que sugiere una uniformización en las prácticas productivas y en la utilización del recurso hídrico. Este fenómeno está relacionado con la normalización de los sistemas de producción en la agroindustria exportadora, en la que el uso de tecnologías y certificaciones fomenta una homogeneidad más alta en los procedimientos. Sin embargo, esta convergencia también podría señalar limitaciones en la resolución de datos o el uso de parámetros generalizados en el modelo de cálculo, elementos que se deben tener en cuenta al analizarlos.

Conforme a la experiencia adquirida en metrología, validación de métodos y sistemas de gestión de calidad, que se describe en el documento anexo, es crucial someter estos descubrimientos a procesos de verificación de consistencia, rastreo de datos y análisis de incertidumbre. Esto es particularmente importante cuando se identifican cambios bruscos o tendencias hacia la estabilización.

La puesta en práctica de estos protocolos potencia la fiabilidad del análisis y asegura su validez científica.

Tabla 4.1.4. Huella hídrica azul (m³/ton) del cultivo de zarzamora en los municipios de Jacona, Los Reyes, Tangancícuaro y Zamora (2011–2023)

ZARZAMORA				
Resultado del Cálculo de la Huella Hídrica Azul (HHA)				
m ³ /ton				
AÑO	Jacona	Los Reyes	Tangancícuaro	Zamora
2011	278.69	265.42	246.87	329.36
2012	274.47	280.85	265.21	278.69
2013	278.69	360.86	186.15	283.05
2014	258.79	278.69	149.32	289.84
2015	301.92	283.05	122.72	268.37
2016	292.41	154.50	132.24	254.78
2017	131.03	139.45	186.38	173.85
2018	130.84	141.97	133.42	149.16
2019	130.37	133.64	128.11	148.06
2020	140.70	136.15	143.08	168.36
2021	137.97	128.25	137.94	171.62
2022	137.97	128.25	141.96	167.34
2023	137.97	143.20	142.33	159.74

Fuente: Elaboración propia con base en datos de SIAP (2023) y CONAGUA (2022), mediante cálculos realizados con CROPWAT 8.0.

En síntesis, la tabla muestra que la producción de zarzamora en el Bajío de Michoacán ha experimentado un cambio hacia una mayor eficiencia del agua, lo que se evidencia en la reducción y estabilización de la huella hídrica azul. Sin embargo, este comportamiento debe analizarse en un contexto más amplio que considere la presión sobre los recursos hídricos, el crecimiento del sistema de producción y la calidad de la información utilizada. Por lo tanto, para ofrecer una valoración más completa del impacto ambiental del sistema agroindustrial, la HHA debe combinarse con otros indicadores de sustentabilidad hídrica.

En los municipios de Zamora, Jacona, Tangancícuaro y Los Reyes, la huella hídrica azul (HHA) en el cultivo de zarzamora muestra una tendencia general a la baja durante el período analizado, con una reducción gradual en la variabilidad entre municipios. Esta conducta señala un proceso de transición hacia una utilización más eficiente del agua, posiblemente asociado con el fortalecimiento de técnicas de riego tecnificadas y la normalización de los sistemas productivos en la agroindustria exportadora.

Durante los primeros años (2011-2014), se observan cifras altas y variadas, en particular en las zonas de Zamora y Los Reyes, donde los niveles de HHA sobrepasan los 300 m³/ton. Esta tendencia es una fase inicial, marcada por un aumento de la actividad relacionada con el agua, que puede estar vinculada a niveles bajos de tecnificación o a procesos de establecimiento del cultivo. Por otra parte, Tangancícuaro muestra desde el inicio valores más bajos, lo que indica una eficiencia relativa más alta o condiciones de producción más favorables. Se observa un hito importante en todos los municipios entre 2015 y 2017, que se distingue por una disminución significativa de la HHA. Esto indica una mejora en la relación entre la cantidad de agua utilizada y el rendimiento.

En el período más reciente (2018-2023), se observa una tendencia de convergencia hacia un rango más restringido (≈ 120 -170 m³/ton), lo que muestra que las prácticas de gestión del agua están siendo cada vez más homogéneas. Este fenómeno de convergencia podría entenderse como resultado de la difusión de normas y tecnologías productivas en la zona, pero también podría señalar una sensibilidad más baja del modelo de cálculo a las variaciones interanuales. Este último aspecto debe considerarse al interpretar los resultados.

El análisis de los coeficientes de determinación (R²) facilita la evaluación de qué tan fuertes son las tendencias lineales que se han detectado. Los valores

relativamente altos de R^2 (cercanos a 0.79 en Zamora y a 0.68 en Jacona) indican que una parte significativa de la variabilidad de la HHA se debe al tiempo, lo cual indica una tendencia decreciente consistente y estructurada. Esta situación puede estar relacionada con procesos graduales de optimización tecnológica o con una estabilidad más alta en las prácticas de gestión del agua.

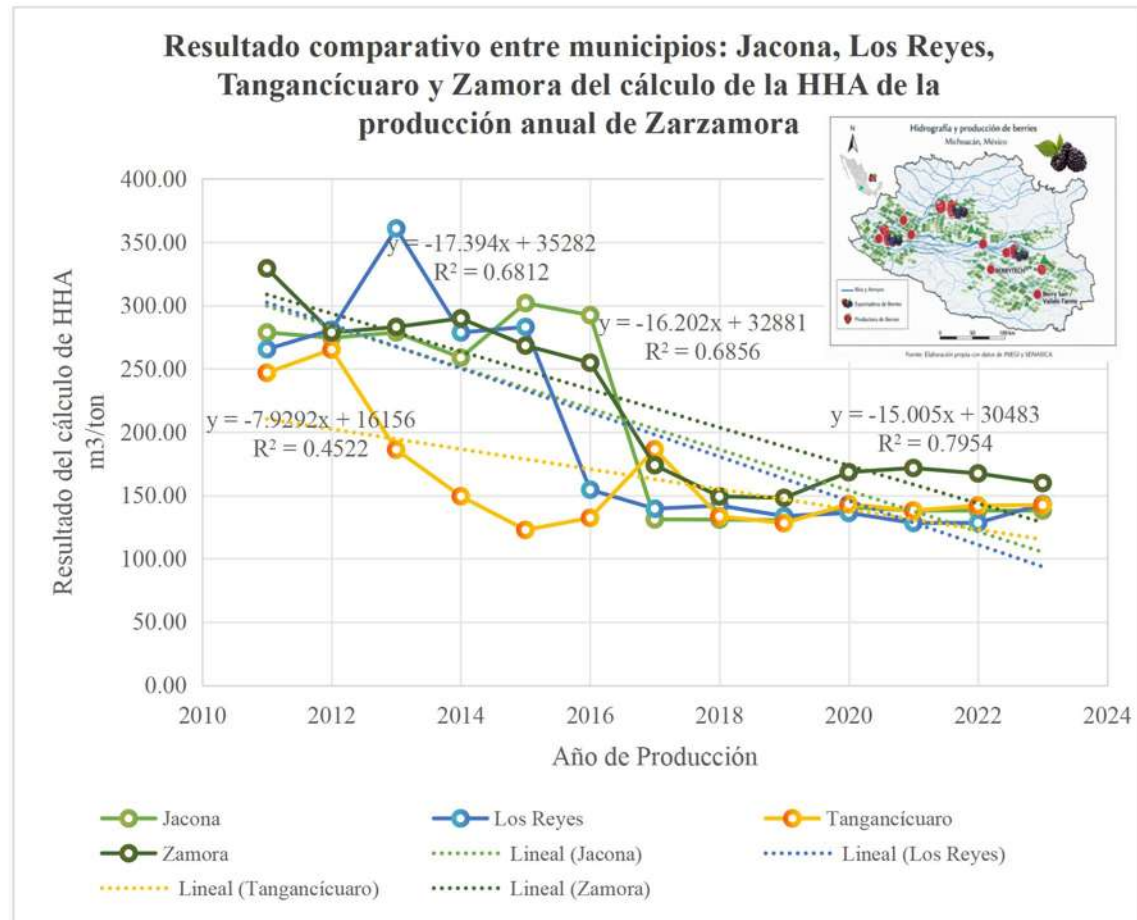
Los Reyes presenta un R^2 de 0.68, lo que indica una conducta parecida, pero con episodios de variabilidad más notables, sobre todo en los años intermedios. Por otro lado, se observa que el modelo lineal tiene una capacidad explicativa moderada en Tangancícuaro, con un R^2 de aproximadamente 0.45. Esto indica que la dinámica de la HHA en este municipio está influenciada por otros elementos que no son considerados por la tendencia temporal, como las fluctuaciones climáticas, los cambios en el rendimiento o las diferencias en la gestión del riego.

Desde un punto de vista metodológico, es crucial destacar que el coeficiente R^2 no cuantifica la causalidad, sino que únicamente evalúa el nivel de adecuación del modelo lineal a la información observada. En este contexto, valores elevados de R^2 señalan una consistencia incrementada en la tendencia, mientras que valores reducidos indican la necesidad de indagar en modelos de mayor complejidad o integrar variables adicionales para elucidar el comportamiento del indicador.

Desde una perspectiva de sustentabilidad, la disminución de la HHA observada en todas las municipalidades podría ser interpretada como un progreso hacia una optimización de la eficiencia hídrica. No obstante, esta interpretación debe ser rectificada, dado que una reducción en el indicador por unidad de producto no necesariamente conlleva una disminución en la presión total ejercida sobre los recursos hídricos. La evidencia académica indica que la eficiencia técnica puede coexistir con procesos de intensificación productiva que potencian la extracción total de agua a nivel territorial.

En última instancia, desde la perspectiva del control de calidad y validación de datos, es esencial tener en cuenta que la robustez del análisis se halla vinculada a la consistencia, trazabilidad y fiabilidad de los datos empleados. La identificación de fluctuaciones abruptas o patrones de convergencia debe ser evaluada a través de métodos de verificación estadística y validación de datos, con el objetivo de asegurar la validez de las conclusiones derivadas.

Figura 4.1.4. Resultado comparativo de la huella hídrica azul (m^3/ton) del cultivo de zarzamora en los municipios de Jacona, Los Reyes, Tangancícuaro y Zamora (2011–2023)



Fuente: Elaboración propia con base en datos de SIAP (2023) y CONAGUA (2022), mediante cálculos realizados con CROPWAT 8.0.

En resumen, el gráfico evidencia una disminución progresiva de la huella hídrica azul en la zarzamora, así como una tendencia hacia la homogeneización entre los municipios, aunque con discrepancias en la robustez estadística de dichas tendencias. Este hecho enfatiza la necesidad de enriquecer el análisis con metodologías multivariadas e indicadores de presión hídrica que faciliten una valoración más holística de la sustentabilidad del sistema agroindustrial.

4.2. Relación entre la Huella Hídrica Azul y las prácticas tecnológicas por cultivo

La interpretación de la huella hídrica azul (HHA) en sistemas agroindustriales no puede efectuarse de forma independiente del contexto tecnológico en el que se lleva a cabo la producción agrícola. Específicamente, en el contexto de los cultivos de

frutas en el Bajío de Michoacán, las prácticas tecnológicas, tales como la modalidad de sistema de riego, la utilización de sustratos, la fertirrigación y la tecnificación de la gestión agronómica, desempeñan un papel crucial en la magnitud y el comportamiento del consumo de agua azul. En esta situación, la HHA se define no únicamente como un indicador biofísico, sino además como una expresión de cuán intensamente se está produciendo y de qué tan eficientemente se usa el recurso hídrico.

Siguiendo con la evaluación comparativa previa, se verifica que cada cultivo presenta una relación única entre su sistema tecnológico principal y su impacto en la huella hídrica. A pesar de que ciertas cosechas como la fresa, que se cultivan mediante sistemas tecnificados de riego localizado y administración controlada, suelen mostrar una eficiencia hídrica más alta, otras como el arándano pueden presentar en la HHA niveles de consumo y variabilidad más altos, especialmente en sistemas intensivos de sustrato y fertirrigación. Esta diversidad evidencia que la tecnología no es estática, sino que posee la capacidad de mejorar el uso del agua y aumentar su extracción, dependiendo de cómo se implemente y se regule.

Desde el punto de vista de la sustentabilidad fuerte, esta relación es crucial porque se entiende que el agua es un recurso natural no transferible. Su explotación excesiva puede amenazar la integridad de los ecosistemas y la equidad entre generaciones. En este marco, un aumento de la eficiencia del agua por unidad productiva no garantiza la sustentabilidad del sistema de manera independiente, especialmente en situaciones en que el crecimiento agrícola y la concentración territorial de cultivos generan una presión acumulativa sobre los recursos hídricos existentes. Por consiguiente, es esencial analizar la HHA conjuntamente con las prácticas tecnológicas, no únicamente desde una perspectiva de eficiencia, sino también desde cómo impacta en la gobernanza, la disponibilidad y la capacidad de recuperación del sistema socioambiental.

En consecuencia, el objetivo de esta sección es examinar la relación entre la huella hídrica azul y los métodos tecnológicos más comunes en la agricultura, utilizando un enfoque crítico que permita reconocer tanto los avances en eficiencia como las amenazas asociadas a la intensificación agroindustrial. De este modo, se aportará a una valoración más integral de la sustentabilidad hídrica en la zona.

La tabla revela que la relación entre el sistema tecnológico y la huella hídrica azul (HHA) en cultivos frutales no es uniforme, sino que surge de una compleja

interacción entre el manejo agronómico, la eficacia técnica y las condiciones del territorio.

En este contexto, el arándano se distingue como el cultivo con mayor riesgo hídrico relativo, atribuible a su dependencia de sistemas intensivos de riego y fertirrigación. Estos sistemas, en caso de una gestión inadecuada, tienen la capacidad de incrementar considerablemente el consumo de agua azul. Este comportamiento se alinea con investigaciones que indican que los cultivos en sustrato exhiben una demanda hídrica superior y demandan un control meticuloso para prevenir ineficiencias (Mekonnen & Hoekstra, 2011).

Por el contrario, la fresa exhibe una eficiencia hídrica superior, lo cual puede ser atribuido a la implementación generalizada de tecnologías como el riego por goteo y el acolchado plástico, que disminuyen las pérdidas por evaporación y optimizan la eficiencia en la utilización del agua. Este hallazgo se alinea con estudios que subrayan la eficacia de los sistemas de riego localizado en cultivos hortícolas de alta intensidad (Lovarelli et al., 2016).

El comportamiento de la frambuesa y la zarzamora se caracteriza por una disminución progresiva de la HHA, lo que sugiere procesos de aprendizaje tecnológico y la adopción de prácticas más eficaces, tales como el fertirriego sectorizado y el control del riego. No obstante, desde la perspectiva de la sustentabilidad fuerte, estos progresos no erradican completamente el riesgo hídrico, dado que la eficiencia relativa puede verse obstaculizada por la ampliación de la superficie cultivada y la creciente presión sobre los acuíferos.

Desde un punto de vista crítico, el gráfico evidencia que la eficiencia hídrica no debe ser interpretada de forma aislada, sino en relación con la disponibilidad del recurso y la capacidad de carga del territorio. Boulay et al. (2018) sostienen que la repercusión del consumo hídrico está condicionada por el contexto de escasez, por lo que un cultivo eficaz en términos relativos puede producir efectos considerables en regiones con estrés hídrico.

Tabla 4.2. Relación entre sistemas tecnológicos, huella hídrica azul y riesgo, bajo el enfoque de sustentabilidad fuerte, en cultivos de berries en el Bajío de Michoacán

Cultivo	Sistema productivo predominante	Implicaciones sobre la HHA	Eficiencia hídrica relativa	Riesgo bajo sustentabilidad fuerte
---------	---------------------------------	----------------------------	-----------------------------	------------------------------------

Arándano	Producción en sustratos ácidos con riego por goteo intensivo y fertirrigación continua	Elevada sensibilidad a las prácticas de manejo; incremento del consumo hídrico bajo esquemas no optimizados	Intermedia	Alto en escenarios de expansión sin regulación hídrica
Frambuesa	Sistemas con conducción en tutorado y fertirriego segmentado	Disminución gradual del consumo unitario de agua asociada a mejoras técnicas	Intermedia–alta	Moderado a alto dependiendo de la presión territorial
Fresa	Cultivo en camas elevadas con acolchado plástico y riego localizado	Consumo hídrico relativamente bajo debido a la eficiencia en la aplicación del agua	Alta	Bajo en condiciones de manejo controlado
Zarzamora	Sistema en espaldera con riego por goteo regulado	Tendencia decreciente en la huella hídrica por optimización del manejo	Intermedia–alta	Moderado

Fuente: Elaboración propia con base en literatura científica y resultados de cálculo de huella hídrica azul.

Estos hallazgos subrayan la imperiosa necesidad de integrar la huella hídrica azul con indicadores de presión y disponibilidad hídrica, junto con la integración de estrategias de gobernanza y regulación territorial, para una evaluación holística de la sustentabilidad del sistema agroindustrial de frutas.

4.2.1. Síntesis tecnológica comparativa

Interrelación entre las prácticas tecnológicas y el comportamiento de la Huella Hídrica Azul debido a la agricultura. La evidencia empírica sugiere que la reducción de la Huella Hídrica Azul en el Bajío Michoacano está inherentemente asociada con la tecnificación del riego y el incremento del rendimiento por área. Sin embargo, en el marco de un robusto paradigma de sustentabilidad, la eficiencia tecnológica no puede sustituir la demanda de restricciones ecológicas explícitas en la extracción de agua.

En consecuencia, la tecnología actúa como un mecanismo de eficiencia; sin embargo, no se manifiesta como una sustitución del capital natural. La ampliación indiscriminada del territorio puede anular los beneficios derivados de la tecnología. Es esencial establecer la productividad económica del agua como un parámetro para una

distribución eficiente del recurso hídrico.

Así, la correlación entre prácticas tecnológicas y HHA demuestra que la sustentabilidad del sistema productivo no se circunscribe exclusivamente al cultivo, sino que también está condicionada por el modelo tecnológico implementado, la escala territorial y la gobernanza hídrica a nivel regional.

4.2.2. Resultados de la Huella Hídrica Azul en Jacona, Michoacán

Dentro del marco metodológico implementado para el cálculo de la Huella Hídrica Azul (HHA), cuantificada en metros cúbicos por tonelada ($\text{m}^3 \cdot \text{ton}^{-1}$), los hallazgos derivados del municipio de Jacona, Michoacán, posibilitan la identificación de discrepancias estructurales notables en el consumo de agua azul entre los cultivos predominantes de frutas (arándano, frambuesa, fresa y zarzamora). Desde un enfoque técnico-hidrológico, la HHA simboliza el volumen de agua superficial y subterránea consumida durante el ciclo productivo y no reintegrada a la cuenca original, constituyéndose como un indicador esencial de la presión hídrica y la eficiencia productiva.

Inicialmente, los hallazgos demuestran que el cultivo de frambuesa exhibe los valores más altos de HHA durante los primeros años del periodo de estudio, superando los $500 \text{ m}^3 \cdot \text{ton}^{-1}$. Este comportamiento indica una dependencia incrementada del riego tecnificado y una mayor evapotranspiración azul vinculada a la gestión intensiva del cultivo. Sin embargo, se evidencia una tendencia decreciente progresivamente hacia los años más recientes, lo cual puede ser interpretado como consecuencia de mejoras en la eficiencia del riego por goteo, modificaciones en los calendarios fenológicos, tecnificación agrícola y un control más riguroso del fertirriego. Estos factores están en consonancia con los procesos de agricultura 4.0 y la modernización productiva de la región.

