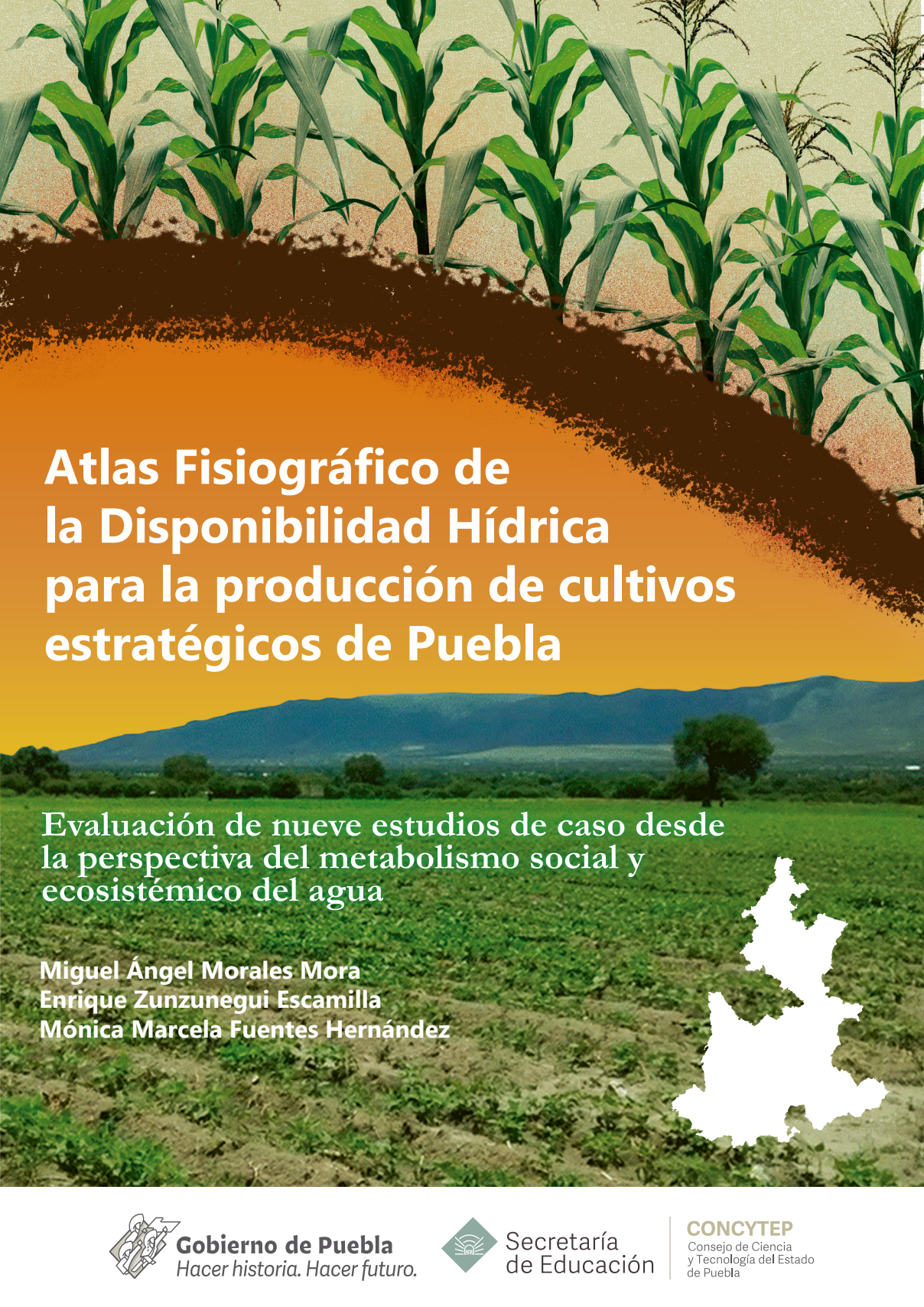




Atlas Fisiográfico de la Disponibilidad Hídrica para la producción de cultivos estratégicos de Puebla

Evaluación de nueve estudios de caso desde
la perspectiva del metabolismo social y
ecosistémico del agua

Miguel Ángel Morales Mora
Enrique Zunzunegui Escamilla
Mónica Marcela Fuentes Hernández



Gobierno de Puebla
Hacer historia. Hacer futuro.



**Secretaría
de Educación**

CONCYTEP
Consejo de Ciencia
y Tecnología del Estado
de Puebla

Atlas Fisiográfico de la Disponibilidad Hídrica para la producción de cultivos estratégicos de Puebla

**Evaluación de nueve estudios de caso desde
la perspectiva del metabolismo social y
ecosistémico del agua**

Atlas Fisiográfico de la Disponibilidad Hídrica para la producción de cultivos estratégicos de Puebla

**Evaluación de nueve estudios de caso desde
la perspectiva del metabolismo social y
ecosistémico del agua**

**Miguel Ángel Morales Mora
Enrique Zunzunegui Escamilla
Mónica Marcela Fuentes Hernández**

Miguel Barbosa Huerta

GOBERNADOR CONSTITUCIONAL DEL ESTADO DE PUEBLA

María Del Rosario Orozco Caballero

PRESIDENTA DEL SISTEMA ESTATAL PARA EL DESARROLLO
INTEGRAL DE LA FAMILIA

Ana Lucía Hill Mayoral

SECRETARIA DE GOBERNACIÓN DEL ESTADO DE PUEBLA

Melitón Lozano Pérez

SECRETARIO DE EDUCACIÓN DEL ESTADO DE PUEBLA

Sergio Salomón Céspedes Peregrina

PRESIDENTE DE LA JUNTA DE GOBIERNO Y COORDINACIÓN
POLÍTICA DEL H. CONGRESO DEL ESTADO LIBRE Y SOBERANO
DE PUEBLA

Héctor Sánchez Sánchez

PRESIDENTE DEL TRIBUNAL SUPERIOR DE JUSTICIA DEL
ESTADO DE PUEBLA

Victoriano Gabriel Covarrubias Salvatori

DIRECTOR GENERAL DEL CONSEJO DE CIENCIA Y
TECNOLOGÍA DEL ESTADO DE PUEBLA

Karla Rodríguez Rosas

DISEÑADORA EDITORIAL Y DE PORTADA

Eva Angélica García Treviño

REVISORA DE ESTILO

Lorenia Polet Domínguez Martínez

REVISORA DE ESTILO

ISBN: 978-607-8839-55-1

México, 2022

Publicado por el Consejo de Ciencia y Tecnología del Estado
de Puebla (CONCYTEP) B Poniente de la 16 de Sept. 4511, Col.
Huexotitla, 72534. Puebla, Pue.

La información contenida en este documento puede ser
reproducida total o parcialmente por cualquier medio, indicando
los créditos y las fuentes de origen respectivas.



Contenido

Presentación	i
Introducción	1
I.Los recursos hídricos y el contexto de la agricultura poblana en el entorno nacional	3
I.1. Los recursos hídricos	4
I.1.1. Las cuencas hidrográficas del estado de Puebla	6
I.1.2. Los acuíferos del estado de Puebla	13
I.2.La agricultura poblana en el contexto nacional	15
II.El enfoque del Metabolismo Social del Agua como diagnóstico y para la construcción de escenarios a los problemas de disponibilidad y contaminación	17
II.1. Marco conceptual del metabolismo del agua.....	18
II.2. El enfoque del metabolismo del agua en la producción de alimentos	22
III.Resultados de la disponibilidad hídrica para la producción de cultivos estratégicos de Puebla	27
III.1.1. Agave	31
III.1.2. Aguacate.....	38
III.1.3. Berries	46
III.1.4. Café	52
III.1.5. Higo	62
III.1.6. Maíces Nativos	68
III.1.7. Pitaya-Pitahaya.....	76
III.1.8. Plátano-Cítricos.....	85
III.1.9. Vainilla	92





Conclusiones y recomendaciones.....	99
IV.1. Conclusiones.....	99
IV.2. Recomendaciones	102
 Agradecimientos	 103
 Referencias bibliográficas	 104



Presentación

La Secretaría de Desarrollo Rural del Gobierno del Estado de Puebla (SDR) diseñó una estrategia de acompañamiento técnico, monitoreo y seguimiento de programas 2021 a trece cadenas productivas agropecuarias, focalizadas en ***Polos de Desarrollo***, para potencializar su crecimiento a través del acceso a capacitación, asistencia técnica, financiamiento y comercialización, entre otras acciones. La SDR en coordinación con el Consejo de Ciencia y Tecnología del Estado de Puebla (CONCYTEP), convocaron a académicos e investigadores para realizar proyectos de investigación en diversas líneas de interés y vincular estos nuevos saberes y conocimientos con los que tradicionalmente han adquirido los productores del campo.

Uno de esos proyectos se presenta en este **Atlas Fisiográfico**, realizado en el marco del Convenio de Apoyo 267/2021, celebrado en septiembre de 2021 con el CONCYTEP, con el objetivo de evaluar la disponibilidad de los recursos hídricos y sus efectos en la producción agrícola de nueve de las nueve cadenas productivas: (i) agave, (ii) aguacate, (iii) berries, (iv) café, (v) higo, (vi) maíces nativos, (vii) pitaya-pitahaya, (viii) plátano-cítricos, y (ix) vainilla.

En este libro se presenta los resultados de la aplicación del enfoque del **Análisis Integrado Multiescala del Metabolismo Social y Ecosistémico** (MuSIASEM, por sus siglas en inglés) para evaluar la **disponibilidad hídrica para nueve estudios de caso** de las cadenas productivas agrícolas prioritarias en 154 municipios sembradas en 276,966 ha. De esta superficie, 35,566 ha (12.8%) presentan un **Índice de Estrés Hídrico Relativo (IEHR) Alto**; 29,364 (10.6%) **Medio**; 113,752 (41.1%) **Moderado**; y 98,284 ha (35.5%) **Bajo**.

Los 56 municipios con un **IEHR Bajo** no experimentan presiones sobre el recurso hídrico, incluso, es posible incrementar la productividad agrícola si se modifican algunas variables, como el aumento en la densidad de población de plantas.



En 62 municipios con **IEHR Moderado**, la disponibilidad de agua puede convertirse, en el medio plazo, en un limitante de desarrollo. De manera preventiva, es necesario capacitar a los productores en la gestión adecuada del recurso hídrico.

La oferta hídrica en los 12 municipios con **IEHR Medio**, está llegando al límite máximo para atender la demanda de los cultivos. En el corto plazo existe un alto riesgo de convertirse en un factor que afecte significativamente los ingresos de los campesinos.

En 24 municipios que resultaron con **IEHR Alto** la oferta hídrica es ya insuficiente para atender la demanda de agua para la producción de alimentos. Se requieren inversiones inmediatas en obras de captación y almacenamiento de lluvia para garantizar la continuidad de la actividad productiva.

En cuanto a la eficiencia metabólica, el café presenta una calificación cualitativa Muy Baja, los maíces nativos Baja, plátano-cítricos Media, y agave, aguacate, berries e higo Alta.



Introducción

La realización de esta investigación responde al riesgo que existe en la viabilidad de las actividades agrícolas, debido a que, por un lado, la precipitación pluvial es cada vez más errática, y por otro, la totalidad del agua superficial presenta diversos grados de contaminación que restringe su uso en la siembra y cultivo de productos que se consumen en crudo, y cuya rentabilidad es menor que aquellos regados con agua *dulce*, afectando la economía de los productores. Por ejemplo: en la región del Distrito de Riego Valsequillo en Tecamachalco y la zona cañera de la Mixteca Poblana, sus fuentes de abastecimiento -los ríos Atoyac y Zahuapan- están clasificados como fuertemente contaminadas (SINA, 2021).

Adicionalmente, la extracción de agua subterránea afecta la disponibilidad de los acuíferos de la entidad, a tal grado que el de Valle de Tecamachalco presente un déficit que rebasa los 63,000,000 m³/año y esté considerado dentro de los más sobreexplotados del país (SINA, 2021a).

La evaluación de la disponibilidad hídrica parte del supuesto de que para producir alimentos el insumo más importante es el agua. Entre los alimentos y el agua existen interconexiones, en las que, la gestión de cada uno de ellos no puede considerarse de forma aislada, sino como parte de un sistema integrado. Estas interconexiones ocurren a diferentes niveles y escalas, y entre procesos sociales, económicos y ambientales. El desafío para establecer los mecanismos del nexo agua-alimentos requiere de una visión desde la complejidad del sistema natural y social como es el enfoque del **Análisis Integrado Multiescala del Metabolismo Social y Ecosistémico** (MuSIASEM), aplicado en este trabajo bajo la siguiente perspectiva de análisis:

Problematizar la relación entre la producción de nueve cultivos estratégicos focalizados en Polos de Desarrollo regionales, y la

disponibilidad y apropiación de tres fuentes de abastecimiento: (i) precipitación local, (ii) agua de riego extraída de cuerpos acuático y, (iii) agua de acuíferos renovable y no renovable.

El proyecto se centró en tres objetivos:

- Diagnosticar la disponibilidad de agua y su interacción con las zonas de cultivos prioritarios y las fuentes de abastecimiento (acuíferos).
- Identificar actuales y futuras restricciones de disponibilidad de agua que pudieran competir con el uso humano y acuíferos sobreexplotados.
- Expresar los hallazgos usando indicadores metabólicos.

El alcance del estudio sólo consideró el agua de primer uso como insumo para la producción de los cultivos. No cubre otras variables de entrada y salida, ni el análisis del impacto social o ambiental que pudiera generarse en los casos donde se registra déficit o estrés hídrico. Este documento proporciona un informe de los resultados finales y está organizado en cuatro secciones:

La sección I muestra la disponibilidad de recursos hídricos de Puebla, tanto superficiales (cuencas hidrográficas) como subterráneos (acuíferos), así como el contexto de la agricultura poblana en el entorno nacional; la sección II se refiere a cómo el enfoque del MuSIASEM contribuye a generar soluciones concretas y medibles a los problemas de disponibilidad y contaminación del agua; en la sección III se presentan los resultados de la evaluación de la disponibilidad hídrica para la producción agrícola de nueve cultivos prioritarios para Puebla; y finalmente, la sección IV incluye las conclusiones y plantea recomendaciones de política pública.



I. Los recursos hídricos y el contexto de la agricultura poblana en el entorno nacional



1.1. LOS RECURSOS HÍDRICOS

En esta sección se consideran los recursos hídricos disponibles, superficiales y subterráneos, y los volúmenes concesionados por la Comisión Nacional del Agua. El volumen total de agua concesionado es de 7,400,633,271 m³/año, correspondiendo el 87.32 % (6,462,342,892 m³/año) a agua superficial y el 12.68 % (938,290,379 m³/año) a agua subterránea.

Para uso agrícola - con el que se riegan 145,000 ha - se destina un volumen de 1,482,541,686 m³/año (19.43 %), del cual, 881,045,840 m³/año (59.4 %) la fuente de suministro es superficial y 601,495,846 m³/año (40.6 %) se extrae de agua subterránea (REPDA, 2021 y SIAP, 2021). La distribución de agua concesionada por uso y uso consuntivo se muestra en la Tabla 1 y Figura 1.

Uso	Agua superficial		Agua subterránea		Total	
	Volumen	Fracción	Volumen	Fracción	Volumen	Fracción
Acuicultura	88,225,452	1.37%	77,570	0.01%	88,303,022	1.16%
Agrícola	881,045,840	13.63%	601,495,846	64.11%	1,482,541,686	19.43%
Diferentes usos	25,505,926	0.39%	14,455,564	1.54%	39,961,490	0.52%
Doméstico	469,650	0.01%	47,847	0.01%	517,497	0.01%
Generación de energía eléctrica	4,887,578,888	75.63%	0	0.00%	4,887,578,888	64.06%
Industrial	371,371,286	5.75%	49,470,409	5.27%	420,841,695	5.52%
Pecuario	479,087	0.01%	5,823,977	0.62%	6,303,064	0.08%
Público urbano	179,515,245	2.78%	257,753,204	27.47%	437,268,449	5.73%
Servicios	28,151,518	0.44%	9,165,962	0.98%	37,317,480	0.49%
sumas	6,462,342,892	100.00%	938,290,379	100.00%	7,400,633,271	96.99%

**Tabla 1: Volumen de agua concesionado (m³/año)
por tipo de uso, 2021.**

Fuente: REPDA 2021



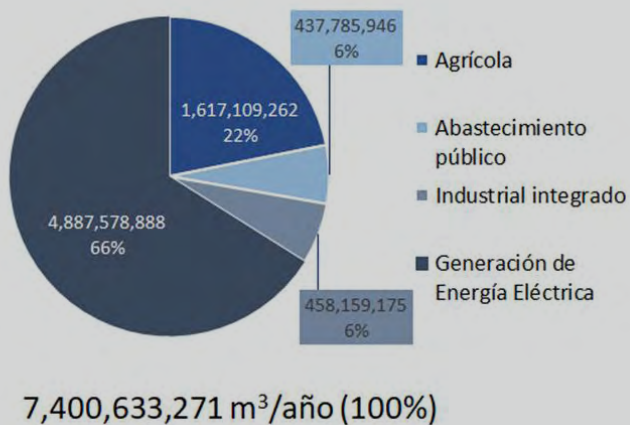
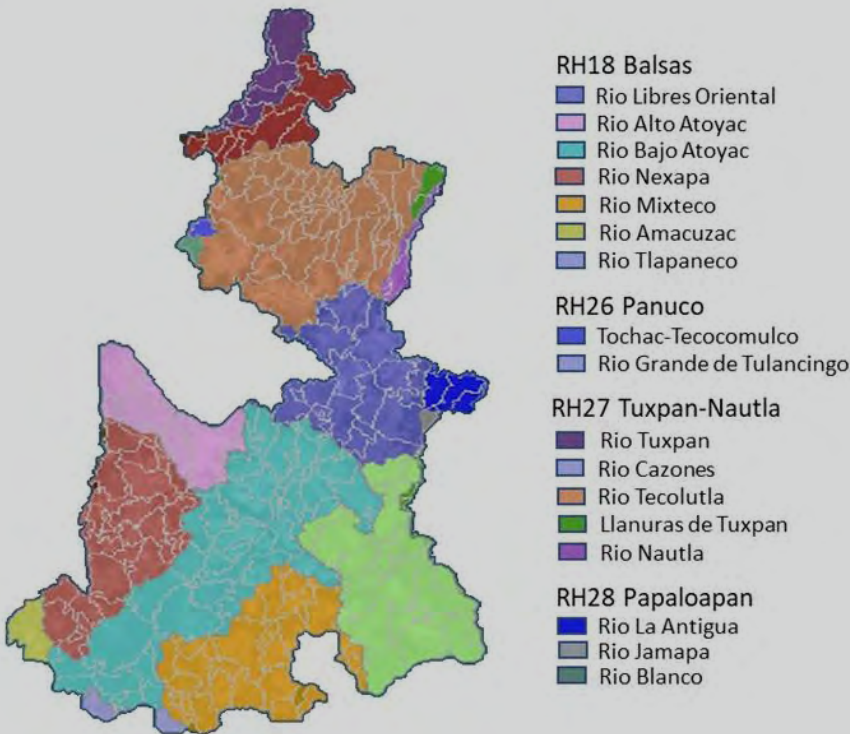


Figura 1: Volumen de agua subterránea (m³/año) concesionada por tipo de uso, 2021.

Fuente: elaboración propia con información de REPDA, 2021

I.1.1. Las cuencas hidrográficas del estado de Puebla

De acuerdo con el INEGI (2000) y SIGA (2021), el estado forma parte de cuatro grandes regiones hidrológicas: RH18 Río Balsas; RH27 Ríos Tuxpan-Nautla; RH28 Río Papaloapan y la RH26 Río Pánuco. Los Ws 1, y 2 muestran las cuencas que integran cada una de las regiones y la distribución de la precipitación.



Mapa 1: Cuencas en el estado de Puebla, por Región Hidrológica

Fuente: Elaboración propia con información de SIGA, 2021



Cuenca (18A) Río Atoyac

Constituye la porción oriental de la región, incluye a la mayor parte de las zonas centro, oeste y suroeste de la entidad, que representan 57.23 % (19,365 km²) de la superficie del estado; se genera anualmente un escurrimiento aproximado de 1,291 Mm³. Incluye a las subcuencas: Río Atoyac-Tehuiztzingo; Atoyac-Balcón del Diablo; Presa Miguel Ávila Camacho; Atoyac-San Martín Texmelucan; Río Nexapa; Río Mixteco; Río Acatlán; Laguna de Totolcingo y Alceseca. Dentro de la cuenca se encuentra el río Atoyac, la corriente más importante del estado. Los valores de temperatura y precipitación media anual en el sur y suroeste de la cuenca son de 20 a 24° C y 700 a 800 mm, respectivamente. En las partes bajas de la sierra Nevada, en el área de San Martín Texmelucan y la ciudad de Puebla, la precipitación oscila entre 1,000 y 1,200 mm con una temperatura media anual de 16° C. Hacia las planicies de Oriental la temperatura media es de aproximadamente 14°C y la precipitación va desde 300 mm en las depresiones lagunares, hasta 800 mm en los bordes de las sierras circundantes.

CUENCA (18B) R. BALSAS-MEZCALA

Localizada en el extremo suroeste de la entidad, cubre apenas 0.04 % (13 km²) de la superficie estatal; sus características no son representativas para el estado.

CUENCA (18E) Río TLAPANECO

Se encuentra hacia el extremo sursuroeste del estado; tiene una superficie de 288 km² (0.84 % de la superficie estatal) en los municipios de Ixcamilpa de Guerrero, Albino Zertuche y Tulcingo. La escasa aportación pluvial de esta área pasa a formar parte del escurrimiento del río Tlapaneco, que se integra al Mezcala, en los límites del estado de Guerrero. Los valores de precipitación y temperatura media anual son de 800 mm y 24°C, respectivamente.



CUENCA (18F) Río GRANDE DE AMACUZAC

Ocupa una pequeña porción del extremo suroeste de la entidad; tan sólo 1.03 % (353 km²) de la superficie estatal, en los municipios de Jolalpan y Teotlalco. Los arroyos que se generan en esta área se incorporan al cauce del río Amacuzac, en el estado de Morelos, que posteriormente se une al río Mezcala. La temperatura media anual es de 26°C hacia las partes bajas de los valles, y de 22°C en las zonas más altas. La precipitación media anual en la cuenca es de 900 mm, y se tiene un rango de escurrimiento general de 10 a 20 %.

Región Hidrológica (RH-27) Tuxpan-Nautla

Se extiende en la Planicie Costera del Golfo Norte y parte de la vertiente este de la Sierra Madre Oriental; ocupa casi todo el lado norte del estado de Puebla, cubre una superficie de 8,426 km² (24.56 % de la entidad). En la entidad está representada por las cuencas Río Nautla; Río Tecolutla; Río Cazonas y Río Tuxpan.

Esta zona es la más lluviosa del estado; se registran precipitaciones de lluvia que van de 1,500 a 3,000 mm al año; en el área de Cuetzalan se tienen medias anuales de más de 4,000 mm. La temperatura media anual, oscila desde 14°C en las partes más altas de la sierra, hasta 24°C en los dominios de la planicie costera. El coeficiente de escurrimiento alcanza en general, valores altos, dadas las abruptas pendientes y la creciente deforestación; fluctúa de 10 a más de 30 % para la mayor parte de la región.

CUENCA (27A) Río NAUTLA

Esta cuenca ocupa tan sólo una estrecha franja del borde noreste del estado, aproximadamente 0.8 % de superficie (274 km²); se encuentra separada de la cuenca adyacente del río Tecolutla por un parteaguas que sigue una línea que forman los poblados de San José Acateno-Hueytamalco-Teziutlán-Perote. La conforman en la entidad las subcuencas: Arroyo Soltero; Río María de la Torre; y Río Bobos.

CUENCA (27B) Río TECOLUTLA

Abarca la mayor parte de la sierra Norte de Puebla; se extiende desde el límite sur de la región hidrológica, hasta la altura de las localidades de Zihuateutla, Xicotepec de Juárez y Huauchinango y ocupa una superficie en el estado de 5,990 km² (17.46 % de la entidad), aproximadamente. Las corrientes derivadas de esta zona confluyen para formar el caudaloso río Tecolutla en Veracruz. Estas corrientes y sus áreas de captación pluvial, constituyen las subcuencas: Río Tecolutla; Río Necaxa; Río Laxaxalpan; Río Tehuantepec; Río Apulco; y Río Joloapan.

Esta zona alberga un buen número de embalses de importancia dentro del estado, dada la presencia de abundantes corrientes permanentes. Entre los de mayor capacidad, figuran los siguientes: Los Reyes (Omittepec), La Laguna (Tejocotal), Necaxa, Nexapa, Tenango y La Soledad; todas ellas con una capacidad de almacenamiento superior a los 15 millones de m³ (Mm³). El uso al que se destinan estos embalses es la generación de energía eléctrica.

El rango de escurrimiento es variable, aunque en general se estima de 10 al 20 % dadas las fuertes pendientes que predominan en la zona y en las zonas deforestadas llega a ser de más de 30 %.

CUENCA (27C) Río CAZONES

En territorio poblano está representada por dos subcuencas A, Río Cazones y B, Río San Marcos, integradas a su vez, por múltiples escurrimientos menores. La corriente de la última subcuenca nace en la sierra de Puebla, a partir de la unión de los ríos Chila y Naupan. Las dos subcuencas suman cerca de 3.70 % (1,269 km²) del territorio estatal. El rango de escurrimiento en la cuenca es alto y en general, va de 20 a más de 30 %.



CUENCA (270) Río TUXPAN

Localizada en el extremo septentrional de la entidad, cubre 2.6 % de la superficie estatal (892 km²), la constituyen parcialmente en el estado las subcuencas: Río Tuxpan; Río Pantepec y, Río Tecomate. La corriente de mayor importancia es el río Pantepec. En esta zona, los rangos de escurrimiento del terreno varían, predominantemente de 20 a 30 % en las partes bajas de las sierras, y se incrementa a más de 30 % en las porciones más abruptas; solamente en las llanuras de inundación de las principales corrientes, se tienen valores de 5 a 10 %. La altura de lluvia registrada al año oscila de 1,500 a 2,500 mm. El gasto medio de su corriente es alrededor de 101.84 m³/seg, que corresponde a 44 % de los escurrimientos de la entidad.

Región Hidrológica (RH-28) Papaloapan

Dentro del estado abarca la zona sureste y parte del oriente; se extiende hacia el este de la Cuenca de Atoyac; ocupa las zonas de Quimixtlán-Chichiquila, la cañada poblana-oaxaqueña y la sierra Mazateca. Está integrada por las cuencas Río Papaloapan y Río Jamapa, que en conjunto constituyen, aproximadamente, 16.05 % de la superficie total estatal (5,507 km²). El volumen estimado de escurrimiento anual es del orden de 3,116 Mm³, que representa 28 % del escurrimiento virgen del estado.

CUENCA (28A) Río PAPALOAPAN

En territorio poblano esta cuenca ocupa cerca de 14.85 % de la superficie estatal (5,095 km²), y se ubica hacia la zona sureste, que incluye a la región de la Cañada; el valle de Tehuacán y el valle del río Salado, así como las sierras que los enmarcan, entre las que destaca hacia el extremo oriente, la sierra Mazateca. El río Salado constituye el afluente principal del Papaloapan en la porción poblana. La cantidad de lluvia y la temperatura media anual, varía desde 400 mm y 10°C en el valle del Salado, hasta más de 3,500 mm y 24°C, en la subcuenca del

Río Petlapa. El rango de escurrimiento en la cuenca varía de 5 % en las partes más llanas, a 20 % en las sierras; solamente en el extremo sureste, hacia la vertiente oriental de la sierra, se tienen porcentajes mayores a 30 %.

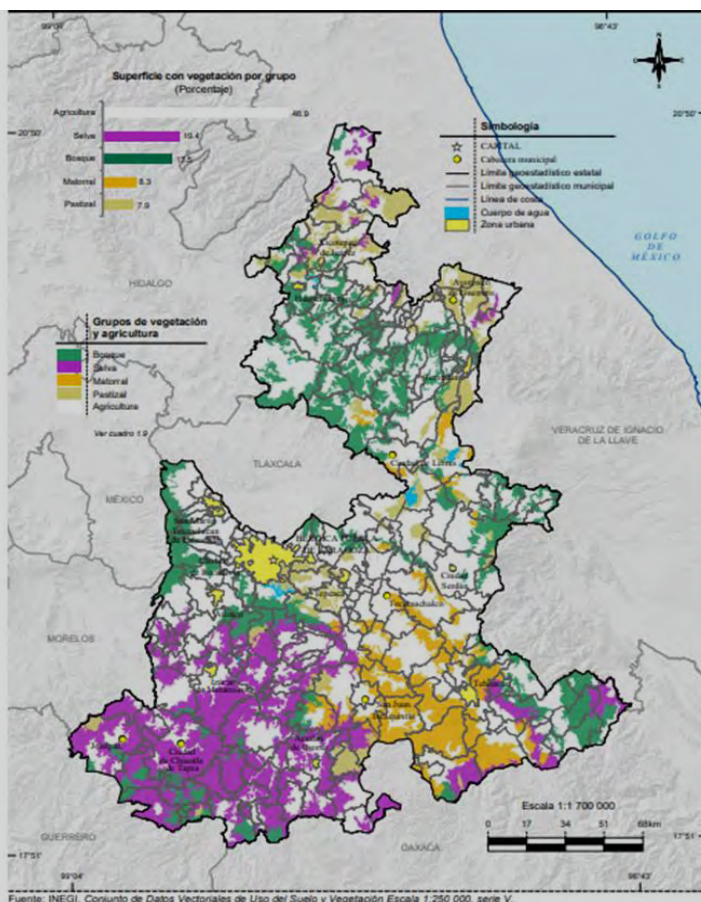
CUENCA (28B) Río JAMAPA

La cuenca comprende una pequeña porción del oriente Poblano, tan sólo 1.20 % (412 km²) del área que ocupa la entidad. En esta zona, destaca el arroyo Chichiquila, que fluye con dirección al este, para unirse aguas abajo al río Santa María en Veracruz, y desembocar finalmente en el Golfo de México. La temperatura media anual en la zona es desde 10 a 12°C en las partes altas, y hasta 18°C, entre 1,500 Y 2,500 m de altitud. La precipitación aumenta de oeste a este, de 1,000 a 2,000 mm. La superficie del terreno presenta coeficientes de escurrimiento moderados a altos, que van de 10 a 30 %.

