



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

ESTUDIO DEL NEXO AGUA-ALIMENTOS EN REGIONES LACUSTRES

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA QUÍMICA**

PRESENTA

I.A. Gustavo Álvarez Gómez

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Fabricio Nápoles Rivera

CO-DIRECTOR

Dr. Mario Alberto Pérez Méndez



Morelia Michoacán, diciembre 2025

DEDICATORIAS

A mi madre por su amor y apoyo a lo largo de mi vida.

A mi abuelito Rafael, por siempre apoyarme.

Y a todos mis amigos, que siempre han estado cuando lo necesito.

AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Fabricio Nápoles Rivera, por aceptarme en su grupo de trabajo, por todos sus consejos, y por apoyarme y guiarme en este proceso.

Al Dr. Mario Alberto Pérez Méndez, por todo su apoyo, guía, paciencia, consejos, y por creer en mí.

Al Dr. Rafael Maya Yescas, gracias por creer en mi y siempre apoyarme, aconsejarme y estar siempre.

A todos los miembros de mi mesa sinodal, al Dr. Roberto Guerra González y Dr. Luis Fernando Lira Barragán, por estar siempre al pendiente de mi trabajo.

Al SECIHTI, por el apoyo financiero durante mi estancia de maestría.

Finalmente, expreso mi gratitud a la Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo y a la División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería Química, por acogerme y permitirme realizar mis estudios de maestría en tan distinguida institución.

RESUMEN

Del agua disponible en el planeta, solo el 2.5% corresponde a agua dulce y gran parte de ella no es accesible para uso humano. En México, la disponibilidad aproximada es de 451,584.7 millones de m³, de los cuales la mayor parte se evapotranspira o escurre superficialmente, y solo una fracción recarga acuíferos. En la actualidad, el consumo de agua dulce ha crecido exponencialmente, generando así, problemas graves en su disponibilidad, así como problemas con los recursos que dependen de ella, particularmente los alimentos. Como respuesta a esta problemática, se ha intensificado la búsqueda de tecnologías y metodologías que ofrezcan soluciones sostenibles.

El presente trabajo se desarrolló en dos etapas: primero, un plan de muestreo para determinar la calidad del agua y estimar su disponibilidad considerando usos agrícolas y poblacionales, y segundo, la aplicación de un modelo de optimización multiobjetivo en GAMS para evaluar la asignación del recurso hídrico en una región lacustre.

El modelo obtenido se aplicó a la región lacustre del lago de Zirahuén, Michoacán; con el propósito de analizar su funcionamiento y explorar su posible adaptación a otras regiones lacustres. La intención es contribuir a la preservación de los cuerpos de agua debido a su importancia vital y sus múltiples funciones ambientales, tales como ser fuentes de agua superficial, reguladores del clima, filtros naturales y formadores de hábitats. Además, estos ecosistemas desempeñan un papel crucial en la producción de alimentos, al sustentar actividades como la pesca, la agricultura de riego y la recolección de recursos naturales, lo que refuerza la importancia del nexo entre agua y alimentos.

Los resultados de la investigación muestran que la calidad del agua en la zona de estudio se mantiene dentro de los límites permisibles para uso agrícola y doméstico. No obstante, se identificaron concentraciones elevadas de nutrientes y materia orgánica en algunos puntos, atribuibles principalmente a las actividades agrícolas cercanas al lago. Estos hallazgos evidencian una presión ambiental progresiva sobre el ecosistema lacustre. En cuanto al modelo desarrollado, los resultados muestran una asignación eficiente del recurso hídrico entre los sectores agrícola y poblacional, logrando producciones aceptables en condiciones climáticas normales. Sin embargo, bajo escenarios de estrés hídricos, la producción agrícola disminuye significativamente, evidenciando la vulnerabilidad de diferentes cultivos frente a la escasez de agua. En conjunto, los resultados confirman la utilidad del modelo como una herramienta de apoyo para la toma de decisiones, con potencial para orientar políticas públicas en materia de gestión hídrica, diversificación agrícola y seguridad alimentaria.