La zarzamora exhibe valores intermedios, evidenciando una disminución significativa a partir de la mitad del periodo evaluado. Esta reducción podría estar vinculada tanto con la estabilización de los rendimientos como con una mejora en la relación entre el consumo de agua azul y la productividad por hectárea. En contraposición, la fresa conserva valores relativamente estables y considerablemente menores, lo que sugiere un patrón de consumo hídrico más consistente y potencialmente una adaptación edafoclimática más efectiva al entorno agroecológico de Jacona. En última instancia, el arándano exhibe valores prácticamente nulos

durante el periodo analizado, lo cual puede atribuirse a su reducida representatividad productiva histórica en el municipio o a la falta de superficie documentada en años específicos.

Desde la perspectiva de la sustentabilidad ambiental, la disminución progresiva de la HHA en frambuesa y zarzamora representa un indicativo positivo en lo que respecta a la eficiencia en la utilización del recurso hídrico, especialmente en una región donde la presión sobre acuíferos y cuerpos superficiales ha incrementado como resultado de la expansión de la industria agroexportadora. En este contexto, valores inferiores de $\text{m}^3\cdot\text{ton}^{-1}$ implican una reducción relativa de la extracción de agua por unidad de producción, lo cual contribuye a la mitigación del estrés hídrico regional.

En el contexto económico, una disminución en la huella hídrica azul por tonelada producida puede resultar en una disminución de los costos energéticos vinculados al bombeo, una optimización de los insumos y una mejora en la competitividad internacional, particularmente teniendo en cuenta que los mercados de exportación están otorgando un creciente valor a los indicadores ambientales verificables. En consecuencia, la progresión evidenciada en la tabla no solo manifiesta una transición técnica, sino también una reconfiguración del paradigma agroindustrial hacia estructuras más eficaces y potencialmente más robustas.

Desde una perspectiva social, la eficiencia hídrica adquiere importancia en lo que respecta a la equidad en el acceso al agua, especialmente en regiones donde coexisten prácticas agrícolas intensivas y demandas domésticas. Por lo tanto, la reducción de la HHA puede ser conceptualizada como un avance hacia una administración más equilibrada del recurso, aunque esto debe ser evaluado en conjunto con indicadores de presión hídrica azul y disponibilidad efectiva en la cuenca.

Tabla 4.2.2. Huella hídrica azul (m^3/ton) por cultivo (arándano, frambuesa, fresa y zarzamora) en el municipio de Jacona, Michoacán (periodo analizado)

JACONA				
Resultado del Cálculo de la Huella Hídrica Azul (HHA)				
m^3/ton				
AÑO	ARANDANO	FRAMBUESA	FRESA	ZARZAMORA
2011	0.00	512.15	117.42	278.69
2012	0.00	504.39	88.64	274.47
2013	0.00	512.15	85.42	278.69



2014	0.00	493.19	83.89	258.79
2015	0.00	475.57	86.36	301.92
2016	0.00	423.54	84.45	292.41
2017	0.00	349.13	81.96	131.03
2018	0.00	399.16	84.53	130.84
2019	0.00	381.77	83.08	130.37
2020	0.00	256.08	87.00	140.70
2021	0.00	252.20	85.78	137.97
2022	0.00	252.20	90.28	137.97
2023	0.00	252.20	85.90	137.97

Fuente: Elaboración propia con base en datos de SIAP (2023) y CONAGUA (2022), mediante cálculos de huella hídrica azul realizados con CROPWAT 8.0.

La representación gráfica de la Huella Hídrica Azul (HHA) en Jacona facilita una exploración más detallada de la dinámica temporal asociada al consumo de agua azul por cultivo, integrando además modelos de regresión lineal que cuantifican la tendencia observada. En este contexto, la frambuesa exhibe una pendiente negativa significativamente pronunciada ($y = -26.285x + 53406$; $R^2 = 0.9063$), lo que sugiere una disminución sistemática y estadísticamente consistente de su huella hídrica azul a lo largo del periodo de estudio. El elevado coeficiente de determinación indica que la tendencia decreciente es de naturaleza estructural y no de carácter aleatorio.

Esta disminución podría ser atribuida a procesos de innovación tecnológica, implementación de sistemas de riego de alta eficiencia y optimizaciones en la gestión agronómica, así como a aumentos en el rendimiento que disminuyen el consumo hídrico por tonelada producida. Desde una perspectiva de sustentabilidad fuerte, esta tendencia favorece una desconexión parcial del crecimiento económico agroexportador del aumento proporcional en la extracción de agua azul.

Para la zarzamora ($y = -16.202x + 32881$; $R^2 = 0.6856$), se evidencia una tendencia decreciente, aunque con un grado de ajuste estadístico inferior. Esto sugiere una disminución significativa, aunque con fluctuaciones interanuales más pronunciadas. Esta variabilidad puede ser atribuible a factores climáticos, modificaciones en la superficie de cultivo o oscilaciones en el rendimiento.

En contraste, la fresa exhibe una pendiente negativa extremadamente baja ($y = -0.9707x + 2046$; $R^2 = 0.1727$), lo que señala una estabilidad relativa en el consumo de agua hídrica azul por tonelada. Esta perseverancia podría ser conceptualizada como una madurez tecnológica del sistema productivo, en la que las optimizaciones de

eficiencia han alcanzado un grado de estabilización.

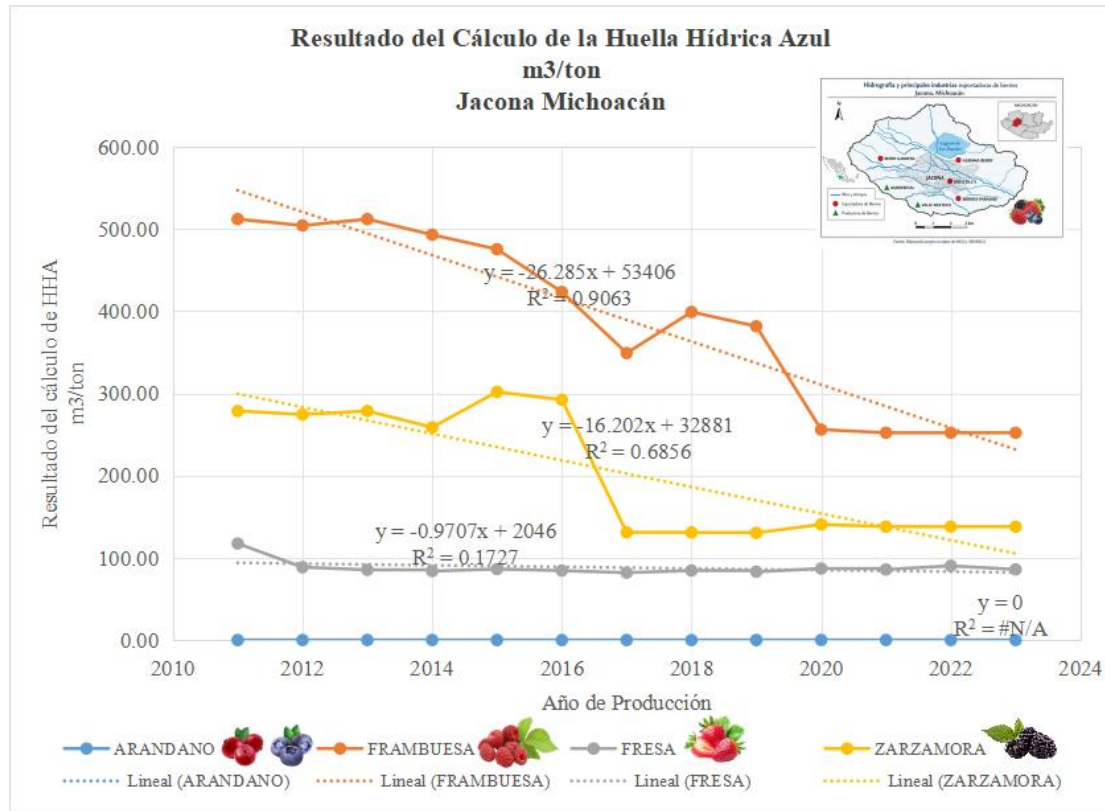
El arándano, que presenta valores nulos en la serie, corrobora su reducida incidencia histórica en la presión hídrica azul del municipio durante el período analizado. Sin embargo, su eventual expansión podría alterar dicha estructura.

Desde un enfoque holístico, la representación gráfica manifiesta un proceso de transición hacia una eficiencia hídrica incrementada en los cultivos predominantes destinados a la exportación. Esta conducta adquiere una relevancia particular en el ámbito regional del Bajío Michoacano, donde la proliferación de la agroindustria de frutas silvestres ha suscitado inquietudes en torno al agotamiento de los acuíferos y la competencia por el recurso hídrico.

Desde una perspectiva económica, la reducción continua de la HHA en frambuesa y zarzamora indica un incremento en la productividad hídrica (kg producidos por m³ de agua azul), lo cual robustece la competitividad a nivel internacional y optimiza la relación costo-beneficio del uso del agua. Desde una perspectiva ambiental, conlleva una disminución relativa en la presión ejercida sobre las fuentes superficiales y subterráneas. Desde una perspectiva social, ofrece la oportunidad de una administración más equitativa del recurso, siempre que se complemente con políticas apropiadas de gobernanza hídrica.

En resumen, los hallazgos gráficos corroboran que el municipio de Jacona se halla en una etapa de optimización en la eficiencia de la utilización del agua azul en la producción de frutas, a pesar de que persisten desafíos estructurales vinculados a la sustentabilidad a largo plazo, la gestión del recurso y la compatibilidad entre la expansión agroexportadora y la disponibilidad hídrica regional.

Figura 4.2.2. Huella hídrica azul (m³/ton) por cultivo (arándano, frambuesa, fresa y zarzamora) en el municipio de Jacona, Michoacán (2011–2023)



Fuente: Elaboración propia con base en datos de SIAP (2023) y CONAGUA (2022), mediante cálculos de huella hídrica azul realizados con CROPWAT 8.0.

La gráfica muestra que la huella hídrica azul (HHA) en Jacona disminuye en la mayoría de los cultivos, especialmente en frambuesa y zarzamora, sugiriendo una mejora en la eficiencia del uso del agua por prácticas tecnológicas optimizadas. Esta tendencia no es homogénea; la fresa tiene valores estables y bajos, siendo el cultivo más eficiente en agua, mientras que el arándano muestra valores nulos, lo que sugiere limitaciones en la disponibilidad o la calidad de los datos, más que una falta real de consumo.

Desde una perspectiva crítica, la reducción en la HHA no debe considerarse un avance en sustentabilidad, ya que puede deberse a aumentos en la productividad o a cambios en la estructura productiva, sin implicar una disminución en la extracción total de agua. El gráfico muestra una transición hacia sistemas más eficientes, pero enfrenta desafíos en presión hídrica y calidad de información, lo que resalta la necesidad de incluir indicadores de disponibilidad y gobernanza hídrica para una evaluación integral del sistema agroindustrial.

4.2.3. Huella Hídrica Azul en Zamora, Michoacán

Dentro del marco metodológico implementado para la estimación de la Huella Hídrica Azul (HHA), cuantificada en metros cúbicos por tonelada ($\text{m}^3 \cdot \text{ton}^{-1}$), los hallazgos obtenidos para el municipio de Zamora, Michoacán, posibilitan la identificación de patrones diferenciados de consumo de agua superficial y subterránea en los cultivos primordiales de frutas: arándano, frambuesa, fresa y zarzamora. La presión hídrica asociada a la agroindustria de exportación en el Bajío Michoacano, conocida como HHA, se define como el volumen de agua azul consumida y no reintegrada a la cuenca durante el ciclo productivo.

Inicialmente, la frambuesa exhibe los valores más altos de huella hídrica azul durante los primeros años del periodo examinado, alcanzando valores que superan los $500 \text{ m}^3 \cdot \text{ton}^{-1}$, e incluso documentando un máximo cercano a $576 \text{ m}^3 \cdot \text{ton}^{-1}$ en la etapa intermedia del periodo. Este comportamiento pone de manifiesto una intensa utilización de agua azul por unidad de producción, lo cual podría estar vinculado a una mayor demanda hídrica del cultivo, a estrategias de riego intensivo o a fluctuaciones en el rendimiento agrícola. Sin embargo, en años recientes se ha registrado una disminución significativa, aproximadamente de $250 \text{ m}^3 \cdot \text{ton}^{-1}$, lo que indica mejoras en la eficiencia del riego y en la productividad por hectárea.

En el contexto de la zarzamora, los valores iniciales se sitúan aproximadamente en $330 \text{ m}^3 \cdot \text{ton}^{-1}$, con una tendencia decreciente gradual que ha llegado a niveles cercanos a $150\text{-}170 \text{ m}^3 \cdot \text{ton}^{-1}$ en los años recientes. Esta reducción sugiere una mejora en la correlación entre el consumo hídrico azul y el rendimiento productivo, posiblemente derivado de la consolidación de los sistemas de riego por goteo, fertirriego y tecnificación agrícola que distinguen a la región.

En contraste, los valores de la fresa se mantienen relativamente estables, oscilando entre 80 y $90 \text{ m}^3 \cdot \text{ton}^{-1}$, lo que evidencia una intensidad relativa de consumo de agua azul por tonelada producida en comparación con la fresa y el arroz. Esta estabilidad puede ser conceptualizada como el producto de un sistema productivo maduro y alineado con las condiciones edafoclimáticas de Zamora, en el que la experiencia acumulada en la gestión agronómica ha facilitado la conservación de niveles constantes de eficiencia hídrica.

En última instancia, el arándano exhibe valores nulos durante el periodo examinado, lo que sugiere una superficie productiva insuficiente o inexistente en Zamora durante los años contemplados. En lo que respecta a la presión hídrica, esto sugiere que este cultivo no ha aportado de forma significativa a la extracción de agua

azul en el municipio durante el periodo de evaluación.

Desde la perspectiva de la sustentabilidad ambiental, la disminución detectada en frambuesa y zarzamora representa un indicativo positivo en lo que respecta a la eficiencia en la utilización del recurso hídrico, particularmente en un escenario regional donde la expansión de la agroindustria exportadora ha elevado la demanda de acuíferos locales. Desde una perspectiva económica, una reducción de la HHA por tonelada producida puede resultar en un incremento en la productividad hídrica, una disminución en los costos energéticos vinculados al bombeo y un fortalecimiento de la competitividad internacional, especialmente en el contexto de mercados que demandan trazabilidad ambiental y certificaciones de sustentabilidad. Desde una perspectiva social, una menor presión relativa sobre el recurso puede favorecer una administración más equilibrada entre las aplicaciones agrícolas y residenciales, siempre y cuando exista una gobernanza hídrica apropiada.

Tabla 4.2.3. Huella hídrica azul (m³/ton) por cultivo (arándano, frambuesa, fresa y zarzamora) en el municipio de Zamora, Michoacán (periodo analizado)

ZAMORA				
Resultado del Cálculo de la Huella Hídrica Azul (HHA)				
m3/ton				
AÑO	ARANDANO	FRAMBUESA	FRESA	ZARZAMORA
2011	0.00	512.15	117.42	329.36
2012	0.00	504.39	88.64	278.69
2013	0.00	504.39	85.42	283.05
2014	0.00	512.15	83.89	289.84
2015	0.00	485.99	84.65	268.37
2016	0.00	576.95	84.09	254.78
2017	0.00	529.67	82.46	173.85
2018	0.00	430.10	89.30	149.16
2019	0.00	318.56	83.39	148.06
2020	0.00	256.08	85.42	168.36
2021	0.00	251.25	84.82	171.62
2022	0.00	251.25	85.12	167.34
2023	0.00	251.25	85.54	159.74

Fuente: Elaboración propia con base en datos de SIAP (2023) y CONAGUA (2022), mediante cálculos de huella hídrica azul realizados con CROPWAT 8.0.

El estudio gráfico de la HHA en Zamora posibilita la evaluación de la dinámica temporal del consumo de agua azul por cultivo, integrando modelos de regresión lineal que cuantifican la tendencia observada. Para la frambuesa, la

pendiente negativa ($y = -27.987x + 58665$; $R^2 = 0.733$) pone de manifiesto una disminución sostenida de la huella hídrica azul a lo largo del periodo de estudio. Aunque el coeficiente de determinación señala una fluctuación interanual moderada, la tendencia declinante se alinea con procesos de modernización tecnológica y un incremento en el rendimiento productivo.

La zarzamora exhibe igualmente una pendiente negativa ($y = -15.005x + 30483$; $R^2 = 0.7954$), lo cual indica un proceso continuo de mejora en la eficiencia hídrica. El valor relativamente elevado de R^2 sugiere que la disminución es de carácter estructural y no meramente de naturaleza coyuntural. Esta conducta puede ser conceptualizada como indicativo de una transición hacia sistemas productivos más eficaces en la utilización del agua azul.

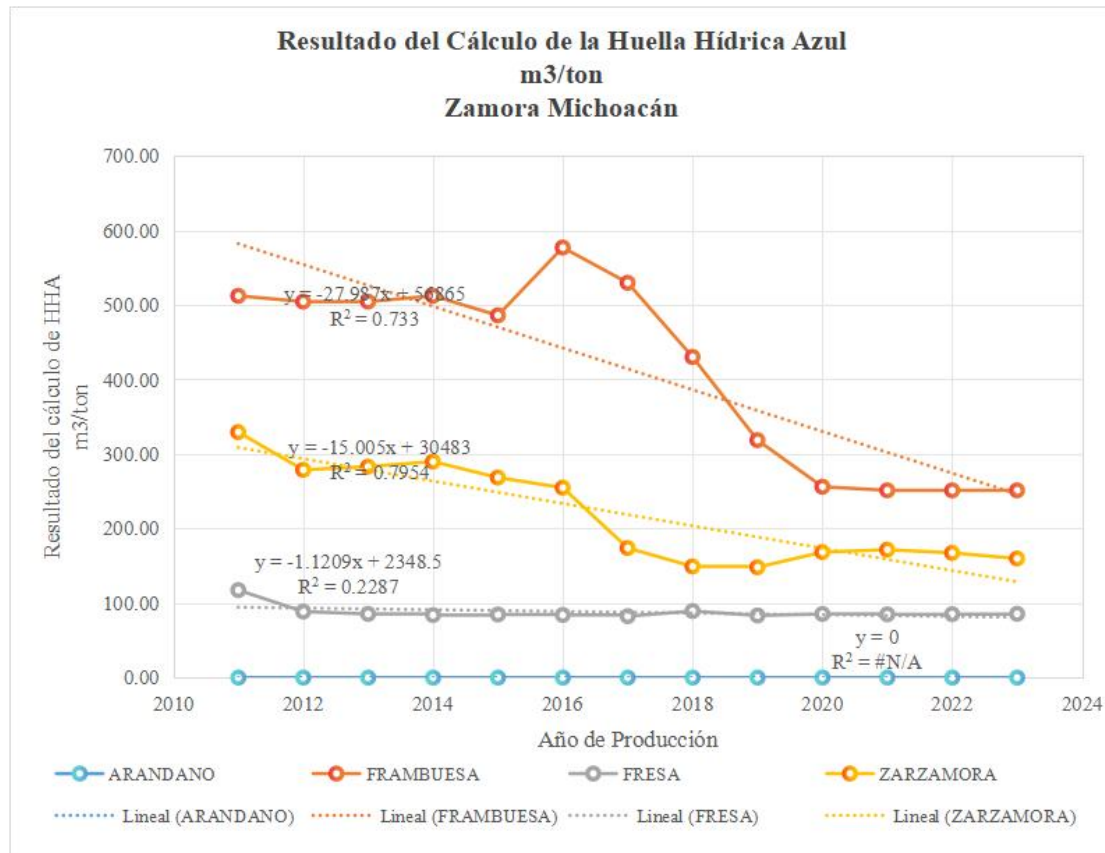
Contrariamente, la fresa exhibe una pendiente negativa extremadamente baja ($y = -1.1209x + 2348.5$; $R^2 = 0.2287$), lo que corrobora la estabilidad del consumo hídrico azul en este cultivo. Esta constancia podría estar vinculada a un balance entre las exigencias fisiológicas del cultivo y las prácticas de gestión establecidas en la región.