Se debe mencionar también, que el estado de Puebla abarca una porción muy pequeña de la Región Hidrológica (RH-26) Río Pánuco, representada en la entidad por la cuenca Río Moctezuma, y de la cual existen aquí dos subcuencas Río Metztitlán; y Lago Tucha y Tecocomulco. Estas zonas ocupan una extensión aproximada de 0.25 % de la superficie de la entidad (86 km²), en los municipios de Chignahuapan y Honey, respectivamente. El volumen de agua involucrado en estas áreas es despreciable y no figura dentro de un balance hidrológico estatal.

La superficie potencial agrícola es de 16,091 km² (46.9 %); 6,656 km² (19.4 %) corresponden a Selva; 6,004 km² (17.5 %) a Bosque; 2,848 km² (8.3 %) a Matorral; y 2,710 km² (7.9 %) a Pastizal (INEGI, 2017), como se muestra en el Mapa 3.





Mapa 3: Vegetación y agricultura

Fuente: INEGI, 2017

I.1.2. Los acuíferos del estado de Puebla

En el estado se localizan once acuíferos: (i) Álamo-Tuxpan, (ii) Poza Rica, (iii) Tecolutla, (iv) Acaxochitlán, (v) Libres-Oriental, (vi) Valle de Puebla, (vii) Valle de Tecamachalco, (viii) Atlixco-Izúcar de Matamoros, (ix) Ixcaquixtla, (x) Valle de Tehuacán, y (xi) Tuxtepec. Cinco de los once acuíferos son compartidos con los estados de Hidalgo (1), Oaxaca (1), y Veracruz (3).

La disponibilidad media anual de los once acuíferos es de 153,519,078 m³/año (Figura 2). El acuífero Valle de Tecamachalco presenta un déficit que rebasa los 63,000,000 m³/año y está considerado dentro de los más sobreexplotados del país. Adicionalmente, en esta región se ubica el Distrito de Riego Valsequillo que se abastece de agua contaminada proveniente de los ríos Atoyac -en el estado de Puebla- y Zahuapan -en el estado de Tlaxcala, que son almacenadas en la Presa Manuel Ávila Camacho (SIGA, 2021).

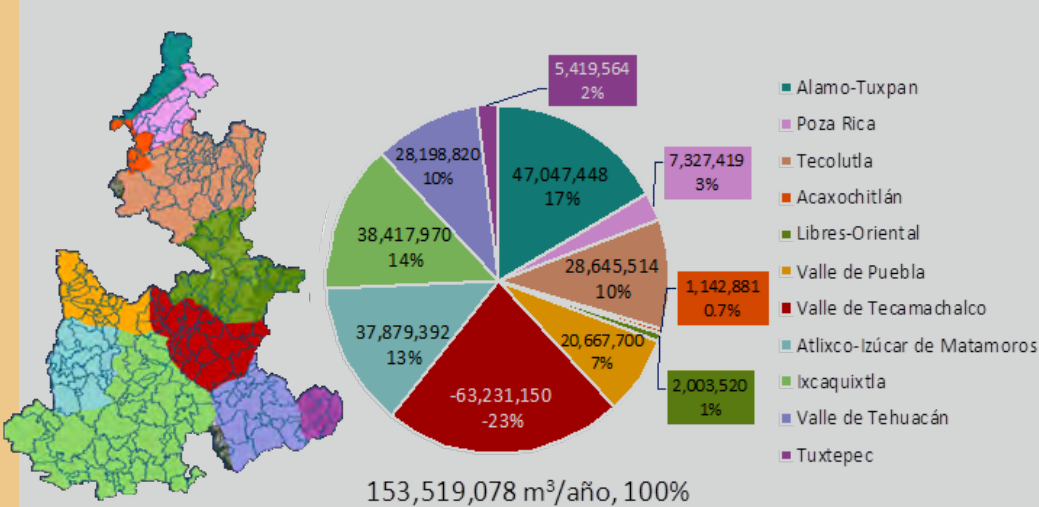


Figura 2: Disponibilidad media anual (m³/año) por acuífero
Fuente SIGA, 2021

1.2.LA AGRICULTURA POBLANA EN EL CONTEXTO NACIONAL

En el año agrícola 2020, la agricultura poblana ocupó el 11° lugar a nivel nacional por superficie sembrada y el 10° lugar por el valor de su producción (Tabla 2 y Figura 3). Sólo 20.2 % de la superficie agrícola cuenta con riego -el promedio nacional es de 30 %-, mientras que el restante 79.8 % depende de un temporal cada vez más errático (SIAP, 2020).

Estado	Superficie (ha)				Valor de producción	
	Sembrada		Cosechada		\$	Fracción
	ha	Fracción	ha	Fracción		
Aguascalientes	135,081	0.7%	134,708	0.8%	3,957,363,572	0.6%
Baja California	142,354	0.8%	139,152	0.8%	14,355,802,585	2.3%
Baja California Sur	36,128	0.2%	31,373	0.2%	5,593,459,485	0.9%
Campeche	311,325	1.7%	306,552	1.8%	5,452,381,233	0.9%
Coahuila	168,962	0.9%	163,577	1.0%	7,610,088,141	1.2%
Colima	88,196	0.5%	87,654	0.5%	7,133,967,850	1.1%
Chiapas	1,233,238	6.8%	1,208,650	7.1%	17,039,012,971	2.7%
Chihuahua	1,006,704	5.6%	731,752	4.3%	41,069,006,396	6.5%
Ciudad de México	14,420	0.1%	14,359	0.1%	1,315,862,680	0.2%
Durango	702,273	3.9%	689,803	4.0%	8,188,708,597	1.3%
Guanajuato	928,862	5.1%	898,789	5.3%	35,560,447,184	5.6%
Guerrero	744,375	4.1%	729,935	4.3%	14,760,758,899	2.3%
Hidalgo	483,623	2.7%	459,534	2.7%	7,689,100,358	1.2%
Jalisco	1,198,759	6.6%	1,120,862	6.6%	71,466,192,673	11.3%
México	710,723	3.9%	671,851	3.9%	20,652,768,642	3.3%
Michoacán	992,553	5.5%	966,542	5.7%	86,667,691,746	13.7%
Morelos	132,179	0.7%	128,022	0.8%	7,919,959,331	1.3%
Nayarit	296,762	1.6%	270,098	1.6%	11,047,063,624	1.8%
Nuevo León	136,618	0.8%	128,433	0.8%	4,922,558,237	0.8%
Oaxaca	879,169	4.9%	839,356	4.9%	15,218,823,715	2.4%
Puebla	864,785	4.8%	848,524	5.0%	17,178,533,094	2.7%
Querétaro	136,518	0.8%	115,227	0.7%	4,858,838,182	0.8%
Quintana Roo	111,377	0.6%	88,258	0.5%	2,344,994,611	0.4%
San Luis Potosí	680,752	3.8%	549,504	3.2%	17,110,312,704	2.7%
Sinaloa	1,067,526	5.9%	1,042,718	6.1%	60,874,496,376	9.6%
Sonora	513,115	2.8%	496,210	2.9%	46,077,033,937	7.3%
Tabasco	223,151	1.2%	209,832	1.2%	6,884,650,313	1.1%
Tamaulipas	1,197,444	6.6%	1,121,870	6.6%	16,982,640,255	2.7%
Tlaxcala	223,745	1.2%	223,127	1.3%	2,859,415,615	0.5%
Veracruz	1,431,162	7.9%	1,393,621	8.2%	45,138,919,914	7.2%
Yucatán	147,903	0.8%	101,751	0.6%	2,283,716,583	0.4%
Zacatecas	1,185,687	6.5%	1,136,843	6.7%	20,718,622,970	3.3%
Total	18,125,470	100.0%	17,048,487	100.0%	630,933,192,472	100.0%

Tabla 2: Estadísticas agrícolas nacionales, 2020

Fuente SIAP, 2021



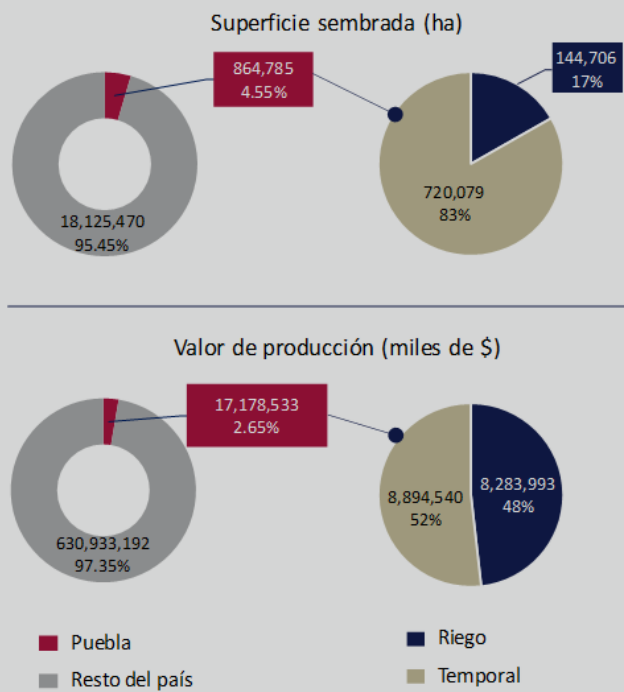


Figura 3: Participación de la agricultura poblana en el ámbito nacional

Fuente: Elaboración propia con información de SIAP, 2021



II. El enfoque del Metabolismo Social del Agua como diagnóstico y para la construcción de escenarios a los problemas de disponibilidad y contaminación



II.1. MARCO CONCEPTUAL DEL METABOLISMO DEL AGUA

En México, la gestión del agua ha sido históricamente orientada con un enfoque o modelo lineal que toma el agua como insumo de los cuerpos de agua, se contabiliza el uso para la sociedad y se desecha al ecosistema. Al mismo tiempo, la gobernabilidad del agua (actuación gubernamental) opera bajo simple función de mercado y organización institucional obsoleta. Asimismo, la gobernanza (que toma en cuenta a la sociedad) introducida en la actual Ley de Aguas Nacionales vigente desde 1992, en el Capítulo V Consejos de Cuenca (CC), en la que participan representantes de los tres niveles de gobierno, los usuarios y ONG's, carecen de autonomía financiera, jurídica y capacidad de decisión.

Lo anterior, porque se parte de la creencia de que el agua es un bien económico y que la escasez que se trata o pérdida de calidad para su gestión, es física, sin tomar en cuenta que es necesario gestionar un bien eco-social, con un enfoque de sustentabilidad (Madrid y Velázquez, 2008).

De acuerdo con el ciclo hidrológico, de cada 100 mililitros de lluvia, el Sistema Ecológico (SE) dispone de una oferta de sólo 27% de agua renovable para mantener las necesidades metabólicas del Sistema Social (SS). En este sentido, el metabolismo social del agua ofrece un marco teórico y metodológico capaz de abordar la complejidad de las relaciones (intercambios de flujos de energía y materiales) entre SE y el SS en términos de la sostenibilidad de un recurso natural como el agua (Figura 4).

En la Figura 4 se observa la conexión del SE (visión externa) con el SS (visión interna) y sus relaciones, a fin de evaluar de forma sistémica la viabilidad del Sistema Socio-Ecológico (SSE). A partir del suministro por el ciclo del agua y recarga en el ecosistema, es posible evaluar la disponibilidad dada por los cuerpos de agua y/o acuíferos,



la cual será apropiada por el SS mediante la extracción para su propio metabolismo interno y como se distribuye y consume en el uso directo (agricultura) y uso final. Es decir, este enfoque permite entender cómo se conecta el metabolismo del ecosistema y la sociedad, y como visualizar si uno u otro se encuentra en estrés o vulnerable, y por el otro, contar con indicadores relevantes: extensivos e intensivos que expliquen el rol del agua para estas dos escalas que permitan su permanencia y resiliencia.

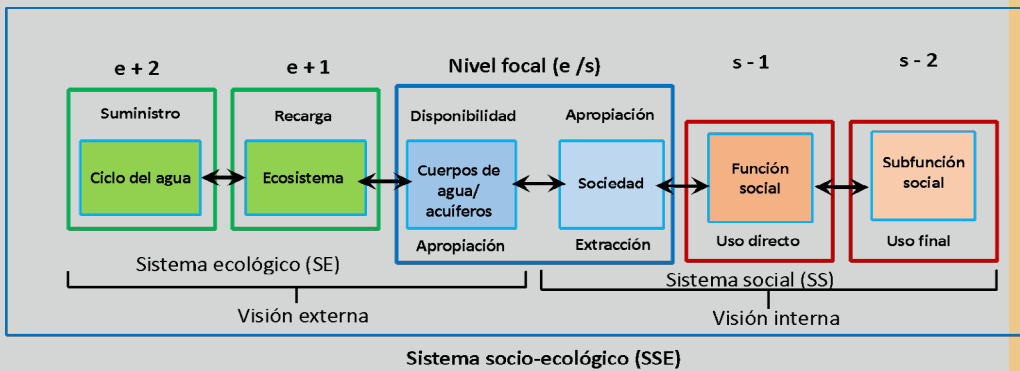


Figura 4: Niveles jerárquicos y sus relaciones en la gramática del agua para el análisis del Sistema Socio-Ecológico

Fuente: Madrid *et al.* (2013)

Por otra parte, la cuenca Río Atoyac en la zona metropolitana Puebla-Tlaxcala (ZMPT) presenta un problema crucial: la contaminación. La ausencia de estudios con enfoque de metabolismo del agua en México, aunado a la deficiencia y/o carencia de tratamiento, así como a las limitaciones de la gobernabilidad, ejemplo: un marco normativo obsoleto, y gobernanza para una gestión integral del agua, ha originado, por un lado, fuertes impactos ambientales hasta alcanzar afectaciones a la salud humana en casi todas las cuencas hidrológicas del país, en donde se combinan múltiples actividades económicas con alto índice demográfico.

La subcuenca del río Atoyac y sus afluentes, la cual forma parte del inicio de la cuenca del río Balsas en la región hidrológica número 18, ha sufrido desde las últimas tres décadas, un marcado deterioro de sus funciones ecológicas a lo largo de su cauce principal originado por las actividades textiles, química, petroquímica, automotriz, papelería, bebidas, hierro y acero, farmacéutica, curtido de pieles, metalmecánica, siderúrgica y servicios.

Desde el punto de vista territorial, la cuenca alta del río Atoyac tiene 4,011 km² (60 % en Puebla), con 22 Municipio en Puebla y 47 en Tlaxcala, haciendo un total de 69 municipios y 3 millones de habitantes. Al respecto, en el 2008 se identificaron un total de 73 descargas industriales (repartidas en 64 industrias); de ellas, 55 descargas (51 industrias) se ubicaron en Puebla y 18 (13 industrias) en Tlaxcala (CONAGUA, 2011; Brabo-Inclán *et al.*, 2015). Esto ha generado fuertes impactos ambientales, y ser considerado uno de los ríos más contaminados de México (García-Nieto *et al.*, 2011; Rodríguez-Espinosa *et al.*, 2014; Martínez-Tavera *et al.*, 2017; Rodríguez-Tapia and Morales-Novelo, 2017).

No se ha prestado la atención suficiente a que el metabolismo del agua y de materiales, se ha modificado drásticamente, y cada vez más por el aumento para la producción de bienes y servicios; principalmente del sector industrial o para la producción de alimentos dentro del SS; que sumado a la falta de tratamiento de las aguas residuales y graves fallas en la normatividad de calidad de agua con la que se desecha así como una gestión insuficiente de autoridades, el nivel de contaminación ha alcanzado a registrar evidencia de daño genotóxico en población humana (Regina Montero *et al.*, 2006) y efectos teratogénicos en biota acuática (Arellano-Aguilar *et al.*, 2015) por los contaminantes vertidos hacia el mismo sistema hídrico. El nivel de daño registrado, ha llegado al nivel de existir una recomendación (Número 10) de la Comisión Nacional de los Derechos Humanos (CNDH, 2017) a la CONAGUA, SEMARNAT, PROFEPA, COFEPRIS y autoridades



Estatales y Municipales, sobre la violación a los derechos humanos a un medio ambiente sano, saneamiento del agua y acceso a la información, en relación con la contaminación de los ríos Atoyac, Xochiac y sus afluentes, la cual señala la urgente necesidad de revertir este deterioro, dando un plazo de un año, el cual venció en marzo del 2018.

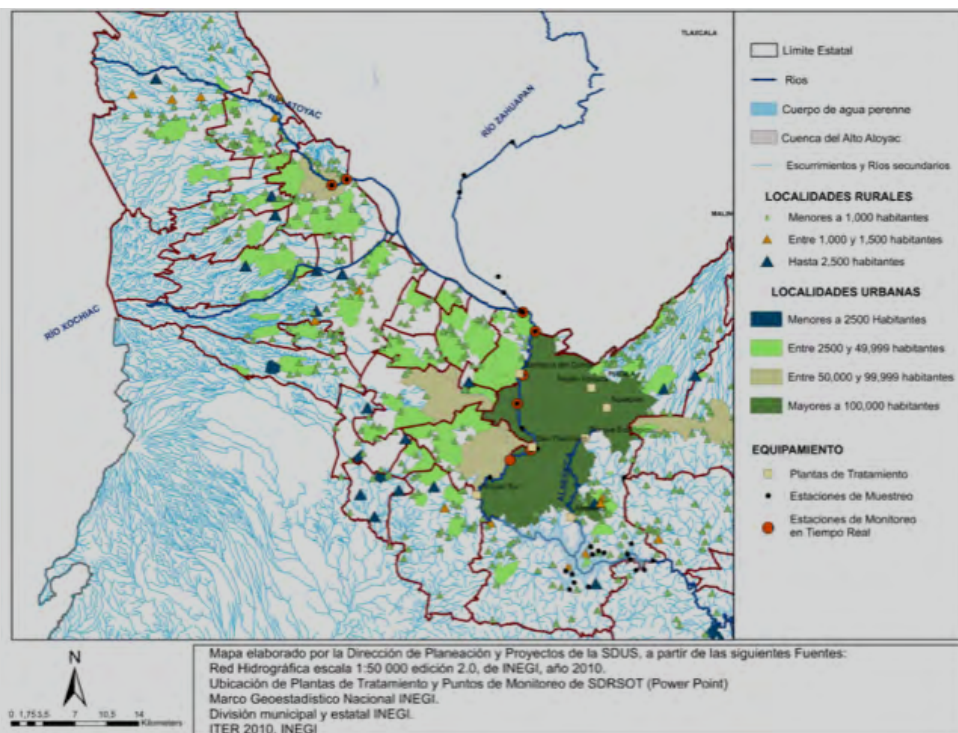


Figura 5: Alto, Medio y Bajo Atoyac, sus afluentes y ZMPT

II.2. EL ENFOQUE DEL METABOLISMO DEL AGUA EN LA PRODUCCIÓN DE ALIMENTOS

En la última década y fuera de México, se han desarrollado nuevos enfoques para abordar la sustentabilidad del agua desde la perspectiva del metabolismo social en España (Madrid y Velásquez, 2008; Cabello-Villarejo and Madrid-López, 2014), y Ecuador (Malo Larrea, 2015) a través del uso del Análisis Multiescala del Metabolismo Social y Ecosistémico (MuSIASEM). El MuSIASEM, permite estudiar de manera física los *flujos* (agua, materiales, energía, alimentos, residuos, etc.) y *fondos* del agua (ríos, arroyos, subsuelo) a diferentes niveles y escalas, que van del SE al sistema socio-ecológico (SSE) (ver Figura 4), y cómo se distribuyen dentro de este último (Giampietro *et al.*, 2003; Giampietro *et al.*, 2009; Giampietro *et al.*, 2014; Madrid-López *et al.*, 2013; Madrid-López y Giampietro, 2014; Madrid-López y Giampietro, 2015). El modelo flujo-fondo de Georgescu Roegen (1971), permite visualizar los roles no equivalentes que cumple el agua tanto en el metabolismo social, como en el metabolismo ecológico, a diferentes escalas y dimensiones. En este contexto, la sustentabilidad del metabolismo del agua en el SSE se refiere al mantenimiento de un conjunto de relaciones entre el ecosistema y la sociedad (Figura 6), en rangos admisibles para su permanencia en el tiempo (Madrid, 2014).



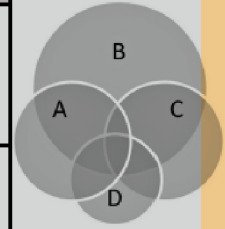
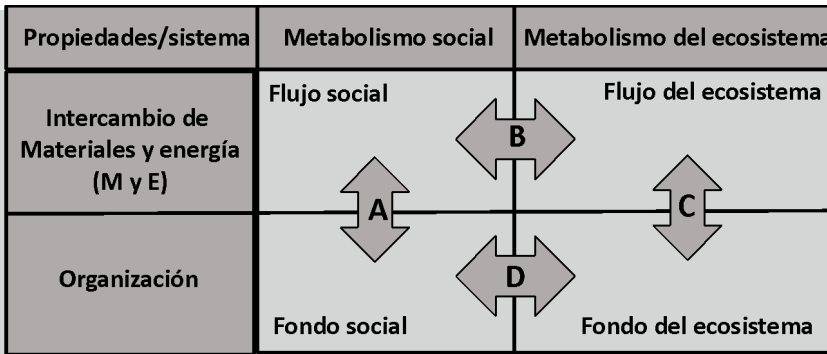


Figura 6: Marco conceptual del metabolismo del agua del SSE y relaciones relevantes (A, B, C, D) del metabolismo social.

Nota: **A:** indica la dependencia del fondo social sobre el intercambio de M y E; **B:** cubre el intercambio de M y E entre la sociedad y el ecosistema; **C:** indica la dependencia de los fondos del ecosistema sobre los flujos de M y E para su propio funcionamiento y reproducción; **D:** se ocupa de la organización estructural de SES y de la existencia de una conexión entre las estructuras y las funciones sociales y del ecosistema (Madrid y Giampietro, 2015).

Así, la discusión sobre la sustentabilidad del agua se establece a través de tres controles o condiciones para el SSE (Cabello, 2015):

-Factibilidad: se refiere a la habilidad de los procesos que están fuera del control humano (visión externa) de estabilizar los fondos (rio, arroyo, acuífero, suelo, etc.) del patrón metabólico del agua; con base a las relaciones de la estructura (relaciones C y D de la fig.6) del ecosistema para el suministro de agua de las necesidades del mismo ecosistema y la organización social. En consecuencia, la Figura 7 muestra la taxonomía de la gramática del agua en su conjunto como proceso conectado, la cual permite entender cómo interactúan los diferentes niveles y escalas el SSE; facilitando medir cada componente y su relación alta o baja a fin de evaluar con indicadores biofísicos la oferta y demanda de agua, así como su rol en cada uno de ellos. El MuSIASEM usa la gramática como representación en lugar de modelos.

-**Viabilidad:** se refiere a la habilidad de los procesos que están bajo el control humano (visión interna) de estabilizar los flujos de agua del patrón metabólico. En este nivel, podemos observar el *comportamiento emergente* de las relaciones entre individuos en niveles más bajos, muchas veces implicando una compensación/solución de compromiso. Este control: relación A y B de la figura 6; se conecta entre la estructura social y demanda de agua por el SS y el suministro de agua por el SE, en el sentido de que el SS depende de la capacidad del ecosistema de suministrar el agua requerida.

-**Pertinencia** es un control cualitativo por parte de los usuarios finales y se relaciona con respecto al desempeño/funcionamiento de los usos del agua en el patrón metabólico. Por ende, un patrón metabólico es conveniente/deseable si los miembros de una sociedad están de acuerdo con el suministro.

Como puede verse, esta gramática no establece relaciones de causa y efecto entre diversos dominios de la representación, sino relaciones que permiten la emergencia de nuevas propiedades por la interacción entre ellos. Esta gramática es multipropósito al identificar flujos (agua, materiales, energía) y fondos (río-arroyos, acuífero, hectáreas de tierra usada u horas de actividad humana) para convertirlas en cocientes de flujo/fondo (indicadores de intensidad o densidad metabólica). Por lo tanto, la relación flujo/fondo permite calcular las tasas metabólicas de uso de un flujo, lo que, a su vez, permite realizar comparaciones entre sistemas que de otra manera serían incomparables, y entre niveles y elementos del mismo sistema, que por definición con cualquier otro indicador serían también incomparables.



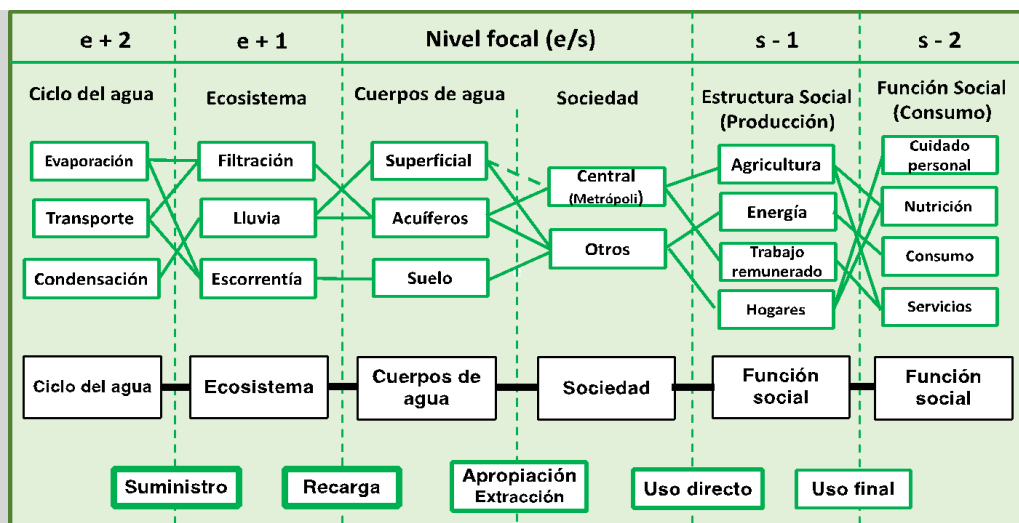


Figura 7: Taxonomía de la gramática del agua para un análisis sistémico entre niveles y componentes del SSE Fuente: Madrid (20159

Por otro lado, se hace necesario nutrir su estructura o marco metodológico del MuSIASEM, incorporando otras herramientas que den apoyo a esta visión holística. De acuerdo a Cabello (2015), la ciencia para la gobernanza del agua ha comenzado a asumir las implicaciones epistemológicas de la complejidad, tales como la existencia de múltiples percepciones sobre la naturaleza, la organización multiescalar de los sistemas vivos o la causalidad circular como el principal tipo de relación que mantiene dicha organización.