Palabras clave: Optimización, seguridad alimentaria, agricultura, calidad del agua, nexo agua-alimentos, políticas públicas.

ABSTRACT

Of the total water on the planet, only 2.5% is freshwater, and much of it is inaccessible for human use. In Mexico, the approximate availability is 451,584.7 million m³, with the majority lost to evapotranspiration and surface runoff and only a fraction contributing to aquifer recharge. Currently, the exponential growth in freshwater consumption has led to severe problems regarding its availability and created challenges for dependent resources, particularly food. In response, efforts have intensified to develop technologies and methodologies that provide sustainable solutions.

This research was conducted in two stages: first, designing a sampling plan to assess water quality and estimate its availability for both agricultural and municipal uses; and second, implementing a multi-objective optimization model in GAMS to evaluate water resource allocation in a lacustrine region.

The model was applied to the Zirahuén Lake region in Michoacán to analyze its performance and explore its potential for transferability to other lacustrine areas. The aim is to contribute to the preservation of these water bodies, given their vital importance and multifaceted environmental functions, including serving as surface water sources, climate regulators, natural filters and habitat providers. Moreover, these ecosystems play a critical role in food production, supporting fishing, irrigated agriculture, and natural resource harvesting, thus reinforcing the water-food nexus.

The resulting model was applied to the lacustrine region of Zirahuén Lake, Michoacán, with the purpose of analyzing its operation and exploring its possible adaptation to other lacustrine regions. The intention is to contribute to the preservation of water bodies due to their vital importance and their multiple environmental functions, such as being sources of surface water, climate regulators, natural filters, and habitat forms. Furthermore, these ecosystems play a crucial role in food production, supporting activities such as fishing, irrigation agriculture, and the conservation of natural resources, which reinforces the importance of the water-food nexus.

The research results show that the water quality in the study area remains within the permissible limits for agricultural and domestic use. However, elevated concentrations of nutrients and organic matter were identified at some points, mainly attributable to agricultural activities near the lake. These findings demonstrate progressive environmental pressure on the lacustrine ecosystem. Regarding the developed model, the results show an efficient allocation of the water resource between the agricultural and population sectors, achieving acceptable yields under normal climatic conditions. However, under water stress scenarios, agricultural production decreases significantly, demonstrating the vulnerability of different crops to water scarcity. Overall, the results confirm the utility of the model as a support tool

for decision-making, with the potential to guide public policies on water management, agricultural diversification, and food security.

Keywords: Optimization, food security, agriculture, water quality, water-food nexus, public policy.

CONTENIDO

RESUMEN.....	1
ABSTRACT	2
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	9
1.1. ANTECEDENTES.....	11
1.2. JUSTIFICACIÓN.....	15
1.3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	16
1.4. HIPÓTESIS	17
1.5. OBJETIVOS	17
1.5.1. OBJETIVO GENERAL	17
1.5.2. OBJETIVOS PARTICULARES	17
CAPITULO 2. MARCO TEÓRICO	18
2.1. NEXO AGUA-ALIMENTOS.....	18
2.2. DISPONIBILIDAD DE AGUA	19
2.3. CALIDAD DEL AGUA.....	19
2.4. AGRICULTURA	20
2.5. USO DE AGUA EN LA AGRICULTURA.....	21
2.6. OPTIMIZACIÓN	21
2.7. PROGRAMACIÓN MATEMÁTICA	22
2.8. GAMS	24
2.9. QGIS	24
2.10. CASO DE ESTUDIO: ZIRAHUÉN	25
CAPITULO 3. METODOLOGIAS	29
3.1. EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA.....	31
3.2. SUPERESTRUCTURA	32
3.3. MODELO MATEMÁTICO	33
3.3.1. BALANCE GENERAL DE AGUA FRESCA	35
3.3.2. BALANCE EN CULTIVOS (ENTRADAS Y SALIDAS)	36
3.3.3. DESCARGAS AL AMBIENTE	37
3.3.4. BALANCE DE CULTIVOS A POBLACIONES	37
3.4. ANÁLISIS DE COSTOS	40
CAPITULO 4. RESULTADOS	43
4.1. DATOS HIDRÓLOGICOS	43