Desde un enfoque holístico, el declive general en los cultivos predominantes sugiere un proceso de desacoplamiento parcial entre la expansión agroexportadora y la extracción proporcional de agua azul. Sin embargo, esto no conlleva necesariamente una disminución total en la presión hídrica, dado que la ampliación de la superficie agrícola puede repercutir en las mejoras en eficiencia por tonelada producida.

Desde una perspectiva de sustentabilidad fuerte, los hallazgos señalan progresos hacia una productividad hídrica incrementada. No obstante, una evaluación holística demanda la consideración de indicadores complementarios como el Índice de Presión Hídrica Azul (IPHA), la disponibilidad efectiva en acuíferos y la interacción con otros usos del agua en la cuenca.

Desde una perspectiva económica, la disminución en metros cúbicos por tonelada incrementa la competitividad del sector exportador de frutas en Zamora, mientras que desde una perspectiva social, puede contribuir a la mitigación de conflictos potenciales relacionados con el acceso al recurso, siempre que exista una gestión institucional apropiada.

Figura 4.2.3. Huella hídrica azul (m^3/ton) por cultivo (arándano, frambuesa, fresa y zarzamora) en el municipio de Zamora, Michoacán (2011–2023)



Fuente: Elaboración propia con base en datos de SIAP (2023) y CONAGUA (2022), mediante cálculos de huella hídrica azul realizados con CROPWAT 8.0.

La gráfica muestra que la frambuesa tiene los niveles más altos de huella hídrica azul en Zamora, con una tendencia decreciente, lo que sugiere una mejora en la eficiencia hídrica. La zarzamora muestra una reducción, mientras que la fresa mantiene valores bajos y estables, consolidándose como el cultivo más eficiente en el uso de agua. El arándano muestra valores nulos, indicando limitaciones en la disponibilidad o calidad de los datos.

Los resultados reflejan una transición hacia una mayor eficiencia en el uso del agua, con diferencias entre cultivos. Esta mejora no implica una menor presión hídrica territorial; por lo que es necesario complementar el análisis con indicadores de disponibilidad y gestión del recurso para evaluar su sustentabilidad.

4.2.4. Huella hídrica azul en Los Reyes, Michoacán

Con base en la metodología implementada para la estimación de la Huella Hídrica Azul (HHA), cuantificada en metros cúbicos por tonelada ($\text{m}^3 \cdot \text{ton}^{-1}$), los

hallazgos obtenidos para el municipio de Los Reyes posibilitan la identificación de una estructura diferenciada en el consumo de agua azul entre los principales cultivos de frutas. La HHA, definida como el volumen de agua superficial y subterránea consumido a lo largo del ciclo productivo y no reintegrado a la cuenca de origen, representa un indicador esencial para la evaluación de la presión hídrica emanada de la agroindustria exportadora en la región del Bajío Michoacano.

Inicialmente, se resalta la conducta del cultivo de arándano, que registra valores significativamente altos en ciertos años del periodo examinado, alcanzando niveles que superan los $700 \text{ m}^3 \cdot \text{ton}^{-1}$. Este patrón pone de manifiesto una intensa utilización de agua azul por unidad de producción, lo cual puede atribuirse a las exigencias hídricas particulares del cultivo, a los sistemas de producción en sustrato con riego frecuente, o a las fluctuaciones en el rendimiento agrícola que elevan el consumo relativo por tonelada. No obstante, en años recientes se evidencia una disminución significativa, llegando incluso a años con valores inexistentes, lo que insinúa modificaciones en la superficie agrícola, ajustes productivos o reconfiguraciones en la estructura agrícola municipal.

En el caso de la frambuesa, los valores iniciales superan los $500 \text{ m}^3 \cdot \text{ton}^{-1}$, seguidos de una reducción notable hasta estabilizarse en intervalos cercanos a $290\text{-}300 \text{ m}^3 \cdot \text{ton}^{-1}$. Esta disminución puede ser conceptualizada como consecuencia de procedimientos de tecnificación, optimización del fertirriego y mejora en la productividad hídrica. Desde una perspectiva económica, una reducción en la HHA por tonelada producida conlleva un incremento en la eficiencia en la utilización del recurso, una potencial disminución en los costos energéticos vinculados al bombeo y un fortalecimiento de la competitividad en mercados internacionales que aprecian indicadores de rendimiento ambiental.

En el periodo evaluado, la zarzamora exhibe valores intermedios, con una tendencia decreciente que se sitúa aproximadamente entre $260 \text{ m}^3 \cdot \text{ton}^{-1}$ y $140 \text{ m}^3 \cdot \text{ton}^{-1}$. Esta conducta indica una mejora progresiva en la eficiencia hídrica del cultivo, un fenómeno que se alinea con la consolidación de los sistemas de riego por goteo en la región. En última instancia, la fresa exhibe valores nulos durante el periodo examinado, lo que sugiere una escasez de superficie productiva significativa en Los Reyes para este cultivo durante los años evaluados.

Desde la perspectiva ambiental, los hallazgos demuestran que la presión hídrica azul en Los Reyes se concentra predominantemente en los cultivos de

arándano y frambuesa, aunque se observa una tendencia general hacia la disminución en $\text{m}^3\cdot\text{ton}^{-1}$. Sin embargo, es crucial tener en cuenta que un incremento en la eficiencia relativa no necesariamente conlleva una disminución absoluta en la extracción de agua, especialmente si se produce una ampliación de la superficie cultivada. Dentro del contexto social, la reducción de la huella hídrica por tonelada puede contribuir a la mitigación de posibles conflictos derivados del uso del agua entre sectores productivos y comunidades locales, siempre que se combine con mecanismos eficaces de gobernanza hídrica.

Desde una perspectiva de sustentabilidad fuerte, estos hallazgos indican un proceso de transición hacia una productividad hídrica incrementada, a pesar de que persisten desafíos estructurales vinculados a la disponibilidad de acuíferos y al crecimiento del sector exportador.

Tabla 4.2.4. Huella hídrica azul (m^3/ton) por cultivo (arándano, frambuesa, fresa y zarzamora) en el municipio de Los Reyes, Michoacán (2011–2023)

LOS REYES				
Resultado del Cálculo de la Huella Hídrica Azul (HHA)				
m^3/ton				
AÑO	ARANDANO	FRAMBUESA	FRESA	ZARZAMORA
2011	0.00	512.15	0.00	265.42
2012	0.00	504.39	0.00	280.85
2013	0.00	512.15	0.00	360.86
2014	522.70	510.58	0.00	278.69
2015	768.68	516.12	0.00	283.05
2016	759.74	301.27	0.00	154.50
2017	706.35	300.59	0.00	139.45
2018	657.48	318.56	0.00	141.97
2019	568.15	295.91	0.00	133.64
2020	0.00	294.60	0.00	136.15
2021	0.00	293.95	0.00	128.25
2022	202.52	293.95	0.00	128.25
2023	198.52	293.95	0.00	143.20

Fuente: Elaboración propia con base en datos de SIAP (2023) y CONAGUA (2022), mediante cálculos de huella hídrica azul realizados con CROPWAT 8.0.

El análisis gráfico de la HHA en Los Reyes facilita un análisis más detallado de la dinámica temporal del consumo de agua azul por cultivo, integrando modelos de regresión lineal para cuantificar la tendencia detectada. Para el arándano, la serie exhibe una elevada fluctuación interanual, con picos notables en la etapa intermedia

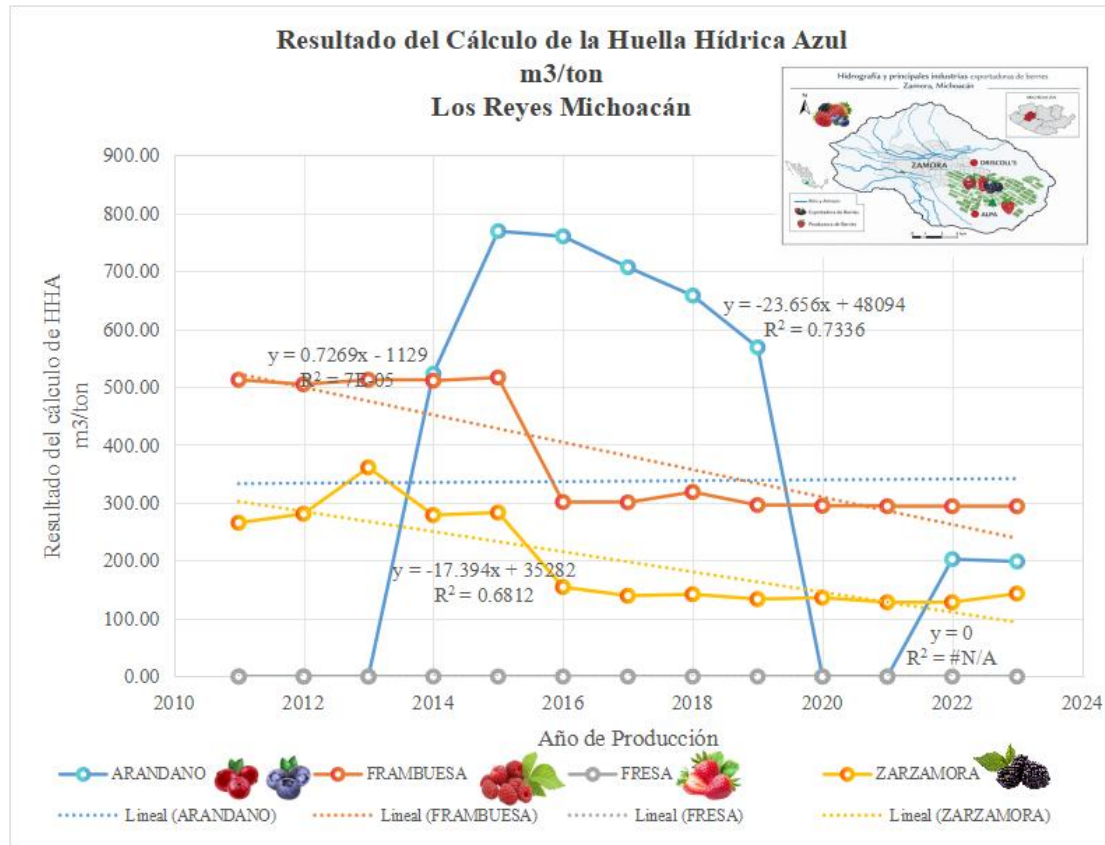
del periodo y una tendencia general decreciente (pendiente negativa). Esta conducta indica modificaciones estructurales en el proceso productivo, potencialmente asociadas a modificaciones en la superficie cultivada o optimizaciones en la eficiencia productiva.

La frambuesa exhibe una inclinación decreciente moderada, manifestada en una pendiente negativa que señala una disminución progresiva en $\text{m}^3 \cdot \text{ton}^{-1}$. A pesar de que el coeficiente de determinación exhibe una variabilidad interanual significativa, la dirección de la tendencia se alinea con procesos de modernización agrícola y optimización de la utilización del recurso hidrológico. Desde una perspectiva económica, esta reducción potencia la productividad hídrica y favorece la optimización de la correlación entre el consumo de agua y el valor de producción.

En contraste, la zarzamora manifiesta una tendencia adversa más evidente, con una disminución sostenida en el consumo de hídrico azul por tonelada producida. Esta conducta puede estar vinculada a la consolidación de sistemas de riego tecnificado y a una mayor estabilidad en los rendimientos agrícolas. La fresa, al no exhibir valores productivos durante el periodo analizado, no contribuye a la presión hídrica azul de la entidad municipal.

Desde un enfoque holístico de sustentabilidad, el descenso generalizado en los cultivos primordiales indica un proceso de optimización en la eficiencia hídrica relativa. No obstante, es imperativo que la interpretación se complemente con indicadores como el Índice de Presión Hídrica Azul (IPHA) y la disponibilidad efectiva de agua en la cuenca, dado que la sustentabilidad no se limita a la eficiencia por tonelada, sino que también se mide en función del volumen total de extracción y del equilibrio ecológico regional. Por lo tanto, si bien Los Reyes exhibe progresos en la productividad hídrica, es imperativo robustecer la administración del recurso y fomentar estrategias de gestión integrada que armonicen el crecimiento económico, la equidad social y la preservación ambiental.

Figura 4.2.4. Huella hídrica azul (m^3/ton) por cultivo (arándano, frambuesa, fresa y zarzamora) en el municipio de Los Reyes, Michoacán (2011–2023)



Fuente: Elaboración propia con base en datos de SIAP (2023) y CONAGUA (2022), mediante cálculos de huella hídrica azul realizados con CROPWAT 8.0.

La gráfica muestra que la huella hídrica azul (HHA) en Los Reyes es heterogénea entre cultivos. El arándano presenta la mayor variabilidad e intensidad hídrica, mientras que la frambuesa y la zarzamora muestran tendencias decrecientes que sugieren mejoras en la eficiencia del uso del agua. La fresa presenta valores nulos, indicando limitaciones en la disponibilidad de datos más que un comportamiento real del consumo hídrico.

Se observa una reducción del consumo de agua por unidad de producción, especialmente en la segunda mitad del periodo analizado, asociada a la tecnificación y optimización del riego. Esta mejora no es uniforme ni constante, ya que persisten fluctuaciones que reflejan factores productivos, climáticos y metodológicos.

La gráfica muestra que, aunque hay una tendencia hacia una mayor eficiencia hídrica, esto no asegura la sustentabilidad del sistema, por la posible expansión de cultivos de alta demanda de agua y las inconsistencias en la calidad de los datos. Los resultados subrayan la necesidad de complementar el análisis con indicadores de presión hídrica y gestión territorial para evaluar el impacto del sistema agroindustrial.

4.2.5. Huella hídrica azul en Tangancícuaro, Michoacán

En el contexto de la metodología implementada para la determinación de la Huella Hídrica Azul (HHA), cuantificada en metros cúbicos por tonelada ($\text{m}^3 \cdot \text{ton}^{-1}$), los hallazgos obtenidos para el municipio de Tangancícuaro evidencian una dinámica heterogénea en el consumo de agua azul entre los cultivos de arándano, frambuesa, fresa y zarzamora. La presión hídrica acumulada (HHA), determinada mediante el consumo hídrico azul acumulado (CWU(b) dividido entre el rendimiento agrícola (Y), representa un indicador esencial para la evaluación de la presión hídrica derivada de la agroindustria de exportación en esta región del Bajío Michoacano.

Inicialmente, el cultivo de arándano exhibe valores elevados durante varios años del periodo examinado, llegando a niveles que superan los $450 \text{ m}^3 \cdot \text{ton}^{-1}$. Sin embargo, también se registran años con valores nulos, lo cual indica fluctuaciones en la superficie cultivada o reconfiguraciones en la producción. Esta elevada fluctuación interanual sugiere que el arándano no ha aportado de manera constante a la presión hídrica municipal, sino que ha sido dependiente de factores estructurales tales como la expansión o la contracción del cultivo.

La frambuesa exhibe valores iniciales que exceden los $500 \text{ m}^3 \cdot \text{ton}^{-1}$, seguidos de una reducción y estabilización en intervalos cercanos a $210\text{-}250 \text{ m}^3 \cdot \text{ton}^{-1}$. Esta conducta indica una mejora progresiva en la eficiencia hídrica, potencialmente vinculada a la consolidación de sistemas de riego por goteo, modificaciones en los calendarios fenológicos y optimizaciones en los rendimientos por hectárea. Desde un punto de vista económico, esta reducción conlleva un incremento en la productividad hídrica, es decir, una reducción en el consumo de agua azul por tonelada producida, lo cual potencia la competitividad en mercados globales que aprecian indicadores de rendimiento ambiental.

En lo que respecta a la zarzamora, los valores evidencian una tendencia general descendente, transitando de niveles que exceden los $260 \text{ m}^3 \cdot \text{ton}^{-1}$ hacia los años finales del periodo evaluado. Esta conducta muestra una mejora en la relación entre el uso de agua azul y la producción, lo que ayuda a reducir en términos relativos la intensidad de extracción de agua subterránea y superficial. En última instancia, la fresa mantiene valores relativamente estables, entre 80 y $90 \text{ m}^3 \cdot \text{ton}^{-1}$, lo que demuestra un patrón de consumo de agua moderado y constante en comparación con otros cultivos.

Desde el punto de vista ambiental, la reducción que se ha visto en la

frambuesa y la zarzamora es un signo positivo en términos de eficiencia en el uso del agua. Sin embargo, es importante considerar que la sustentabilidad no solo depende de la eficiencia relativa ($\text{m}^3 \cdot \text{ton}^{-1}$), sino que también está condicionada por el volumen total extraído y la disponibilidad real en la cuenca. En el marco social, una disminución en la intensidad de uso del agua por tonelada puede ayudar a disminuir las tensiones entre el sector agrícola y otros usuarios de este recurso, siempre que la gobernanza hídrica sea eficiente.

Desde una perspectiva económica, el incremento en la productividad hídrica robustece la capacidad de resistencia del sector agroexportador local ante situaciones de escasez y regulaciones ambientales más rigurosas.

Tabla 4.2.5. Huella hídrica azul (m^3/ton) por cultivo (arándano, frambuesa, fresa y zarzamora) en el municipio de Tangancícuaro, Michoacán (2011–2023)

TANGANCÍCUARO				
Resultado del Cálculo de la Huella Hídrica Azul (HHA)				
m^3/ton				
AÑO	ARANDANO	FRAMBUESA	FRESA	ZARZAMORA
2011	0.00	221.93	154.68	246.87
2012	0.00	512.15	88.64	265.21
2013	475.18	221.93	85.42	186.15
2014	454.52	226.08	126.05	149.32
2015	450.60	218.30	79.63	122.72
2016	384.62	383.53	79.52	132.24
2017	380.98	211.03	83.39	186.38
2018	433.78	217.30	83.31	133.42
2019	434.14	221.20	83.98	128.11
2020	0.00	246.59	85.42	143.08
2021	0.00	242.11	84.42	137.94
2022	253.74	242.11	83.31	141.96
2023	248.79	242.11	82.73	142.33

Fuente: Elaboración propia con base en datos de SIAP (2023) y CONAGUA (2022), mediante cálculos de huella hídrica azul realizados con CROPWAT 8.0.