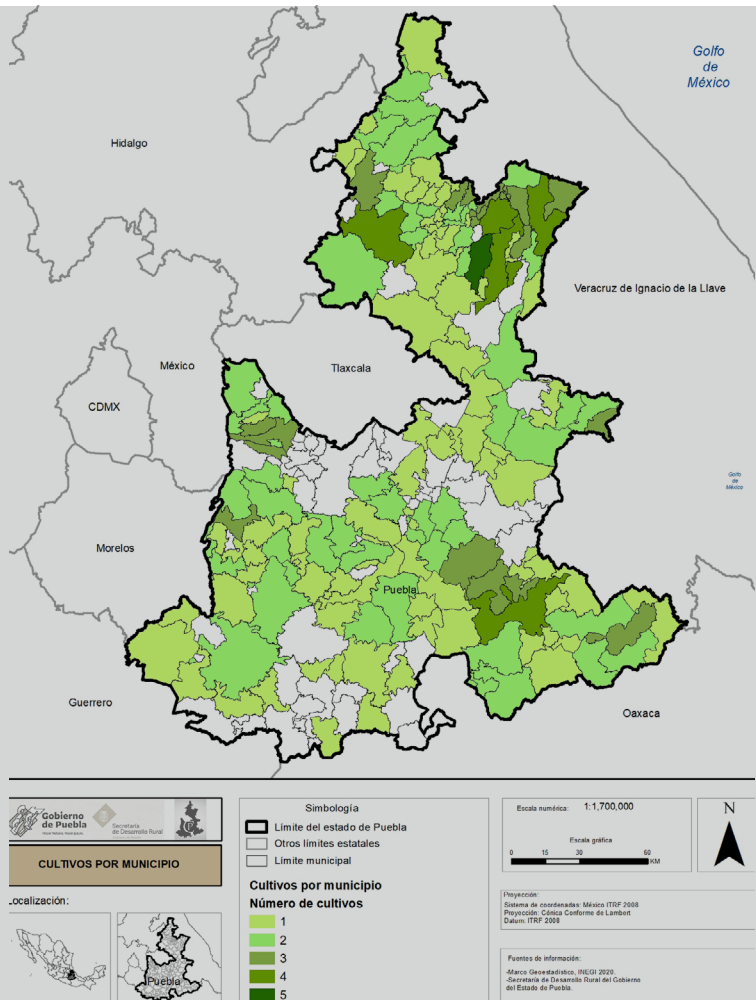
En este contexto, MuSIASEM fue considerado por la FAO (2013) como el enfoque más adecuado para caracterizar simultáneamente el patrón metabólico del Nexo Agua-Energía-Alimentos con relación a variables socioeconómicas y ambientales. En este proyecto de investigación se aplicó para entender el **Nexo Agua-Alimentos**.

Cadillo-Benalcazar et. al. (2020) y Renner *et al.* (2020) llevan a cabo un análisis de los factores que caracterizan la sustentabilidad del sistema de alimentos en Europa. Cabello *et al.* (2019) analizan los problemas de falta de disponibilidad de agua en zonas áridas y la producción de alimentos.

III. Resultados de la disponibilidad hídrica para la producción de cultivos estratégicos de Puebla



En el año agrícola 2020, la superficie sembrada o establecida con los nueve cultivos prioritarios en 154 municipios, llegó a 276,964 ha, que representa 32% de las 864,785 ha que en total se sembraron en el estado, produjeron 803,191 t de alimentos, el 6.1%, de 13,128,898 t estatal; y aportaron \$3,551,396,138 (20.7%) al valor total de la producción de \$17,178,533,094 (SIAP, 2021). Su distribución espacial se muestra en el Mapa 4.



Mapa 4: Distribución espacial de los cultivos prioritarios

La mayor superficie sembrada, respecto al total de los cultivos prioritarios, la ocupan los maíces nativos con 190,848 ha (68.91%); le sigue café 68,952 ha (24.90%), plátano-cítricos 13,414 ha (4.84%), aguacate 2,278 ha (0.82%), agave 777 ha (0.28%), berries 315 ha (0.11%), pitaya-pitahaya 261 ha (0.09%), higo 83 ha (0.03%), y finalmente vainilla 37 ha (0.01%), como se muestra en la Tabla 4.

Cultivo	Polo de Desarrollo	Número de municipios	Superficie sembrada (ha)	Fracción de la superficie
Agave	P1 Tepeaca	3	153	19.7%
	P2 Tepexi de Rodríguez	1	267	34.4%
	P3 Chiautla de Tapia-Izúcar de	3	357	45.9%
	Total del cultivo	7	777	100.0%
Aguacate	P1 Atlixco	6	611	26.8%
	P2 Sierra Norte	3	58	2.5%
	P3 Sierra Nororiental	6	488	21.4%
	P4 Quimixtlán	3	1,060	46.5%
	P5 Tehuacán-Sierra Negra	7	61	2.7%
	Total del cultivo	25	2,278	100.0%
Berries	P1 Sierra Norte	4	230	72.9%
	P2 Sierra Nororiental	4	10	3.1%
	P3 Sierra Nevada	5	76	24.1%
	Total del cultivo	13	315	100.0%
Café	P1 Xicotepec-Tlaquilotepec	6	11,871	17.2%
	P2 Xicotepec-Jopala	3	16,569	24.0%
	P3 Huauchinango	4	5,063	7.3%
	P4 Zacatlán	9	4,467	6.5%
	P5 Huehuetla	4	3,441	5.0%
	P6 Zapotitlán de Méndez	7	5,076	7.4%
	P7 Zacapoaxtla	5	6,476	9.4%
	P8 Teziutlán	8	8,545	12.4%
	P9 Quimixtlán	2	634	0.9%
	P10 Sierra Negra	5	6,810	9.9%
	Total del cultivo	53	68,952	100.0%
Higo	P1 Zacatpoaxtla	2	83	100.0%
Total del cultivo	2	83	100.0%	
Maíces Nativos	P1 Serdán	6	52,242	27.4%
	P2 Libres	7	35,892	18.8%
	P3 Sierra Norte	6	34,327	18.0%
	P4 San Martín	8	20,791	10.9%
	P5 Sierra Nororiental	7	16,852	8.8%
	P6 Atlixco	7	11,877	6.2%
	P7 Tehuacán-Tecamachalco	9	18,867	9.9%
	Total del cultivo	50	190,848	100.0%

	Pitaya-Pitahaya	P1 Mixteca	1	9	3.4%
		P2 Centro	8	180	69.0%
		P3 Tehuacán	9	72	27.4%
	Total del cultivo		18	261	100.0%
	Plátano-Cítricos	P1 Teziutlán	4	13,414	100.0%
		Total del cultivo	4	13,414	100.0%
	Vainilla	P1 Sierra Norte	4	31	83.8%
		P2 Sierra Nororiental	1	6	16.2%
		Total del cultivo	5	37	100.0%
	Total		177	276,964	

Tabla 4: Superficie sembrada o establecida por cultivo y Polo de Desarrollo

Fuente: SIAP, 2021

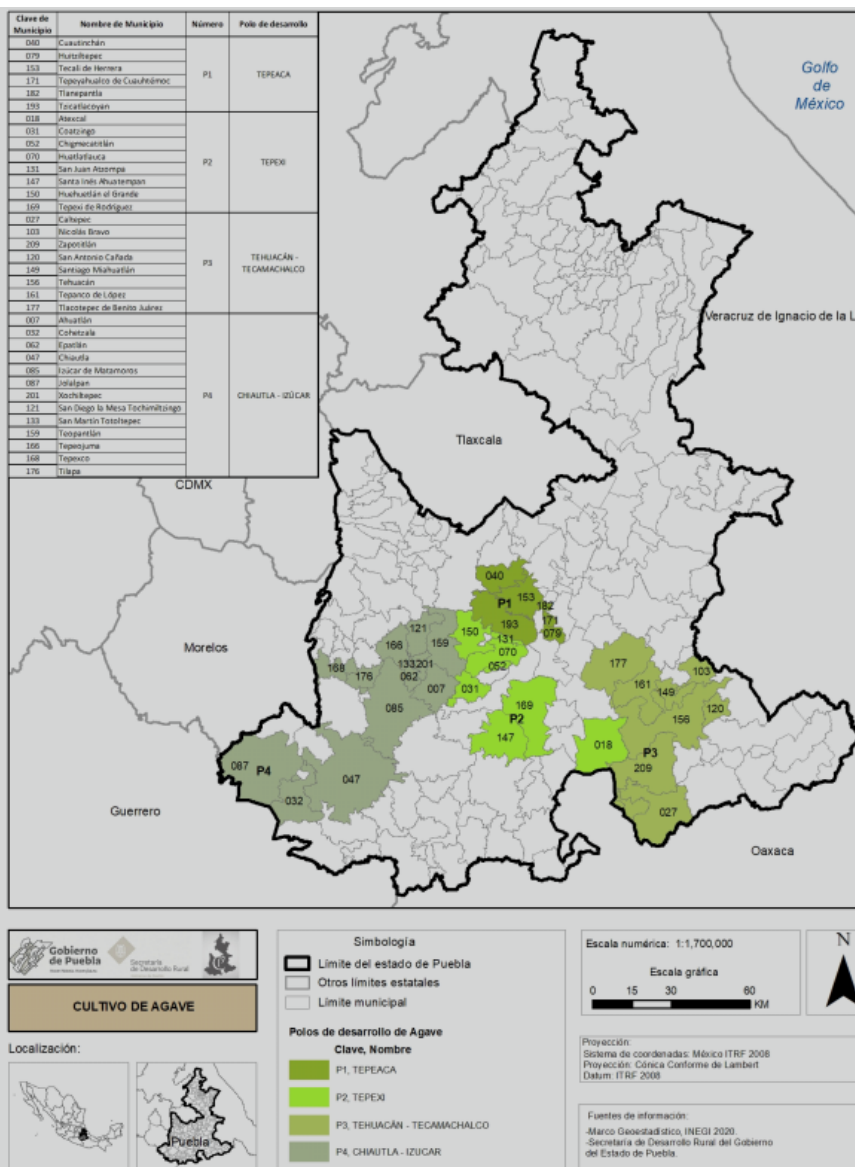


III.1.1. Agave



Imagen: Cultivo de agave mezcalero endémico en la Mixteca (Acatepec) Poblana.
Fuente: Miguel Orea

Está establecido en siete municipios que forman parte de las cuencas Río Atoyac, Río Papaloapan y Río Grande de Amacuzac (Ver Mapa 1). En el año agrícola 2020, la superficie establecida en el estado llegó a 815 ha, de las cuales, 777 ha (95.3%) integran tres Polos de Desarrollo (PD): P1 Tepeaca, P2 Tepexi de Rodríguez, y P3 Chiautla de Tapia-Izúcar de Matamoros (Mapa 5 y Figura 8). El volumen de producción obtenido fue de 40,255 t con un valor de \$74,614,269. San Diego la Mesa Tochimiltzingo del P3 es el municipio con mayor superficie establecida, 290 ha (37%), así como el de mayor producción 14,580 t (36%) (SIAP, 2021) (Tabla, 4).



Mapa 5: Distribución espacial de agave por Polo de Desarrollo y municipio, 2021

Fuente: Elaboración propia con información de SDR, 2021 y SIAP, 2021

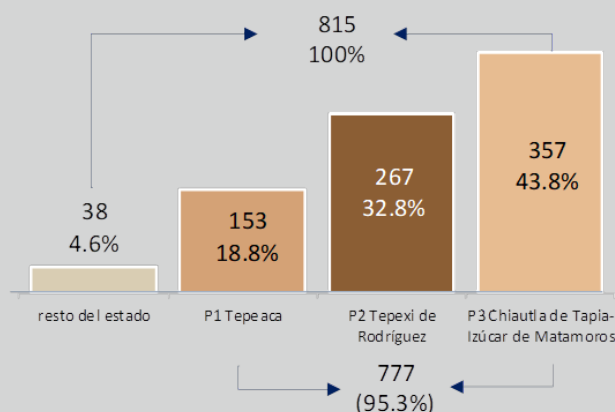


Figura 8: Superficie (ha) establecida de agave, 2021

Fuente: Elaboración propia con información de SIAP, 2021

Polo de Desarrollo	Municipio	Superficie (ha)		Producción (t)	Rendimiento (t/ha)	Valor de producción (\$)
		Sembrada	Cosechada			
Polo 1 Tepeaca	Cuautinchan	22	19	1,734	91	4,666,917
	Tecali de Herrera	30	30	2,768	92	7,383,053
	Tzicatlacoyan	101	98	9,080	93	23,070,337
	sumas	153	147	13,581	92	35,120,308
Polo 2 Tepexi de Rodríguez	Huehuetlán el Grande	267	108	8,651	80	13,270,933
	sumas	267	108	8,651	80	13,270,933
	San Diego la Mesa Tochimilzingo	290	180	14,580	81	21,213,900
Polo 3 Chiautla-Izúcar de Matamoros	Tepeojuma	46	29	2,320	81	3,375,455
	Xochiltepec	21	14	1,123	80	1,633,674
	sumas	357	223	18,023	81	26,223,029
totales		777	478	40,255	84	74,614,269

Tabla 3: Estadísticas agrícolas de agave, 2021 Fuente: SIAP, 2021

Para su producción, el agave dispone de dos fuentes de abastecimiento de agua con un volumen total anual de 72,635,977 m³. El 90.9% (66,078,212 m³) está disponible en dos acuíferos: Atlixco-Izúcar de Matamoros (43%) y Valle de Tehuacán (57%), y el 9.1% restante (6,557,765 m³) es agua de lluvia (Figura 9).

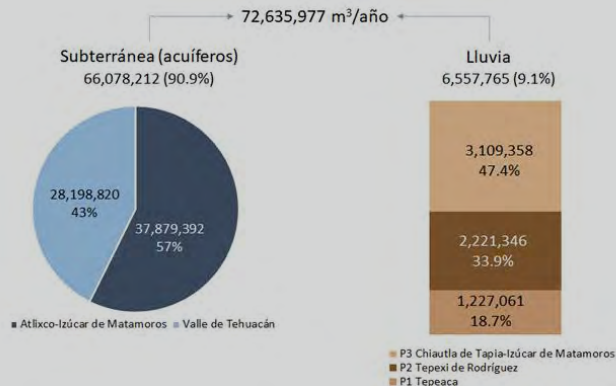


Figura 9: Fuentes disponibles de agua (m³/año) en el territorio

Fuente: Elaboración propia con información de SINA, 2021

Debido a que la totalidad de la superficie sembrada depende del agua de lluvia, la disponibilidad de agua efectiva es del 78% (5,132,821 m³/año), que, al comparar con la demanda hídrica del cultivo de 5,559,005 m³ anuales, resulta un déficit de -426,184 m³. Como se muestra en la Tabla 5, el único municipio con superávit es San Diego la Mesa Tochimiltzingo, el resto de los siete municipios se encuentran en déficit.

El 40% (313 ha) de la superficie presenta un Índice de Estrés Hídrico Relativo (IEHR) ALTO, 23% (174 ha) MEDIO, y 37% (290 ha) MODERADO (Figura 10 y Mapa 6).

Polo de Desarrollo	municipio	superficie sembrada	demanda hídrica	disponibilidad hídrica (m³/año)		balance hídrico	
				lluvia efectiva	subterránea	total	(m³/año)
Polo 1 Tepeaca	Cuaautinchan	22	125,862	113,343	0	113,343	-12,519
	Tecali de Herrera	30	171,630	154,559	0	154,559	-17,071
	Tzicatlacoyan	101	812,012	692,521	0	692,521	-119,490
	sumas	153	1,109,504	960,423	0	960,423	-149,081
Polo 2 Tepexi de Rodríguez	Huehuetlán el Grande	267	2,140,328	1,761,348	0	1,761,348	-378,980
	sumas	267	2,140,328	1,761,348	0	1,761,348	-378,980
Polo 3 Chiautla-Izúcar de Matamoros	San Diego la Mesa Tochimiltzingo	290	1,775,601	2,005,190	0	2,005,190	229,589
	Tepeojuma	46	364,738	261,871	0	261,871	-102,867
	Xochiltepec	21	168,834	143,990	0	143,990	-24,845
	sumas	357	2,309,173	2,411,050	0	2,411,050	101,878
totales		777	5,559,005	5,132,821	0	5,132,821	-426,184

Tabla 4: Disponibilidad y balance hídricos del agave

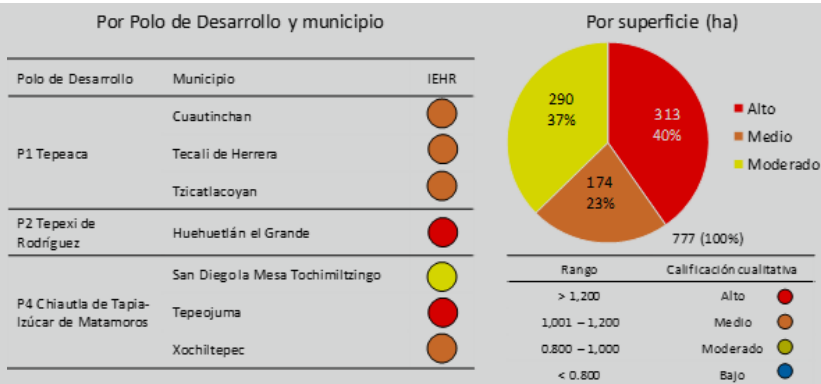
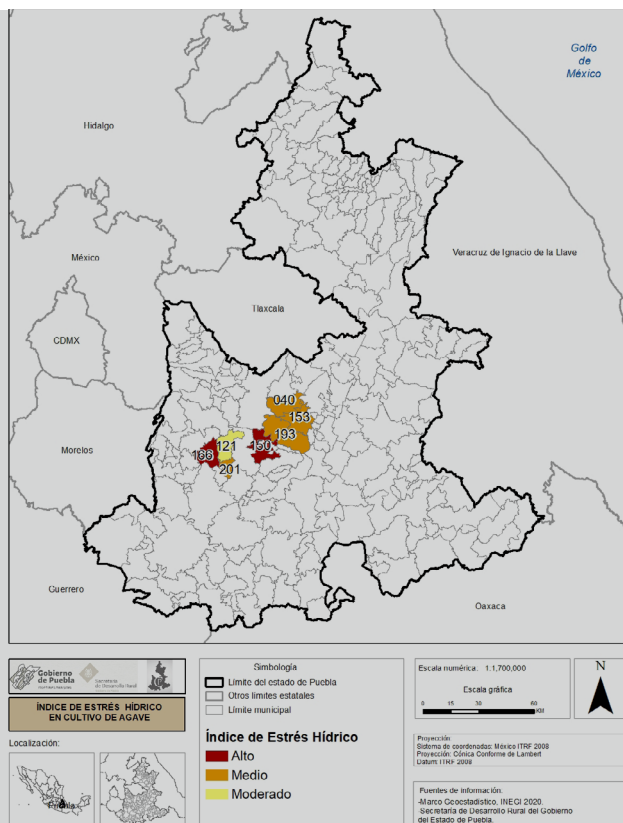


Figura 10: Índice de Estrés Hídrico Relativo por Polo de Desarrollo y municipio



Mapa 6: Distribución espacial del IEHR del agave

En el año agrícola 2021 la superficie establecida de agave dispuso de un volumen de agua de 6,557,765 m³/año (100%), cuya fuente de abastecimiento en su totalidad fue agua de lluvia, el volumen efectivo de agua fue de 5,132,821 m³/año (Figura 11), con el que se produjeron 40,255 t cosechadas en 468 ha. Por cada m³ de agua efectiva se produjeron 7.84 kg de agave.

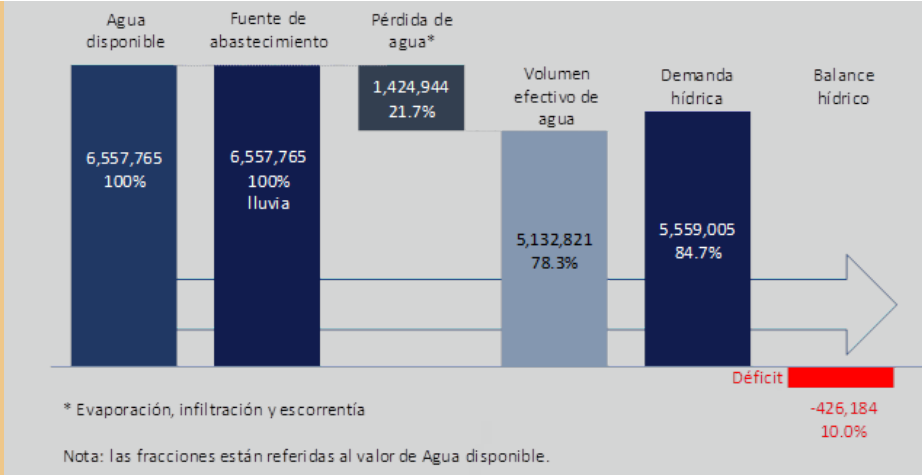


Figura 11: Interrelación del agua con la producción de agave

Fuente: Elaboración propia

El metabolismo del agua se muestra en la Figura 12 y en la Tabla 5 las tasas metabólicas. La eficiencia metabólica promedio del cultivo es ALTA con un valor de 0.07 m³/\$, y de igual manera resultó por Polo de Desarrollo los resultados son: P1 Tepeaca 0.027 m³/\$, P2 Tepexi de Rodríguez 0.13 m³/\$, y P3 Chiautla de Tapia-Izúcar de Matamoros 0.09 m³/\$.



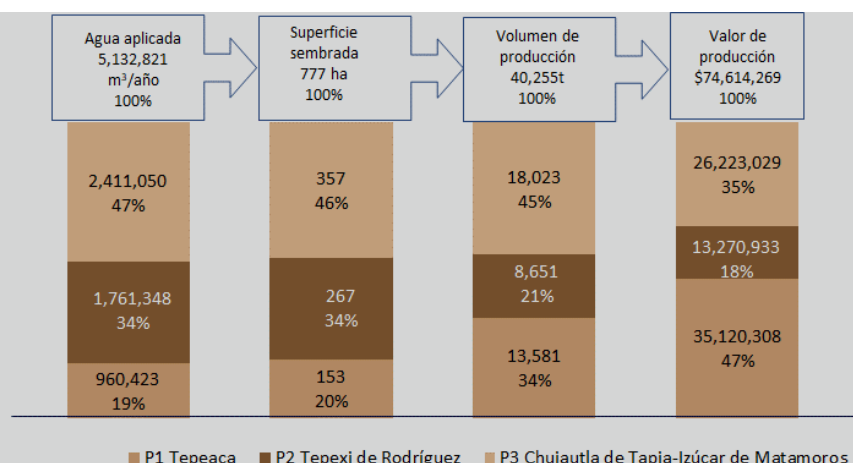


Figura 12: Metabolismo del agua en la producción de agave

Fuente: Elaboración propia

Tasa metabólica		P1 Tepeaca	Polo de Desarrollo P2 Tepexi de Rodríguez	P3 Chiuautla de Tapia-Izúcar de Matamoros
Volumen de agua para producir un kilogramo de agave (l/kg)	requerida por el cultivo (l/kg)	82	247	128
	aplicada al cultivo (l/kg)	71	204	134
	diferencia agua aplicada-agua requerida (l/kg)	-11	-44	6
	porcentaje agua aplicada/agua requerida	86.6%	82.3%	104.4%
Eficiencia monetaria del uso de agua aplicada (\$/m³)		36.57	7.53	10.88
Productividad del agua (kg/m³)		14.14	4.91	7.48
Rendimiento promedio (t/ha)		92	80	81
Relación con rendimiento promedio nacional (74.32 t/ha)		1.24	1.08	1.09

Tabla 5: Tasas metabólicas del agave

III.1.2. Aguacate

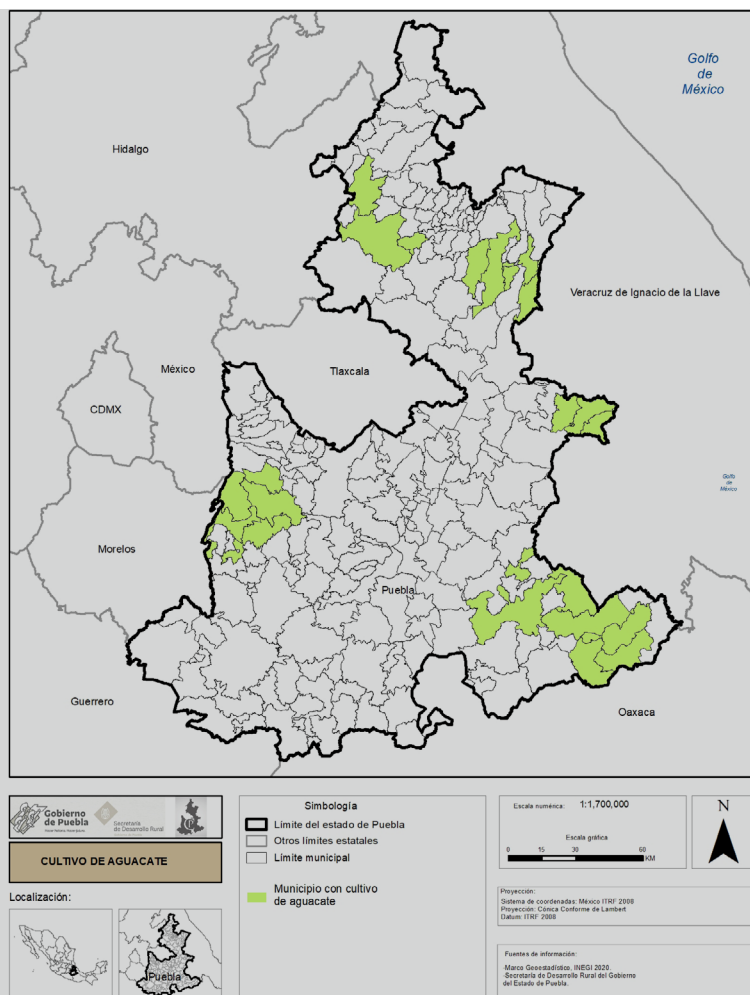


La superficie establecida en Puebla al año agrícola 2020, fue de 3,133 ha y 73% (2,278 ha) de ella se localiza en 23 municipios de cinco PD: P1 Atlixco, P2 Sierra Norte, P3 Sierra Nororiental, P4 Quimixtlán, y P5 Tehuacán-Sierra Negra (Mapa 7) (SIAP, 2021), que forman parte de las cuencas hidrográficas: Río Atoyac, Río Tecolutla, Río Jamapa y otros, y Río Papaloapan (ver Mapa 1).

El 78% de la superficie de los Polos se encuentra en producción y el 22% restante aún está en etapa de desarrollo. El Polo 4 Quimixtlán es el más importante: tiene sembrada 46.5% de la superficie total de los Polos, produce 41.7% y contribuye con 56.2% al valor de producción. Destaca el municipio de Quimixtlán con 32.2%, 27.4% y 38.1%, en los mismos indicadores.



De acuerdo con el SIAP (2021), el Polo 5 Tehuacán-Sierra Negra tiene el más alto rendimiento promedio con 7.9 t/ha y dentro de este Polo sobresale Ajalpan con 8.4 t/ha -el mayor rendimiento de los Polos- con tan solo 0.75% de la superficie total sembrada (Mapa 7). El rendimiento más bajo se presenta en Tochimilco, con 4.2 t/ha, pero es el segundo municipio con mayor superficie sembrada (14.3%) después de Quimixtlán (Tabla 6).



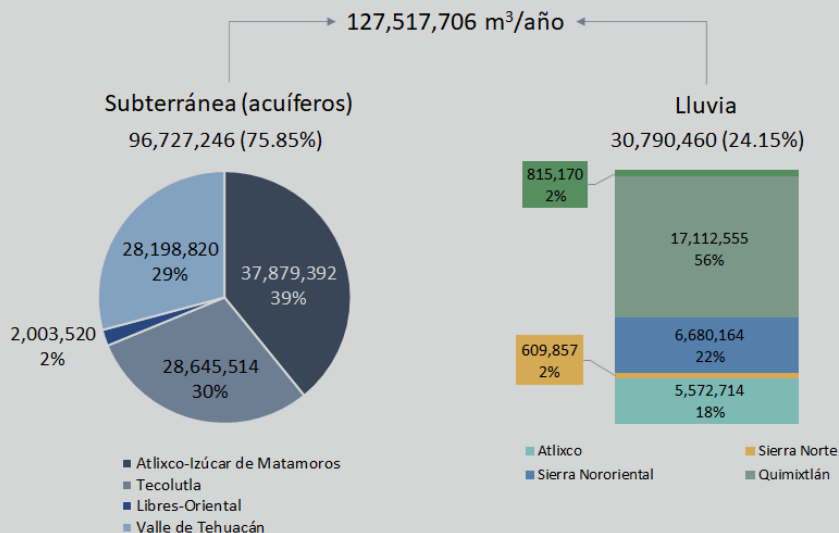
Mapa 7: Distribución espacial de aguacate

Polo de Desarrollo	municipio	superficie (ha)		producción (t)	rendimiento (t/ha)	valor de producción (\$)
		sembrada	cosechada			
Polo 1 Atlixco	Atlixco	162	134	1,121	7.7	4,917,274
	Atzitzihuacán	0	0	0	0.0	0
	Cohuecan	27	21	215	5.1	1,765,588
	Huaquechula	71	61	481	7.4	2,262,703
	Tianguismanalco	26	25	190	7.2	1,164,114
	Tochimilco	326	276	2,295	4.2	17,424,968
	sumas	611	516	4,301	6.3	27,534,647
Polo 2 Sierra Norte	Huachuinango	0	0	0	0.0	0
	Tepetzintla	0	0	0	0.0	0
	Zacatlán	58	35	169	4.8	2,410,090
	sumas	58	35	169	4.8	2,410,090
Polo 3 Sierra Nororiental	Atempan	24	23	128	5.6	1,160,166
	Teteles de Ávila Castillo	16	15	86	5.6	819,205
	Teziutlán	167	158	925	5.9	11,230,295
	Tlatlauquitepec	99	90	527	5.9	5,275,017
	Xiutetelco	93	88	516	5.9	5,493,980
	Zacapoaxtla	89	75	385	5.1	5,203,781
	sumas	488	449	2,567	5.6	29,182,443
Polo 4 Quimixtlán	Chichiquila	237	193	1,410	7.3	21,103,349
	Chilchotla	89	53	400	7.6	5,229,253
	Quimixtlán	734	487	3,477	7.2	55,400,000
	sumas	1,060	733	5,287	7.3	81,732,602
5 Tehuacán-Sierra Negra	Ajalpan	17	13	109	8.4	1,399,852
	Chapulco	5	4	31	7.8	372,156
	Coxcatlán	8	6	46	7.6	564,203
	Coyomeapan	9	6	48	8.0	554,912
	Tehuacán	2	2	16	8.0	184,800
	Vicente Guerrero	7	4	26	7.5	319,884
	Zoquitlán	13	11	89	8.1	1,117,614
	sumas	61	46	365	7.9	4,513,421
totales		2,278	1,779	12,690	6.4	145,373,203

Tabla 6: Estadísticas agrícolas del aguacate, 2020

Para su producción, el aguacate dispone de dos fuentes de abastecimiento de agua con un volumen total anual de 127,517,706 m³, el 75.85% (96,727,2456 m³) es agua subterránea de cuatro acuíferos: Atlixco-Izúcar de Matamoros (39%), Tecolutla (30%), Libres-Oriental (2%) y Valle de Tehuacán (29%); y el 24.15% restante (30,790,460 m³) es agua de lluvia (Figura 13).