4.2.	CALIDAD DEL AGUA.....	44
4.3.	FACTOR DE ESCURRIMIENTO ESTIMADO.....	48
4.4.	MODELO APLICADO AL CASO DE ESTUDIO.....	50
4.5.	VALOR DE LA FUNCIÓN OBJETIVO: MAXIMIZACIÓN DE LA PRODUCCIÓN TOTAL DE ALIMENTOS Y MINIMIZACIÓN DE LOS COSTOS	51
4.6.	USO Y DISPONIBILIDAD DE AGUA POR PERIODO	52
4.7.	ASIGNACIÓN DE AGUA DESDE LA FUENTE INICIAL A CULTIVOS Y POBLACIÓN.....	52
4.8.	USO DE TANQUES DE ALMACENAMIENTO HACIA CULTIVOS	54
4.9.	PRODUCCIÓN Y DEMANDA DE ALIMENTOS POR CULTIVO	56
4.10.	ANÁLISIS SOCIOECONÓMICO.....	56
4.11.	COMPARACIÓN DE PRODUCCIÓN	57
4.12.	CONFIGURACIÓN DEL MODELO Y PRIORIDADES	57
4.13.	PERSPECTIVA DE DIVERSIFICACIÓN ECONOMICA.....	57
4.14.	COSTOS ESTIMADOS POR EL MODELO FRENTE A LA REALIDAD AGRICOLA	58
4.15.	ESCENARIO ALTERNO: ESCASEZ DE AGUA	60
4.16.	ESCENARIO CRITICO	64
	CAPITULO 5. CONCLUSIONES Y TRABAJO A FUTURO	66
5.1.	TRABAJOS A FUTURO	67
5.2.	APORTE DEL TRABAJO A LA POSIBLE GENERACIÓN DE POLITICAS PÚBLICAS	67
	REFERENCIAS	69
	ANEXOS.....	71
	ANEXO A. GLOSARIO	71
	ANEXO B. PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS, BACTERIOLÓGICOS Y MICROPLÁSTICOS EN EL RÍO EL SILENCIO.....	73
	ANEXO C. PARAMETROS FISICOQUÍMICOS Y BATERIOLÓGICOS EN EL LAGO DE ZIRAHUÉN	74
	ANEXO D. PARAMETROS FISICOQUÍMICOS EN EL LAGO DE ZIRAHUÉN Y RÍO EL SILENCIO, 2024.....	75
	ANEXO E. CODIGO EN GAMS.....	76
	ANEXO F.	82

NOMENCLATURA

Conjuntos

w	Fuentes de agua disponible
c	Tipos de cultivo
p	Poblaciones
s	Tanques de almacenamiento de agua
t	Periodos de tiempo (meses)

Parámetros

$FreshWPr_{w,t}$	Agua proveniente de la precipitación en la fuente w en el periodo t
$FreshWES_{w,t}$	Agua proveniente de los escurrimientos en la fuente w en el periodo t
$FreshWdisp_{s,t}$	Capacidad máxima de agua en el tanque s en el periodo t
$FreshWconsum_{p,t}$	Demanda fija de agua para la población p en el periodo t
$Finicial$	Nivel inicial de agua total disponible
$ThetaMax_{w,t}$	Límite superior de disponibilidad de agua fresca en la fuente w en el periodo t
ηc_c	Eficiencia de conversión de agua en alimento para el cultivo c
Cp_t	Consumo per cápita de alimentos en el periodo t
$Pt_{p,t}$	Población del lugar p en el periodo t