La tabla de huella hídrica azul (HHA) de Tangancícuaro muestra diferencias en el uso del agua entre cultivos y una tendencia a la reducción y estabilización del consumo hídrico en años recientes. El arándano y la frambuesa tienen los valores más altos y variables, indicando mayor demanda de agua azul y sensibilidad al manejo y la productividad. La fresa muestra valores bajos y es el cultivo más eficiente en agua. Por otro lado, la zarzamora presenta niveles intermedios que tienden a disminuir, lo

que indica una mejora en el uso del recurso.

Los valores de HHA tienden a converger hacia rangos más estables desde la segunda parte del período de análisis; esto está relacionado con la adopción de tecnologías eficientes para el riego y una mayor uniformidad en las prácticas productivas. En la interpretación debe tenerse en cuenta que en ciertos años el arándano presenta valores nulos, lo cual señala que los datos tienen limitaciones en cuanto a su calidad o disponibilidad.

Los hallazgos señalan que, pese a que se observa un aumento de la eficiencia hídrica por unidad productiva, esto no asegura la sustentabilidad del sistema, debido a que la presión sobre los recursos hídricos puede persistir o intensificarse con el crecimiento de la producción. La tabla revela que es preciso añadir a la evaluación del impacto agroindustrial un análisis de la HHA junto con indicadores de gobernanza y disponibilidad del agua.

El estudio gráfico de la HHA en Tangancícuaro posibilita la evaluación del comportamiento a lo largo del tiempo del uso de agua azul por cultivo, utilizando modelos de regresión lineal que miden el sentido y el tamaño de las tendencias detectadas. La serie del arándano muestra una gran variabilidad entre años, con picos importantes y períodos sin producción informada. La tendencia general negativa de la pendiente indica que la intensidad del agua ha disminuido durante el período, pero, debido a que el coeficiente de determinación es bajo, esto muestra que no es totalmente lineal y está sujeta a variaciones estructurales en la producción.

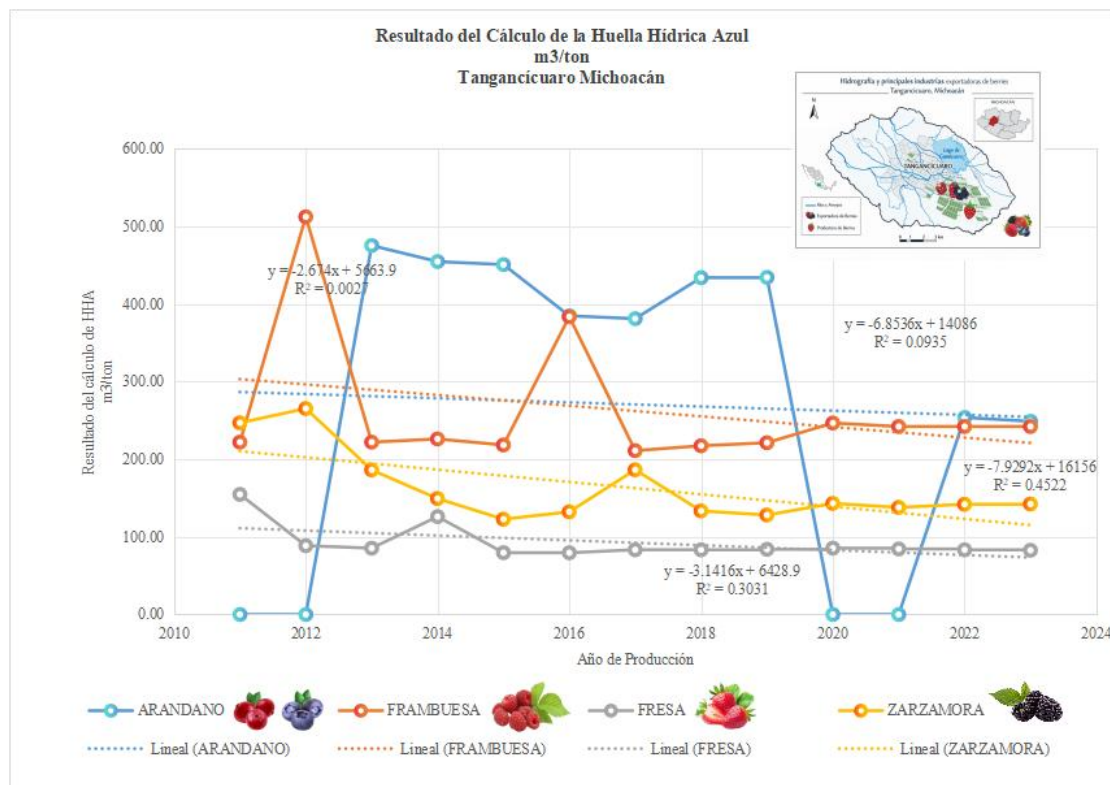
La frambuesa presenta una ligera tendencia a la baja, con una disminución gradual en $\text{m}^3 \cdot \text{ton}^{-1}$. Esta conducta puede estar relacionada con la optimización de la eficiencia del riego, el aumento de las producciones o cambios tecnológicos que se han puesto en práctica en el municipio. La zarzamora, en cambio, muestra una tendencia decreciente más evidente, lo que corrobora un proceso de optimización mantenido a lo largo del tiempo en la relación entre el consumo de agua y la producción.

Por otro lado, la fresa conserva una trayectoria más o menos estable, aunque con una ligera tendencia a la baja. Este patrón indica que existe un sistema de producción sólido con demandas de agua constantes y predecibles a lo largo del tiempo.

Desde el punto de vista de la sustentabilidad integral, las tendencias vistas en Tangancícuaro señalan progresos en la productividad hídrica relativa; no obstante, es

preciso añadir a la interpretación otros indicadores como el Índice de Presión Hídrica Azul (IPHA), la capacidad acuífera local y el aumento de la superficie cultivada. Por lo tanto, a pesar de que se detectan progresos en términos de eficiencia, la sustentabilidad a largo plazo estará condicionada por la coordinación entre la gobernanza del agua, la eficiencia tecnológica y el planeamiento territorial enfocado en equilibrar aspectos sociales y económicos con los ecológicos.

Figura 4.2.5. Huella hídrica azul (m^3/ton) por cultivo (arándano, frambuesa, fresa y zarzamora) en el municipio de Tangancícuaro, Michoacán (2011–2023)



Fuente: Elaboración propia con base en datos de SIAP (2023) y CONAGUA (2022), mediante cálculos de huella hídrica azul realizados con CROPWAT 8.0.

La gráfica revela que la huella hídrica azul en Tangancícuaro se reduce en cultivos de frambuesa y zarzamora, lo que indica progresos en el uso eficiente del agua debido a la tecnificación agrícola. La fresa se ha consolidado como el cultivo con mayor eficiencia de agua, ya que presenta niveles estables y bajos. En cambio, el arándano exhibe una gran variabilidad e inconsistencias.

Desde la perspectiva de la sustentabilidad fuerte, es necesario interpretar estos resultados con precaución, porque una reducción de la HHA por unidad de producción no significa que haya disminuido la presión total sobre los recursos

hídricos. Una expansión productiva que intensifique la extracción de agua puede suceder junto con la eficiencia técnica. La imagen muestra un avance en la eficiencia hídrica; sin embargo, la explotación excesiva y el manejo desigual del recurso siguen siendo riesgos. Para garantizar la sustentabilidad del sistema agroindustrial, es imprescindible combinar estos estudios con los indicadores de gobernanza, regulación y disponibilidad del agua.

La variabilidad entre municipios que se ha observado en la Huella Hídrica Azul (HHA) de las plantaciones frutales en el Bajío Michoacano no se puede explicar únicamente por factores como el clima o el suelo, sino que está vinculada intrínsecamente con la intensidad de la gestión agronómica, el grado de tecnificación del campo y la estructura productiva predominante en cada jurisdicción.

Desde un enfoque de sustentabilidad fuerte, el capital natural hídrico representa un límite biofísico que no puede ser completamente reemplazado por la innovación tecnológica. No obstante, una tecnificación apropiada puede potenciar la eficiencia relativa y disminuir la intensidad de extracción por unidad producida.

Dentro de este marco, el análisis municipal facilita la identificación de patrones diferenciados de adopción tecnológica, los cuales elucidan las trayectorias de reducción o estabilidad en la Hepatitis B (HHA).

Para evaluar geográficamente la huella hídrica azul (HHA) en el Bajío de Michoacán, no solo se requiere información cuantitativa sobre el uso del agua, sino también sobre las condiciones tecnológicas que determinan la producción agrícola en cada jurisdicción municipal. En este escenario, la tecnificación de los sistemas de riego, cultivo y gestión agronómica son variables esenciales para comprender las fluctuaciones en la eficiencia hídrica y sus efectos desde el punto de vista de la sustentabilidad fuerte. La tabla subsiguiente condensa dichas relaciones, facilitando la identificación de patrones diferenciados entre municipios y sus potenciales repercusiones sobre la presión de los recursos hídricos.

Tabla 4.2.6. Dinámica de la tecnificación, comportamiento de la huella hídrica azul e implicaciones bajo el enfoque de sustentabilidad fuerte en municipios productores de berries del Bajío de Michoacán

Municipio	Intensidad tecnológica predominante	Dinámica de la HHA	Eficiencia hídrica relativa	Implicaciones bajo sustentabilidad
-----------	-------------------------------------	--------------------	-----------------------------	------------------------------------

				fuerte
Jacona	Sistemas altamente tecnificados con riego presurizado, fertirriego y uso extendido de acolchados	Tendencia estable con ligera reducción	Elevaa	Consolidación de la eficiencia, aunque con riesgo por el incremento del volumen total extraído
Zamora	Tecnificación intermedia-alta con conducción en tutorado y distribución hidráulica sectorizada	Disminución progresiva	Media–alta	La expansión productiva puede contrarrestar los beneficios de eficiencia
Los Reyes	Configuración tecnológica heterogénea, con uso de sustratos y riego intensivo	Alta variabilidad interanual	Media	Alta dependencia del manejo técnico; vulnerable a prácticas ineficientes
Tangancícuaro	Sistemas semi-tecnificados con espaldera y riego por goteo regulado	Reducción gradual	Media	Proceso de convergencia tecnológica; requiere seguimiento y control continuo

Fuente: Elaboración propia con base en datos de huella hídrica azul y caracterización tecnológica regional.0.

La tabla revela que la relación entre la tecnificación agrícola y la huella hídrica azul no es lineal ni uniforme, sino que depende de cómo se implementen y gestionen las tecnologías en cada región. Si bien localidades como Zamora y Jacona muestran avances en la eficiencia hídrica, estos pueden verse contrarrestados por procesos de aumento de producción que incrementan la presión general sobre los recursos hídricos existentes. Tangancícuaro y Los Reyes son ejemplos de situaciones de cambio tecnológico, donde la calidad de la gestión agronómica todavía tiene un gran impacto en la eficiencia.

Desde el punto de vista de la sustentabilidad fuerte, estos resultados demuestran que la eficiencia técnica no garantiza por sí sola la sustentabilidad del sistema, ya que el agua es un recurso natural inalienable. Por ende, es crucial

fortalecer la tecnificación mediante sistemas de regulación y gobernanza hídrica que aseguren una relación equilibrada relación entre la conservación del recurso y la productividad a largo plazo.

- La evidencia sugiere que la Huella Hídrica Azul no está exclusivamente vinculada al cultivo, sino que depende del modelo tecnológico que se ha adoptado a nivel territorial. Los municipios con un alto grado de tecnificación exhiben disminuciones relativas en la HHA; no obstante, bajo el paradigma de una fuerte sustentabilidad, la tecnología no reemplaza los límites ecológicos.

Por lo tanto:

- La optimización tecnológica incrementa la productividad en el sector hídrico, sin embargo, no erradica la presión absoluta.
- La expansión territorial no planificada tiene el potencial de neutralizar los progresos en el ámbito de la tecnificación.
- El análisis econométrico debe incorporar la gobernanza hídrica municipal como variable institucional.

En consecuencia, la sustentabilidad del sistema agroexportador regional estará condicionada por la integración entre la innovación tecnológica, la planificación territorial y la regulación hídrica fundamentada en evidencia científica.

Para finalizar este capítulo, la comparación de la síntesis de la huella hídrica azul (HHA) por cultivo en el Bajío Michoacano revela una estructura diferenciada en la demanda hídrica, en la que coexisten sistemas de alta demanda y otros de mayor eficiencia. Esto demuestra una heterogeneidad productiva que supera los límites técnicos e integra dinámicas territoriales, económicas y ambientales de mayor alcance. Generalmente, los cultivos de arándano y frambuesa exhiben las intensidades hídricas más elevadas, mientras que la fresa y la zarzamora exhiben niveles más moderados o bajos, lo que indica discrepancias significativas en la relación agua-productividad.

El arándano, con valores de presión hídrica relativa que varían entre 400 y 750 $\text{m}^3 \cdot \text{ton}^{-1}$, se distingue como el cultivo con mayor concentración de agua. Aunque su tendencia a la baja podría ser interpretada como una mejora en la eficiencia, la alta variabilidad detectada indica que este cultivo es especialmente sensible a las condiciones de gestión y a los sistemas tecnológicos implementados. Desde una perspectiva crítica, esta característica revela una dependencia estructural de insumos

hídricos intensivos, sobre todo en los sistemas de producción con sustrato. Esto aumenta su vulnerabilidad en circunstancias de escasez. Según la literatura académica, los cultivos con una huella hídrica alta en zonas de estrés hídrico pueden incrementar la sobreexplotación de acuíferos si no se les controla correctamente (Mekonnen & Hoekstra, 2011).

Además, aunque la frambuesa tiene una alta intensidad hídrica, muestra una tendencia más clara a disminuir y una menor variabilidad. Esta conducta señala un cambio hacia prácticas más efectivas; sin embargo, desde el punto de vista de la sustentabilidad fuerte, es fundamental cuestionar si este aumento en la eficiencia por unidad de producto se refleja en una reducción significativa de la presión hídrica total.

En numerosos escenarios, la intensificación de la producción y la ampliación del área cultivada pueden compensar las mejoras en eficiencia, originando lo que se ha denominado una paradoja de la eficiencia hídrica (Boulay et al., 2018).

Por otro lado, la fresa se distingue como el cultivo con una intensidad hídrica más reducida ($80\text{-}90\text{ m}^3\cdot\text{ton}^{-1}$) y una tendencia estable, lo que la sitúa como el sistema más eficaz en términos volumétricos. Este rendimiento puede atribuirse a la implementación generalizada de tecnologías como el riego por goteo y el acolchado plástico, las cuales optimizan la utilización del agua y disminuyen las pérdidas. No obstante, es importante subrayar que una huella hídrica relativa pequeña no garantiza de manera automática la sustentabilidad, ya que el impacto ambiental también depende del contexto hidrológico a nivel local y del tamaño de la producción (Lovarelli et al., 2016).

La zarzamora, que tiene valores entre 130 y $300\text{ m}^3\cdot\text{ton}^{-1}$, muestra una tendencia a la baja y un acercamiento gradual hacia niveles más altos de eficiencia. Una conducta como esta señala un proceso de maduración tecnológica, en el que la puesta en marcha de sistemas de riego más regulados y prácticas agronómicas mejoradas ha ayudado a optimizar la eficiencia del agua. Sin embargo, al igual que en otros campos de cultivo, este avance debe analizarse tomando en cuenta la expansión del sistema productivo y su impacto acumulativo sobre los recursos de agua.

La tabla muestra, desde una perspectiva holística, que la eficiencia hídrica en el sector frutal del Bajío Michoacano no es un fenómeno uniforme; más bien, es el resultado de una compleja interrelación entre la gestión agronómica, la tecnología y las condiciones geológicas. Estos resultados, desde el punto de vista de la

sustentabilidad fuerte, muestran que no se puede considerar al agua solamente como un recurso productivo, sino como un capital natural limitado cuya explotación excesiva pone en peligro la resiliencia de los ecosistemas y la equidad entre generaciones.

En resumen, los datos analizados señalan que, a pesar de que se han alcanzado avances en la eficiencia del agua en ciertos cultivos, estos no son suficientes para garantizar la sustentabilidad del sistema completo. Por consiguiente, se torna esencial complementar la evaluación de la HHA con indicadores de presión hídrica, disponibilidad de recursos y gobernanza, además de implementar políticas diferenciadas por cultivo que faciliten un equilibrio entre la productividad agrícola y la preservación del agua a largo plazo.

Tabla 4.2.7. Síntesis comparativa de la Huella Hídrica Azul y desempeño relativo por cultivo en el Bajío michoacano.

Cultivo	Intensidad de uso de agua ($\text{m}^3 \cdot \text{ton}^{-1}$)	Comportamiento temporal de la HHA	Nivel de eficiencia en el uso del agua	Implicaciones desde la sustentabilidad fuerte	Categoría de riesgo hídrico
Arándano	Elevada ($\approx 400-750$)	Descenso con alta fluctuación	Baja a intermedia	Alta presión sobre acuíferos; requiere control de la expansión y optimización tecnológica	Alto
Frambuesa	Alta ($\approx 300-580$)	Tendencia decreciente	Intermedia	Requiere desvincular el crecimiento productivo del incremento en la extracción de agua	Medio-alto
Fresa	Baja ($\approx 80-90$)	Estabilidad en el tiempo	Alta	Representa un sistema más eficiente; menor presión relativa sobre el recurso hídrico	Bajo

Zarzamora	Intermedia (≈130–300)	Disminución progresiva	Intermedia a alta	Evidencia procesos de ajuste tecnológico y mejora en la gestión del riego	Medio
-----------	--------------------------	---------------------------	-------------------	---	-------

Fuente: Elaboración propia con base en los resultados de Huella Hídrica Azul estimados para el periodo 2011–2023 en el Bajío de Michoacán, con base en resultados de huella hídrica azul calculados mediante CROPWAT 8.0 y datos de SIAP (2023) y CONAGUA (2022).

Con base en el análisis realizado, se deduce que la estructura hídrica del sistema de producción de frutas en el Bajío Michoacano exhibe una diferenciación notable entre los cultivos, tanto en lo que respecta a la intensidad hídrica relativa como en su potencial para generar valor económico por unidad de agua consumida. El arándano y la frambuesa manifiestan los niveles más elevados de consumo hídrico por tonelada producida, lo que intensifica su susceptibilidad a situaciones de limitación hídrica y regulación ambiental más rigurosa. Por otro lado, la fresa emerge como el cultivo con el rendimiento volumétrico más destacado, mientras que la zarzamora exhibe una trayectoria de mejora progresiva hacia niveles intermedios de eficiencia.

Sin embargo, desde la perspectiva de una fuerte sustentabilidad, la disminución relativa en la HHA no representa de manera aislada una garantía de sustentabilidad territorial. La ampliación de la superficie agrícola, la concentración geográfica de la producción y la presión acumulada sobre los acuíferos regionales pueden neutralizar los progresos tecnológicos en términos de eficiencia. Por consiguiente, la evaluación holística debe tener en cuenta tanto la eficiencia relativa como el volumen absoluto de extracción y la capacidad de recarga del sistema hidrológico.