Fuente: Elaboración propia con información de SMN, 2021 y SINA, 2021

Figura 13: Fuentes de abastecimiento (m³/año) en el territorio

Del volumen total de agua disponible se aprovecha el 24% equivalente a 31,139,538 m³/año, que corresponde 349,078 m³/año (1.13%) a aguas subterráneas, y 30,790,460 m³/año (98.87) a agua de lluvia. El volumen efectivo de agua después de descontar evaporación, infiltración y escorrentía es de 20,969,025 m³/año con el que se cubre la demanda hídrica del agave por 15,755,975 m³/año, resultando un superávit de 5,213,049 m³/año. Sin embargo, cinco municipios presentan un déficit de -163,659 m³/año, como se muestra en la Tabla 7. El 2% (51 ha) de la superficie presenta un Índice de Estrés Hídrico Relativo (IEHR) ALTO, 26% (584 ha) MODERADO, y 72% (1,643 ha) BAJO (Figura 14 y Mapa 8).

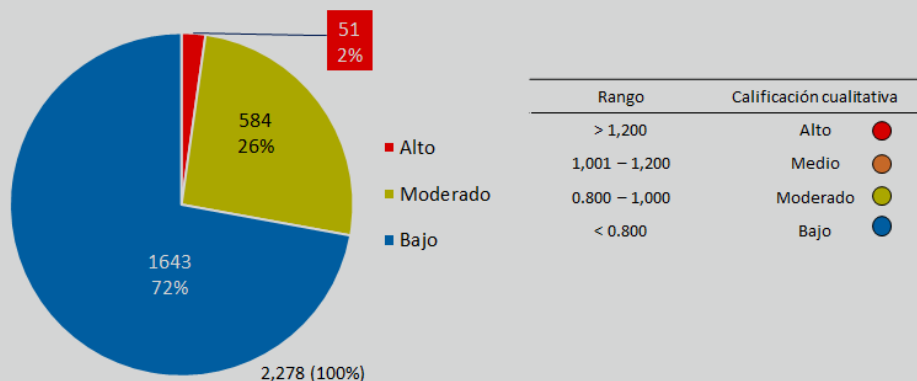


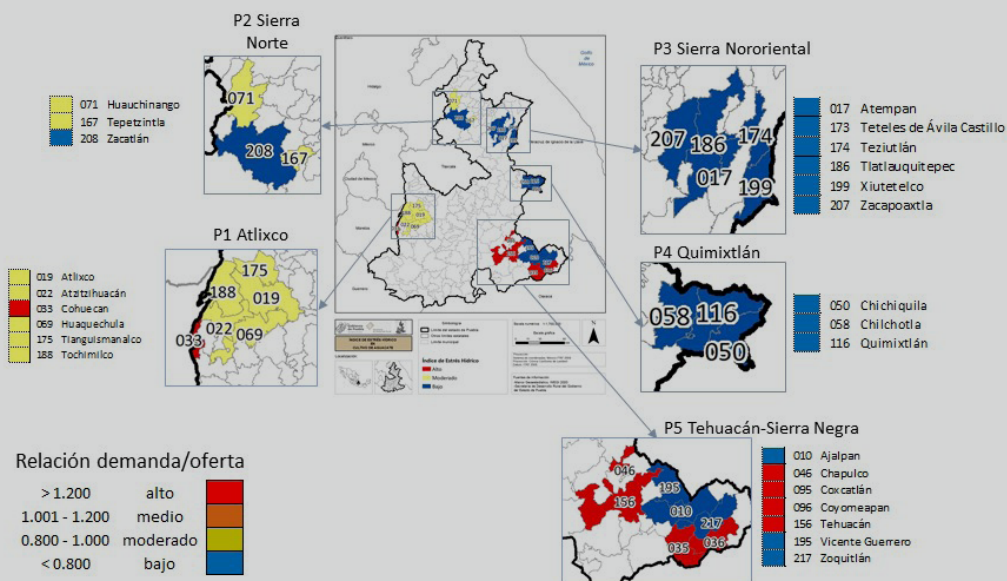
Figura 14: IEHR por superficie (ha)

Fuente: Elaboración propia

Polo de Desarrollo	municipio	superficie sembrada (ha)	demanda hídrica (m3/año)	disponibilidad hídrica (m3/año)			balance (m3/año)
				lluvia efectiva	subterránea	total	
Polo 1 Atlixco	Atlixco	162	1,212,271	1,120,141	92,131	1,212,272	0
	Atzitzihuacán	0	0	0	0	0	0
	Cohuecan	27	246,258	180,529	0	180,529	-65,729
	Huaquechula	71	643,007	471,382	171,625	643,007	0
	Tianguismanalco	26	194,003	169,340	24,662	194,002	0
	Tochimilco	326	2,385,988	2,325,328	60,660	2,385,988	0
	sumas	611	4,681,527	4,266,720	349,078	4,615,798	-65,728
Polo 2 Sierra Norte	Huauchinango	0	0	0	0	0	0
	Tepetzintla	0	0	0	0	0	0
	Zacatlán	58	324,362	482,314	0	482,314	157,952
	sumas	58	324,362	482,314	0	482,314	157,952
Polo 3 Sierra Nororiental	Atempan	24	102,443	148,248	0	148,248	45,805
	Teteles de Ávila Castillo	16	66,375	96,052	0	96,052	29,678
	Teziutlán	167	1,028,924	1,893,828	0	1,893,828	864,904
	Tlatlauquitepec	99	420,444	608,434	0	608,434	187,990
	Xiutetelco	93	574,255	1,056,968	0	1,056,968	482,713
	Zacapoaxtla	89	547,428	882,906	0	882,906	335,478
	sumas	488	2,739,868	4,686,436	0	4,686,436	1,946,567
Polo 4 Quimixtlán	Chichiquila	237	1,703,550	2,389,150	0	2,389,150	685,600
	Chilchotla	89	637,170	893,602	0	893,602	256,431
	Quimixtlán	734	5,275,942	7,399,263	0	7,399,263	2,123,321
	sumas	1,060	7,616,662	10,682,014	0	10,682,014	3,065,352
Polo 5 Tehuacán-Sierra Negra	Ajalpan	17	88,188	215,435	0	215,435	127,247
	Chapulco	5	34,413	22,130	0	22,130	-12,283
	Coxcatlán	8	78,654	28,144	0	28,144	-50,510
	Coyomeapan	9	66,377	37,629	0	37,629	-28,748
	Tehuacán	2	14,750	8,362	0	8,362	-6,388
	Vicente Guerrero	7	34,276	57,529	0	57,529	23,253
	Zoquitlán	13	76,896	133,234	0	133,234	56,338
	sumas	61	393,556	502,463	0	502,463	108,907
total Polo de Desarrollo		2,278	15,755,975	20,619,947	349,078	20,969,025	5,213,050

Tabla 7: Disponibilidad y balance hídricos del aguacate

Fuente: Elaboración propia

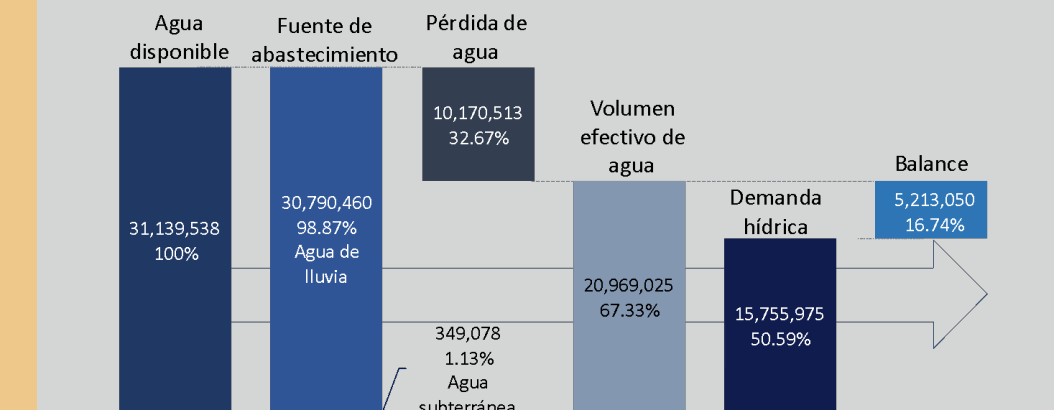


Fuente: Elaboración propia

Mapa 8: Distribución espacial de IEHR del aguacate por municipio

Fuente: Elaboración propia

El cultivo de aguacate dispuso de 31,139,538 m³/año (100%), de los que 30,790,460 (98.87%) son agua de lluvia y 349,078 (1.13%) agua subterránea; con un volumen efectivo de agua de 20,969,025 m³/año (67.33%) (Figura 15) con lo cual se obtuvo una producción de 12,690 t; lo que equivale a 0.615 kg/m³



Fuente: Elaboración propia con información de SMN (2021), REPDA (2021), INIFAP (2001) y FAO (2006)

Figura 15: Interrelación del agua con el aguacate

El metabolismo del agua se muestra en la Figura 16 y Tabla 8. La eficiencia metabólica promedio del cultivo es ALTA con un valor de $0.14 \text{ m}^3/\$$, así como por cada Polo de Desarrollo fue de: P1 Atlixco con $0.16 \text{ m}^3/\$$, P2 Sierra Norte $0.20 \text{ m}^3/\$$, P3 Sierra Nororiental $0.16 \text{ m}^3/\$$, P4 Quimixtlán $0.13 \text{ m}^3/\$$, y P5 Tehuacán-Sierra Negra $0.11 \text{ m}^3/\$$.

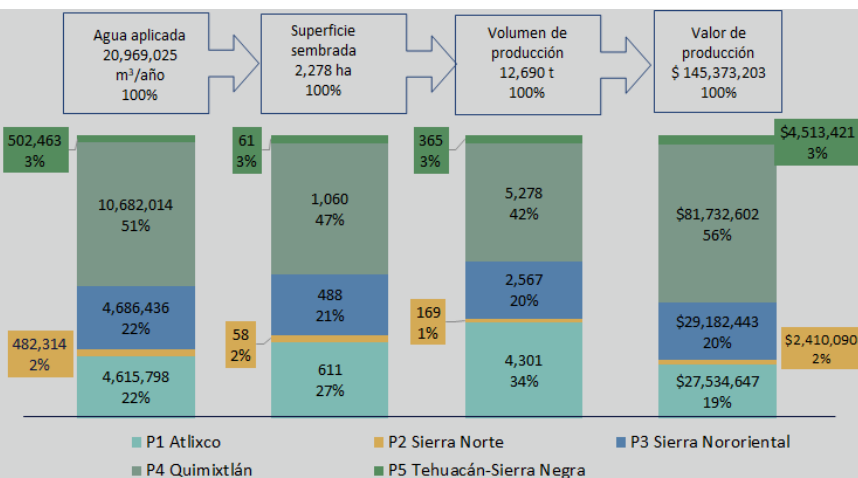


Figura 16: Metabolismo del agua en la producción de aguacate

Fuente: Elaboración propia

	Tasa metabólica	Polo de Desarrollo				
		Atlixco	Sierra Norte	Sierra Nororiental	Quimixtlán	Tehuacán-Sierra Negra
Volumen de agua requerida y aplicada para producir un kilogramo de aguacate (l/kg)	requerida por el cultivo (l/kg)	975	1,158	911	996	851
	número de veces por encima del valor recomendado por la WAO (600 l/kg)	1.6	1.9	1.5	1.7	1.4
	aplicada al cultivo (l/kg)	898	1722	1490	1396	855
	diferencia agua aplicada-agua requerida (l/kg)	-77	564	578	401	4
	porcentaje agua aplicada/agua requerida	92.1%	148.7%	163.5%	140.2%	100.5%
Eficiencia monetaria del uso de agua aplicada (\$/m³)		5.97	5.00	6.23	7.65	8.98
Productividad del agua (kg/m³)		0.932	0.350	0.548	0.495	0.727
Rendimiento promedio (t/ha)		6.3	4.8	5.6	7.3	7.9
Relación con rendimiento promedio nacional (10.67 t/ha)		0.59	0.45	0.52	0.68	0.74

Tabla 8: Tasas metabólicas del aguacate

Fuente: Elaboración propia

III.1.3. Berries



De 327 ha establecidas de los berries, 315 (96.3%) se localizan en ocho municipios (Mapa 9) que integran tres PD: P1 Sierra Norte con 230 ha (70.3%), P2 Sierra Nororiental con 10 ha (3.1%), y P3 Sierra Nevada con 76 ha (23.2%) (Figura 17) y forman parte de las cuencas hidrográficas: Río Atoyac, Río Tecolutla, y Río Moctezuma (ver Mapa 1).



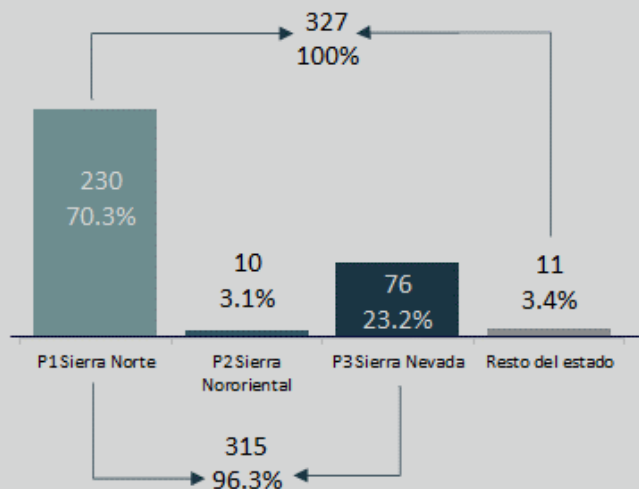
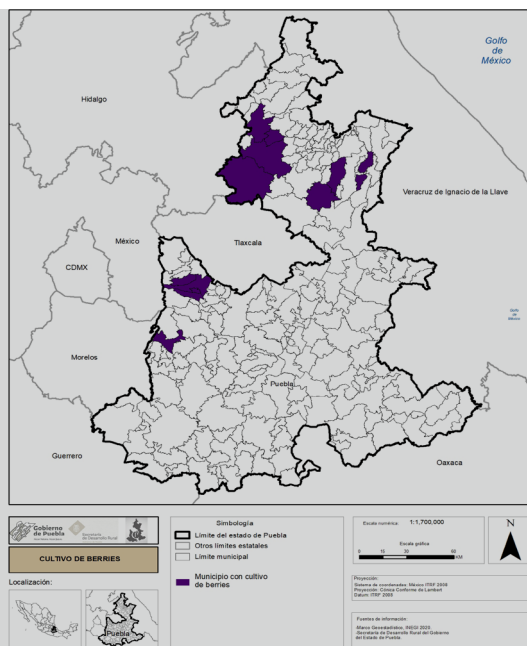


Figura 17: Superficie establecida (ha) por PD

Fuente: Elaboración propia con información de SIAP, 2021



Mapa 9: Distribución espacial de los berries

Fuente: Elaboración propia con información de SDR, 2021

Para su producción, los berries disponen de dos fuentes de abastecimiento de agua con un volumen total anual de más de 97 millones de m³, del que el 97% es agua subterránea de cuatro acuíferos: Atlixco-Izúcar de Matamoros (40%), Tecolutla (30%), Valle de Puebla (22%) y Poza Rica (8%); y el 3% restante es agua de lluvia (Figura 18).

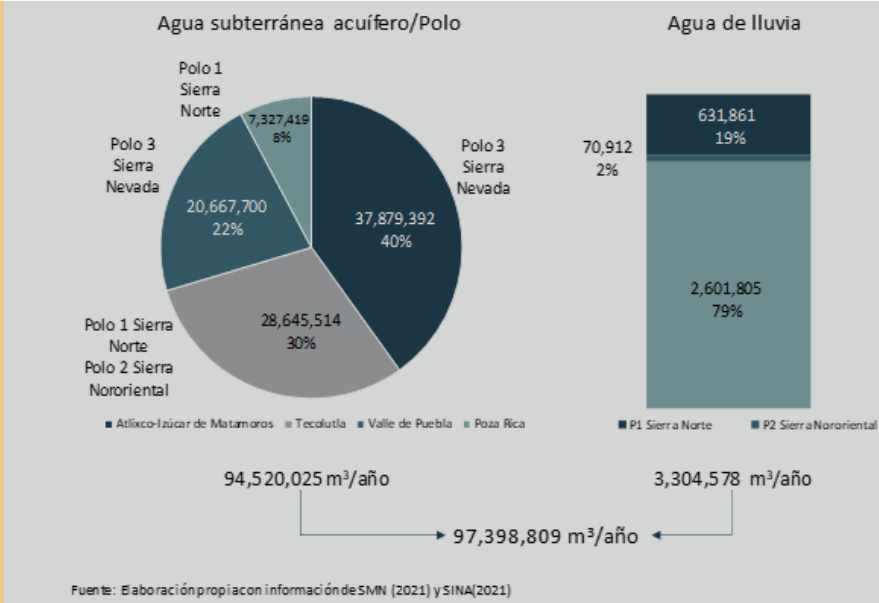
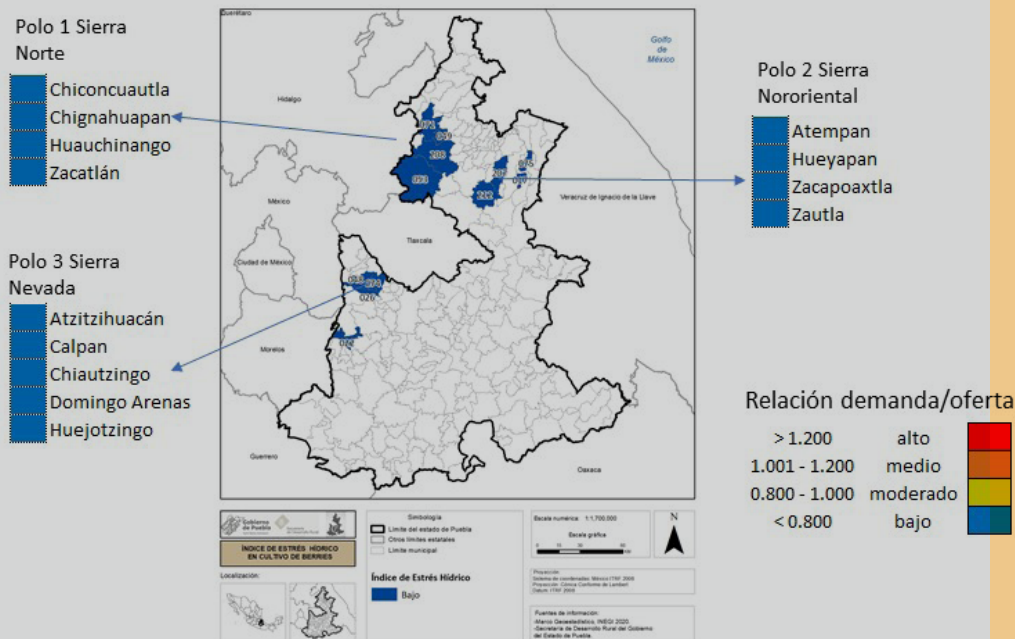


Figura 18: Volumen de agua (m³/año) disponible por tipo de fuente

Como se observa en la Tabla 9, el volumen utilizado es suficiente para atender la demanda hídrica de los berries en todos los municipios, resultando un superávit mayor al 44% del agua efectiva, por lo que el IEHR resultó BAJO en las 315 ha establecidas (Mapa 10).

Polo de Desarrollo	municipio	superficie sembrada (ha)	demanda hídrica (m³/año)	disponibilidad hídrica (m³/año)			balance (m³/año)
				lluvia efectiva	subterránea	total	
Polo 1 Sierra Norte	Chiconcuautla	0	0	0	0	0	0
	Chignahuapan	8	34,853	48,414	37,176	85,590	50,737
	Huauchinango	21	136,870	245,059	0	245,059	108,189
	Zacatlán	201	1,063,140	1,672,049	13,589	1,685,638	622,498
	sumas	230	1,234,862	1,965,522	50,765	2,016,286	781,424
Polo 2 Sierra Nororiental	Atempan	0	0	0	0	0	0
	Hueyapan	10	39,347	60,226	0	60,226	20,878
	Zacapoaxtla	0	0	0	0	0	0
	Zautla	0	0	0	0	0	0
	sumas	10	39,347	60,226	0	60,226	20,878
Polo 3 Sierra Nevada	Atzitzihuacán	0	0	0	0	0	0
	Calpan	4	19,214	23,770	19,214	42,984	23,770
	Chiautzingo	4	25,140	30,834	25,140	55,974	30,834
	Domingo Arenas	43	254,667	320,544	254,667	575,211	320,544
	Huejotzingo	26	155,796	196,098	155,796	351,894	196,097
	sumas	76	454,818	571,246	454,817	1,026,063	571,245
total Polo de Desarrollo		315	1,729,028	2,596,994	505,582	3,102,575	1,373,547

Tabla 9: Disponibilidad y balance hídricos de los berries



Mapa 10: Distribución espacial de los IEHR de los berries

Para su producción, los berries dispusieron de 3,810,160 m³/año (100%), que corresponde a agua de lluvia con 3,304,578 (86.7%) y subterránea 505,582 m³/año (13.3%), esta última se utiliza para regar el cultivo bajo invernaderos (Figura 19). La interrelación agua alimentos resultó de 0.678 kg/m³.

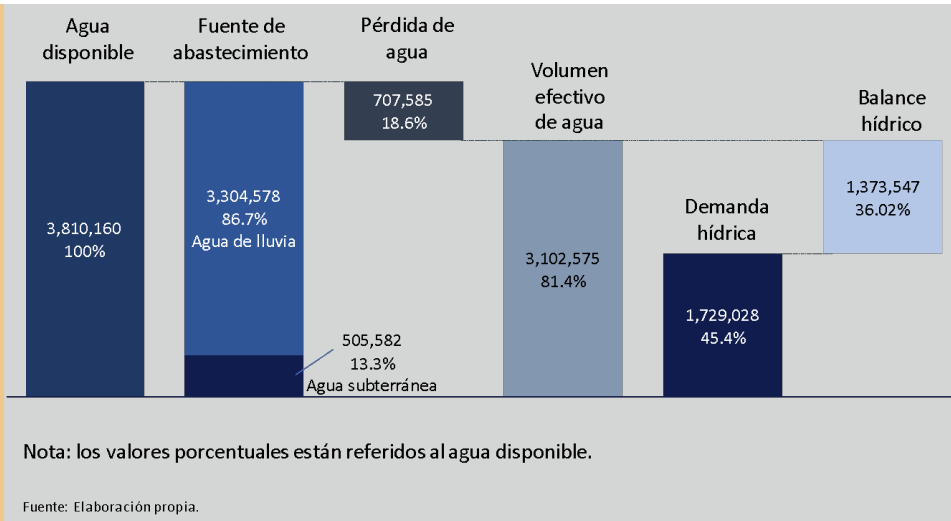


Figura 19: Interrelación del agua con la producción de berries

Fuente: Elaboración propia

El metabolismo del agua y las tasas metabólicas se muestran en la Figura 20 y Tabla 10. La eficiencia metabólica promedio del cultivo es ALTA con un valor de 0.07 m³/\$, así como por cada Polo de Desarrollo: P1 Sierra Norte con 0.07 m³/\$, P2 Sierra Nororiental con 0.08 m³/\$, y P3 Sierra Nevada con 0.05 m³/\$.



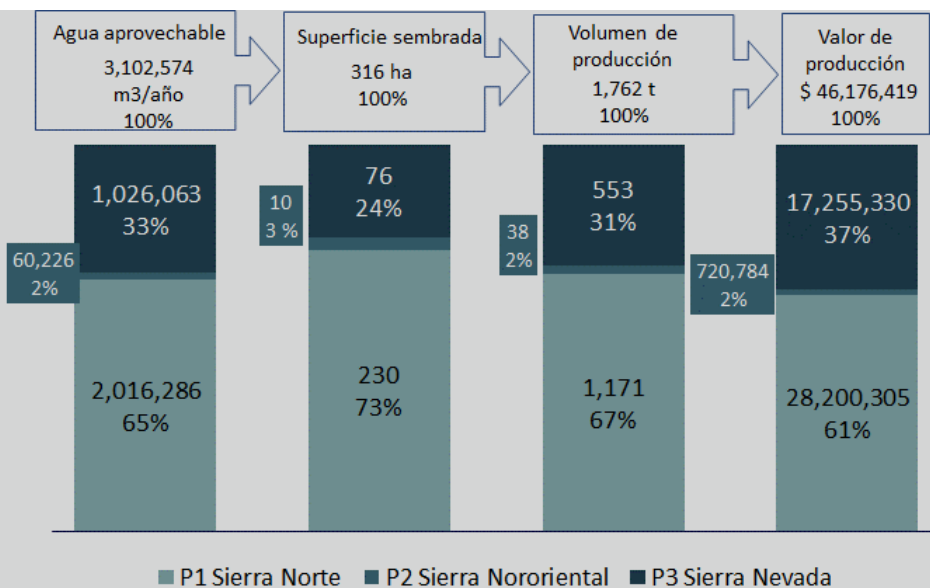


Figura 20: Metabolismo del agua en la producción de berries

Tasa metabólica		Polo de Desarrollo		
		Sierra Norte	Sierra Nororiental	Sierra Nevada
Volumen de agua para producir un kilogramo de berries (l/kg)	requerida por el cultivo (l/kg)	637	934	816
	aplicada al cultivo (l/kg)	947	1,430	1,016
	diferencia agua aplicada-agua requerida (l/kg)	310	496	200
	porcentaje agua aplicada/agua requerida	148.7%	153.1%	124.5%
Eficiencia monetaria del uso de agua aplicada (\$/m³)		13.99	11.97	16.82
Productividad del agua (kg/m³)		0.581	0.628	0.539
Rendimiento promedio (t/ha)		17.9	4.3	7.6
Relación con rendimiento promedio nacional (14.83 t/ha)		1.21	0.29	0.51

Tabla 10: Tasas metabólicas de los berries

II.1.4. Café



Casi 70 mil ha están establecidas de café en el estado de las cuales 68,952 (99%) se localizan en 53 municipios que forman parte de diez PD, siendo el más importe por superficie el P2 Xicotepec-Jolalpan con 16,569 ha (23.8%) (Figura 21 y Mapa 11). La superficie establecida forma parte de las cuencas hidrológicas Río Tecolutla, Río Cazones, Río Tuxpan, Río Jamapa y otros, y Río Papaloapan (ver Mapa 1).