Variables

$FreshWfstot_{w,t}$	Agua fresca total disponible en la fuente w en el periodo t
$FreshWfs_{w,c,t}$	Agua fresca asignada de la fuente w al cultivo c en el periodo t
$FreshWfspob_{w,c,t}$	Agua fresca asignada de la fuente w a la población p en el periodo t
$FreshWuse_{s,c,t}$	Agua utilizada del tanque s para el cultivo c en el periodo t
$FreshWentra_{c,t}$	Agua que entra a los cultivos del tipo c en el periodo t
$FreshWabs_{c,t}$	Agua absorbida por el cultivo c en el periodo t
$FreshWevap_{c,t}$	Agua evaporada de los cultivos c en el periodo t
$FreshWamb_{c,t}$	Agua que se descarga al ambiente desde el cultivo c en el periodo t
$FreshWambpob_{p,t}$	Agua residual descargada al ambiente por la población p en el periodo t
$FreshWstorage_{c,t}$	Agua almacenada para el cultivo c en el periodo t
$FreshFprod_{c,t}$	Producción de alimentos del cultivo c en el periodo t
$FreshFdem_{c,p,t}$	Demanda de alimentos del cultivo c por la población p en el periodo t
z	Función objetivo

Índice de tablas

Tabla 1. Requerimientos de agua por tonelada de producto alimenticio(Cansino-Loeza & Ponce-Ortega, 2023).	18
Tabla 2. Porcentajes de prioridad asignados a función objetivo.	51
Tabla 3. Comparación de producción entre escenario normal y escenario de sequía	62
Tabla 4. Comparación de precios del modelo y valor de la función objetivo.....	63

Índice de figuras

Figura 1. Consumo de agua de un árbol de aguacate en crecimiento y en producción (las flechas indican un intervalo entre el valor superior e inferior).	13
Figura 2. Usos del agua en México (CONAGUA, 2019).	21
Figura 3. Zona de estudio (elaboración propia).	27
Figura 4. Mapa hidrográfico e hidrológico de la cuenca del lago de Zirahuén (elaboración propia con información del INEGI. Subcuenca RH18le. L. de Zirahuén, Cuenca R. Tepalcatepec-Infiernillo. Edición 2.0, 2010).	28
Figura 5. Primera etapa del proyecto de investigación.	29
Figura 6. Segunda etapa del proyecto de investigación.	30
Figura 7. Fotografías de la toma de muestras (lado izquierdo) y del análisis de laboratorio (lado derecho).	31
Figura 8. Superestructura propuesta.....	33
Figura 9. Concentración de oxígeno disuelto en la zona de estudio.	44
Figura 10. Demanda química de oxígeno en la zona de estudio.	45
Figura 11. Valores de pH en la zona de estudio.	46
Figura 12. Temperatura del agua en la zona de estudio.	47
Figura 13. Mapa de uso de suelo y tipos de suelo en la región estudiada (elaboración propia)	48
Figura 14. Agua enviada desde la fuente inicial a cada cultivo de interés.	53
Figura 15. Agua enviada a satisfacer la demanda de la población.	54
Figura 16. Uso de agua de tanques por cultivo.	55
Figura 17. Diferencia de costos de producción de aguacate.	59
Figura 18. Producción de aguacate en escenario de sequía.	60
Figura 19. Producción de maíz en escenario de sequía.	61
Figura 20. Producción de arándano en escenario de sequía.	62
Figura 21. Comparación de producción en condiciones normales y de sequía.	64

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, el crecimiento poblacional y el consecuente aumento en la demanda de recursos han intensificado la presión sobre los sistemas hídricos a nivel global. A esta situación se suman factores como el cambio climático, impulsado por actividades antropogénicas, que ha modificado significativamente el ciclo hidrológico, afectando tanto la disponibilidad como la calidad del agua. Esta problemática no solo compromete el acceso al recurso hídrico, sino que también impacta directamente otros sectores estratégicos, como el alimentario, generando un desafío para el desarrollo sostenible.

El agua y los alimentos están estrechamente vinculados a través de lo que se conoce como el nexo agua-alimentos, el cual destaca la dependencia mutua entre ambos elementos: la producción de alimentos requiere grandes cantidades de agua, y la seguridad alimentaria no puede garantizarse sin una gestión adecuada de los recursos hídricos. Actualmente, alrededor del 70% del agua dulce utilizada a nivel mundial se destina a la agricultura (FAO, 2000). Esta relación es especialmente crítica en regiones donde el recurso hídrico es escaso o su gestión es ineficiente.