La integración del indicador de productividad económica del agua potencia el examen econométrico al facilitar la cuantificación del valor producido por metro cúbico consumido, estableciendo una correlación directa entre la competitividad exportadora y la eficiencia ambiental. Esta perspectiva favorece la formulación de políticas públicas dirigidas a la maximización del valor económico del agua dentro de restricciones ecológicas rigurosas, fomentando de este modo un modelo agroindustrial que sea resiliente, competitivo y ambientalmente responsable.

Por lo tanto, el sistema regional de berries exhibe progresos notables en términos de eficiencia hídrica relativa; no obstante, su viabilidad a largo plazo estará condicionada por la consolidación de una gobernanza hídrica fundamentada en evidencia científica, por incentivos económicos diferenciados y por estrategias de planificación territorial que estén en consonancia con los principios de la sustentabilidad fuerte.

CAPÍTULO V

Impactos de la huella hídrica azul en la disponibilidad del agua

“La tecnología inalámbrica proporcionará un contacto más próximo mediante la transmisión de información, el traslado de nuestros cuerpos y de materiales y el transporte de energía”

-Nikola Tesla-

La huella hídrica azul (HHA) se ha establecido como uno de los indicadores primordiales para cuantificar la presión ejercida sobre los recursos hídricos en zonas caracterizadas por prácticas de agricultura intensiva y modelos agroexportadores. En el Bajío michoacano, la expansión acelerada de cultivos de alto valor comercial, específicamente berries, aguacate y hortalizas destinadas a la exportación, ha acelerado considerablemente la extracción de agua subterránea. Este fenómeno ha generado repercusiones ambientales, sociales y económicas vinculadas a la disponibilidad del recurso hídrico. Esta circunstancia adquiere particular importancia dado que la región representa uno de los corredores agroindustriales más significativos de México dirigidos hacia el mercado internacional (Hoekstra et al., 2011; CONAGUA, 2024).

La proliferación de la agroindustria exportadora ha generado una transformación significativa en las dinámicas territoriales y productivas del estado de Michoacán. En el marco de esta situación, la intensificación de la agricultura ha intensificado la dependencia del agua azul derivada de acuíferos subterráneos, especialmente en municipios como Zamora, Tangancícuaro, Los Reyes y Peribán. Diversas entidades internacionales indican que la agricultura constituye aproximadamente el 70 % del consumo global de agua dulce, circunstancia que se intensifica en regiones con estrés hídrico estructural y una capacidad de recarga natural de acuíferos limitada (FAO, 2023; UNESCO, 2024).

Desde un enfoque de sustentabilidad robusta, el agua se erige como un recurso natural esencial e irremplazable, esencial para la estabilidad ecológica, productiva y social de los territorios. Por lo tanto, la explotación excesiva de acuíferos no puede ser únicamente conceptualizada como una cuestión técnica, sino como un proceso de degradación socioambiental que pone en riesgo la viabilidad futura del desarrollo regional. Bajo esta perspectiva, la huella hídrica azul facilita la identificación de

incongruencias entre el crecimiento económico, la expansión agroindustrial y los límites ecológicos territoriales (Neumayer, 2013; Leff, 2014).

5.1 Diagnóstico de la disponibilidad hídrica y estrés sobre los acuíferos en el Bajío de Michoacán

5.1.1 Transformación agroexportadora y aumento de la demanda de agua subterránea

En el presente contexto, la región del Bajío Michoacano se encuentra ante un incremento en la presión hídrica, resultado de la proliferación de cultivos agroindustriales orientados hacia la exportación. La expansión en la superficie dedicada al cultivo de frutas, aguacate y vegetales ha propiciado una mayor extracción de agua subterránea a través de sistemas de riego intensivo y pozos profundos. Esta dinámica productiva ha alterado significativamente los equilibrios hidrológicos a nivel regional, intensificando la susceptibilidad de los acuíferos estratégicos del estado (CONAGUA, 2024; Rosa et al., 2022)

Numerosos estudios contemporáneos ponen de manifiesto que el paradigma agroexportador ha intensificado la presión sobre los sistemas acuíferos, atribuible a la demanda global de bienes agrícolas de alto valor comercial. Municipios como Zamora y Los Reyes exhiben elevados índices de extracción hídrica vinculados a la agricultura tecnificada, especialmente en cultivos que requieren una elevada dependencia del riego. Dentro de este marco, el crecimiento económico a nivel regional está intrínsecamente asociado con una mayor utilización de agua subterránea, circunstancia que pone en riesgo la sostenibilidad ecológica del territorio (Gleeson et al., 2012; Mekonnen et al., 2021).

Además, el avance agrícola ha propiciado una reconfiguración territorial que se distingue por la concentración de infraestructura hidráulica y el acceso diferenciado al recurso hídrico. Los productores agroexportadores de gran envergadura poseen una mayor capacidad de extracción, almacenamiento y tecnificación, mientras que los agricultores de pequeña escala y las comunidades rurales experimentan crecientes limitaciones en la disponibilidad de agua. Esta circunstancia pone de manifiesto profundas disparidades territoriales vinculadas a la distribución y gestión del recurso hídrico (Boelens et al., 2023; Zwarteveen et al., 2021)

5.1.2 Evaluación del estrés hídrico regional mediante estudios de caso

La valoración de la disponibilidad hídrica a nivel regional demanda la incorporación de indicadores que faciliten el análisis simultáneo de la extracción, la

recarga y la presión sobre los acuíferos. Numerous studies conducted in Bajío Michoacano have employed indicators such as el Water Stress Index (WSI) y los balances de extracción-recharge to determine the degree of territorial vulnerability to floods. Cuando la extracción sobrepasa de manera sistemática la recarga natural, se establece un escenario de sobreexplotación estructural que resulta incompatible con la sostenibilidad a largo plazo (Boulay et al., 2021; Hoekstra et al.).

La Comisión Nacional del Agua ha realizado análisis territoriales que demuestran que diversos acuíferos de la región exhiben balances negativos persistentes, especialmente en áreas asociadas con la agroindustria exportadora. Este fenómeno guarda una correlación directa con la expansión de sistemas agrícolas intensivos bajo riego tecnificado, en los cuales el consumo de agua azul supera progresivamente la capacidad natural de regeneración del recurso (CONAGUA, 2014).

La evidencia científica sugiere que la agricultura intensiva se erige como uno de los factores primordiales que ejercen presión sobre los acuíferos en zonas semiáridas y subhúmedas. Dentro de este marco, el Bajío Michoacano manifiesta dinámicas análogas a otras regiones agroexportadoras de América Latina, donde la expansión agrícola ha resultado en la reducción de los niveles freáticos, la degradación de los ecosistemas hidrológicos y disputas por el acceso al agua (Famiglietti, 2014; Rosa et al., 2022).

Tabla 5.1
Condición hidrológica de los acuíferos en municipios estratégicos del Bajío michoacano.

Municipio	Sistema acuífero asociado	Condición de aprovechamiento	Extracción anual estimada (hm ³)	Recarga media anual (hm ³)	Balance hídrico (hm ³)
Zamora	Valle de Zamora	Sobreexplotación crítica	210	150	-60
Tangancícuaro	Acuífero Tangancicuaro	Condición de presión	95	100	5
Los Reyes	Sistema acuífero Los Reyes	Sobreexplotación	180	130	-50
Jiquilpan	Acuífero Jiquilpan	Vulnerabilidad moderada	85	90	5
Sahuayo	Sistema acuífero Sahuayo	Sobreexplotación	150	110	-40

Fuente: Elaboración propia con base en datos de Comisión Nacional del Agua (2024) y reportes técnicos de disponibilidad de agua subterránea.

La tabla evidencia que municipios como Zamora, Los Reyes y Sahuayo presentan balances hídricos negativos persistentes, lo cual indica procesos de sobreexplotación estructural asociados con la agricultura intensiva. Estos resultados muestran que la extracción anual supera sostenidamente la capacidad de recarga natural de los acuíferos, comprometiendo la disponibilidad futura del recurso hídrico y aumentando la vulnerabilidad climática regional (Gleeson et al., 2012; UNESCO, 2024).

5.2 Impacto de la huella hídrica azul sobre la calidad del agua y los sistemas de riego agrícola

5.2.1 Contaminación hídrica asociada al uso intensivo de fertilizantes y agroquímicos

La huella hídrica azul no solo simboliza las cantidades de extracción de agua, sino también las repercusiones vinculadas con la calidad del recurso hídrico. En sistemas agrícolas de alta intensidad, la utilización desmedida de fertilizantes nitrogenados y agroquímicos propicia procesos de lixiviación que impactan negativamente en acuíferos y cuerpos de agua superficiales. Numerosos estudios realizados en Michoacán han detectado concentraciones significativas de nitratos en regiones agrícolas asociadas con la producción intensiva de frutas y aguacate (FAO, 2022; Mekonnen et al., 2021).

Las comparaciones entre los sistemas de riego convencional y tecnificado revelan diferencias significativas en cuanto a la contaminación y la eficiencia hídrica. Los sistemas de microgoteo y fertirriego controlado exhiben pérdidas de nutrientes inferiores en comparación con el riego por gravedad tradicional. No obstante, si bien dichas tecnologías optimizan la eficiencia parcelaria, no necesariamente disminuyen la presión total sobre los acuíferos, atribuible a la ampliación de las superficies cultivadas y al aumento de la producción agrícola (Grafton et al., 2018; Perry et al., 2021)

Las investigaciones contemporáneas llevadas a cabo en la región del Bajío indican que los cultivos agroexportadores que emplean riego intensivo presentan huellas hídricas notablemente más altas que el promedio nacional. En entidades municipales dedicadas a la producción de aguacate y frutas, la combinación de extracción desmedida y contaminación agrícola origina una doble problemática: reducción de la disponibilidad hídrica y deterioro progresivo de la calidad del agua subterránea (Fuerte-Velázquez & Gómez-Tagle, 2024; Gómez-Tagle et al., 2022)

Tabla 5.2

Comparación entre sistemas de riego y efectos sobre la calidad del agua

Tipo de riego	Nivel de eficiencia hídrica	Riesgo de lixiviación	Impacto sobre acuíferos	Nivel de tecnificación
Riego por gravedad	Bajo	Alto	Alta contaminación	Bajo
Microgoteo	Alto	Medio	Menor presión hídrica	Medio
Fertirriego tecnificado	Muy alto	Bajo	Reducción de contaminación	Alto
Riego inteligente con sensores	Óptimo	Muy bajo	Uso eficiente del agua	Muy alto

Fuente: Elaboración propia con base en Chukalla et al. (2015), FAO (2022) y Fuerte-Velázquez y Gómez-Tagle (2024).

La información presentada evidencia que los sistemas de riego tecnificado contribuyen significativamente a mejorar la eficiencia hídrica y reducir procesos de contaminación difusa. Sin embargo, diversos autores advierten que dichas tecnologías deben acompañarse de regulación institucional y planificación territorial para evitar efectos rebote asociados con la expansión agrícola y aumento del consumo total de agua (Perry et al., 2021; Grafton et al., 2018).

5.3 Diferenciación productiva, innovación tecnológica y eficiencia hídrica en cultivos estratégicos.

Los cultivos agroexportadores del Bajío Michoacano exhiben diferencias notables en cuanto a las exigencias hídricas, la eficiencia tecnológica y la presión ambiental. Investigaciones contemporáneas indican que los frutos de la vid y el aguacate exhiben elevados índices de dependencia de agua azul, particularmente bajo estrategias de producción intensiva dirigidas al mercado global. Estas variaciones son atribuibles a elementos vinculados con los ciclos fenológicos, la evapotranspiración, tipo de suelo y sistemas de riego implementados (Gómez-Tagle et al., 2022; Fuerte-Velázquez & Gómez-Tagle, 2024).

La implementación de instrumentos como CROPWAT 8.0 y AquaCrop ha facilitado la estimación de la huella hídrica de diversos cultivos agrícolas con mayor exactitud. Estos modelos incorporan variables climáticas, evapotranspiración y precipitación efectiva con el fin de calcular las necesidades hídricas y evaluar escenarios de presión sobre acuíferos a nivel regional. La implementación de esta herramienta representa un instrumento estratégico para la formulación de políticas públicas y estrategias de sustentabilidad hídrica territorial (Allen et al., 1998; FAO,

2023).

La integración de tecnologías agrícolas avanzadas constituye una oportunidad significativa para optimizar la utilización del agua en sistemas agrícolas de alta intensidad. Sensores, estaciones agroclimáticas y plataformas digitales facilitan la monitorización de la humedad del suelo y la modificación en tiempo real de los volúmenes de riego. Sin embargo, desde una perspectiva de sustentabilidad robusta, estas innovaciones deben ser evaluadas teniendo en cuenta simultáneamente sus repercusiones ecológicas, energéticas y sociales, evitando enfoques exclusivamente productivistas (Klerkx et al., 2019; Leff, 2014).

5.4 Análisis integral de los impactos ambientales, sociales y económicos de la huella hídrica azul

5.4.1 Consecuencias ambientales derivadas de la sobreexplotación hídrica

La extracción a gran escala de agua subterránea ha inducido modificaciones notables en los ecosistemas hidrológicos del Bajío Michoacano. La reducción de los niveles de aguas subterráneas, la disminución de los flujos ecológicos y la degradación de los acuíferos constituyen algunas de las principales repercusiones ambientales vinculadas al crecimiento agroexportador. En contextos de cambio climático, dichas dinámicas intensifican la vulnerabilidad territorial y disminuyen la resiliencia ecológica regional (IPCC, 2023; UNESCO, 2024).

Desde la perspectiva social, la crisis hídrica ha suscitado disputas territoriales vinculadas al acceso inequitativo al agua y a la apropiación del recurso por parte de grandes productores agroexportadores. Las comunidades rurales que dependen de pozos y manantiales locales se ven expuestas a crecientes limitaciones en la disponibilidad de agua, circunstancia que agudiza las desigualdades socioambientales y la vulnerabilidad territorial (Boelens et al., 2023; Zwarteveen et al., 2021)

Desde una perspectiva económica, a pesar de que la industria agrícola exportadora genera significativos ingresos regionales, los costes ambientales vinculados al agotamiento de acuíferos y a la contaminación hídrica no se internalizan debidamente. Las externalidades resultantes de la sobreexplotación constituyen costos diferidos que ponen en riesgo la viabilidad futura del sistema productivo a nivel regional. Dentro de este marco, la rentabilidad económica del modelo agroexportador depende parcialmente de subvenciones ecológicas tácitas vinculadas con el uso intensivo de recursos naturales (OCDE, 2023; Hoekstra, 2017).

5.5 Limitaciones metodológicas y desafíos para la evaluación integral de la huella hídrica

Una de las principales restricciones inherentes al estudio de la huella hídrica azul radica en la insuficiencia de datos hidrológicos actualizados y desagregados a nivel territorial. En varios municipios dedicados a la agricultura, no se encuentran documentos exactos sobre la extracción efectiva de agua subterránea, la eficiencia en el riego o los balances hídricos integrales. Esta circunstancia obstaculiza la realización de estimaciones precisas acerca de la disponibilidad futura del recurso y la vulnerabilidad hídrica regional (CONAGUA, 2024).

Además, una considerable cantidad de investigaciones adoptan enfoques predominantemente técnicos, centrados en indicadores volumétricos, sin integrar de manera adecuada dimensiones sociales, políticas y territoriales de la crisis hídrica. La falta de metodologías interdisciplinarias restringe la comprensión holística de las interrelaciones entre la agroindustria, la gobernanza del agua y la sostenibilidad territorial. Por lo tanto, es imperativo robustecer las investigaciones que incorporen análisis hidrológicos con enfoques de ecología política y sustentabilidad robusta (Boelens et al., 2023; Swyngedouw, 2020).

5.6 Discusión crítica y argumentación sobre la sustentabilidad hídrica del modelo agroexportador

La evaluación exhaustiva de la huella hídrica azul evidencia que el modelo agroexportador contemporáneo en el Bajío Michoacano se sustenta estructuralmente en la extracción intensiva de agua subterránea. Este modelo productivo ha originado situaciones continuas de estrés hídrico que amenazan la sostenibilidad ambiental y territorial de la región. Municipios con una elevada especialización en la agricultura exhiben niveles elevados de presión sobre los acuíferos y una mayor susceptibilidad frente a fenómenos de sequía y variabilidad climática (Gleeson et al., 2012; Rosa et al., 2022).

Los hallazgos indican que la tecnificación agrícola optimiza la eficiencia hídrica a escala parcelaria; no obstante, no asegura una disminución absoluta del consumo hídrico regional. En múltiples instancias, las mejoras tecnológicas propician una expansión productiva y un incremento en las superficies cultivadas, replicando dinámicas de sobreexplotación. Este fenómeno corrobora que la sustentabilidad hídrica demanda no solo innovación tecnológica, sino también normativas

institucionales, gobernanza participativa y planificación territorial (Pahl-Wostl et al., 2013; Grafton et al., 2018).

Desde la perspectiva de la ecología política del agua, la crisis hídrica regional manifiesta relaciones de poder inequitativas vinculadas al control, distribución y apropiación del recurso hídrico. La acumulación de agua en sectores de producción agroexportadora exacerba las desigualdades sociales y los conflictos territoriales en comunidades rurales. Dentro de este marco, la transición hacia modelos robustos de sostenibilidad conlleva el reconocimiento de que el agua es un recurso natural inigualable cuya preservación debería ser un eje estratégico de las políticas públicas a nivel regional (Boelens et al., 2023; Neumayer, 2013).

Capítulo VI

Estrategias para la gestión sustentable del agua en la agroindustria del Bajío de Michoacán. Hacia una gestión sustentable del agua en la agroindustria del Bajío en Michoacán.

“Tus talentos y habilidades irán mejorando con el tiempo, pero para eso has de empezar”

Martin Luther King

6.1 Introducción: hacia una transición hídrica sustentable en el Bajío michoacano

La intensificación de la presión sobre los acuíferos del Bajío Michoacano pone de manifiesto la imperiosa necesidad de reorientar los modelos convencionales de administración hídrica hacia estrategias holísticas orientadas hacia la sustentabilidad territorial. Dentro de este marco, la transición hídrica constituye un proceso multifacético que fusiona innovación tecnológica, gobernanza adaptativa y resiliencia ambiental en respuesta al cambio climático. (UNESCO, 2024; Organización de las Naciones Unidas para el Ambiente y la Alimentación, 2023).

El modelo agroexportador regional ha catalizado significativos procesos de expansión económica; no obstante, ha agudizado la dependencia del agua subterránea en cultivos de alta demanda como los frutos de temporada, el aguacate y las hortalizas destinadas a la exportación. Esta circunstancia demanda la instauración de estrategias estructurales que faciliten la compatibilidad entre la productividad agrícola y la conservación ecológica del recurso hídrico. (Mekonnen y colaboradores, 2021; OCDE, 2023).

Desde un enfoque de sustentabilidad robusta, el agua se erige como un capital natural esencial cuya degradación puede comprometer la estabilidad futura de los sistemas socioecológicos. Bajo esta perspectiva, las tácticas de administración hídrica deben identificar las restricciones biofísicas de los acuíferos y priorizar estrategias que aseguren la regeneración natural del recurso. Según Neumayer (2013) y Leff (2014).