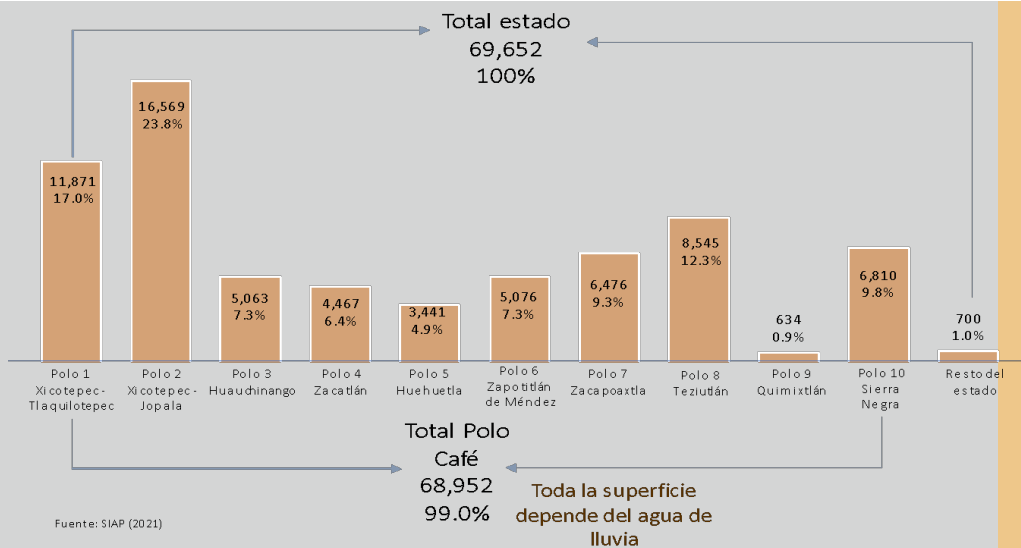
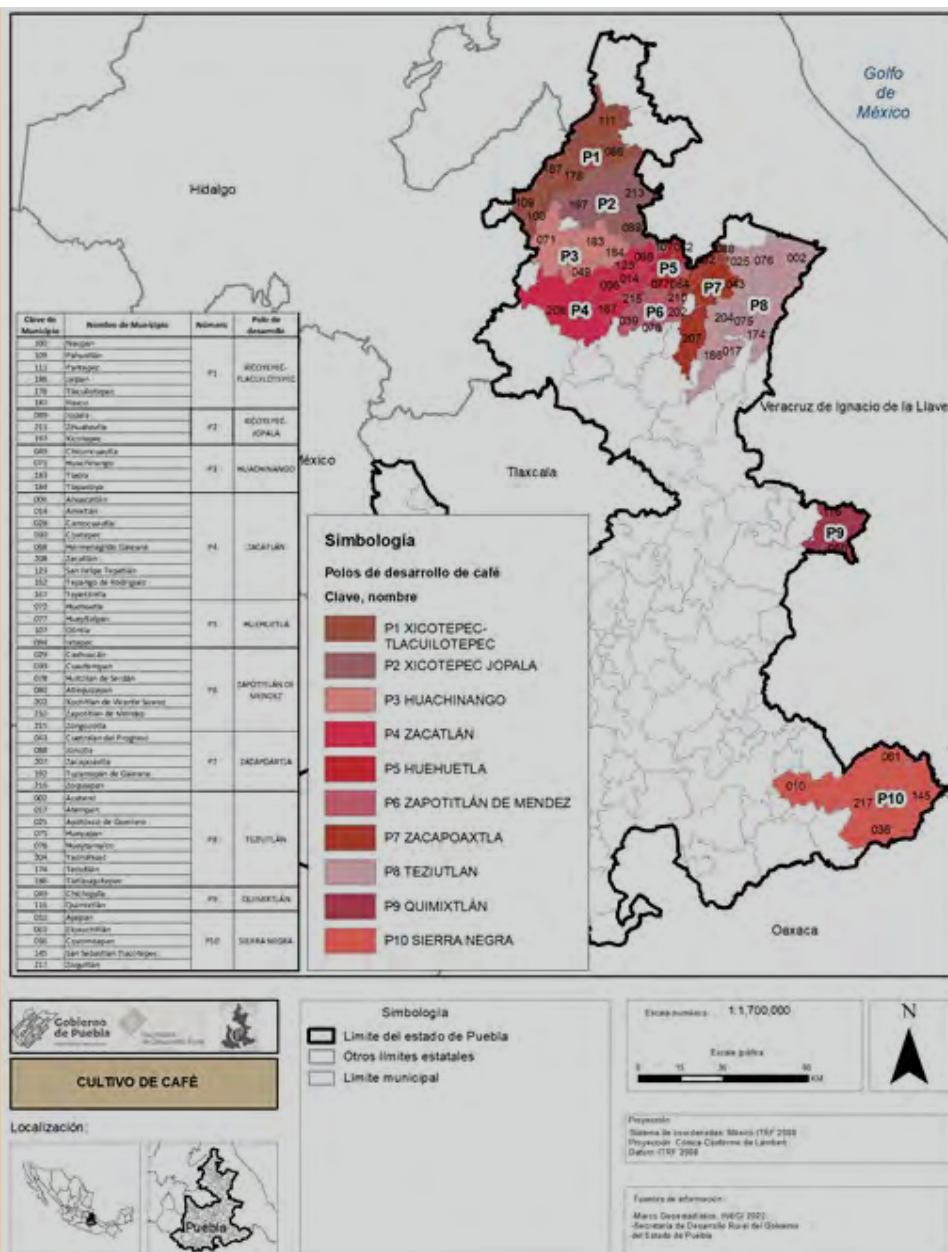


Figura 21: Superficie (ha) establecida de café, por PD, 2020



Mapa 11: Distribución espacial del café por municipio y PD, 2020

El café dispone de un volumen de agua anual de 1,870,191,459 m³ de dos fuentes de abastecimiento: tres acuíferos con 96,727,246 (5%) y agua de lluvia con 1,773,464,213 (95%), destacando el PD Xicotepec-Tlacuilotepec con el 28.1% y el PD Zacapoaxtla con el 15.2% (Figura 22).

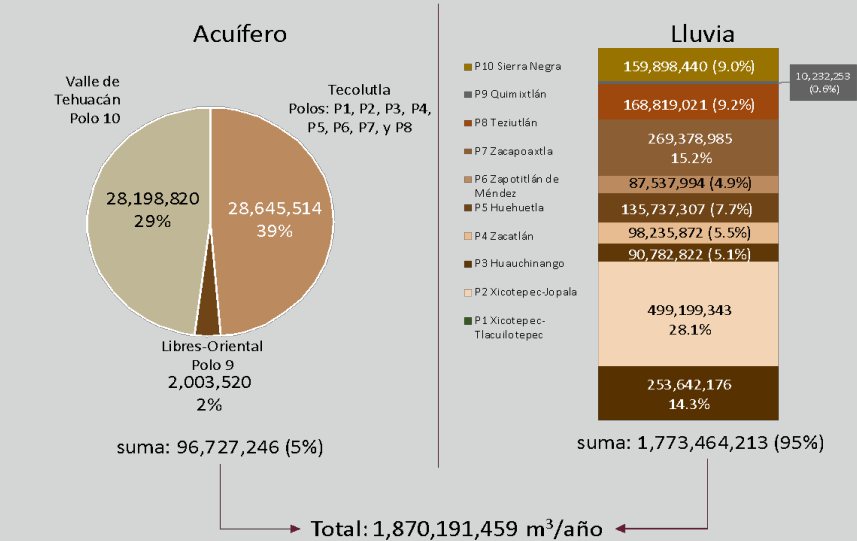


Figura 22: Volumen de agua (m³/año) disponible por tipo de fuente

El agua aprovechable en los territorios es de 1,773,464,213 m³/año, de la cual el volumen efectivo es de 899,719,971 m³/año que a pesar de que cubre la demanda hídrica total del cultivo por 717,179,427 m³/año, algunos municipios presentan déficit, como se muestra en la Tabla 11. El IEHR resultante es ALTO en 4,937 ha (7%), MEDIO en 7,330 ha (11%), MODERADO en 20,335 (29%), y BAJO en 36,351 ha (53%) Figura 23 y Mapa 12.

Polo de Desarrollo	municipio	superficie	demanda hídrica	disponibilidad hídrica (m³/año)		balance (m³/año)	
		sembrada (ha)	(m³/año)	lluvia efectiva	subterránea		
Polo 1 Xicotepēc-Tlaquilotepec	Jalpan	3,527	49,237,260	35,310,198	0	35,310,198	-13,927,062
	Naupan	944	8,877,114	11,010,146	0	11,010,146	2,133,032
	Pahuatlán	1,171	12,268,884	16,152,696	0	16,152,696	3,883,813
	Pantepec	1,029	14,786,026	11,301,580	0	11,301,580	-3,484,445
	Tlaquilotepec	3,225	33,749,135	44,485,437	0	44,485,437	10,736,302
	Tlaxco	1,975	23,160,328	21,731,466	0	21,731,466	-1,428,862
	sumas	11,871	142,078,745	139,991,524	0	139,991,524	-2,087,221
Polo 2 Xicotepēc-Jopala	Jopala	3,495	36,579,358	48,202,902	0	48,202,902	11,623,544
	Xicotepēc	6,976	73,022,636	96,226,482	0	96,226,482	23,203,846
	Zihuateutla	6,099	63,839,328	84,125,064	0	84,125,064	20,285,736
	sumas	16,569	173,441,321	228,554,448	0	228,554,448	55,113,127
Polo 3 Huauchinango	Chiconcuautla	1,061	7,357,679	7,229,926	0	7,229,926	-127,753
	Huauchinango	434	4,084,614	5,064,551	0	5,064,551	979,936
	Tlaola	2,104	19,801,908	24,552,568	0	24,552,568	4,750,660
	Tlapacoya	1,464	13,778,514	17,084,106	0	17,084,106	3,305,592
	sumas	5,063	45,022,715	53,931,151	0	53,931,151	8,908,435
Polo 4 Zacatlán	Ahuacatlán	421	3,210,111	3,500,933	0	3,500,933	290,822
	Amixtlán	818	8,500,001	12,066,761	0	12,066,761	3,566,761
	Camocuautla	263	2,732,885	3,879,656	0	3,879,656	1,146,770
	Coatepec	257	2,674,289	3,791,146	0	3,791,146	1,116,857
	Hermenegildo Galeana	1,192	11,218,571	13,910,010	0	13,910,010	2,691,438
	San Felipe Tepatlán	860	8,089,230	10,029,911	0	10,029,911	1,940,681
	Tepango de Rodríguez	259	2,690,939	3,814,749	0	3,814,749	1,123,810
	Tetetzintla	216	1,646,993	1,796,203	0	1,796,203	149,211
	Zacatlán	182	1,388,506	1,514,299	0	1,514,299	125,793
sumas	4,467	42,151,526	54,303,668	0	54,303,668	12,152,142	
Polo 5 Huehuetla	Huehuetla	1,313	11,503	23,938,283	0	23,938,283	23,926,780
	Hueytlalpan	521	6,567,515	7,710,117	0	7,710,117	1,142,601
	Ixtepēc	429	4,934,728	7,821,419	0	7,821,419	2,886,691
	Olintla	1,178	13,550,373	21,476,997	0	21,476,997	7,926,624
	sumas	3,441	25,064,119	60,946,815	0	60,946,815	35,882,696
Polo 6 Zapotitlán de Méndez	Atlequizayan	164	1,880,718	2,980,890	0	2,980,890	1,100,172
	Caxhuacan	276	2,872,000	4,071,426	0	4,071,426	1,199,426
	Cuautempan	575	4,444,329	4,412,221	0	4,412,221	-32,109
	Huitzilán de Serdán	1,887	14,388,312	15,691,832	0	15,691,832	1,303,520
	Xochitlán de Vicente Suárez	715	5,980,306	7,073,137	0	7,073,137	1,092,832
	Zapotitlán de Méndez	500	5,197,695	7,368,395	0	7,368,395	2,170,700
	Zongozotla	960	9,989,564	14,161,480	0	14,161,480	4,171,917
sumas	5,076	44,752,923	55,759,381	0	55,759,381	11,006,458	
Polo 7 Zacapoaxtla	Cuetzalan del Progreso	4,858	55,875,158	88,560,707	0	88,560,707	32,685,549
	Jonotla	725	8,336,700	13,213,458	0	13,213,458	4,876,758
	Tuzamapan de Galeana	648	7,451,555	11,810,525	0	11,810,525	4,358,970
	Zacapoaxtla	29	240,467	284,409	0	284,409	43,943
	Zoquiapan	217	2,500,722	3,963,582	0	3,963,582	1,462,859
sumas	6,476	74,404,602	117,832,681	0	117,832,681	43,428,079	
Polo 8 Teziutlán	Acateño	136	2,061,859	1,464,715	0	1,464,715	-597,144
	Atempan	156	905,109	960,523	0	960,523	55,414
	Ayotaxco de Guerrero	754	10,933,586	10,624,961	0	10,624,961	-308,625
	Hueyapan	677	3,940,569	4,181,825	0	4,181,825	241,256
	Hueytamalco	4,710	59,460,194	69,701,823	0	69,701,823	10,241,628
	Teziutlán	207	1,731,316	2,336,872	0	2,336,872	605,556
	Tlatlauquitepec	1,691	9,842,692	10,445,298	0	10,445,298	602,606
	Yaonáhuac	216	1,254,347	1,331,142	0	1,331,142	76,796
sumas	8,545	90,129,671	101,047,159	0	101,047,159	10,917,487	
Polo 9 Quimixtlán	Chichiquila	359	3,616,615	3,616,719	0	3,616,719	100,103
	Quimixtlán	275	2,693,786	2,770,467	0	2,770,467	76,681
sumas	634	6,310,402	6,387,186	0	6,387,186	176,784	
Polo 10 Sierra Negra	Ajalpan	260	1,839,219	3,294,886	0	3,294,886	1,455,667
	Coyomeapan	245	2,463,996	1,024,340	0	1,024,340	-1,439,657
	Eloxochitlán	2,060	16,616,020	21,112,512	0	21,112,512	4,496,492
	San Sebastián Tlaxiacopec	2,965	42,679,649	42,415,767	0	42,415,767	-263,883
	Zoquián	1,280	10,324,517	13,118,454	0	13,118,454	2,793,937
	sumas	6,810	73,923,402	80,965,959	0	80,965,959	7,042,557
totales		68,952	717,179,427	899,719,971	0	899,719,971	182,540,544

Tabla 11: Disponibilidad y balance hídricos del café, 2020

Fuente: Elaboración propia

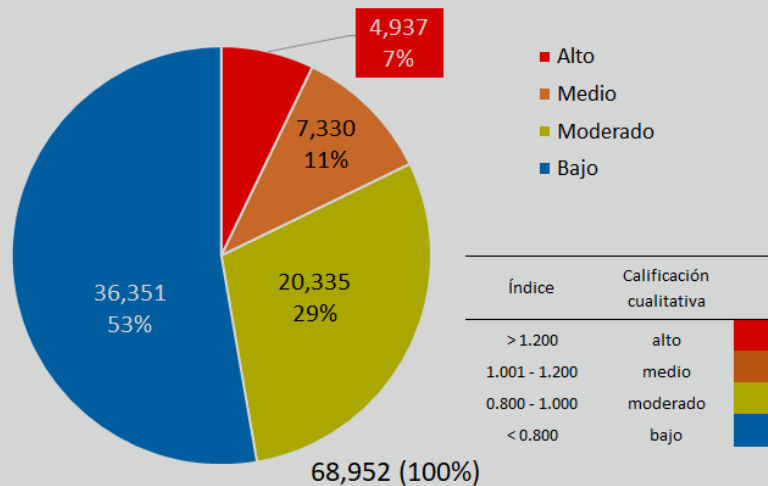
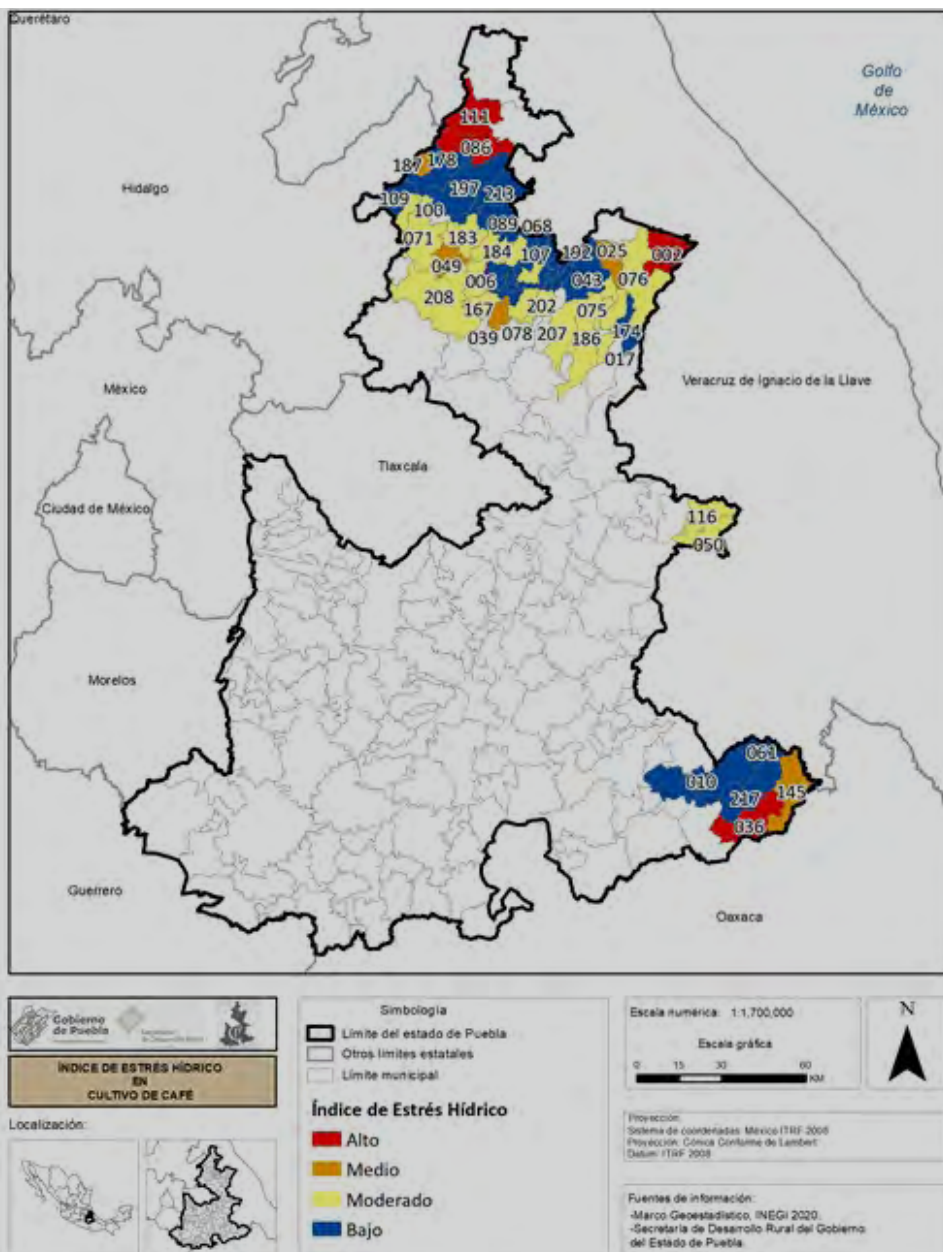


Figura 23: IEHR del café por superficie (ha)

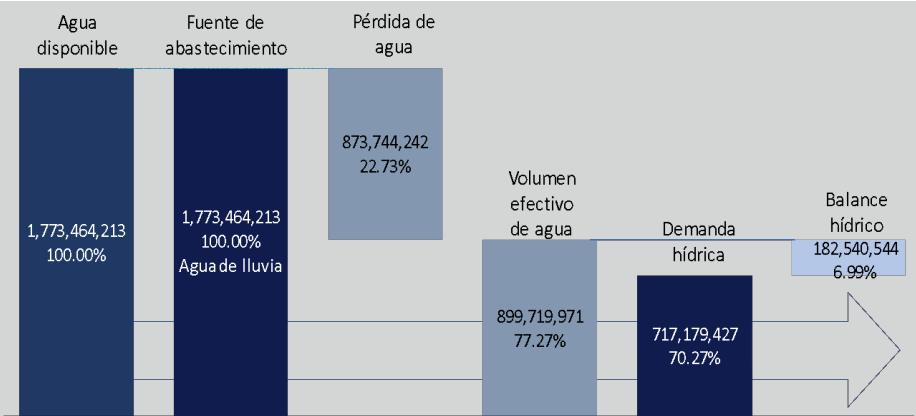
Fuente: Elaboración propia



Mapa 12: Distribución espacial de IEHR del café por municipio y Polo de Desarrollo

Fuente: Elaboración propia

La superficie establecida dispuso de un volumen de agua de 1,773,464,213 m³/año (100% agua de lluvia), con un volumen efectivo de agua de 899,719,971 m³/año (77.27%) (Figura 24). Se obtuvieron 157,807 t, lo que resulta una interrelación agua alimentos 0.175 kg/m³.



Nota: los valores porcentuales están referidos al agua disponible.

Figura 24: Interrelación del agua con la producción de café

Fuente: Elaboración propia

El metabolismo del agua se muestra en la Figura 25 y la eficiencia metabólica promedio del cultivo resultó como MUY BAJA con un valor de 0.98 m³/\$, los resultados por Polo de Desarrollo se muestran en la Tabla 12 y las tasas metabólicas se muestra en la Tabla 13.

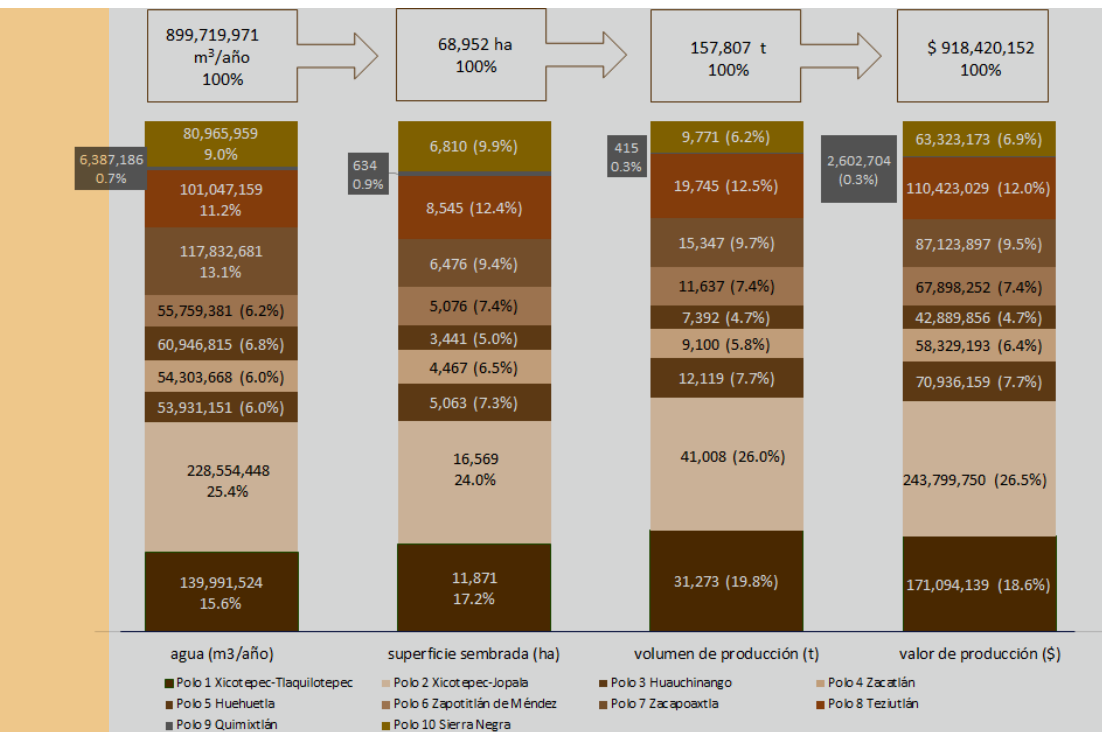


Figura 25: Metabolismo del agua en la producción de café

	Polo de Desarrollo	Rango	Calificación cualitativa
	Polo 1 Xicotepec-Tlaquilotepec	0.82	Muy Baja
	Polo 2 Xicotepec-Jopala	0.94	Muy Baja
	Polo 3 Huauchinango	0.76	Muy Baja
	Polo 4 Zacatlán	0.93	Muy Baja
	Polo 5 Huehuetla	0.84	Muy Baja
	Polo 6 Zapotitlán de Méndez	0.82	Muy Baja
	Polo 7 Zacapoaxtla	1.35	Muy Baja
	Polo 8 Teziutlán	0.92	Muy Baja
	Polo 9 Quimixtlán	2.45	Muy Baja
	Polo 10 Sierra Negra	1.28	Muy Baja

Tabla 12: Eficiencias metabólicas del café, por Polo de Desarrollo

Fuente: Elaboración propia

Tasa metabólica		Polo de Desarrollo									Sierra Negra
		Xicotepec-Tlaquilotepec	Xicotepec-Jopala	Huauchinango	Zacatlán	Huehuetla	Zapotitlán de Méndez	Zacapoaxtla	Teziutlán	Quimixtlán	
Volumen de agua para producir un kilogramo de café (l/kg)	requerida por el cultivo (l/kg)	4,063	3,675	3,299	3,993	5,287	3,958	4,552	3,982	5,170	6,487
	aplicada al cultivo (l/kg)	4,476	5,573	4,450	5,968	8,245	4,792	7,678	5,118	15,395	8,286
	diferencia agua aplicada-agua requerida (l/kg)	413	1,899	1,151	1,975	2,958	833	3,126	1,135	10,224	1,799
	porcentaje agua aplicada/agua requerida	110.2%	151.7%	134.9%	149.5%	155.9%	121.1%	168.7%	128.5%	297.7%	127.7%
Eficiencia monetaria del uso de agua aplicada (\$/m³)		1.22	1.07	1.32	1.07	0.70	1.22	0.74	1.09	0.41	0.78
Productividad del agua (kg/m³)		0.223	0.179	0.225	0.168	0.121	0.209	0.275	0.195	0.065	0.121
Rendimiento promedio (t/ha)		2.8	2.7	2.6	2.2	2.2	2.4	2.4	2.3	1.9	1.4
Relacion con rendimiento promedio nacional (1.5 t/ha)		1.9	1.8	1.7	1.5	1.5	1.6	1.6	1.5	1.3	0.9

Tabla 13: Tasas metabólicas del cultivo de café

III.1.5. Higo



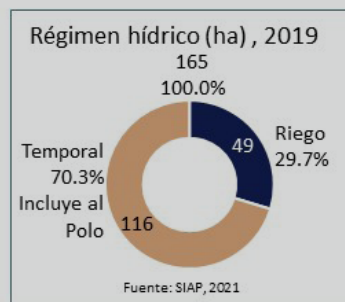
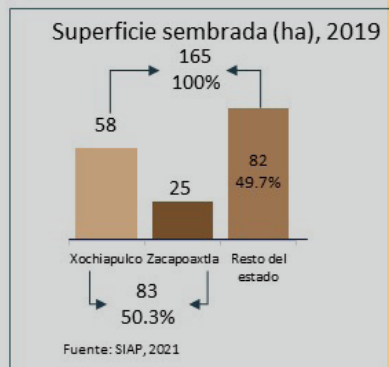
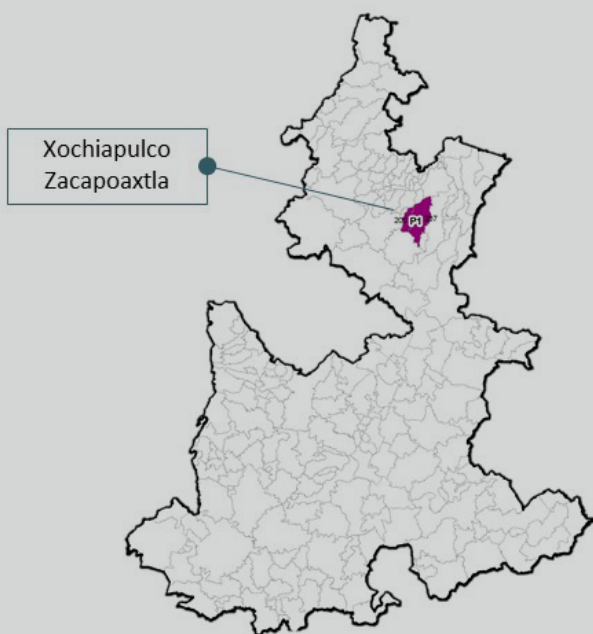
Está establecido en 165 ha en el estado y sólo 83 ha están consideradas en un PD: P1 Zacapoaxtla con dos municipios (Tabla 14 y Mapa 13) que forman parte de la cuenca R Tecolutla (ver Mapa 1)

Polo de desarrollo	municipio	superficie (ha)		producción (t)	rendimiento (t/ha)	valor de producción (\$)
		sembrada	cosechada			
Polo 1 Zacapoaxtla	Xochiapulco	58	47	451	9.6	3,679,548
	Zacapoaxtla	25	20	188	9.4	1,540,820
	sumas	83	67	639	10	5,220,368
	totales	83	67	639	10	5,220,368

Tabla 14: Estadísticas agrícolas del higo por PD, 2019

Fuente: SIAP, 2020





Mapa 13: Distribución espacial, superficie sembrada y régimen hídrico

Fuente: Elaboración propia con información de SIAP, 2020

Como se muestra en la Figura 26, la producción de higo dispone de dos fuentes de abastecimiento: agua subterránea con un volumen de más de 28 millones de $\text{m}^3/\text{año}$ (96%) del acuífero de Tecolutla, y agua de lluvia con 1,191,296 $\text{m}^3/\text{año}$ (4%), lo que hace un total de 29,836,811 $\text{m}^3/\text{año}$ (100%).