En el caso de México, se estima una disponibilidad de 451,584.7 millones de metros cúbicos de agua dulce, aunque esta cifra esconde profundas desigualdades geográficas y temporales en su distribución. Además, el país se clasifica en el lugar 93 de 200 en términos de disponibilidad de agua, lo que lo ubica como una nación con recursos hídricos limitados (CONAGUA, 2019). Esta escasez se ha agravado con el crecimiento poblacional: la disponibilidad per cápita ha disminuido de 18,000 metros cúbicos en 1950 a 3,620 metros cúbicos en 2018. En paralelo, el sector agrícola consume aproximadamente el 75.7% del agua disponible, pero se estima que cerca del 50% de este volumen se desperdicia principalmente por una ineficiente infraestructura de riego, tecnologías obsoletas o fugas en los sistemas de distribución (CONAGUA, 2019). Esta ineficiencia hídrica compromete la capacidad productiva del sector agrícola y, por ende, afecta la seguridad alimentaria del país.

Asimismo, se calcula que anualmente recibe aproximadamente 1,449,471 millones de metros cúbicos de agua en forma de precipitación, de los cuales el 72.1% se evapotranspira, el 21.4% escurre superficialmente a través de ríos y arroyos, y solo el 6.4% se infiltra en el subsuelo para recargar los acuíferos (CONAGUA, 2019). Estos porcentajes reflejan la necesidad de implementar estrategias que mejoren su captación, almacenamiento y uso sostenible.

La estrecha relación entre el agua y los alimentos también se manifiesta en los indicadores sociales. Según datos recientes, entre 691 y 783 millones de personas sufrieron hambre en 2022, y se estima que alrededor de 660 millones continuarán en esa condición hacia 2030 (Cansino-Loeza & Ponce-Ortega, 2023; FAO, 2022). Estos datos reflejan una correlación

directa entre la escasez hídrica y la inseguridad alimentaria, sobre todo en regiones rurales o con baja capacidad de gestión de recursos.

Ante este contexto, la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible propone una visión integral mediante los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), donde el Objetivo 6 establece la importancia del acceso universal al agua limpia y al saneamiento, no solo por razones de salud, sino también por su impacto en la reducción de la pobreza, la garantía de la seguridad alimentaria, la preservación de ecosistemas y el ejercicio de derechos fundamentales. Este enfoque reconoce la complejidad del nexo agua-alimentos y la necesidad de abordarlo desde una perspectiva sistémica e interdisciplinaria.

En este sentido, es urgente desarrollar metodologías que permitan evaluar y optimizar el uso del agua en función de la producción de alimentos, especialmente en zonas ambientalmente sensibles como las regiones lacustres. Estos espacios cumplen funciones ecológicas, hidrológicas y productivas esenciales, y son particularmente vulnerables al deterioro ambiental y a la presión antrópica. Diseñar estrategias basadas en modelos de optimización y análisis de calidad y disponibilidad del recurso hídrico puede contribuir de manera significativa a formular políticas públicas más eficientes, garantizar la sostenibilidad de los recursos naturales y mejorar la calidad de vida de las comunidades dependientes.

1.1. ANTECEDENTES

Las proyecciones globales indican que la demanda de agua dulce, energía y alimentos aumentará considerablemente en las próximas décadas, impulsada por factores como el crecimiento demográfico, la urbanización, la movilidad, el desarrollo económico, el comercio internacional, los cambios tecnológicos y culturales, así como el cambio climático (Cansino-Loeza & Ponce-Ortega, 2023; Hoff, 2011). Se estima que para el año 2050 será necesario producir 60% más de alimentos para satisfacer las necesidades de la población mundial, mientras que el consumo de energía podría incrementarse hasta en un 50% hacia 2035. Asimismo, se prevé que la extracción mundial de agua para riego aumentará en un 10% (FAO, 2022). Estas proyecciones reflejan claramente la interdependencia entre agua, energía y alimentos, y refuerzan la importancia de analizar la interacción mediante el nexo agua-alimentos.