El corpus académico contemporáneo indica que las regiones agroexportadoras se ven expuestas a riesgos incrementados vinculados a sequías prolongadas, reducción de las recargas naturales y variabilidad climática extrema. Por consiguiente, las

estrategias de adaptación hídrica deben integrar instrumentos tecnológicos, territoriales y regulatorios que potencien la resiliencia regional frente a situaciones de incertidumbre climática. (IPCC, 2023; Rosa y colaboradores, 2022)

La transición hacia una administración sostenible del agua conlleva la superación de enfoques meramente productivistas y el avance hacia modelos holísticos de gobernanza hídrica. Esto demanda la colaboración conjunta de productores, entidades gubernamentales, entidades internacionales y comunidades rurales para asegurar una gestión equitativa y sostenible del recurso hídrico regional. (Boelens y colaboradores, 2023; Pahl-Wostl et al., 2023).

6.2 Agricultura inteligente y tecnologías de precisión para la eficiencia hídrica

La agricultura inteligente se destaca como una de las estrategias predominantes en la actualidad para la optimización del uso del agua en sistemas agrícolas de alta intensidad. La integración de sensores, estaciones agroclimáticas y plataformas digitales posibilita el seguimiento en tiempo real de variables como la humedad del suelo, la evapotranspiración y las necesidades hídricas particulares del cultivo. Según Wolfert et al. (2017) y Klerkx et al. (2019).

Los sistemas de riego avanzados, fundamentados en la inteligencia artificial, posibilitan la adaptación automática de las frecuencias y volúmenes de riego en función de las condiciones climáticas y fisiológicas del cultivo. Estas tecnologías desempeñan un papel significativo en la reducción de pérdidas derivadas de la evaporación, escurrimiento y sobreaplicación hídrica en regiones con un incremento en el estrés hídrico. Según FAO y UNESCO, 2024.

En cultivos agroexportadores tales como el arándano, la frambuesa y la zarzamora, la supervisión digital del riego optimiza la eficiencia parcelaria y potencia la productividad agrícola a través de la aplicación más exacta de agua y nutrientes. Adicionalmente, estas tecnologías propician una significativa disminución en los costos operativos y el consumo energético en los sistemas de bombeo agrícola. Perry et al., 2022; Gómez-Tagle et al., 2021).

La incorporación de plataformas de big data y agricultura 4.0 promueve la creación de modelos predictivos en relación con la disponibilidad hídrica y la dinámica climática regional. Estas herramientas facilitan la predicción de períodos de

sequía, la formulación de estrategias de prevención y la optimización del proceso de toma de decisiones en la administración territorial del agua destinado a la agricultura. (Wolfert y colaboradores, 2017; OCDE, 2023).

Sin embargo, múltiples investigaciones indican que la tecnificación agrícola no asegura de manera automática una disminución absoluta del consumo hídrico regional. En diversas instancias, las mejoras en eficiencia inducen una expansión agrícola y un incremento en las superficies cultivadas, emulando dinámicas de sobreexplotación hídrica denominadas efecto rebote. (Grafton y colaboradores, 2018; Perry et al., 2021).

Desde una perspectiva de sustentabilidad robusta, las innovaciones tecnológicas deben ser valoradas no solo en función de su potencial productivo, sino también en función de sus repercusiones ecológicas y sociales. La integración de tecnologías debería fomentar la disminución de la presión total sobre los acuíferos, no meramente incrementar la rentabilidad de las empresas agroexportadoras a nivel regional. Según Leff (2014) y Neumayer (2013).

6.3 Economía circular del agua y reúso agrícola sustentable

La implementación de la economía circular en el ámbito agrícola constituye una estrategia emergente destinada a la minimización de desechos, la reutilización de recursos hídricos y la minimización de los impactos ambientales derivados de la producción agroindustrial. Esta metodología fomenta la reutilización del agua tratada en procesos agrícolas, consolidando así la sostenibilidad regional a largo plazo. Según FAO y UNESCO, 2024.

La alternativa viable para reducir la extracción de agua subterránea en regiones con estrés hídrico estructural ha sido la reutilización de aguas residuales tratadas en actividades agrícolas. La instauración de tecnologías de tratamiento y reutilización posibilita la expansión de la disponibilidad hídrica sin incrementar la presión sobre acuíferos estratégicos. (Organización de las Naciones Unidas para la Agua de 2023; CEPAL, 2022).

Numerosos estudios a nivel global indican que los sistemas de recirculación hídrica tienen la capacidad de disminuir de manera significativa el consumo total de agua en la agricultura de alta intensidad. En cultivos protegidos e hidropónicos, la reutilización hídrica facilita la optimización de los nutrientes y la reducción de

pérdidas resultantes de escurrimientos y evaporación desmedida. (FAO, 2023; Perry y colaboradores, 2021)

La integración de tácticas de economía circular contribuye igualmente a la reducción de la contaminación agrícola vinculada a fertilizantes y agroquímicos. A través de procedimientos de tratamiento y filtrado, se pueden disminuir las concentraciones de contaminantes y optimizar la calidad ambiental de cuerpos de agua superficiales y subterráneos. (Boulay y colaboradores, 2021; UNESCO, 2024).

No obstante, la puesta en práctica de estas estrategias demanda significativas inversiones en infraestructura hidráulica, tratamiento de aguas y formación técnica. Además, es imperativo robustecer los marcos regulatorios que aseguren estándares sanitarios apropiados y mitiguen los riesgos medioambientales vinculados al reúso hídrico agrícola. (Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Económico y Social, 2023; CONAGUA, 2024).

6.4 Infraestructura verde y recarga sustentable de acuíferos

La implementación de infraestructura verde representa una estrategia esencial para robustecer la resiliencia hídrica en zonas de producción agroexportadora que enfrentan dificultades de sobreexplotación acuífera. Esta metodología integra soluciones fundamentadas en la naturaleza con el objetivo de optimizar la infiltración, almacenamiento y regulación hidrológica del territorio. (World Water Partnership, 2024; UNESCO, 2021).

La implementación de bordos de infiltración, humedales artificiales y sistemas de captación pluvial contribuye a la mejora de la recarga natural de acuíferos estratégicamente situados. Estas medidas promueven la recuperación progresiva de los niveles freáticos y robustecen la disponibilidad hídrica en respuesta a períodos prolongados de sequía regional. Conforme a CONAGUA 2024 y FAO 2023.

Las soluciones naturales también contribuyen a la reducción de procesos erosivos y a la degradación del suelo destinado a la agricultura. La preservación de la cobertura vegetal, junto con la restauración de áreas ribereñas, potencia los servicios ecosistémicos vinculados a la regulación hídrica, la biodiversidad y la estabilidad ambiental en cuencas agrícolas intensivas. De acuerdo con (IPCC, 2023; UNESCO, 2024).

La administración integrada de cuencas hidrográficas constituye un elemento

estratégico para asegurar la viabilidad a largo plazo de dichas intervenciones. Bajo esta perspectiva, la planificación de recursos hídricos debe tener en cuenta simultáneamente las necesidades agrícolas, urbanas y ambientales, evitando procesos de fragmentación institucional en la gestión del recurso. (Global Water Purpose, 2021; Pahl-Wostl et al., 2023).

En la región del Bajío de Michoacán, la instauración de infraestructuras verdes demanda una vinculación territorial entre entidades municipales, entidades operadoras y productores de agricultura. La coordinación regional es esencial para la implementación de proyectos holísticos de recarga hídrica y restauración ecológica, orientados a un largo plazo. Según CONAGUA (2024) y CEPAL (2022).

6.5 Gobernanza adaptativa y participación territorial en la gestión del agua

La gobernanza adaptativa del agua representa un modelo estratégico destinado a robustecer la capacidad institucional y social ante situaciones de incertidumbre climática y creciente presión hídrica. Este enfoque fomenta la creación de estructuras de gestión adaptables, capaces de reaccionar de manera dinámica a las transformaciones ambientales y territoriales. ONU-Agua, 2023 (Pahl-Wostl et al., 2023).

La implicación social constituye un elemento indispensable para asegurar procesos de administración hídrica más equitativos y sostenibles. La integración de comunidades rurales, agrupaciones agrícolas y entidades locales consolida la legitimidad de las resoluciones concernientes a la distribución, regulación y preservación del recurso hídrico regional. (Boelens y colaboradores 2023; Zwarteveen y colaboradores 2021).

Numerosos estudios contemporáneos sugieren que las disputas socioambientales asociadas al agua se agudizan en regiones donde prevalecen disparidades estructurales en el acceso al recurso. Dentro de este marco, la gobernanza participativa facilita la mitigación de tensiones sociales y el fortalecimiento de mecanismos colectivos para la gestión hídrica sostenible. magaña et al., 2022; boelens et al., 2023).

La transparencia institucional y el seguimiento constante de concesiones constituyen componentes esenciales para optimizar la gobernanza hídrica en zonas de producción agropecuaria. La consolidación de sistemas de auditoría hídrica potencia

la supervisión de las extracciones y fomenta una utilización más responsable del recurso subterráneo. (Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Económico y Social, 2023; CONAGUA, 2024).

La sostenibilidad hídrica a nivel regional también demanda la implementación constante de procesos de educación ambiental y formación técnica orientados a los productores agrícolas. El entrenamiento especializado promueve la implementación de prácticas eficaces y robustece la conciencia colectiva respecto a los límites ecológicos de los acuíferos regionales. Según FAO y UNESCO, 2024.

6.6 Estrategias de resiliencia climática y sustentabilidad territorial

El cambio climático constituye uno de los principales retos actuales para la seguridad hídrica en áreas de agricultura intensiva. La elevación de las temperaturas, las modificaciones en los patrones de precipitación y el incremento de las sequías extremas intensifican de manera significativa la susceptibilidad de los sistemas agroexportadores que dependen del agua subterránea. De acuerdo con (IPCC, 2023; UNESCO, 2024).

La resiliencia territorial hídrica conlleva el desarrollo de habilidades institucionales, tecnológicas y ecológicas destinadas a abordar situaciones de estrés hídrico prolongado. Las estrategias adaptativas deben otorgar prioridad a la preservación del agua, la diversificación de la producción y el robustecimiento de los ecosistemas hidrológicos a nivel regional. (Organización de las Naciones Unidas para la Agua de 2023; CEPAL, 2022).

La transición de la producción hacia cultivos de menor demanda hídrica representa una opción estratégica para mitigar la presión sobre los acuíferos sobreexplotados. Esta metamorfosis productiva debería ser acompañada de estímulos económicos y políticas públicas dirigidas a robustecer prácticas agrícolas sustentables. (Organización para las Naciones Unidas para el Desarrollo Económico y Social, 2023; Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, 2023).

Los sistemas agroecológicos y policultivos constituyen estrategias complementarias destinadas a potenciar la resiliencia climática en la agricultura. Estas prácticas promueven una mayor retención de humedad, la preservación de la biodiversidad y la disminución de la dependencia hídrica en contraste con los sistemas intensivos de monocultivo orientados exclusivamente a la comercialización. (IPCC,

2023).

La sustentabilidad territorial demanda el reconocimiento de que la expansión económica regional no puede perpetuarse indefinidamente a través de la extracción intensiva de agua subterránea. Por lo tanto, las futuras estrategias deberían dirigirse hacia modelos de suficiencia ecológica que sean compatibles con la capacidad natural de regeneración de los acuíferos (Neumayer 2013), Hoekstra et al. 2011).

6.7 Conclusión: hacia un modelo estratégico de sustentabilidad hídrica regional

La evidencia científica contemporánea evidencia que la sostenibilidad hídrica del Bajío Michoacano está condicionada por la implementación de estrategias holísticas que articulen tecnología, gobernanza y resiliencia ambiental. La transición hacia modelos de sostenibilidad requiere la superación de enfoques productivistas que se focalizan exclusivamente en el crecimiento económico agroexportador. UNESCO, 2024; Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE, 2023).

Las tácticas sugeridas en el presente capítulo facilitan la formulación de una ruta de transformación territorial con el objetivo de mitigar la presión sobre los acuíferos y robustecer la seguridad hídrica a nivel regional. La incorporación de la agricultura avanzada, la infraestructura sustentable y la gobernanza adaptativa se presenta como un elemento crucial para asegurar la sustentabilidad a largo plazo. (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Cultura, 2023; Global Water Partnership, 2021).

Desde un enfoque de sustentabilidad robusta, se debe considerar al agua como un recurso natural estratégico cuya conservación es esencial para la estabilidad ecológica, económica y social del territorio. Por lo tanto, las futuras políticas públicas deberán otorgar prioridad a los límites ecológicos y a los mecanismos de regulación hídrica sustentable. Según Neumayer (2013) y Leff (2014).

En última instancia, la transición hídrica sostenible en el Bajío Michoacano demanda compromiso político, participación social y una coordinación institucional constante. La edificación de un modelo agroindustrial resiliente estará condicionada por la habilidad regional para armonizar la competitividad agrícola, la preservación ambiental y la equidad en la distribución de aguas territoriales. ONU-Agua, 2023 (Boelens et al., 2023).

Capítulo VII

Conclusiones generales

“Nunca consideres el estudio como una obligación, sino como una oportunidad para penetrar en el bello y maravilloso mundo del saber”

-Albert Einstein-

La elaboración de este estudio doctoral facilitó la formulación de una interpretación holística de la relación entre la huella hídrica azul (HHA) y la sustentabilidad de los recursos hídricos en el Bajío de Michoacán. Esto puso de manifiesto que el modelo agroindustrial de exportación no solo conlleva un proceso productivo eficaz, sino también una presión estructural sobre el capital natural hídrico. En este contexto, las conclusiones por capítulo evidencian un proceso de análisis gradual que integra teoría, metodología y evidencia empírica.

El Capítulo I determinó que la huella hídrica representa un indicador esencial para la comprensión de la apropiación del agua en sistemas agroindustriales. La revisión bibliográfica permitió discernir que la agricultura constituye alrededor del 92 % del consumo global de agua dulce, con el componente azul desempeñando un papel crítico en regiones con riego intensivo (Mekonnen & Hoekstra, 2011). En el contexto mexicano, investigaciones anteriores han registrado marcas hídricas en cultivos agrícolas que exceden los 1,500-2,300 L/kg en productos como el aguacate, lo que pone de manifiesto patrones de sobreexplotación en regiones de exportación.

Por lo tanto, se deduce que la huella hídrica azul no solo cuantifica el consumo, sino que también revela disparidades territoriales y procesos de transferencia virtual de agua, consolidándose como un instrumento analítico esencial en el marco del enfoque de sustentabilidad fuerte.

En el Capítulo II, el diseño metodológico facilitó el tratamiento del fenómeno desde un enfoque sólido. La implementación del modelo CROPWAT, en combinación con la determinación del Indicador de Presión Hídrica Azul (IPHA) y la productividad económica del agua (\$/m³), facilitó la generación de una base empírica coherente. La implementación de la triangulación metodológica, que englobó análisis cuantitativo, espacial y cualitativo, reforzó la validez de los hallazgos. Se deduce que esta metodología no solo es relevante para el análisis regional, sino que representa una contribución replicable para investigaciones análogas en entornos agroindustriales,

aunque su implementación es restringida por la disponibilidad y la calidad de los datos secundarios.

El Capítulo III puso de manifiesto que el Bajío de Michoacán exhibe una estructura territorial altamente especializada en cultivos destinados a la exportación, con municipios como Zamora y Jacona concentrando una considerable proporción de la producción. Esta concentración se manifiesta en una presión hídrica distinta, en la que la intensificación de la agricultura y la implementación de tecnologías de riego presurizado han elevado la demanda de agua. Se deduce que hay una considerable heterogeneidad territorial, en la que los grados de tecnificación y productividad no necesariamente se correlacionan con una administración sustentable del recurso, sino que en numerosos casos intensifican su utilización.

En el Capítulo IV, los hallazgos empíricos evidenciaron discrepancias evidentes en la huella hídrica azul entre distintos cultivos. El arándano y la frambuesa registraron consumos que excedieron los 4,000-6,000 m³·ha⁻¹ por ciclo, mientras que la fresa exhibió valores inferiores, oscilando entre 3,000 y 4,500 m³·ha⁻¹. Además, se constató que la implementación de la tecnificación en la agricultura incrementa la productividad económica del agua entre un 20 % y un 35 %, lo que evidencia avances en eficiencia. No obstante, este aumento no disminuye el consumo total, atribuible a la ampliación de la superficie agrícola y a la intensificación de la producción. En consecuencia, se deduce que la eficiencia hídrica constituye un indicador parcial que no evidencia de manera inequívoca la sustentabilidad del sistema.

En el Capítulo V, se llevó a cabo un análisis del efecto de la huella hídrica azul en la accesibilidad del recurso, detectando que, en varias localidades, la extracción de agua subterránea sobrepasa la recarga natural. Esta circunstancia propicia situaciones de explotación excesiva que ponen en riesgo la viabilidad del recurso a largo plazo. Se deduce que la presión hídrica no es meramente un fenómeno técnico, sino estructural e intrínsecamente vinculado al modelo de agroexportación. Además, se constató una discrepancia entre la rentabilidad económica y la sustentabilidad hídrica, lo que sugiere que los sistemas productivos pueden tener eficiencia económica pero ser inviables desde una perspectiva ambiental.

El Capítulo VI facilitó la determinación de que la administración sustentable del agua demanda una transformación holística que amalgama la eficiencia tecnológica, la regulación institucional y la equidad territorial. Las tácticas sugeridas

subrayan la imperatividad de instaurar sistemas de supervisión, control y rastreabilidad del uso del agua, junto con políticas públicas que restrinjan la extracción en la disponibilidad efectiva del recurso. Se deduce que la gobernanza hídrica constituye un componente esencial en la transición hacia un paradigma sustentable, superando enfoques meramente productivistas.

En última instancia, el Capítulo VII consolida los descubrimientos y valida la hipótesis de investigación: la huella hídrica azul producida por la agroindustria de frutas tiene un impacto considerable en la sustentabilidad de los recursos hídricos del Bajío de Michoacán, con diferencias notables entre los cultivos, las entidades municipales y los grados de tecnificación. La investigación evidencia que, incluso con la incorporación de innovaciones tecnológicas, el modelo agroexportador puede exceder los límites de recarga hídrica si no se regula de manera adecuada.

En términos generales, el descubrimiento primordial de este estudio es que la sustentabilidad hídrica no se limita únicamente a la eficiencia en la utilización del agua, sino que también se encuentra vinculada al respeto a los límites ecológicos del recurso. La evidencia empírica corrobora la presencia de un fenómeno de intensificación, donde la tecnología optimiza la eficiencia, pero a su vez eleva el consumo total. Además, se llega a la conclusión de que el agua debe ser considerada un capital natural esencial, cuya explotación excesiva amenaza la sustentabilidad de los sistemas socioecológicos.

El estudio proporciona pruebas robustas para reconsiderar el modelo de desarrollo agroindustrial en áreas con estrés hídrico, subrayando que la sustentabilidad demanda la integración de tres dimensiones esenciales: eficiencia técnica, regulación hídrica y equidad territorial. Así, la investigación trasciende la cuantificación del consumo de agua y se establece como una aportación significativa para la formulación de políticas públicas orientadas hacia la sustentabilidad en escenarios de creciente insuficiencia hídrica.

Por lo tanto, este trabajo doctoral constituye una aportación significativa al ámbito del desarrollo y la sustentabilidad, al examinar de manera holística la interrelación entre la agroindustria, la utilización del agua y los límites ecológicos en una región estratégica de México, como el Bajío de Michoacán. Su influencia se fundamenta en la producción de evidencia empírica territorializada que facilita una comprensión rigurosa de cómo la huella hídrica azul vinculada a la producción de

berries impacta directamente en la sustentabilidad de los recursos hídricos, superando enfoques convencionales enfocados exclusivamente en la productividad agrícola.