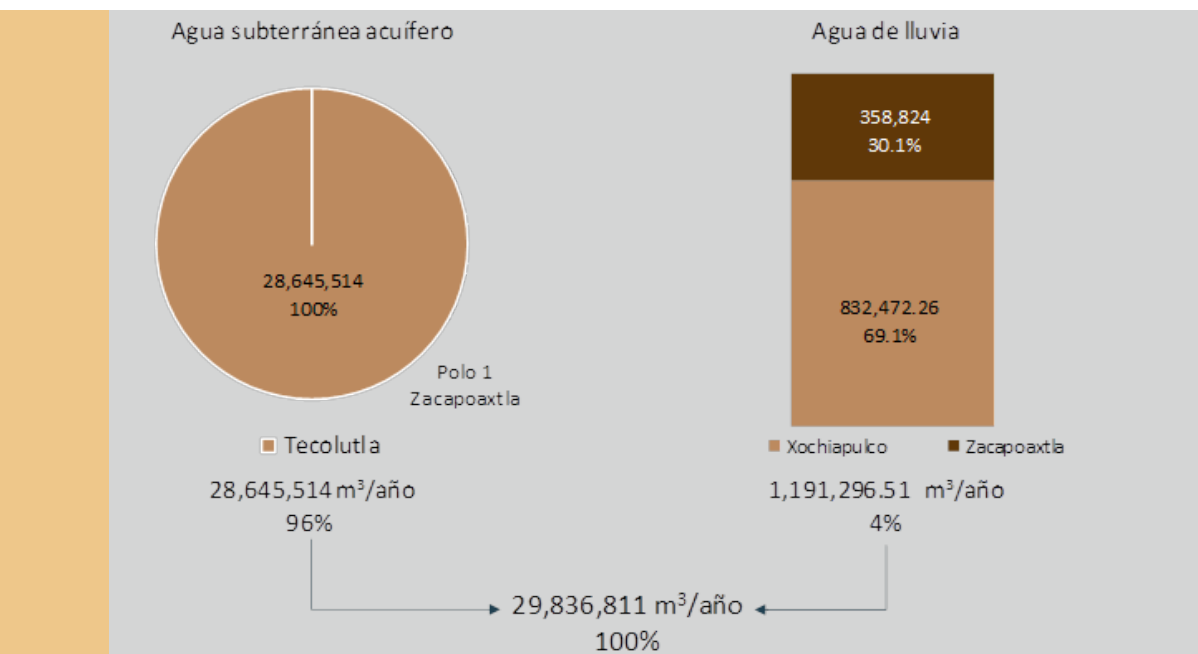


Figura 26: Volumen de agua disponible (m³/año) por tipo de fuente.

Fuente: Elaboración propia con información de SIGA, 2021

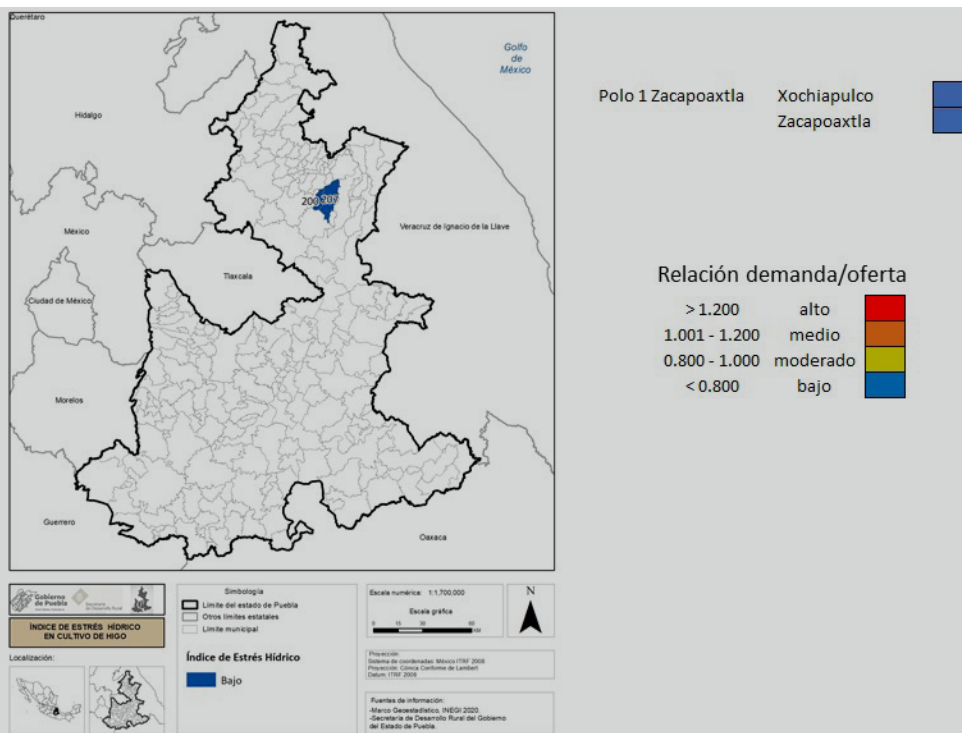
El volumen efectivo de agua utilizado en el desarrollo del cultivo es de 821,077 m³/año, que es suficiente para cubrir la demanda hídrica del higo por 508,488 m³/año, resultando un balance positivo con un superávit de 312,589 m³/año (Tabla 15). Las 83 hectáreas establecidas presentan un IEHR BAJO, Mapa 14.

Polo de Desarrollo	municipio	superficie sembrada (ha)	demanda hídrica (m³/año)	oferta hídrica (m³/año)		total	balance hídrico (m³/año)
				lluvia efectiva	subterránea		
Polo 1 Zacapoaxtla	Xochiapulco	58	355,329	573,765	0	573,765	218,436
	Zacapoaxtla	25	153,159	247,312	0	247,312	94,153
	sumas	83	508,488	821,077	0	821,077	312,589
total Polo de Desarrollo		83	508,488	821,077	0	821,077	312,589

Tabla 15: Disponibilidad y balance hídricos del higo

Fuente: SIAP, 2020

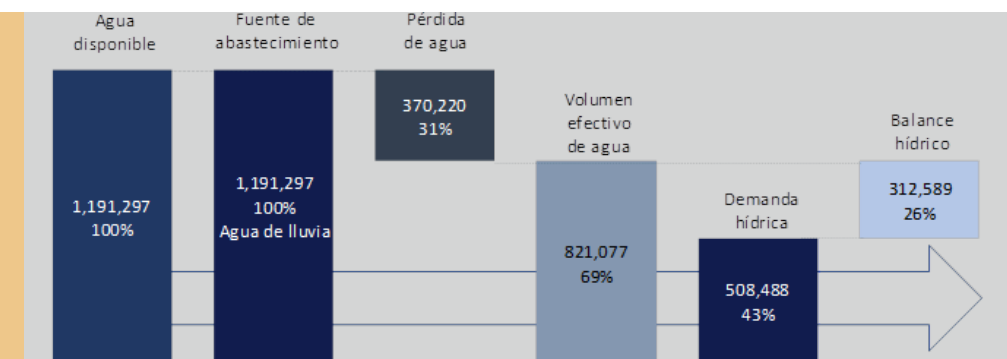




Mapa 14: Distribución espacial del IEHR del higo

Fuente: Elaboración propia

Con una superficie sembrada de 83 ha se obtuvieron 639 t. El volumen de agua disponible fue de 1,191,297 m³/año (100% agua de lluvia), quedando un volumen efectivo del 69% que fue suficiente para atender la demanda hídrica por 508,488, con un superávit del 26% respecto al agua disponible (Figura 27). La interrelación agua alimentos resultó de 0.778kg/m³.



Nota: los valores porcentuales están referidos al agua disponible.

Figura 27: Interrelación del agua con la producción de higo

El metabolismo del agua y las tasas metabólicas se muestran en la Figura 28 y Tabla 16. La eficiencia metabólica del cultivo es ALTA con un valor de $0.16 \text{ m}^3/\$$, al igual que el Polo 1 Xochiapulco con $0.15 \text{ m}^3/\$$ y el Polo Zacapoaxtla con $0.16 \text{ m}^3/\$$.

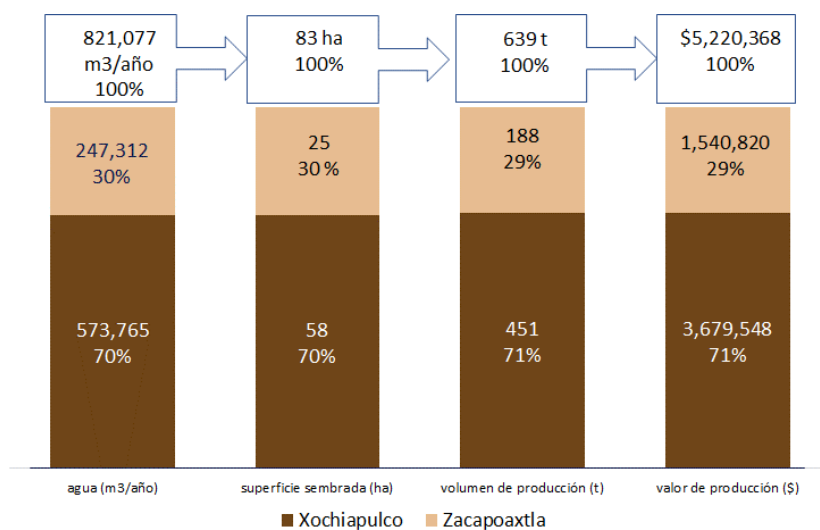


Figura 28: Metabolismo del agua en la producción de higo

Fuente: Elaboración propia

Tasa metabólica	Polo Sierra Nororiental
requerida por el cultivo (l/kg)	796
aplicada al cultivo (l/kg)	1,285
Volumen de agua para producir un kilogramo de higo (l/kg)	
diferencia agua aplicada-agua requerida (l/kg)	489
porcentaje agua aplicada/agua requerida	161.5%
Eficiencia monetaria del uso de agua aplicada (\$/m³)	6.36
Productividad del agua (kg/m³)	0.001
Rendimiento promedio (t/ha)	4.3
Relación con rendimiento promedio nacional (7.16 t/ha)	0.60

Tabla 16: Tasas metabólicas del higo

Fuente: Elaboración propia

III.1.6. Maíces Nativos



Es el cultivo de mayor importancia de los nueve, por la superficie sembrada (Figura 29 y Mapa 15). En el año agrícola 2020, de 472,930 ha sembradas en el estado se incluyeron 190,848 (40%) en siete PD: P1 Serdán, P2 Libres, P3 Sierra Norte, P4 San Martín, P5 Nororiental, P6 Atlixco, y P7 Tehuacán-Tecamachalco (SIAP, 2021 y SDR, 2021).

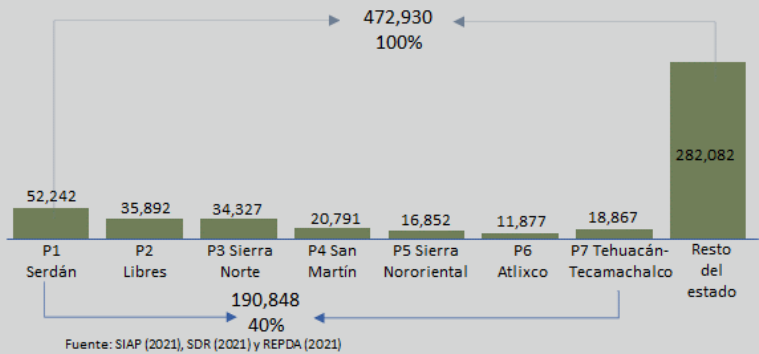


Figura 29: Superficie sembrada (ha) por PD





El volumen de agua disponible para su desarrollo es de 1,368,355,328 m³/año, de los cuales 96,727,246 (7%) corresponden a cuatro acuíferos y 1,271,628,328 (93%) es agua de lluvia, como se muestra en la Figura 30.

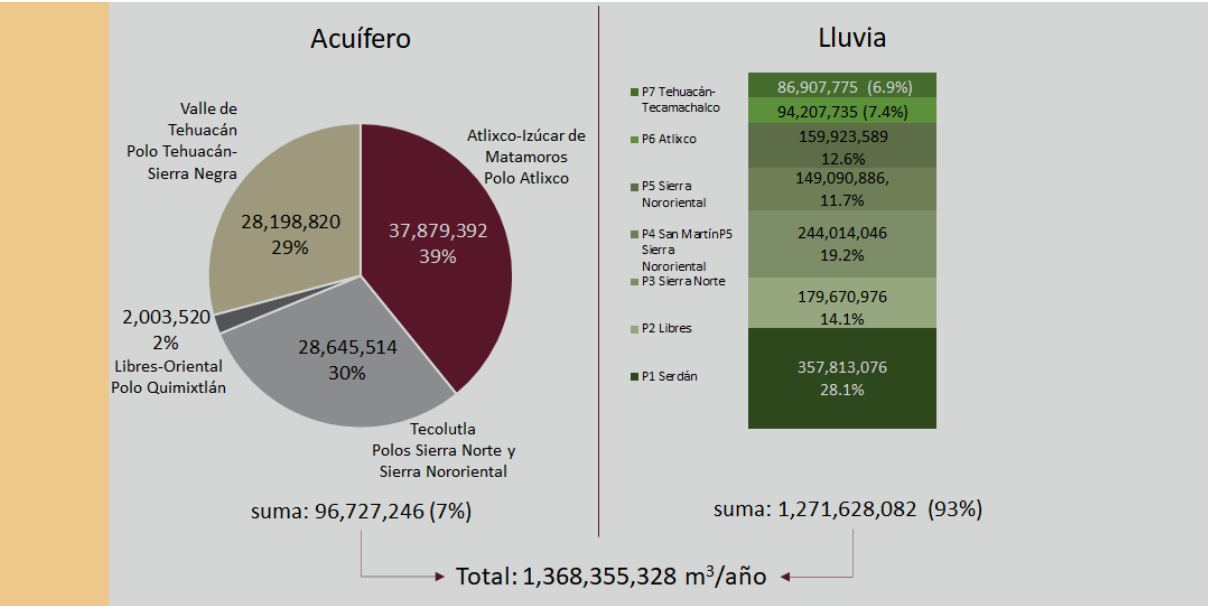


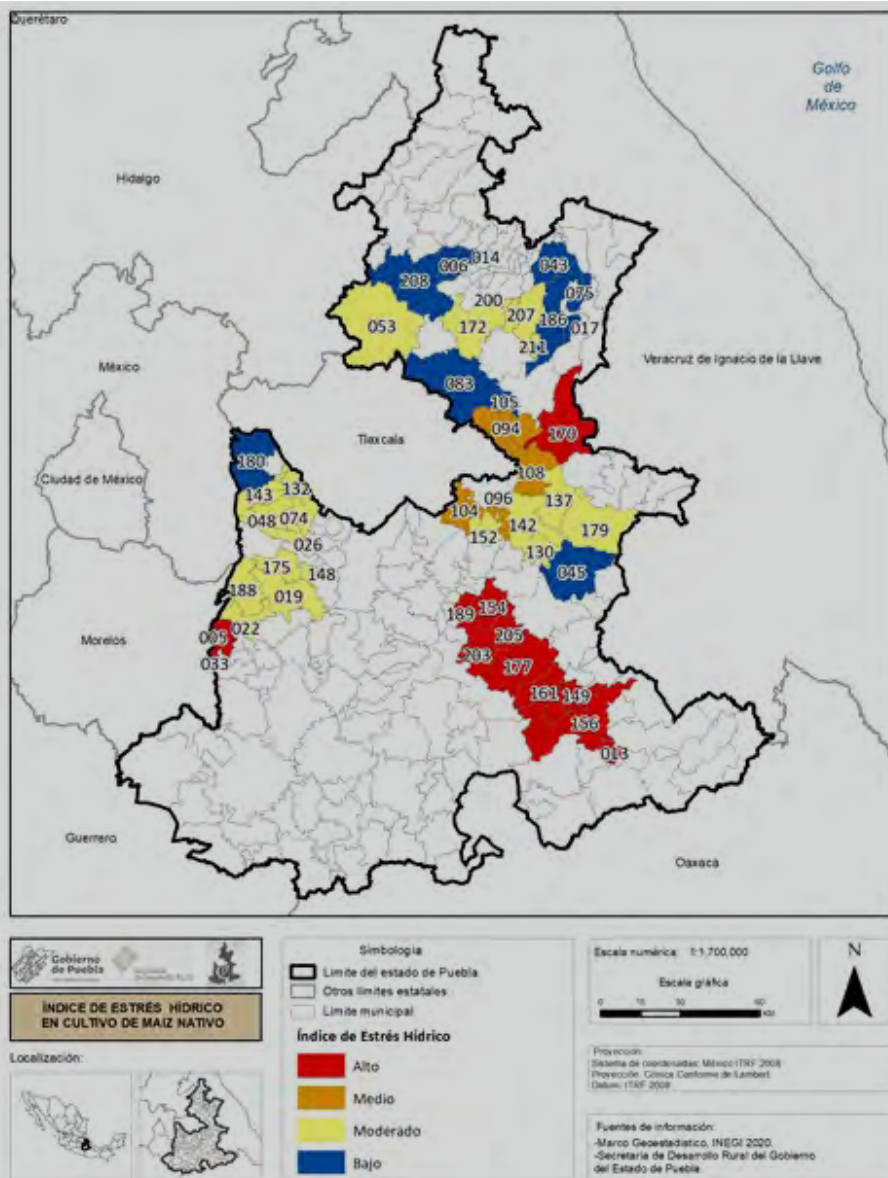
Figura 30: Volumen (m³/año) de agua disponible por tipo de fuente
Fuente: Elaboración propia con información de SIGA, 2021

Como se muestra en la Tabla 17, el agua efectiva de 982,588,357 m³/año satisface la demanda hídrica del cultivo por 899,882,640, resultando en el conjunto de los PD un superávit de 82,705,717, sin embargo, en lo individual, 30,199 ha (16%) tienen un IEHR ALTO, 21,645 ha MEDIO (11%), 84,509 (44%) MODERADO y 54,494 (29%) BAJO (Mapa 16 y Figura 31).

Polo de Desarrollo	municipio	superficie	demanda hídrica	disponibilidad hídrica (m3/año)		balance (m3/año)
		sembrada	(m3/año)	lluvia efectiva	subterránea	
Polo 1 Serdán	Aljojuca	2,135	9,651,054	11,805,828	0	2,154,774
	Chalchicomula de Sesma	14,491	62,325,647	78,598,477	0	16,272,830
	San Juan Atenco	2,836	12,501,869	15,149,400	0	2,647,531
	San Nicolás Buenos Aires	7,865	35,552,947	43,490,792	0	7,937,844
	San Salvador El Seco	8,860	40,050,746	48,992,806	0	8,942,060
	Tlachiçuca	16,055	72,575,025	88,778,724	0	16,203,699
	sumas	52,242	232,657,288	286,816,027	0	54,158,739
Polo 2 Libres	Libres	6,995	32,529,985	30,656,057	0	-1,873,928
	Nopalucan	7,000	32,553,237	30,677,969	0	-1,875,268
	Ocotepéc	1,347	6,263,550	5,903,318	0	-360,232
	Oriental	4,400	20,462,035	19,283,295	0	-1,178,740
	Tepeyahualco	10,252	49,779,733	36,408,627	0	-13,371,106
	Mazapiltepec de Juárez	1,903	8,849,830	8,340,025	0	-509,805
	sumas	35,892	168,497,369	153,360,291	0	-15,137,078
Polo 3 Sierra Norte	Ahuacatlán	956	4,256,691	5,426,067	0	1,169,375
	Amixtlán	314	1,942,665	2,732,480	0	789,816
	Chignahuapan	11,238	44,509,118	55,031,312	0	10,522,193
	Ixtacamaxtitlán	10,495	46,755,889	59,600,415	0	12,844,526
	Tetela de Ocampo	2,365	10,686,956	12,608,403	0	1,921,446
	Zacatlán	8,960	39,918,008	50,884,068	0	10,966,060
	sumas	34,327	148,069,328	186,282,745	0	38,213,417
Polo 4 San Martín	Calpan	2,291	12,152,555	13,037,220	0	884,665
	Chiautzingo	1,211	6,424,562	6,509,627	0	85,065
	Domingo Arenas	758	3,853,553	4,164,412	0	310,859
	Huejotzingo	3,810	19,369,440	20,931,938	0	1,562,498
	San Felipe Teotlalcingo	1,380	7,321,136	7,418,072	0	96,937
	San Martín Texmelucan	2,319	12,302,691	12,465,587	0	162,896
	sumas	20,791	101,948,845	116,129,867	0	14,181,023
Polo 5 Sierra Nororiental	Atempan	1,632	5,540,925	7,092,169	0	1,551,244
	Cuetzalan del Progreso	2,323	16,065,067	23,481,839	0	7,416,772
	Hueyapan	1,192	4,046,030	5,178,761	0	1,132,731
	Tlaltlauquitepec	6,431	21,834,370	27,947,144	0	6,112,775
	Xochiapulco	731	3,610,974	4,348,790	0	737,815
	Zacapoaxtla	2,282	11,272,563	13,575,839	0	2,303,276
	sumas	16,852	73,540,437	95,077,474	0	21,537,037
Polo 6 Atlixco	Actopan	370	2,936,899	2,038,821	0	-898,078
	Atlixco	4,311	24,957,360	25,284,539	0	327,179
	Atlixcohuacán	1,180	6,831,764	6,921,325	0	89,561
	Cohuecan	710	4,971,606	4,028,901	0	-942,705
	Santalabel Cholula	766	4,552,353	4,809,734	0	257,381
	Tianguismanalco	1,790	10,363,439	10,499,298	0	135,860
	sumas	11,877	70,130,778	70,042,966	0	-87,813
Polo 7 Tehuacán-Tecamachalco	Altepexi	285	1,683,769	1,025,734	0	-658,035
	Santiago Miahuatlán	1,320	7,798,509	4,750,769	0	-3,047,740
	Tecamachalco	3,080	16,702,216	12,724,766	0	-3,977,450
	Tehuacán	2,403	14,196,831	8,648,559	0	-5,548,272
	Tepanco de López	1,756	10,374,380	6,319,963	0	-4,054,418
	Tlacotepec de Benito Juárez	4,510	24,387,007	18,632,692	0	-5,754,315
	sumas	18,867	105,038,594	74,878,987	0	-30,159,607
Total del Polo		190,848	899,882,640	982,588,357	0	82,705,717

Tabla 17: Disponibilidad y balance hídricos por municipio y Polos de Desarrollo

Fuente: Elaboración propia



Mapa 16: Distribución espacial de IEHR del maíz nativo por municipio

Fuente: Elaboración propia

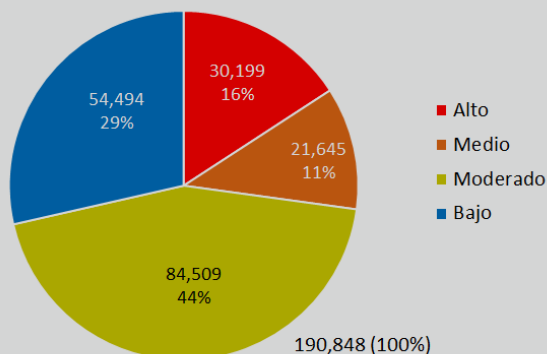
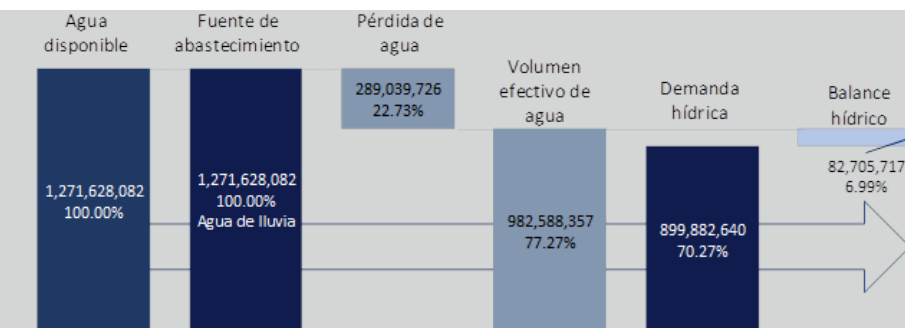


Figura 31: IEHR por superficie (ha)

Fuente: Elaboración propia

Los maíces nativos se siembran en su totalidad en temporal y dispusieron de un volumen de agua de lluvia de 1,271,628,082 m³/año (100%), que después de la evaporación, infiltración y escorrentía quedaron 982,588,357 m³/año de agua efectiva (Figura 32) con la que se obtuvieron 399,924 t del grano. La interrelación alimentos-agua fue de 0.407 kg/m³.



Nota: los valores porcentuales están referidos al agua total aprovechable.

Figura 32: Interrelación del agua (m³/año) con la producción de maíces nativos

Fuente: Elaboración propia

Respecto al metabolismo del agua (Figura 33) su eficiencia metabólica fue de 0.58 m³/\$ y está clasificada como BAJA. En la Tabla 18 se muestran los valores por cada Polo de Desarrollo.

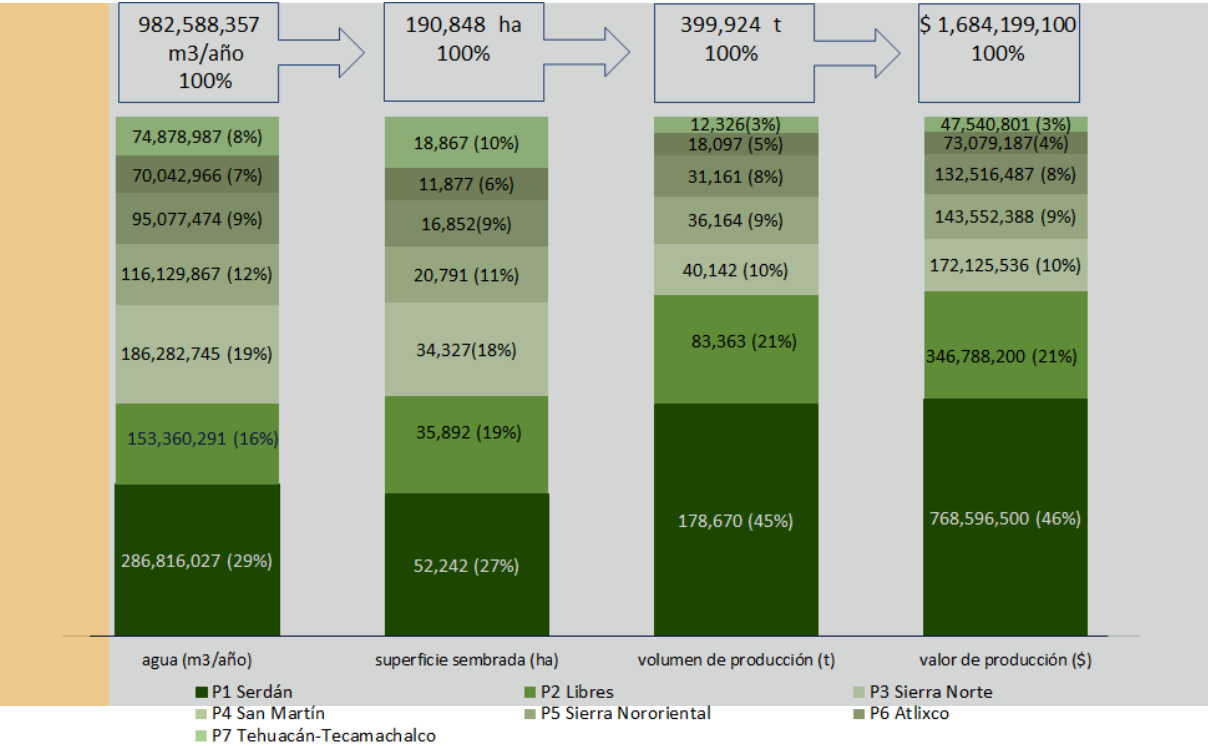


Figura 33: Metabolismo del agua en la producción de maíces nativos

Fuente: Elaboración propia

Polo de Desarrollo	Rango	Calificación cualitativa
Polo 1 Serdán	0.37	Media
Polo 2 Libres	0.44	Media
Polo 3 Sierra Norte	1.08	Muy Baja
Polo 4 San Martín	0.81	Muy Baja
Polo 5 Sierra Nororiental	0.72	Baja
Polo 6 Atlixco	0.96	Muy Baja
Polo 7 Tehuacán-Tecamachalco	1.58	Muy Baja

Tabla 18: Eficiencias metabólicas por Polo de Desarrollo

Fuente: Elaboración propia

En cuanto a las tasas metabólicas, se destaca que el Polo Tehuacán-Tecamachalco tiene el menor rendimiento promedio con 0.69 t/ha y la cantidad de agua disponible es insuficiente para satisfacer la demanda hídrica del cultivo, Tabla 19.

Tasa metabólica		Polo de Desarrollo						
		P1 Serdán	P2 Libres	P3 Sierra Norte	P4 San Martín	P5 Sierra Nororiental	P6 Atlixco	P7 Tehuacán-Tecamachalco
Volumen de agua requerida y aplicada para producir un kilogramo de maíz nativo (l/kg)	requerida por el cultivo (l/kg)	1,302	2,021	3,689	2,819	2,360	3,875	8,521
	aplicada al cultivo (l/kg)	1,605	1,840	2,235	3,211	3,051	3,870	6,075
	diferencia agua aplicada-agua requerida (l/kg)	303	-182	-1,454	392	691	-5	-2,447
	porcentaje agua aplicada/agua requerida	123.3%	91.0%	60.6%	113.9%	129.3%	99.9%	71.3%
Eficiencia monetaria del uso de agua aplicada (\$/m³)		2.68	2.26	0.92	1.24	1.39	1.04	0.63
Productividad del agua (kg/m³)		0.623	0.544	0.215	0.311	0.328	0.258	0.165
Rendimiento promedio (t/ha)		3.38	2.48	1.15	1.67	1.66	1.54	0.69
Relación con rendimiento promedio nacional (2.47 t/ha)		1.37	1.00	0.47	0.68	0.67	0.62	0.28

Tabla 19: Tasas metabólicas de maíces nativos por Polo de Desarrollo

Fuente: Elaboración propia



III.1.7. Pitaya-Pitahaya



La superficie establecida de pitaya en el estado, al 2019, fue de 172 ha de las que 150 (87%) está incluida en tres PD, mientras que la superficie de pitahaya en Puebla, al 2020, fue de 131 ha, y 111 ha corresponden a dos PD (Figura 34 y Mapa 17), y forman parte de las cuencas Río Atoyac y Río Papaloapan (Ver Mapa 1). Las estadísticas agrícolas se muestran en las Tablas 20 y 21.