En este contexto, diversos estudios han demostrado que los modelos de optimización son herramientas efectivas para la gestión integrada del recurso hídrico. (Liu et al., 2021) destacan que, para lograr modelos exitosos, no solo debe considerarse la cantidad de agua disponible, sino también su calidad. En su investigación, centrada en cuerpos de agua como lagos, se resalta que la agricultura es uno de los principales consumidores de agua, y se propone que la calidad del agua puede integrarse como función objetivo dentro de los modelos de optimización.

De manera similar, (Ochoa-Barragán et al., 2021) desarrollaron un modelo matemático de optimización enfocado en satisfacer la demanda de agua tanto doméstica como agrícola en regiones específicas, mostrando la viabilidad de este tipo de herramientas para planificar el uso eficiente de los recursos. Por su parte, (Rojas-Torres et al., 2014) propusieron un modelo multianual para el almacenamiento y distribución del agua en sistemas macroscópicos. Su caso de estudio reveló que la implementación de fuentes de agua alternativas podría aumentar en un 22.9% los ingresos por almacenamiento y cubrir hasta un 25.2% de la demanda total (doméstica, agrícola e industrial), lo que permitiría disminuir la presión sobre cuerpos de agua naturales.

Respecto al sector agrícola, (Arredondo-Ramírez et al., 2015) presentaron un diseño óptimo para el manejo del agua, logrando reducir el uso del recurso entre un 10 y 25%, sin afectar la producción, lo que representa un avance importante en la sostenibilidad hídrica y alimentaria. Esto refuerza el vínculo directo entre el uso eficiente del agua y la seguridad alimentaria, consolidando la relevancia del nexo agua-alimentos.

Un elemento clave en todos estos modelos es la calidad del agua, ya que determina su idoneidad para distintos usos, como el consumo humano, la agricultura o la preservación ecológica. En el caso particular del lago de Zirahuén, Michoacán; (Mendoza et al., 2015) realizaron un estudio que concluyó que la calidad del agua del lago era óptima para la

preservación de la vida acuática. Sin embargo, también advirtieron que ciertas actividades humanas cercanas, como el pastoreo, el cambio de uso de suelo y los asentamientos irregulares, han generado focos de contaminación, especialmente en el río El Silencio, cuyas características fisicoquímicas y bacteriológicas difieren significativamente de las del lago.

Estudios más recientes han confirmado estos hallazgos. (Álvarez Gómez, 2023) reportó la presencia de bacterias coliformes, contaminantes fisicoquímicos y microplásticos (aún o normados) por encima de los límites establecidos en la normatividad mexicana, lo cual compromete la calidad del agua y, por ende, la seguridad alimentaria en la región. En la misma línea, (Ruiz Vigil, 2023) señaló que, aunque el lago presenta condiciones fisicoquímicas aceptables, los niveles de contaminación bacteriológica y de microplásticos representan un riesgo creciente.

Estos antecedentes muestran claramente la necesidad de abordar la gestión del agua desde una perspectiva integral que considere tanto su cantidad como su calidad, especialmente en zonas lacustres. Además, demuestran la pertinencia de emplear herramientas de optimización para evaluar escenarios de uso eficiente del recurso, considerando su impacto sobre la producción de alimentos y la sostenibilidad de los ecosistemas.

Adicionalmente, se incluyen datos importantes relacionados a la situación entorno al nexo agua-alimentos en la región de estudio:

Actualmente, el cultivo de aguacate en el estado de Michoacán abarca aproximadamente 180 mil hectáreas, de las cuales cerca de 11 mil hectáreas se ubican en la región lacustre de Zirahuén. De acuerdo con Fuerte-Velázquez & Gómez-Tagle, 2024, las plantaciones de aguacate de temporal presentan un requerimiento hídrico estimado en 839.03 m³/ton, mientras que aquellas bajo riego requieren hasta 2355.80 m³/ton, dando un promedio ponderado de 1597.47 m³/ton como se observa en la figura 1.