Una contribución destacada del estudio se encuentra en la implementación de una metodología multidimensional, que amalgama instrumentos cuantitativos (CROPWAT, indicadores como IPHA y productividad económica del agua), análisis territorial a través de Sistemas de Información Geográfica (SIG) y una interpretación crítica desde una perspectiva de sustentabilidad fuerte. Esta articulación facilita no solo la medición del consumo de agua, sino también la interpretación de sus repercusiones ecológicas, económicas y sociales en diversos estratos espaciales. En este contexto, la investigación proporciona un modelo metodológico replicable para otras regiones agrícolas con problemas análogos, consolidando su relevancia dentro del ámbito académico y aplicado.

El estudio aporta de manera significativa al debate teórico al evidenciar que la eficiencia hídrica no asegura la sustentabilidad. Asimismo, señala que la implementación de tecnologías inherentes a la agroindustria 4.0 puede potenciar la productividad del agua, pero simultáneamente intensificar su consumo total debido a la expansión productiva. Este descubrimiento pone en tela de juicio las premisas tradicionales de modernización agrícola y establece la necesidad de integrar restricciones ecológicas en la planificación del desarrollo, en consonancia con el enfoque de sustentabilidad robusto.

Una contribución crucial es la exposición de las disparidades territoriales en la utilización del agua, evidenciando que las localidades con una elevada concentración agroindustrial presentan niveles elevados de presión hídrica, lo que suscita tensiones entre la rentabilidad económica y la accesibilidad del recurso. Este estudio facilita la comprensión de que el problema hídrico no es homogéneo, sino profundamente territorial, un aspecto esencial para la formulación de políticas públicas diferenciadas y contextualizadas.

Desde un enfoque aplicado, el estudio se distingue por su énfasis en la gobernanza hídrica y la administración sustentable, postulando la necesidad de transitar hacia sistemas que incorporen regulación, supervisión y control del uso del agua, más allá de la mera eficiencia técnica. En esta etapa, la experiencia profesional integrada en los sistemas de gestión de calidad y normativas potencia la investigación, proporcionando una perspectiva operativa sobre la implementación de mecanismos de control y mejora continua en la utilización del recurso hídrico.

Lo más destacado de la investigación reside en su habilidad para presentar pruebas empíricas, rigurosidad metodológica y reflexión crítica en torno a un problema estructural del desarrollo contemporáneo: la tensión entre el crecimiento económico y las restricciones medioambientales. El estudio no solo cuantifica el problema, sino que también lo contextualiza en el contexto de dinámicas globales como el comercio virtual de agua y la intensificación agroindustrial, proporcionando una interpretación holística que vincula lo local con lo global.

En resumen, este estudio doctoral incorpora al Doctorado en Desarrollo y Sustentabilidad un enfoque innovador que amalgama ciencia aplicada, análisis territorial y teoría crítica, estableciéndose como un punto de referencia para la investigación de la sustentabilidad hídrica en sistemas agroindustriales. Su importancia radica en que evidencia que la factibilidad del desarrollo no se limita meramente a la eficiencia productiva, sino que se vincula con la habilidad para respetar los límites ecológicos del capital natural, en particular del agua, como un pilar esencial para la sustentabilidad a largo plazo.

Referencias bibliográficas

- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements (FAO Irrigation and Drainage Paper 56)*. FAO.
- Almeida, C., et al. (2023). Social sustainability indicators in agricultural water use. *Journal of Cleaner Production*, 412, 137391. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137391>
- Álvarez-Berrios, N., & Aide, T. M. (2015). Global demand for avocados and forest transition in Mexico. *Journal of Land Use Science*, 10(4), 1–15. <https://doi.org/10.1080/1747423X.2014.939706>
- Ayars, J. E., et al. (2015). Subsurface drip irrigation in agriculture. *Agricultural Water Management*, 157, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.03.001>
- Bezerra, M. O., Vollmer, D., Acero, N., Castro, J., & Sáenz, L. (2022). The Freshwater Health Index: Assessing ecosystem vitality and governance in Latin American basins. *Ambio*, 51(2), 321–335. <https://doi.org/10.1007/s13280-021-01613-6>
- Boelens, R. (2014). Cultural politics and the hydrosocial cycle. *Water Alternatives*, 7(1), 1–17.
- Boelens, R. (2014). Cultural politics and the hydrosocial cycle: Water, power and identity in the Andean highlands. *Geoforum*, 57, 234–247. <https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2013.02.008>
- Boelens, R., Hoogesteger, J., & Swyngedouw, E. (2016). Hydrosocial territories: A political ecology perspective. *Journal of Peasant Studies*, 43(2), 1–22. <https://doi.org/10.1080/03066150.2016.1157099>
- Boelens, R., Hoogesteger, J., & Swyngedouw, E. (2016). Hydrosocial territories. *Water International*, 41(1), 1–14. <https://doi.org/10.1080/02508060.2016.1134898>
- Bogardi, J. J., & Szöllösi-Nagy, A. (2014). Water security revisited. *Water Security*. <https://doi.org/10.1016/j.wasec.2017.03.001>
- Boulay, A. M., Bare, J., De Camillis, C., et al. (2018). The WULCA consensus characterization model for water scarcity footprints. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 23, 368–378.
- Boulay, A. M., et al. (2018). The WULCA consensus characterization model for water scarcity footprints. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 23(2), 368–378. <https://doi.org/10.1007/s11367-017-1333-8>
- Boulay, A.-M., Bare, J., Benini, L., Berger, M., Lathuillière, M. J., Manzardo, A., Margni, M., Motoshita, M., Núñez, M., Pastor, A. V., Ridoutt, B., Oki, T., Worbe, S., & Pfister, S. (2018). The WULCA consensus characterization model for water scarcity footprints: Assessing impacts of water consumption based on available water remaining (AWARE). *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 23(2), 368–378. <https://doi.org/10.1007/s11367-017-1333-8>
- Burt, C. M., et al. (2015). Surface irrigation management. *Irrigation Science*, 33, 1–10. <https://doi.org/10.1007/s00271-014-0445-7>
- Castellanos, E., & Juárez, H. (2020). Participación comunitaria y gestión del agua en el occidente de México. *Sociedad y Ambiente*.

- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2023). *Datos hidrológicos y cartografía del agua en México*. Gobierno de México.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2023). *Estadísticas del agua en México*. Gobierno de México.
- CONAGUA. (2022). *Estadísticas del agua en México*. Comisión Nacional del Agua.
- Contreras-Pérez, M., Santoyo-Pizano, G., de los Santos-Villalobos, S., Gutiérrez-García, M. A., Orozco-Mosqueda, M. del C., & Rocha-Granados, M. del C. (2019). Primer reporte de *Lasiodiplodia* en plantas de zarzamora (*Rubus* subgénero *Eubatus*) en el estado de Michoacán, México. *Revista Mexicana de Fitopatología*, 37(3). <https://doi.org/10.18781/r.mex.fit.1905-4>
- Crespo Stupková, L. (2016). Global value chain in agro-export production and its socio-economic impact in Michoacán, Mexico. *AGRIS On-line Papers in Economics and Informatics*, 8(1), 25–36. <https://doi.org/10.7160/aol.2016.080103>
- Creswell, J. W., & Plano Clark, V. L. (2018). *Designing and conducting mixed methods research* (3rd ed.). SAGE Publications.
- Dalin, C., et al. (2017). Groundwater depletion embedded in international food trade. *Nature*, 543, 700–704. <https://doi.org/10.1038/nature21403>
- Dalin, C., Wada, Y., Kastner, T., & Puma, M. (2017). Groundwater depletion embedded in international food trade. *Nature*, 543, 700–704. <https://doi.org/10.1038/nature21403>
- Daly, H. E. (1996). *Beyond growth*. Beacon Press.
- Delgado-Ramos, G. C., & Romo, I. (2021). Water governance and agro-export expansion in western Mexico. *Journal of Rural Studies*, 85, 241–252. <https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2021.05.006>
- Estrada, L., & Rangel, M. (2019). Uso agrícola del agua y conflictos en el valle de Zamora. *Estudios Sociales*, XX(X), XX–XX.
- FAO. (2012). *Irrigation and drainage paper 56 update*. FAO.
- FAO. (2020). *The state of food and agriculture*. Food and Agriculture Organization.
- FAO. (2023). *The state of food and agriculture 2023*. FAO.
- Flores Lázaro, N., Saldivar Valdez, A., Hernández Madrigal, V. M., & Pérez Veyna, O. (2017). Valoración del agua de riego agrícola en el valle de Zamora, Michoacán, México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 8(4). <https://doi.org/10.29312/remexca.v8i4.9>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2018). *Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements (FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56)*. FAO.
- Fuerte-Velázquez, S., et al. (2024). Avocado water footprint for two municipalities in Michoacán, Mexico. *Water*, 16(3), 512. <https://doi.org/10.3390/w16030512>
- García-Coll, I., et al. (2020). Dinámicas socioambientales del cultivo de aguacate en Michoacán. *Revista de Estudios Regionales*, XX(X), XX–XX.

- Gleeson, T., Wada, Y., Bierkens, M. F. P., & van Beek, L. P. H. (2012). Water balance of global aquifers revealed by groundwater footprint. *Nature*, 488(7410), 197–200. <https://doi.org/10.1038/nature11295>
- Global Water Partnership. (2000). *Integrated water resources management*. TAC Background Paper No. 4.
- Global Water Partnership. (2000). *Integrated water resources management*. GWP.
- GlobalG.A.P. (2022). *Integrated farm assurance standard*.
- Gobierno del Estado de Michoacán de Ocampo, CPLADEM. (2022). *Ficha municipal de información 2022: Jacona*. Gobierno del Estado de Michoacán.
- Gobierno del Estado de Michoacán de Ocampo, CPLADEM. (2022). *Ficha municipal de información 2022: Los Reyes*. Gobierno del Estado de Michoacán.
- Gobierno del Estado de Michoacán de Ocampo, CPLADEM. (2022). *Ficha municipal de información 2022: Tangancicuaro*. Gobierno del Estado de Michoacán.
- Gobierno del Estado de Michoacán de Ocampo, CPLADEM. (2022). *Ficha municipal de información 2022: Zamora*. Gobierno del Estado de Michoacán.
- Gobierno Municipal de Jacona. (2021). *Plan de Desarrollo Municipal 2021–2024*. Ayuntamiento de Jacona.
- Godfray, H. C. J., & Garnett, T. (2014). Food security and sustainable intensification. *Philosophical Transactions B*, 369, 20120273. <https://doi.org/10.1098/rstb.2012.0273>
- Grafton, R. Q., Williams, J., & Jiang, Q. (2018). Possible pathways and tensions in the food and water nexus. *Earth's Future*, 6(4), 449–462.
- Grafton, R. Q., Williams, J., Perry, C. J., Molle, F., Ringler, C., Steduto, P., Udall, B., Wheeler, S. A., Wang, Y., Garrick, D., & Allen, R. G. (2018). The paradox of irrigation efficiency. *Science*, 361(6404), 748–750. <https://doi.org/10.1126/science.aat9314>
- Haddaway, N. R., Macura, B., Whaley, P., & Pullin, A. S. (2018). ROSES reporting standards for systematic evidence syntheses: Pro forma, flow-diagram and descriptive summary of the plan and conduct of environmental systematic reviews and systematic maps. *Environmental Evidence*, 7(7), 1–8. <https://doi.org/10.1186/s13750-018-0131-0>
- Hartman, S., Farfán, M., Hoogesteger, J., et al. (2022). Mapping the expansion of berry greenhouses onto Michoacán's ejido lands, México. *Environmental Research Letters*, 17(11), 115004. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac9ac8>
- Hartmann, T., et al. (2021). Mapping greenhouse expansion in western Mexico. *Remote Sensing*, 13(9), 1705. <https://doi.org/10.3390/rs13091705>
- Hernández Madrigal, V. M., et al. (2024). Fallas activas en Zamora, Michoacán, México: afectación y monitoreo. *Investigaciones Geográficas*, (115).
- Hernández Robledo, J. C., & Barón León, M. de L. (2020). De la reproducción ampliada a la acumulación por desposesión: Introducción y desarrollo del capital fresero en el Valle Zamorano. *Textual*, (76), 75–102. <https://doi.org/10.5154/r.textual.2020.74.04>
- Hernández Robledo, J. C., & Ramírez Miranda, C. A. (2025). Crisis neoliberal y expansión regional agroexportadora de frutillas michoacanas. *Revista de Geografía Agrícola*, (74). <https://doi.org/10.5154/r.ga.2024.74.11>

- Hoekstra, A. Y., & Chapagain, A. K. (2008). *Globalization of water*. Wiley-Blackwell.
- Hoekstra, A. Y., Chapagain, A. K., Aldaya, M. M., & Mekonnen, M. M. (2011). *The water footprint assessment manual: Setting the global standard*. Earthscan.
- Hoekstra, A. Y., et al. (2011). *The water footprint assessment manual*. Earthscan.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2020). *Marco geoestadístico nacional*. Gobierno de México.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2010). *Compendio de información geográfica municipal 2010. Los Reyes, Michoacán de Ocampo*. INEGI.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2010). *Compendio de información geográfica municipal 2010. Tangancícuaro, Michoacán de Ocampo*. INEGI.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2010). *Compendio de información geográfica municipal 2010. Zamora, Michoacán de Ocampo*. INEGI.
- International Organization for Standardization. (2014). *ISO 14046:2014 Environmental management — Water footprint — Principles, requirements and guidelines*. ISO.
- International Organization for Standardization. (2014). *ISO 14046:2014 Environmental management — Water footprint — Principles, requirements and guidelines*. ISO.
- ISO. (2015). *ISO 14001: Environmental management systems*.
- ISO. (2017). *ISO/IEC 17025: Testing and calibration laboratories*.
- ISO. (2018). *ISO 19011: Guidelines for auditing management systems*.
- Klerkx, L., Jakku, E., & Labarthe, P. (2019). A review of social science on digital agriculture. *NJAS*, 90–91.
- Klerkx, L., Jakku, E., & Labarthe, P. (2019). Digital agriculture. *NJAS*, 90–91, 100315. <https://doi.org/10.1016/j.njas.2019.100315>
- Leff, E. (2014). *La apuesta por la vida*. Siglo XXI.
- Lovarelli, D., Bacenetti, J., & Fiala, M. (2016). Water footprint of crop productions: A review. *Science of the Total Environment*, 548–549, 236–251. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.01.022>
- Magaña, V., et al. (2022). Gobernanza del agua y agricultura en el Bajío mexicano. *Journal of Environmental Policy*, XX(X), XX–XX.
- Mekonnen, M. M., & Hoekstra, A. Y. (2011). National water footprint accounts. *Water Resources Management*, 25, 2211–2232. <https://doi.org/10.1007/s11269-011-9898-8>
- Mekonnen, M. M., & Hoekstra, A. Y. (2011). National water footprint accounts: The green, blue and grey water footprint of production and consumption. *Value of Water Research Report Series No. 50*. UNESCO-IHE.
- Mekonnen, M. M., & Hoekstra, A. Y. (2011). National water footprint accounts. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(5), 1577–1600.

- Mekonnen, M. M., & Hoekstra, A. Y. (2011). The green, blue and grey water footprint of crops and derived crop products. *Ecological Indicators*, 12(1), 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2011.08.010>
- Mekonnen, M. M., & Hoekstra, A. Y. (2011). The green, blue and grey water footprint of crops and derived crop products. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(5), 1577–1600. <https://doi.org/10.5194/hess-15-1577-2011>
- Mekonnen, M. M., & Hoekstra, A. Y. (2011). The green, blue and grey water footprint of crops. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15, 1577–1600.
- Mekonnen, M. M., & Hoekstra, A. Y. (2014). Water footprint benchmarks for crop production: A first global assessment. *Ecological Indicators*, 46, 214–223. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.06.013>
- Neumayer, E. (2003). *Weak versus strong sustainability: Exploring the limits of two opposing paradigms*. Edward Elgar Publishing.
- Neumayer, E. (2010). *Weak versus strong sustainability: Exploring the limits of two opposing paradigms* (3rd ed.). Edward Elgar.
- Ortega-Farías, S., Espinoza-Meza, S., López-Olivari, R., Araya-Alman, M., & Carrasco-Benavides, M. (2021). Effects of different irrigation levels on plant water status, yield, fruit quality, and water productivity in a drip-irrigated blueberry orchard under Mediterranean conditions. *Agricultural Water Management*, 249, 106805. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.106805>
- Pahl-Wostl, C., Arthington, A. H., Bogardi, J. J., Bunn, S. E., Hoff, H., Lebel, L., Nikitina, E., Palmer, M. A., Poff, N. L., Richards, K., Schlüter, M., Schulze, R., St-Hilaire, A., Tharme, R., Tockner, K., & Tsegai, D. (2013). Environmental flows and water governance: Managing sustainable water uses. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 5(3–4), 341–351. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2013.06.009>
- Pahl-Wostl, C., et al. (2013). Analyzing complex water governance regimes. *Ecology and Society*, 18(4), 29. <https://doi.org/10.5751/ES-05868-180429>
- Pahl-Wostl, C., Holtz, G., Kastens, B., & Knieper, C. (2013). Analyzing complex water governance regimes: The management and transition framework. *Environmental Science & Policy*, 32, 60–70. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2013.03.010>
- Pannunzio, A., Holzapfel, E., Fernandez Cirelli, A., Texeira, P., Souto, C., & Bryla, D. R. (2023). Agricultural water footprint of southern highbush blueberry produced commercially with drip irrigation and sprinkler frost protection. *Agricultural Sciences*, 14(1), 114–128. <https://doi.org/10.4236/as.2023.141008>
- Perry, C., et al. (2017). Does improved irrigation efficiency save water? *Agricultural Water Management*, 187, 34–43. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2017.01.012>
- Pfister, S., Koehler, A., & Hellweg, S. (2009). Assessing the environmental impacts of freshwater consumption in LCA. *Environmental Science & Technology*, 43(11), 4098–4104. <https://doi.org/10.1021/es802423e>
- Pfister, S., Ridoutt, B., & Pfister, R. (2023). Water scarcity footprint: A review of methods and applications. *Journal of Cleaner Production*, 385, 135658. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135658>