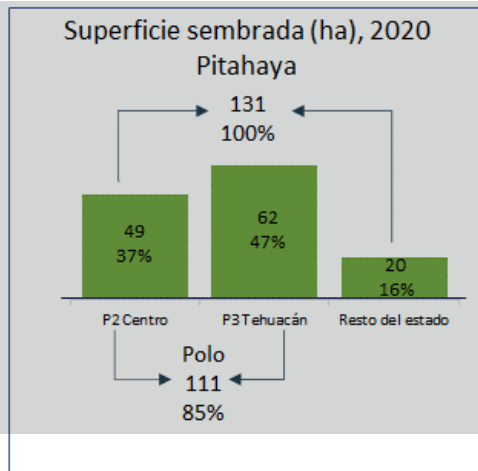
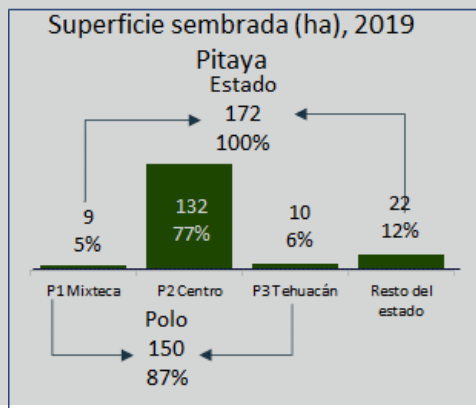


Figura 34: Superficies (ha) establecidas por cultivo y PD

Fuente: Elaboración propia con información de SIAP, 2020 y 2021

Polo de desarrollo	municipio	superficie (ha)		producción (t)	rendimiento (t/ha)	valor de producción (\$)
		sembrada	cosechada			
Polo 1 Mixteca	San Jerónimo Xayacatlán	9	9	53	6	398,175
	sumas	9	9	53	6	398,175
Polo 2 Centro	Huitziltepec	87	87	279	3	4,108,992
	Tepexi de Rodríguez	10	6	18	3	258,216
	Tepeyahualco de Cuauhtémoc	15	15	49	3	716,471
	Xochitlán Todos Santos	5	5	14	3	195,450
	Yehualtepec	13	13	39	3	571,740
	Zacapala	2	0	0	0	0
	sumas	132	126	399	3	5,850,868
Polo 3 Tehuacán	Caltepec	4	4	14	4	135,360
	Santiago Miahuatlán	3	3	6	2	60,250
	Tepanco de López	2	2	5	3	66,440
	Zapotitlán	2	2	4	3	58,800
	sumas	10	10	29	3	320,850
	totales	150	144	481	4	6,569,893

Tabla 20: Estadísticas agrícolas de pitaya

Fuente: SIAP, 2020

Polo de desarrollo	municipio	superficie (ha)		producción (t)	rendimiento (t/ha)	valor de producción (\$)
		sembrada	cosechada			
Polo 2 Centro	Huitziltepec	11	11	39	4	721,775
	Ixcaquixtla	1	1	3	3	60,745
	Santa Inés Ahuatempan	3	2	5	3	89,495
	Tepexi de Rodríguez	21	13	43	3	790,894
	Tepeyahualco de Cuauhtémoc	3	3	8	3	157,322
	Xochitlán Todos Santos	5	5	17	3	309,767
	Yehualtepec	5	5	14	3	266,744
	Zacapala	1	1	3.27	3.27	60400.53
	sumas	49	40	133	3	2,457,144
Polo 3 Tehuacán	Caltepec	37	29	155	5	2,245,470
	Coxcatlán	1	1	4	4	55,350
	San Gabriel Chilac	7	4	13	3	184,740
	San José Miahuatlán	7	5	17	3	233,310
	Santiago Miahuatlán	3	3	10	3	129,987
	Tehuacán	4	3	12	4	166,890
	Zinacatepec	3	2	7	4	86,140
	sumas	62	47	218	4	3,101,887
	totales	111	87	350	7	5,559,031

Tabla 21: Estadísticas agrícolas de la pitahaya

Fuente: SIAP, 2021

Para su producción, los cultivos disponen de un volumen anual de agua de 107,654,172 m³, de dos fuentes de abastecimiento: agua subterránea de tres acuíferos 106,075,177 (98.5%) y de agua de lluvia 1,578,995 (1.5%) (Figura 35).

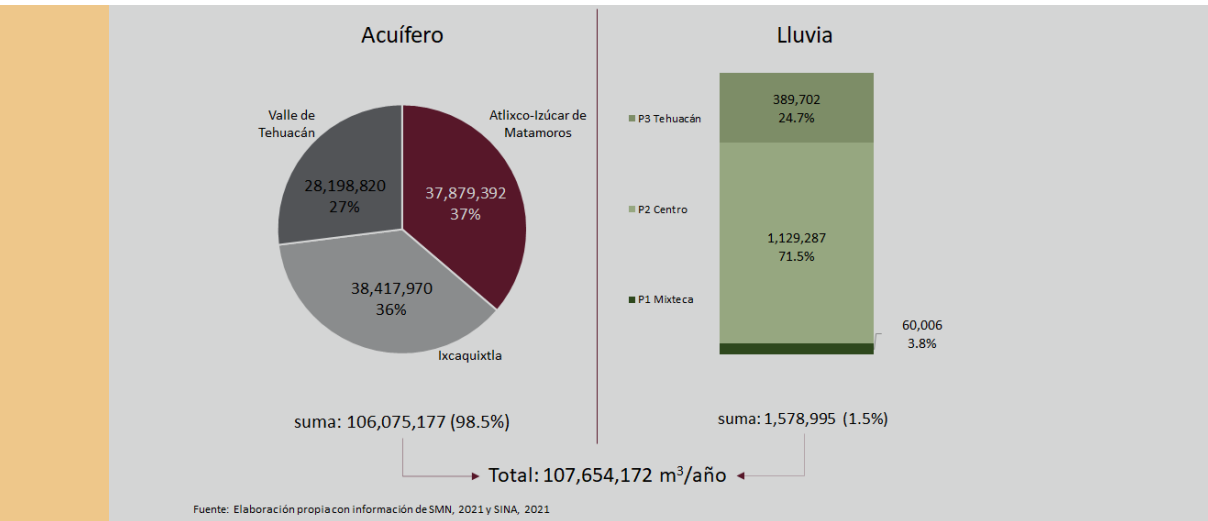


Figura 35: Volumen de agua (m³/año) disponible por tipo de fuente

Fuente: Elaboración propia con información de SIGA, 2021

Para su producción, la cadena productiva utilizó un volumen efectivo de agua anual de 1,363,178 m³, que resulta insuficiente para cubrir la demanda hídrica de 1,375,579 m³, resultando un déficit de 12,401 m³, como se muestra en las Tablas 22 y 23.

Polo de Desarrollo	municipio	superficie sembrada	demanda hídrica	disponibilidad hídrica (m³/año)		balance hídrico (m³/año)
				lluvia efectiva	subterránea	
Polo 1 Mixteca	San Jerónimo Xayacatlán	9	72,038	51,005	21,033	0
	sumas	9	72,038	51,005	21,033	0
Polo 2 Centro	Huitziltepec	87	427,940	443,007	0	15,066
	Tepexi de Rodríguez	10	56,725	62,475	0	5,750
	Tepeyahualco de Cuauhtémoc	15	73,770	76,380	0	2,610
	Xochitlán Todos Santos	5	22,131	22,914	0	783
	Yehualtepec	13	63,934	66,196	0	2,262
	Zacapala	2	11,345	12,495	0	1,150
	sumas	132	655,845	683,467	0	27,622
Polo 3 Tehuacán	Caltepec	4	21,903	15,922	0	-5,980
	Santiago Miahuatlán	3	13,412	29,174	0	15,761
	Tepanco de López	2	8,047	17,504	0	9,457
	Zapotitlán	2	8,047	17,504	0	9,457
	sumas	10	51,409	80,104	0	28,695
totales		150	779,292	814,576	21,033	56,317

Tabla 22: Disponibilidad y balance hídrico de la pitaya

Fuente: Elaboración propia

Polo de Desarrollo	municipio	superficie sebrada	demanda hídrica	disponibilidad hídrica (m3/año)		balance hídrico	
				lluvia efectiva	subterránea	total	(m3/año)
Polo 2 Centro	Huitziltepec	11	54,107	56,012	0	56,012	1,905
	Ixcaquixtla	1	5,675	6,247	0	6,247	572
	Santa Inés Ahuatempan	3	14,187	15,619	0	15,619	1,431
	Tepexi de Rodríguez	21	119,122	131,197	0	131,197	12,075
	Tepeyahualco de Cuauhtémoc	3	12,295	12,730	0	12,730	435
	Xochitlán Todos Santos	5	24,590	25,460	0	25,460	870
	Yehualtepec	5	22,131	22,914	0	22,914	783
	Zacapala	1	5,672	6,247	0	6,247	575
	sumas	49	257,780	276,427	0	276,427	18,647
Polo 3 Tehuacán	Caltepec	37	202,599	147,281	0	147,281	-55,318
	Coxcatlán	1	7,151	3,518	0	3,518	-3,633
	San Gabriel Chilac	7	37,554	29,267	0	29,267	-8,287
	San José Miahuatlán	7	37,554	29,267	0	29,267	-8,287
	Santiago Miahuatlán	3	16,095	12,543	0	12,543	-3,552
	Tehuacán	4	21,460	16,724	0	16,724	-4,736
	Zinacatepec	3	16,095	12,543	0	12,543	-3,552
	sumas	62	338,507	251,142	0	251,142	-87,365
	totales	111	596,287	527,569	0	527,569	-68,718

Tabla 23: Disponibilidad y balance hídrico de la pitayaha

Fuente: Elaboración propia

Respecto al IEHR resultó que en 66 ha (25%) es ALTO, 190 ha (73%) MODERADO y 6 ha (2%) BAJO, como se muestra en la Figura 36 y Mapa 18.

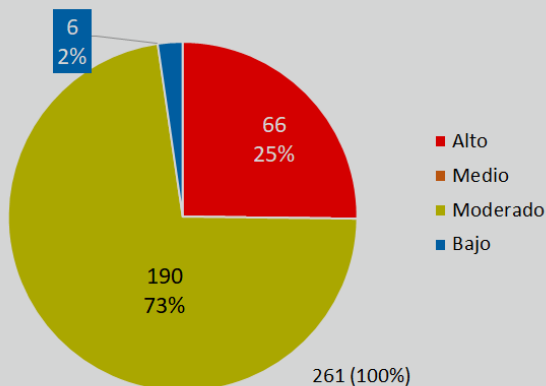


Figura 36: IEHR de la cadena productiva por superficie (ha)

Fuente: Elaboración propia

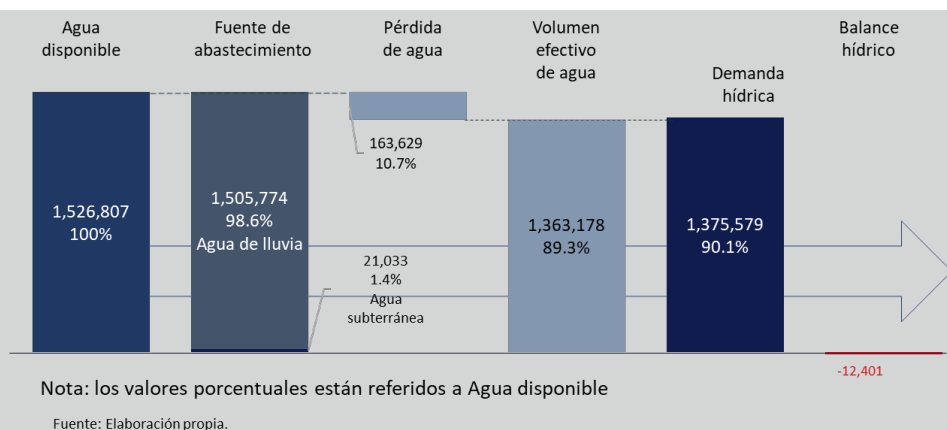


Figura 37: Interrelación del agua con la producción de Pitaya-Pitahaya

El metabolismo del agua se muestra en la Figura 38. La eficiencia metabólica promedio es ALTA con un valor de $0.11 \text{ m}^3/\$$, al igual que en cada Polo de Desarrollo: P1 Mixteca con $0.18 \text{ m}^3/\$$, P2 Centro con $0.12 \text{ m}^3/\$$, y P3 Tehuacán con $0.09 \text{ m}^3/\$$.

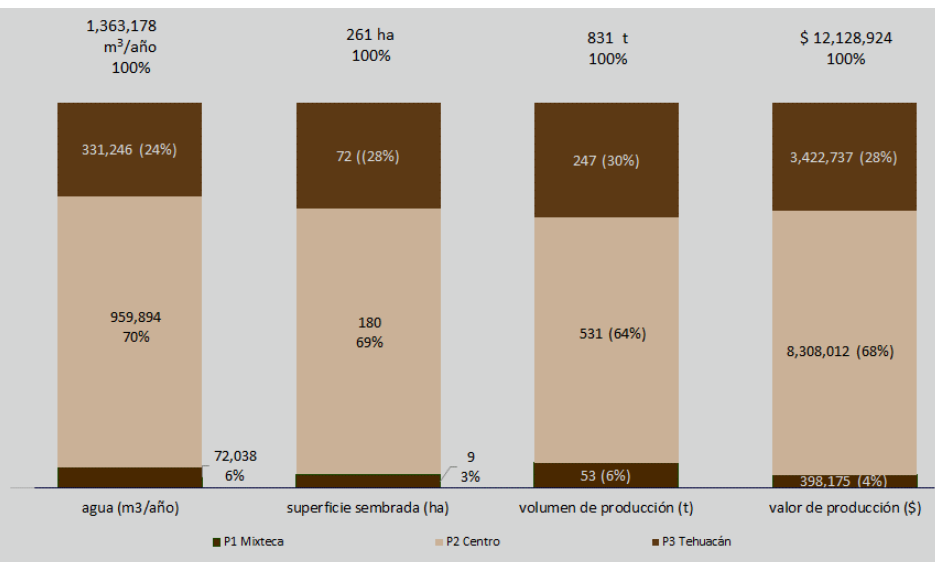


Figura 38: Metabolismo del agua en la producción de pitaya-pitahaya

Fuente: Elaboración propia

Como se muestra en la Tabla 24, la pitahaya tiene un mejor desempeño metabólico al satisfacer la demanda hídrica del cultivo y con una productividad mayor.

Tasa metabólica		P1 Teziutlán	
		Pitaya	Pitahaya
Volumen de agua requerida y aplicada para producir un kilogramo del cultivo (l/kg)	requerida por el cultivo (l/kg)	1,621	1,702
	aplicada al cultivo (l/kg)	1,738	1,506
	diferencia agua aplicada-agua requerida (l/kg)	117	-196
	porcentaje agua aplicada/agua requerida	107.2%	88.5%
Eficiencia monetaria del uso de agua aplicada (\$/m³)		7.86	10.54
Productividad del agua (kg/m³)		0.575	0.001
Rendimiento promedio (t/ha)		3.77	4.27
Relación con rendimiento promedio nacional (pitaya 3.73 t/ha) y pitahaya 6.04 t/ha)		1.01	0.71

Tabla 24: Tasas metabólicas de pitaya-pitahaya

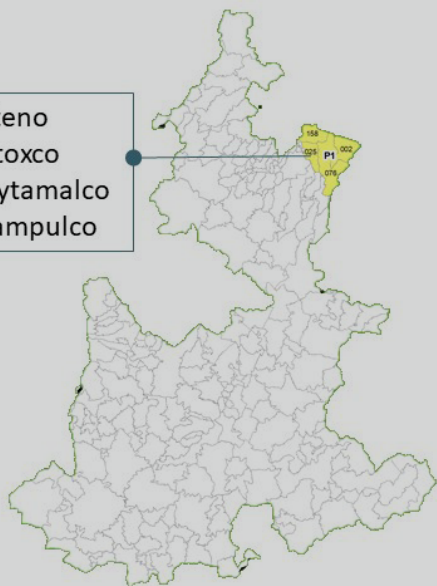
Fuente: Elaboración propia

III.1.8. Plátano-Cítricos

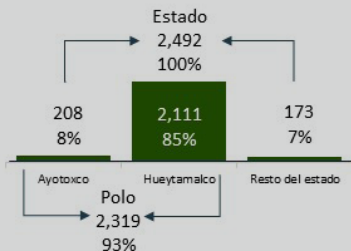


La superficie establecida de plátano en el estado es de 2,492 ha, de ellas, 2,319 (93%) se localizan en dos municipios, y la de cítricos es de 36,191 ha, de las cuales 11,095 ha (30%) de cuatro municipios forman los dos PD. El territorio de los cultivos se encuentra dentro de las cuencas hidrográficas Río Nautla y otros, y Río Tecolutla, (Ver Mapa 1), (Mapa 19 y Tabla 25).

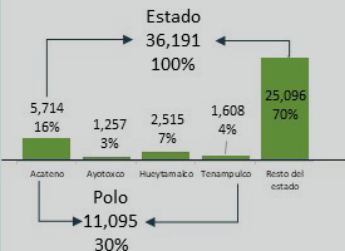
Acateno
Ayotoxco
Hueytamalco
Tenampulco



Superficie sembrada (ha), 2020
Plátano



Superficie sembrada (ha), 2020
Cítricos



Fuente: SIAP, 2021

Mapa 19: Distribución espacial y superficies sembradas de plátano y cítricos

Cultivo	municipio	superficie (ha)		producción (t)	rendimiento (t/ha)	valor de producción (\$)
		sembrada	cosechada			
Plátano	Ayotoxco	208	200	3,066	15.4	15,798,113
	Hueytamalco	2,111	2,058	33,456	16.3	157,282,387
	sumas	2,319	2,257	36,522	15.8	173,080,501
Cítricos	Acateno	5,714	5,643	80,648	14.4	265,217,311
	Ayotoxco	1,257	1,208	16,430	13.7	52,721,461
	Hueytamalco	2,515	2,470	33,509	13.4	102,719,510
	Tenampulco	1,608	1,556	22,138	13.8	69,573,890
	sumas	11,095	10,878	152,726	13.8	490,232,172
Total Polo de Desarrollo		13,414	13,135	189,248	15	663,312,673

Tabla 25: Estadísticas agrícolas de plátano y cítricos

Fuente: SIAP, 2021

El territorio dispone de un volumen de agua anual de 305,432,832 m³, de dos fuentes de abastecimiento: el acuífero Tecolutla con 28,645,514 m³ (9%) y agua de lluvia con 276,787,318 (91%), Figura 39.

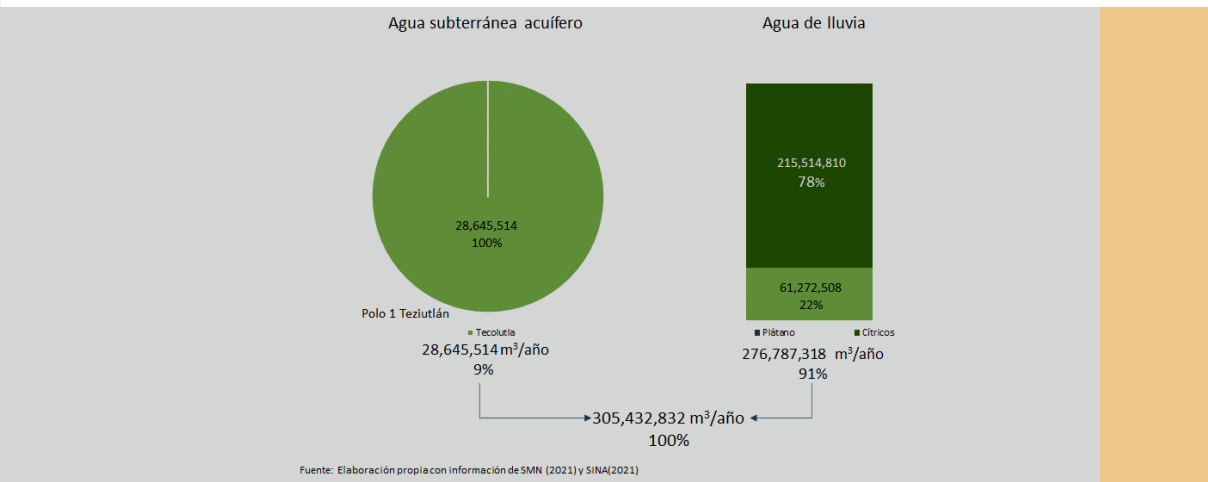


Figura 39: Volumen de agua disponible (m³/año) por tipo de fuente

El volumen de agua efectiva anual es de 173,565,846 m³, que cubre la demanda hídrica de los cultivos de 140,212,335 m³, con superávit de 33,353,511 m³ (Tabla 26).

Cultivo	municipio	superficie sembrada (ha)	demanda hídrica (m3/año)	disponibilidad hídrica (m3/año)		superávit/déficit (m3/año)
				lluvia efectiva	subterránea	
Plátano	Ayotoxco	208	3,224,209	2,936,494	0.0	2,936,494
	Hueytamalco	2,111	28,386,029	31,232,632	0.0	31,232,632
	sumas	2,319	31,610,238	34,169,126	0.0	34,169,126
Cítricos	Acateno	5,714	59,916,836	61,769,889	0.0	61,769,889
	Ayotoxco	1,257	12,164,808	17,726,835	0.0	17,726,835
	Hueytamalco	2,515	21,143,254	37,221,661	0.0	37,221,661
	Tenampulco	1,608	15,377,200	22,678,335	0.0	22,678,335
	sumas	11,095	108,602,097	139,396,720	0.0	139,396,720
Total Polo de Desarrollo		13,414	140,212,335	173,565,846	0.0	173,565,846

Tabla 26: Disponibilidad y balance hídricos de plátano-cítricos

Fuente: Elaboración propia

Respecto al IEHR, 208 ha (2%) resultaron con IEHR MEDIO, 7,825 (58%) MODERADO y 5,381 (40%) BAJO, como se muestran en la Figura 40 y el Mapa 20.

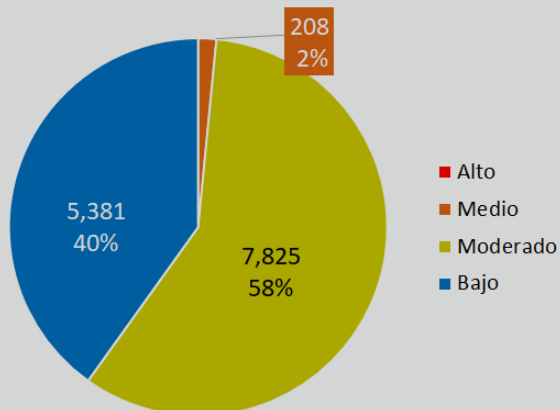
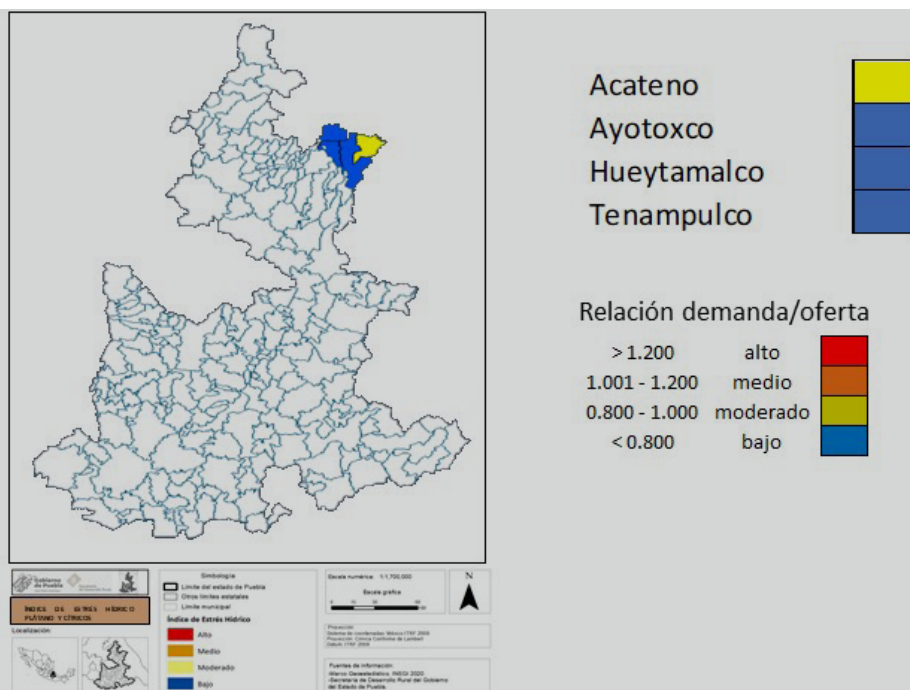


Figura 40: IEHR por superficie (ha)

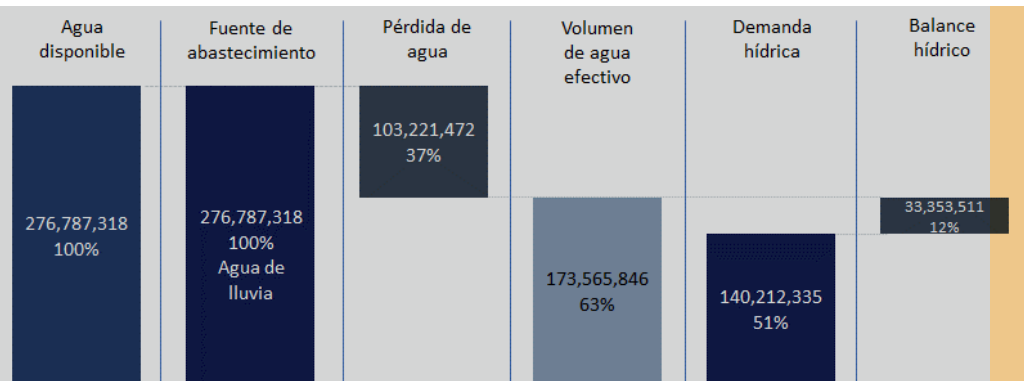
Fuente: Elaboración propia



Mapa 20: Distribución espacial de los IEHR

Fuente: Elaboración propia

Para su producción, los cultivos dispusieron de un volumen de agua de 1,526,807 m³/año con una pérdida de 163,629 m³/año (10.7%) con lo que el agua efectiva fue de 89.3% (Figura 41). La producción obtenida alcanzó 189,248 t, resultando una interrelación agua-alimentos de 1.090 kg/m³.



Nota: los valores porcentuales están referidos a la oferta hídrica

Fuente: Elaboración propia.

Figura 41: Interrelación del agua con la producción de los cultivos

Fuente: Elaboración propia

El metabolismo del agua se muestra en la Figura 42. La eficiencia metabólica promedio resultó MEDIA con un valor de 0.26 m³/\$, al igual que por cada Polo de Desarrollo: Plátano con 0.19 m³/\$ y Cítricos con 0.28 m³/\$.

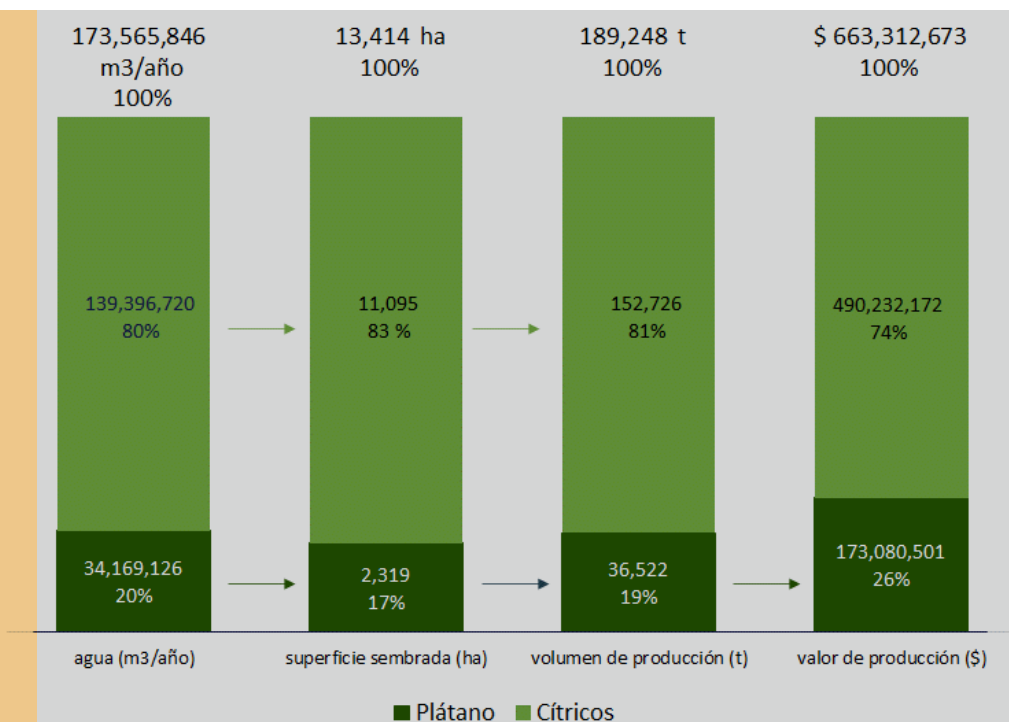


Figura 42: Metabolismo del agua en la producción de los cultivos

Fuente: Elaboración propia



Respecto a las tasas metabólicas, que se muestran en la Tabla 27, el plátano tiene una mayor eficiencia monetaria, mientras que los cítricos presentan un rendimiento mayor al promedio nacional.