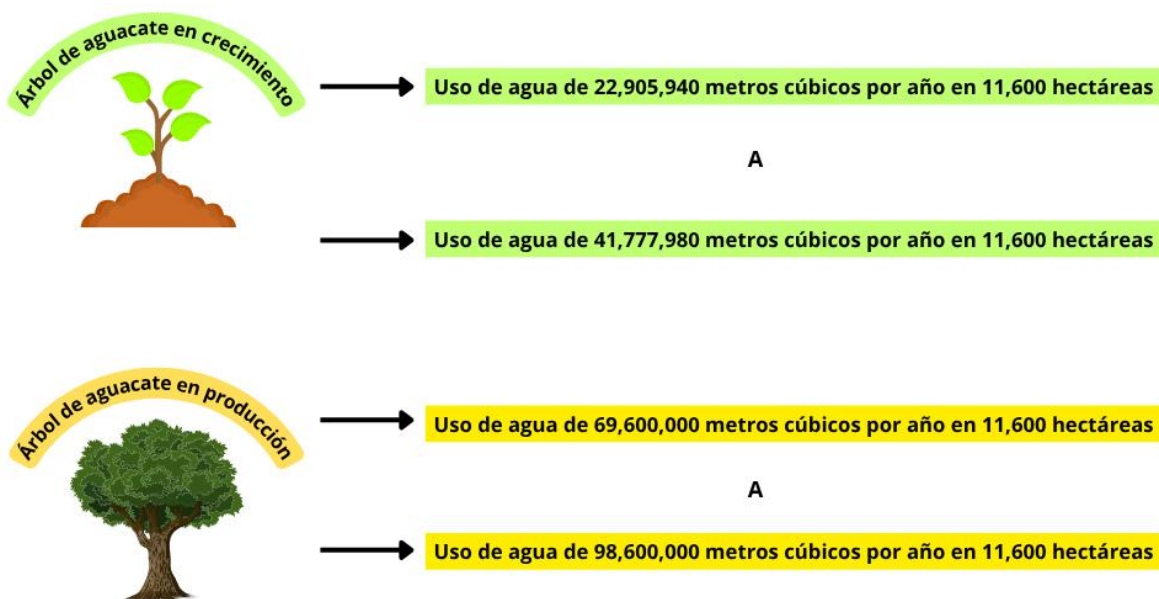


Figura 1. Consumo de agua de un árbol de aguacate en crecimiento y en producción (las flechas indican un intervalo entre el valor superior e inferior).

Mientras que, para el arándano, según estudios realizados por Medina Orozco et al., 2020, la huella hídrica de este cultivo en el centro de México se estima en 62.27 m³/ton, con un rendimiento aproximado de 4.27 ton/ha. Con base a estos valores se calcula un consumo de agua de 28,200 m³ por ciclo de producción para el total de la superficie dedicada al cultivo de arándano en la región de estudio.

El análisis del consumo de agua por parte de la población en la región se basa en la población total estimada de 49,896 habitantes. Considerando un consumo promedio diario de 380 litros por persona, según datos del INEGI para nuestro país, se obtiene un consumo total de aproximadamente:

- 18,960 m³ diarios
- 68,514 m³ mensuales
- 6,922,575 m³ anuales

Estos valores permiten dimensionar la demanda hídrica doméstica y su importancia dentro del balance general de agua en la zona de estudio.

El análisis climatológico indica que la precipitación anual promedio en Zirahuén para el año 2020 fue de aproximadamente 933.1 mm, lo cual equivale a una disponibilidad teórica de 9,331,000 litros por hectárea por año (L/ha/año). Extrapolando este valor a la superficie total de la zona de estudio (28,390 ha), se estima una disponibilidad de 313,453,900 m³ de agua de lluvia por año.