- Ray, P., Bara, A., & Chakraborty, S. (2022). Digital agriculture and water-use efficiency: Implications for sustainable irrigation. *Computers and Electronics in Agriculture*, 196, 107266. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.107266>
- Rodríguez-de-Francisco, J. C., & Boelens, R. (2015). Payment for environmental services and power in the Chamachán watershed, Ecuador. *Water International*, 40(1), 1–19. <https://doi.org/10.1080/07900627.2015.1026438>
- Rodríguez-de-Francisco, J., & Boelens, R. (2015). Payment for environmental services and hydrosocial territories. *Geoforum*, 65, 90–101. <https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2015.07.002>
- Rodríguez-Díaz, J. A., Camacho-Poyato, E., & López-Luque, R. (2010). Modern irrigation technologies. *Agricultural Water Management*, 97(12), 1909–1918. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2010.06.018>
- Rodríguez-Díaz, J. A., et al. (2010). Modern irrigation technologies. *Agricultural Water Management*, 97, 1909–1918. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2010.06.018>
- Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER). (2022). *Anuario estadístico de la producción agrícola*. Gobierno de México.
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). (2022). *Información agrícola por municipio*. Gobierno de México.
- Steffen, W., Richardson, K., Rockström, J., Cornell, S. E., Fetzer, I., Bennett, E. M., Biggs, R., Carpenter, S. R., Vries, W., de Wit, C. A., Folke, C., Gerten, D., Heinke, J., Mace, G., Persson, L. M., Ramanathan, V., Reyers, B., & Sörlin, S. (2015). Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. *Science*, 347(6223), 1259855. <https://doi.org/10.1126/science.1259855>
- Swyngedouw, E. (2009). The political economy and political ecology of the hydro-social cycle. *Journal of Agrarian Change*, 9(3), 343–366. <https://doi.org/10.1080/03066150902876852>
- UNEP. (2019). *Circular economy and water management*. United Nations Environment Programme.
- UNESCO. (2023). *World water development report*.
- Vanham, D., & Mekonnen, M. (2021). The scarcity-weighted water footprint. *Water Research*, 193, 116843. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.116843>
- Vanham, D., & Mekonnen, M. M. (2021). The global water footprint of crops: Sustainability assessment and implications. *Communications Earth & Environment*, 2(1), 1–12. <https://doi.org/10.1038/s43247-021-00139-5>
- Velázquez, F., et al. (2021). Huella hídrica y agricultura en México. *Water Resources Management*, XX(X), XX–XX.
- Villalvazo-Valdovinos, R., Pamatz-Ángel, M. M., Lara-Chávez, M. B. N., Ávila-Val, T. del C., & Vargas-Sandoval, M. (2024). Ácaros asociados a frambuesa en Zamora y Los Reyes, Michoacán. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 15(3), e3660. <https://doi.org/10.29312/remexca.v15i3.3660>
- Villaseñor-Reyes, C. I., et al. (2026). Spatiotemporal mapping of protected agriculture and its impacts on water consumption. *Applied Geomatics*. <https://doi.org/10.1007/s12518-026-00710-5>

- WCED. (1987). *Our common future*. Oxford University Press.
- Wolfert, S., Ge, L., Verdouw, C., & Bogaardt, M. J. (2017). Big data in smart farming: A review. *Agricultural Systems*, 153, 69–80.
<https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.01.023>
- Yin, R. K. (2018). *Case study research and applications: Design and methods* (6th ed.). SAGE Publications.
- Zarazúa-Escobar, J. A., Almaguer-Vargas, G., & Márquez-Berber, S. R. (2011). Redes de innovación en el sistema productivo fresa en Zamora, Michoacán. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 17(1), 51–60.
<https://doi.org/10.5154/r.rchsh.2011.17.008>
- Zwarteveen, M., & Boelens, R. (2014). Defining water justice from the grassroots: A hydrosocial perspective. *Journal of Peasant Studies*, 41(2), 143–158.
<https://doi.org/10.1080/03066150.2014.939150>
- Zwarteveen, M., & Boelens, R. (2014). Defining, researching and struggling for water justice. *Water International*, 39(2), 143–158.
- Comisión Nacional del Agua. (2024). *Disponibilidad media anual de agua subterránea: acuíferos del estado de Michoacán*. Gobierno de México.
- Escamilla, E. Z., et al. (2023). Applying societal metabolism to characterize water availability, requirement, and scarcity in agriculture: A case study of Mexico. *Frontiers in Sustainable Food Systems*. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2023.1252546>
- Fuerte-Velázquez, D. J., et al. (2024). Avocado water footprint for two municipalities in Michoacán, Mexico. *Agriculture*, 14(7), 981.
<https://doi.org/10.3390/agriculture14070981>
- Novoa, V., Rojas, C., Rojas, O., Ahumada-Rudolph, R., & Moreno-Santoyo, R. (2024). A temporal analysis of the consequences of the drought regime on the water footprint of agriculture in the Guadalupe Valley, Mexico. *Scientific Reports*, 14, 6114.
<https://doi.org/10.1038/s41598-024-56407-5>
- Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. (2023). *Información agroalimentaria y pesquera de México*. Gobierno de México.
- UNESCO. (2023). *The United Nations World Water Development Report 2023: Partnerships and cooperation for water*. UNESCO.

Anexos

Anexo 1

Abreviaturas, símbolos y variables empleadas en el análisis de la huella hídrica azul y en el modelo CROPWAT

Tipo	Símbolo / Abreviatura	Descripción conceptual	Unidad
Indicador	HHA	Huella hídrica azul asociada al consumo de agua superficial y subterránea en el proceso productivo agrícola	$\text{m}^3 \cdot \text{ton}^{-1}$
Indicador	HH	Huella hídrica total (suma de componentes azul, verde y gris)	$\text{m}^3 \cdot \text{ton}^{-1}$
Indicador	HHV	Componente verde de la huella hídrica (agua de lluvia aprovechada por el cultivo)	$\text{m}^3 \cdot \text{ton}^{-1}$
Indicador	HHG	Componente gris de la huella hídrica (volumen necesario para diluir contaminantes)	$\text{m}^3 \cdot \text{ton}^{-1}$
Indicador	IPHA	Indicador de presión hídrica azul que relaciona el consumo agrícola con la disponibilidad del recurso	adimensional
Indicador	WSI	Índice de estrés hídrico que evalúa la presión sobre el recurso en una región determinada	adimensional
Indicador	AWARE	Disponibilidad de agua restante en cuenca después de usos humanos	m^3
Variable climática	ET_0	Evapotranspiración de referencia estimada mediante el método Penman–Monteith	$\text{mm} \cdot \text{día}^{-1}$
Variable agronómica	ET_c	Evapotranspiración real del cultivo en función de sus características fisiológicas	$\text{mm} \cdot \text{día}^{-1}$
Parámetro	K_c	Coefficiente de cultivo que ajusta la ET_0 a condiciones específicas del cultivo	adimensional
Parámetro	$K_c \text{ ini / mid / end}$	Valores del coeficiente de cultivo según la etapa fenológica (inicial, desarrollo y madurez)	adimensional
Variable climática	P	Precipitación total registrada en el periodo de análisis	mm

Variable hidrológica	Peff	Fracción de precipitación efectivamente aprovechada por el cultivo	mm
Variable de manejo	I	Lámina de riego requerida para suplir déficit hídrico	mm
Variable de consumo	CWU	Volumen total de agua consumida por el cultivo durante su ciclo productivo	m ³ ·ha ⁻¹
Variable productiva	Y	Rendimiento agrícola por unidad de superficie	ton·ha ⁻¹
Variable climática	T	Temperatura media del aire	°C
Variable climática	RH	Humedad relativa del ambiente	%
Variable climática	u ₂	Velocidad del viento medida a 2 metros de altura	m·s ⁻¹
Variable energética	Rn	Radiación neta disponible en la superficie del cultivo	MJ·m ⁻² ·día ⁻¹
Variable energética	G	Flujo de calor en el suelo	MJ·m ⁻² ·día ⁻¹
Variable edáfica	FC	Capacidad de campo del suelo (retención máxima de agua útil)	%
Variable edáfica	PMP	Punto de marchitez permanente (límite inferior de disponibilidad hídrica)	%
Variable edáfica	AD	Agua disponible para las plantas en el perfil del suelo	mm
Variable edáfica	Zr	Profundidad efectiva del sistema radicular del cultivo	m
Parámetro	p	Fracción de agotamiento permisible del agua en el suelo antes de requerir riego	adimensional
Propiedad del suelo	K _s	Conductividad hidráulica del suelo	mm·día ⁻¹
Variable edáfica	θ	Contenido volumétrico de humedad en el suelo	m ³ ·m ⁻³
Variable derivada	ET _(blue)	Componente de evapotranspiración atribuible al uso de agua azul (ET _c – Peff)	mm
Variable derivada	CWU _(blue)	Consumo acumulado de agua azul durante el ciclo del cultivo	m ³ ·ha ⁻¹

Relación económica	$\$/\text{m}^3$	Productividad económica del agua utilizada en el sistema agrícola	moneda $\cdot \text{m}^{-3}$
Sistema	CROPWAT	Modelo desarrollado por FAO para estimar requerimientos hídricos y programación de riego	—
Base de datos	CLIMWAT	Base climática utilizada como insumo para el modelo CROPWAT	—
Enfoque	Agro 4.0	Uso de tecnologías digitales para optimizar procesos productivos agrícolas	—
Institución	FAO	Organización internacional especializada en agricultura y alimentación	—
Institución	CONAGUA	Autoridad nacional encargada de la gestión del agua en México	—
Institución	SIAP	Sistema de información estadística agroalimentaria de México	—
Enfoque	SIG	Herramientas de análisis espacial para representación territorial	—

Anexo 2

Parámetros agroclimáticos, edáficos y coeficientes de cultivo (Kc) que se emplean para calcular la huella hídrica azul y la evapotranspiración en cultivos de bayas en localidades del Bajío de Michoacán

Fruto	Municipio	Siembra / establecimiento	Duración total (d)	Ini (d)	Dev (d)	Mid (d)	Fin (d)	Altura (m)	Prof. radical (m)	p (p)	Ky	Kc ini	Kc dev	Kc mid	Kc end	Tipo de suelo dominante y características edáficas	Cosecha principal
Fresa	Zamora	Ago-sep	150	20	30	60	40	0.20-0.35	0.30-0.40	0.30-0.40	0.8-1.2	0.15-0.20	0.40-0.70	0.80-1.05	0.70-0.90	Vertisol-Phaeozem . CC: 40-50%; PMP: 20-25%; HAD: 20-25%; Ksat: 0.2-0.6 in/hr (120-360 mm/d). Vertisol arcilloso expansible, alta retención, Phaeozem fértil, buen MO	Nov-jun
Fresa	Jacona	Ago-sep	150	20	30	60	40	0.20-0.35	0.30-0.40	0.30-0.40	0.8-1.2	0.15-0.20	0.40-0.70	0.80-1.05	0.70-0.90	Vertisol dominante . CC: 42-52%; PMP: 22-27%; HAD: 20-25%; Ksat: 0.15-0.5 in/hr (90-300 mm/d). Riesgo de compactación y drenaje lento.	Nov-jun
Fresa	Tangancicuaro	Ago-sep	150	20	30	60	40	0.20-0.35	0.30-0.40	0.30-0.40	0.8-1.2	0.15-0.20	0.40-0.70	0.80-1.05	0.70-0.90	Andosol-Luvisol . CC: 50-65%; PMP: 25-30%; HAD: 25-35%; Ksat: 1.0-3.0 in/hr (600-1800 mm/d). Suelo volcánico, alta porosidad y drenaje.	Nov-jun
Fresa	Los Reyes	Ago-sep	150	20	30	60	40	0.20-0.35	0.30-0.40	0.30-0.40	0.8-1.2	0.15-0.20	0.40-0.70	0.80-1.05	0.70-0.90	Andosol-Cambisol . CC: 48-62%; PMP: 24-30%; HAD: 24-32%; Ksat: 0.8-2.5 in/hr (480-1500 mm/d). Buen drenaje, origen volcánico.	Nov-jun
Arándano	Zamora	Oto-inv	200	30	40	90	40	1.2-2.0	0.40-0.60	0.40-0.50	1	0.2	0.50-0.80	0.90-1.10	0.70-0.90	Phaeozem-Vertisol (manejado) . CC: 38-48%; PMP: 20-25%; HAD: 18-23%; Ksat: 0.3-0.8 in/hr (180-480 mm/d). Requiere ajuste de pH y drenaje.	Mar-jun
Arándano	Jacona	Oto-inv	200	30	40	90	40	1.2-2.0	0.40-0.60	0.40-0.50	1	0.2	0.50-0.80	0.90-1.10	0.70-0.90	Vertisol . CC: 42-52%; PMP: 22-27%; HAD: 20-25%; Ksat: 0.2-0.6 in/hr (120-360 mm/d). Necesario drenaje y sustrato.	Mar-jun
Arándano	Tangancicuaro	Oto-inv	200	30	40	90	40	1.2-2.0	0.40-0.60	0.40-0.50	1	0.2	0.50-0.80	0.90-1.10	0.70-0.90	Andosol . CC: 55-65%; PMP: 25-30%; HAD: 30-35%; Ksat: 1.5-3.5 in/hr (900-2100 mm/d). Excelente aireación.	Mar-jun
Arándano	Los Reyes	Oto-inv	200	30	40	90	40	1.2-2.0	0.40-0.60	0.40-0.50	1	0.2	0.50-0.80	0.90-1.10	0.70-0.90	Andosol-Cambisol . CC: 50-62%; PMP: 25-30%; HAD: 25-32%; Ksat: 1.0-3.0 in/hr (600-1800 mm/d).	Mar-jun
Frambuesa	Zamora	Prim-ver	180	30	40	80	30	1.2-2.0	0.60-1.00	0.45-0.55	1	0.2	0.50-0.80	0.90-1.10	0.70-0.90	Vertisol-Phaeozem . CC: 40-50%; PMP: 20-25%; HAD: 20-25%; Ksat: 0.3-0.8 in/hr (180-480 mm/d).	Oct-abr
Frambuesa	Jacona	Prim-ver	180	30	40	80	30	1.2-2.0	0.60-1.00	0.45-0.55	1	0.2	0.50-0.80	0.90-1.10	0.70-0.90	Vertisol . CC: 42-52%; PMP: 22-27%; HAD: 20-25%; Ksat: 0.2-0.6 in/hr (120-360 mm/d).	Oct-abr
Frambuesa	Tangancicuaro	Prim-ver	180	30	40	80	30	1.2-2.0	0.60-1.00	0.45-0.55	1	0.2	0.50-0.80	0.90-1.10	0.70-0.90	Andosol-Luvisol . CC: 50-65%; PMP: 25-30%; HAD: 25-35%; Ksat: 1.0-3.0 in/hr (600-1800 mm/d).	Oct-abr
Frambuesa	Los Reyes	Prim-ver	180	30	40	80	30	1.2-2.0	0.60-1.00	0.45-0.55	1	0.2	0.50-0.80	0.90-1.10	0.70-0.90	Andosol . CC: 55-65%; PMP: 25-30%; HAD: 30-35%; Ksat: 1.5-3.5 in/hr (900-2100 mm/d).	Oct-abr
Zarzamora	Zamora	Inv-prim	210	30	50	90	40	1.5-3.0	0.80-1.20	0.45-0.60	1	0.25	0.50-0.80	0.85-1.05	0.70-0.90	Vertisol-Phaeozem . CC: 40-50%; PMP: 20-25%; HAD: 20-25%; Ksat: 0.3-0.8 in/hr (180-480 mm/d).	Oct-may
Zarzamora	Jacona	Inv-prim	210	30	50	90	40	1.5-3.0	0.80-1.20	0.45-0.60	1	0.25	0.50-0.80	0.85-1.05	0.70-0.90	Vertisol . CC: 42-52%; PMP: 22-27%; HAD: 20-25%; Ksat: 0.2-0.6 in/hr (120-360 mm/d).	Oct-may
Zarzamora	Tangancicuaro	Inv-prim	210	30	50	90	40	1.5-3.0	0.80-1.20	0.45-0.60	1	0.25	0.50-0.80	0.85-1.05	0.70-0.90	Andosol . CC: 55-65%; PMP: 25-30%; HAD: 30-35%; Ksat: 1.5-3.5 in/hr (900-2100 mm/d).	Oct-may
Zarzamora	Los Reyes	Inv-prim	210	30	50	90	40	1.5-3.0	0.80-1.20	0.45-0.60	1	0.25	0.50-0.80	0.85-1.05	0.70-0.90	Andosol volcánico . CC: 55-65%; PMP: 25-30%; HAD: 30-35%; Ksat: 1.5-4.0 in/hr (900-2400 mm/d).	Oct-may

Ana Rosa Rangel Argueta

Huella Hídrica Azul y Sustentabilidad en la Agroindustria de Exportación en la Región Bajío, Michoacán.pdf

 Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

Detalles del documento

Identificador de la entrega
trn:oid:::3117:579760183

Fecha de entrega
17 abr 2026, 8:33 a.m. GMT-6

Fecha de descarga
17 abr 2026, 8:40 a.m. GMT-6

Nombre del archivo
Huella Hídrica Azul y Sustentabilidad en la Agroindustria de Exportación en la Región Bajío, Mich....pdf

Tamaño del archivo
5.8 MB

214 páginas

63.686 palabras

383.421 caracteres

8% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- Texto citado
- Texto mencionado
- Coincidencias menores (menos de 10 palabras)

Fuentes principales

- 7% Fuentes de Internet
- 4% Publicaciones
- 0% Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alerta de integridad para revisión

- Texto oculto

50 caracteres sospechosos en N.º de página

El texto es alterado para mezclarse con el fondo blanco del documento.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

Formato de Declaración de Originalidad y Uso de Inteligencia Artificial

Coordinación General de Estudios de Posgrado
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



A quien corresponda,

Por este medio, quien abajo firma, bajo protesta de decir verdad, declara lo siguiente:

• Que presenta para revisión de originalidad el manuscrito cuyos detalles se especifican abajo. • Que todas las fuentes consultadas para la elaboración del manuscrito están debidamente identificadas dentro del cuerpo del texto, e incluidas en la lista de referencias. • Que, en caso de haber usado un sistema de inteligencia artificial, en cualquier etapa del desarrollo de su trabajo, lo ha especificado en la tabla que se encuentra en este documento. • Que conoce la normativa de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, en particular los Incisos IX y XII del artículo 85, y los artículos 88 y 101 del Estatuto Universitario de la UMSNH, además del transitorio tercero del Reglamento General para los Estudios de Posgrado de la UMSNH.

Datos del manuscrito que se presenta a revisión		
Programa educativo	Doctorado en Desarrollo y Sustentabilidad (DODESU), Posgrado de la facultad de Economía “Vasco de Quiroga”, UMSNH	
Título del trabajo	Huella hídrica azul y Sustentabilidad en la agroindustria de exportación en la región Bajío, Michoacán	
	Nombre	Correo electrónico
Autor/es	Ana Rosa Rangel Argueta	0553045f@umich.mx
Director	Dr. Hugo Amador Herrera Torres	hugo.herrera@umich.mx
Codirector	Dra. Erandi Maldonado Villalpando	0323656e@umich.mx
Coordinador del programa	Dr. Juan Carlos Hidalgo Sanjurjo	juan.hidalgo@umich.mx

Uso de Inteligencia Artificial

Rubro	Uso (sí/no)	Descripción
Asistencia en la redacción	No	

Formato de Declaración de Originalidad y Uso de Inteligencia Artificial

Coordinación General de Estudios de Posgrado
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



Uso de Inteligencia Artificial

Rubro	Uso (sí/no)	Descripción
Traducción al español	No	
Traducción a otra lengua	No	
Revisión y corrección de estilo	No	
Análisis de datos	No	
Búsqueda y organización de información	No	
Formateo de las referencias bibliográficas	No	
Generación de contenido multimedia	Si	Para crear imágenes en algunos capítulos y diagramas de flujo.
Otro	No	

Datos del solicitante	
Nombre y firma	Ana Rosa Rangel Argueta
Lugar y fecha	Morelia, Michoacán a 15 de abril del 2026