Tasa metabólica		P1 Teziutlán	
		Plátano	Cítricos
Volumen de agua requerida y aplicada para producir un kilogramo del cultivo (l/kg)	requerida por el cultivo (l/kg)	866	711
	aplicada al cultivo (l/kg)	936	913
	diferencia agua aplicada-agua requerida (l/kg)	70	202
	porcentaje agua aplicada/agua requerida	108.1%	128.4%
Eficiencia monetaria del uso de agua aplicada (\$/m³)		5.07	3.52
Productividad del agua (kg/m³)		1.069	1.096
Rendimiento promedio (t/ha)		15.8	13.8
Relación con rendimiento promedio nacional (plátano 24.04 t/ha) y cítricos 12.77 t/ha)		0.66	1.08

Tabla 27: Tasas metabólicas de los cultivos

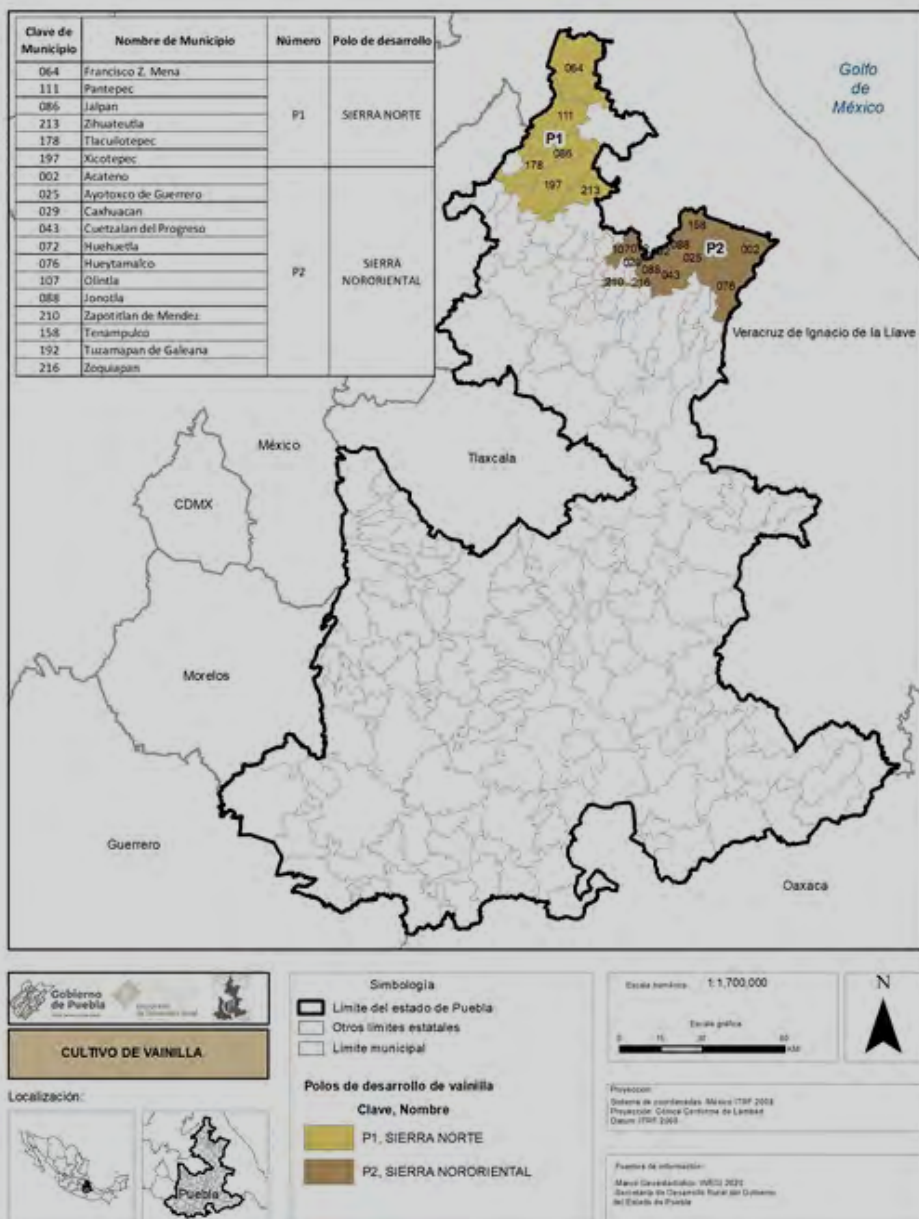
Fuente: Elaboración propia

III.1.9. Vainilla



De las 107 hectáreas establecidas en el estado, 37 (35%) forman parte de dos PD: P1 Sierra Norte y P2 Sierra Nororiental, su territorio está dentro de las cuencas de la Región RH27 Tuxpan-Nautla (ver Mapa 1). (Mapa 21 y Figura 43).





Mapa 21: Distribución espacial de la vainilla

Fuente: Elaboración propia con información de SDR, 2021

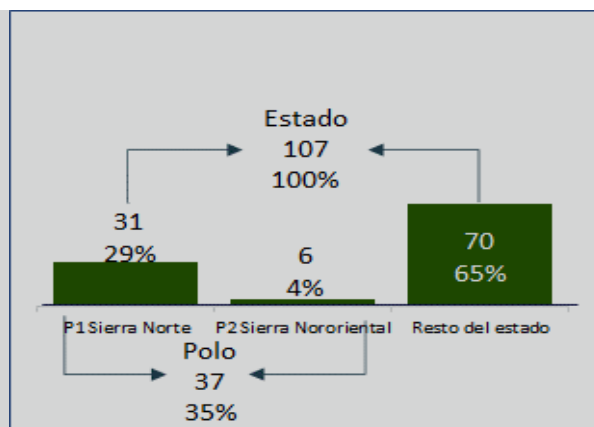


Figura 43: Superficie sembrada (ha) por Polo de Desarrollo

Fuente: Elaboración propia con información de SIAP, 2021

Para su desarrollo, la vainilla dispone de un volumen de agua anual de 29,256,893 m³, proveniente de dos fuentes de abastecimiento: el acuífero Tecolutla con 28,645,514 m³ (98%) y agua de lluvia con 611,379 m³ (2%). Figura 44.

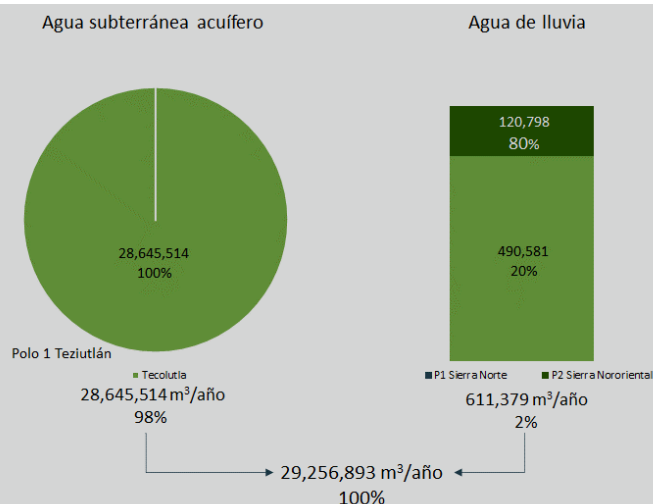


Figura 44: Volumen de agua disponible (m³/año) por tipo de fuente

Fuente: Elaboración propia con información de SIGA, 2021

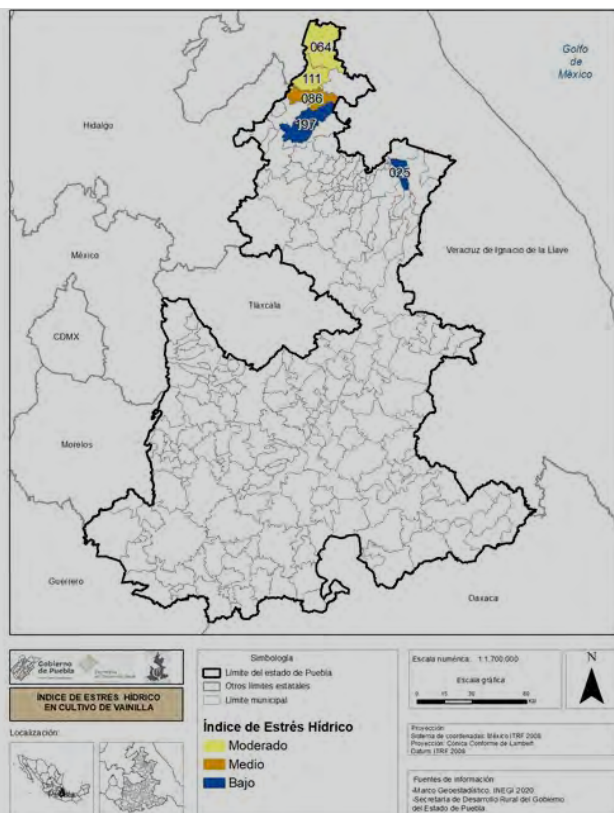
La demanda hídrica del cultivo es de 432,757 m³/año, que se satisface con un volumen de agua efectiva de 531,633 m³/año, resultando un superávit de 98,876 m³/año, como se muestra en la Tabla 28.

Polo de Desarrollo	municipio	superficie sembrada (ha)	demanda hídrica (m3/año)	disponibilidad hídrica (m3/año)		balance hídrico (m3/año)
				lluvia efectiva	subterránea	
Polo 1 Sierra Norte	Francisco Z. Mena	7	84,497	91,653	0	7,156
	Jalpan	7	84,759	82,388	0	-2,371
	Pantepec	12	149,541	178,934	0	29,392
	Xicotepec	5	45,378	73,617	0	28,239
	sumas	31	364,175	426,592	0	62,416
Polo 2 Sierra Nororiental	Ayotoxco de Guerrero	6	68,582	105,042	0	36,460
	sumas	6	68,582	105,042	0	36,460
totales		37	432,757	531,633	0	98,876

Tabla 28: Disponibilidad y balance hídricos de la vainilla

Fuente: Elaboración propia

El IEHR resultante es: 7 ha (19%) MEDIO, 19 ha (51%) MODERADO y 11 ha (30%) BAJO. Mapa 22 y Figura 45. Por otra parte, considerando el volumen de agua efectiva aplicada y la producción de 35 t, la interrelación agua-alimentos resultó de 0.066 kg/m³ (Figura 46).



Mapa 22: Distribución espacial de IEHR de la vainilla

Fuente: Elaboración propia

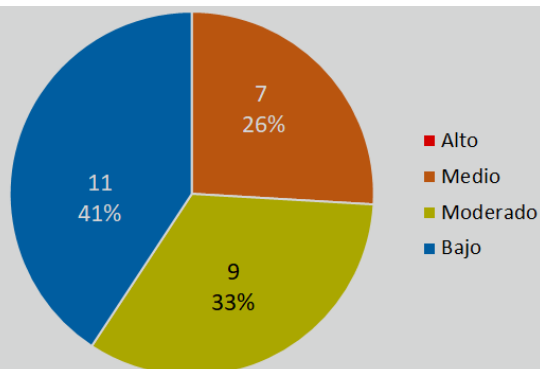
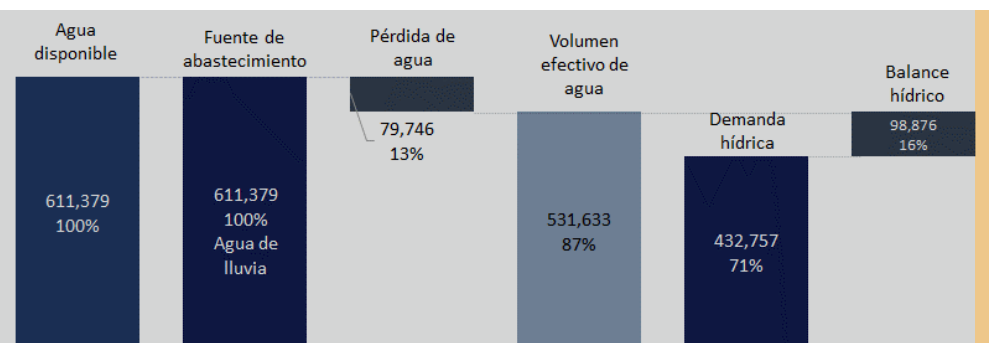


Figura 45: IEHR de la vainilla por rango y superficie (ha)

Fuente: Elaboración propia



Nota: los valores porcentuales están referidos a la oferta hídrica

Fuente: Elaboración propia.

Figura 46: Interrelación del agua con la producción de vainilla

Fuente: Elaboración propia

Con base en el metabolismo del agua, que se muestra en la Figura 47, la eficiencia metabólica promedio resultó MEDIA con un valor de $0.27 \text{ m}^3/\$$, al igual que el Polo de Desarrollo P1 Sierra Norte con $0.24 \text{ m}^3/\$$, mientras que el P2 Sierra Nororiental resultó Baja con $0.52 \text{ m}^3/\$$.

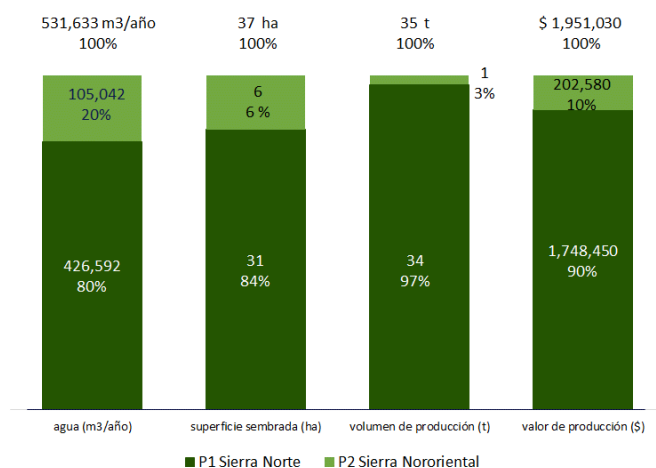


Figura 47: Metabolismo del agua en la producción de vainilla

Fuente: Elaboración propia

Respecto a las tasas metabólicas, la eficiencia monetaria por el agua aplicada es mayor en el Polo 1, al igual que su rendimiento promedio, que supera al nacional, como se muestra en la Tabla 29.

Tasa metabólica		P1 Sierra Norte	P2 Sierra Nororiental
Volumen de agua requerida y aplicada para producir un kilogramo del cultivo (l/kg)	requerida por el cultivo (l/kg)	10,711	68,582
	aplicada al cultivo (l/kg)	12,547	105,042
	diferencia agua aplicada-agua requerida (l/kg)	1,836	36,460
	porcentaje agua aplicada/agua requerida	117.1%	153.2%
Eficiencia monetaria del uso de agua aplicada (\$/m³)		4.10	1.93
Productividad del agua (kg/m³)		0.080	0.010
Rendimiento promedio (t/ha)		1.1	0.28
Relación con rendimiento promedio nacional 0.61 t/ha		1.80	0.46

Tabla 29: Tasas metabólicas de la vainilla

Fuente: Elaboración propia

Conclusiones y recomendaciones

IV.1. CONCLUSIONES

Los IEHR del conjunto de nueve cultivos muestran los siguientes resultados: 35,566 ha (13%) tienen un índice ALTO; 29,364 (11%) MEDIO; 113,752 (41%) MODERADO; y 98,284 (35%) BAJO (Figura 48). De un total de 2,087,794,484 m³/año de agua efectiva utilizada en el desarrollo de los cultivos, sólo 875,693 (0.04%) corresponde a riego tecnificado cuya agua es extraída de acuíferos y los restantes 2,086,918,792 (99.96%) son agua de lluvia, que depende de un temporal cada vez más errático. Como se muestra en el Mapa 23, una cantidad importante de los municipios con IEHR alto se localizan en la zona del Acuífero Valle de Tecamachalco que presenta un déficit de agua de más de 63 millones de m³/año.

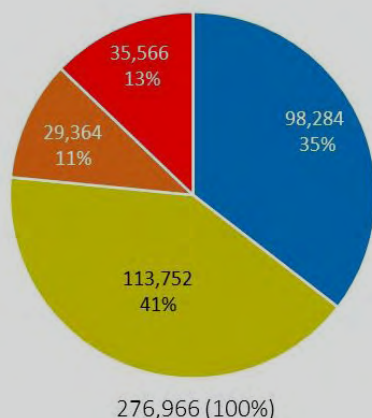


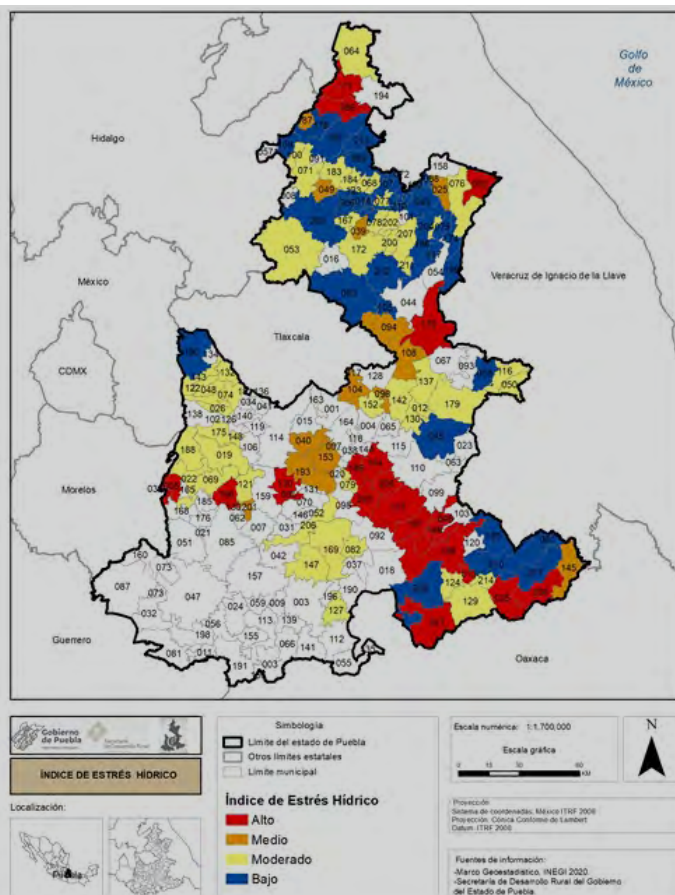
Figura 48: IEHR por superficie y rango

Fuente: Elaboración propia

56 municipios con un Bajo Índice de estrés no experimentan presiones sobre el recurso hídrico, incluso, es posible mejorar la productividad mediante el incremento en la densidad de población de plantas. En 62 municipios con índice Moderado, la disponibilidad de agua se puede convertir en un limitante de desarrollo, de manera preventiva es necesario implementar un programa de capacitación en la gestión adecuada del recurso hídrico.

En 12 municipios con índice Medio la oferta hídrica está llegando al límite máximo para atender la demanda, existe un alto riesgo de convertirse en un factor limitante de desarrollo. En 24 municipios con Índice Alto la oferta hídrica es insuficiente para atender la demanda de agua, se requieren inversiones en obras de captación y almacenamiento de lluvia para mejorar la eficiencia productiva.





Mapa 23: Distribución espacial de IEHR de los nueve cultivos

Fuente: Elaboración propia

Adicionalmente, en el Polo 4 Quimixtlán del cultivo de aguacate, se estimó la disponibilidad hídrica al 2050 para uso agrícola y para consumo humano, y el resultado mostró que la producción de aguacate en este Polo no compromete la disponibilidad de agua para satisfacer las necesidades humanas. Por otra parte, se muestra una tendencia a la disminución de la superficie sembrada, a una tasa promedio anual de -2.14%. La población dedicada a actividades agropecuarias en el territorio pasó de 70.28% a 53.77% de la PEA, entre 2010 y 2020.

IV.2. RECOMENDACIONES

En todos los casos, es conveniente realizar talleres de capacitación para concientizar a los productores en la importancia de realizar obras y prácticas de almacenamiento de agua y de conducción y aplicación en el riego agrícola a fin de lograr mayores eficiencias. De igual manera, es necesario difundir prácticas de conservación de suelo que eviten la erosión hídrica y eólica, que pueda causar afectaciones en los rendimientos y productividad.

También es importante ampliar el estudio considerando otras variables de entrada y salida, así como la evaluación del potencial impacto que pudiera tener en el futuro cultivos claves por una mayor presión de la demanda e impacto a la salud por uso de aguas residuales.

Asimismo, considerando que el agua para uso agrícola es el insumo más importante para garantizar la producción de alimentos en cantidades suficientes que mejoren las condiciones de vida de los habitantes del medio rural dedicados a esta actividad, es conveniente que las políticas públicas dirigidas al sector fortalezcan con la más alta prioridad las acciones y programas relacionados para incrementar las eficiencias en la captación, almacenamiento, conducción y aplicación del riego agrícola, que se abastece del agua de lluvia, agua superficial y agua subterránea.



Agradecimientos

Al Consejo de Ciencia y Tecnología del Estado de Puebla (Concytep), especialmente a su director general Dr. Victoriano Covarrubias Salvatori y a su equipo, no solo por su apoyo para la realización de este proyecto, sino por contagiar con su energía y ser puente para articular las necesidades de las Instituciones del Gobierno del Estado de Puebla con los Investigadores y Alumnos, permitiendo este mecanismo sembrar la semilla para formar nuevos investigadores para el Estado.

A la Secretaría de Desarrollo Rural del Gobierno del Estado de Puebla, particularmente a su titular Mtra. Ana Laura Altamirano Pérez, al subsecretario Dr. Oscar Hernández Fernández y Mtros. Julio Cesar Rosette Castro y Roberto Ruiz Silva, por su interés y facilidades otorgadas para llevar a cabo esta investigación y por su iniciativa de vincular a académicos e investigadores con los campesinos y campesinas para compartir saberes y conocimientos.

Al Colegio de Puebla A.C., de manera particular a la presidenta la Mtra. Yenifer López Guzmán por apoyar la investigación de incidencia en el estado y las facilidades otorgadas para realizar este trabajo con la SDR.

Referencias bibliográficas

1. Cabello-Villarejo, V. & Madrid Lopez, C, 2014. Water use in arid rural systems and the integration of water and agricultural policies in Europe: the case of Andarax river basin. *Environment, Development and Sustainability*. Volume 16, Issue 4, pp 957–975
2. Cabello V, Renner A & Giampietro M 2019, ‘Relational analysis of the resource nexus in arid land crop production’, *Advances in Water Resources*, vol. 130, pp. 258–269. DOI: 10.1016/j.advwatres.2019.06.014.
3. Cadillo-Benalcazar JJ, Renner A & Giampietro M 2020. ‘A multiscale integrated analysis of the factors characterizing the sustainability of food systems in Europe’, *Journal of Environmental Management*, vol. 271, article 110944. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110944>
4. CONAGUA, 2016. Atlas de Agua en México. SEMARNAT-CONAGUA. México, D.F. 140 p.
5. Cotler-Avalos H. y Caire, G., 2009. Lecciones aprendidas del manejo de cuencas en México. INE-SEMARNAT, Fundación Gonzalo Rìo Arronte, WWF. 380 p.
6. Delgado-Ramos G.C. & Louise Guibrunet, 2017. Assessing the ecological dimension of urban resilience and sustainability. *International Journal of Urban Sustainable Development*. ISSN: 1946-3138 (Print) 1946-3146 (Online) Journal homepage: <http://www.tandfonline.com/loi/tjue20>
7. Doorenbos, J. y Pruitt, W. 1977. Evapotranspiración del cultivo. Boletín 56. Organización de la Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. FAO. <https://www.fao.org/3/x0490s/x0490s00.htm>
8. Fernández, D., Martínez, M., Tavaréz, C., Castillo, R., Salas, R. (s/f). Estimación de las demandas de consumo de agua. Colegio de Postgraduados. México. demanda de consumo agua colpos.pdf



9. García, M., Vargas, O., Sánchez, F., González, C., Jaramillo, O. 2010. Estado y dinámica del agua en áreas hidrológicas de Colombia. Capítulo 8. Estudio Nacional del Agua. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. Colombia. <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/021888/CAP8.pdf>
10. Giampietro, M., 2003. Multi-Scale Integrated Analysis of Agroecosystems. *Advances In Agroecology*. Reino Unido: CRC Press INC.
11. Giampietro, M.; K. Mayumi y J. Ramos Martín. 2009. Multi-scale integrated analysis of societal and ecosystem metabolism (MuSIASEM): Theoretical concepts and basi rationale. *Energy* 34 (3): 313–322.
12. Giampietro, M.; K. Mayumi y A.H. Sorman (2012). *The Metabolic Pattern of Societies: Where Economists Fall Short*. Routledge Studies in Ecological Economics. Routledge.
13. Giampietro, M.; R.J. Aspinall; J. Ramos Martín y S. Bukkensed. 2014. *Resource Accounting for Sustainability Assessment: The Nexus between Energy, Food, Water and Land Use*. Routledge Explorations in Sustainability and Governance. London, UK: Routledge: Taylor and Francis Group.
14. Giampietro, M., Richard J. Aspinall, Sandra G.F. Bukkens, Juan Cadillo Benalcazar, François Diaz-Maurin, Alessandro Flammini, Tiziano Gomiero, Zora Kovacic, Cristina Madrid, Jesús Ramos-Martín, Tarik Serrano-Tovar, 2013. *An Innovative Accounting Framework for the Food-Energy-Water Nexus - Application of the MuSIASEM approach to three case studies*. Environment and Natural Resources Working Paper No.56 – FAO, Rome
15. Georgescu-Roegen, N. 1971. *The Entropy Law and the Economic Process*. Harvard University Press, Cambridge.
16. INEGI, 2020. *Síntesis geográfica del estado de Puebla*. 6 Hidrología. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México.
17. INEGI, 2017. *Anuario estadístico y geográfico de Puebla*.

- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México. http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/Productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/anuarios_2017/702825094973.pdf
18. Madrid-López, C.; V. Cabello y M. Giampietro, 2013. Water-Use Sustainability in Socioecological Systems: A Multiscale Integrated Approach. *BioScience* 63 (1): 14–24. 68
 19. Madrid-López, C. y M. Giampietro, 2014. Water Grammar. En: *Resource Accounting for Sustainability Assessment: The Nexus between Energy, Food, Water and Land Use* Routledge Explorations in Sustainability and Governance. London, UK: Routledge: Taylor and Francis Group.
 20. Madrid-López, C. y M. Giampietro, 2015. The Water Metabolism of Socio-Ecological Systems Reflections and a Conceptual Framework. *Journal of Industrial Ecology*. Volume 19, Number 5.
 21. Malo Larrea A., 2015. El metabolismo social, el Sumak Kawsay y el territorio: El caso de Cuenca, Ecuador. Tesis Doctoral. Doctorado en Ciencia y Tecnología Ambientales. Institut de Ciència i Tecnologia Ambientals. Universitat Autònoma de Barcelona, España.
 22. Renner A., Juan José Cadillo-Benalcazar, Lorenzo Benini, Mario Giampietro, 2020. Environmental pressure of the European agricultural system: Anticipating the biophysical consequences of internalization. *Ecosystem Services*, Volume 46, 101195, ISSN 2212-0416, <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2020.101195>.
 23. REPDA, 2021. Base de datos del Registro Público de Derechos de Agua. Comisión Nacional del Agua. México. <https://app.conagua.gob.mx/ConsultaRepda.aspx>
 24. SDR. 2021. Identificación de Polos de Desarrollo 2021. Secretaría de Desarrollo Rural. Puebla. Presentación de PP.
 25. SIGA, 2021. Aguas subterráneas/acuíferos. Subgerencia de Información Geográfica del Agua. Comisión Nacional del Agua.



- México. <https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/sections/Edos/puebla/puebla.html>
26. SIAP, 2021. Cierre de la producción agrícola (1980-2020). Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. México. <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>
27. Villanueva, J., Loredó, C., Hernández, A. 2001. Requerimientos hídricos de especies anuales y perennes en la zona media y altiplano de San Luis Potosí. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. México. <http://www.inifapcirne.gob.mx/Biblioteca/Publicaciones/755.pdf>



Gobierno de Puebla
Hacer historia. Hacer futuro.



**Secretaría
de Educación**

CONCYTEP
Consejo de Ciencia
y Tecnología del Estado
de Puebla