En términos de uso del suelo agrícola en la cuenca, se identifican aproximadamente 11,600 hectáreas dedicadas al aguacate, 107 hectáreas al cultivo de arándano y 4,545 hectáreas dedicadas al cultivo del maíz, conforme a los datos del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera, 2023).

Aunque los cálculos realizados indican que la demanda hídrica total, tanto agrícola como doméstica no supera la disponibilidad anual estimada de agua en la región, es fundamental mantener una gestión cuidadosa y constante del recurso.

1.2. JUSTIFICACIÓN

La disponibilidad de agua y alimentos constituye una necesidad fundamental para la supervivencia humana. Sin embargo, en muchas comunidades pequeñas, la distribución equitativa y eficiente de estos recursos sigue siendo un desafío considerable. Esta problemática se agrava con el crecimiento acelerado de los monocultivos en diversas regiones, lo que ha generado una competencia directa entre el uso de agua para el consumo humano y la producción agrícola.

Ante este escenario, se vuelve imprescindible desarrollar herramientas que permitan un manejo integral y sustentable del recurso hídrico, que no solo garanticen la disponibilidad de agua potable, sino que también aseguren la producción suficiente de alimentos. La implementación de estas herramientas debe orientarse a lograr un equilibrio entre la protección ambiental y el desarrollo económico, beneficiando tanto al sector productivo como a la población en general. Así, se busca contribuir de manera directa al fortalecimiento del nexo agua-alimentos en contextos locales, con miras a una gestión más resiliente y sostenible de los recursos naturales.

1.3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La agricultura es el sector que más agua dulce consume, tanto en México como a nivel mundial, lo que ha generado una creciente competencia por este recurso entre la producción agrícola, el uso industrial y el consumo humano. Esta situación ha motivado la implementación de normas que regulan la calidad del agua para riego, estableciendo límites permisibles de contaminantes. Sin embargo, el impacto de las actividades antropogénicas sobre cuerpos de agua como ríos, lagos y acuíferos ha aumentado significativamente en las últimas décadas, comprometiendo no solo la calidad del recurso, sino también su disponibilidad para los distintos usos.

Ante esta problemática, se vuelve necesario realizar estudios específicos en zonas representativas que permitan evaluar el estado actual del recurso hídrico, tanto en términos de calidad como de cantidad. A partir de esta evaluación, la recolección y análisis de datos permitirá estimar de manera más precisa la disponibilidad y la distribución del agua en la región. Con base en esta información, se propone desarrollar una metodología de optimización mediante General Algebraic Modeling System (GAMS), un software especializado en programación matemática y modelado de problemas de optimización. Esta herramienta permitirá mejorar la gestión del recurso, buscando un equilibrio entre la conservación ambiental, la seguridad alimentaria y el bienestar de la población.

1.4. HIPÓTESIS

Si se desarrolla un modelo de optimización enfocado en el nexo agua-alimentos, entonces será posible generar información y resultados que sirvan de base para que los tomadores de decisiones y especialistas en políticas públicas diseñen estrategias orientadas a garantizar un suministro sostenible del recurso hídrico.

1.5. OBJETIVOS

1.5.1. OBJETIVO GENERAL

Proponer un modelo de optimización del nexo agua-alimentos que contribuya a la formulación de políticas públicas orientadas a garantizar un suministro equitativo y sostenible de agua y alimentos, incorporando parámetros fisicoquímicos que aseguren la calidad del recurso hídrico y alimentario. Con ello se busca no solo optimizar la distribución en términos de cantidad, sino de mantener estándares de calidad que protejan la salud de la población, fortalezcan la productividad agrícola y preserven los ecosistemas acuáticos.

1.5.2. OBJETIVOS PARTICULARES

1. Caracterizar el agua de la zona lacustre de Zirahuén (caso de estudio)
 - 1.1. Identificar las zonas de muestreo
 - 1.2. Determinar temperatura
 - 1.3. Determinar pH
 - 1.4. Determinar oxígeno disuelto
 - 1.5. Determinar demanda química de oxígeno
 - 1.6. Determinar sólidos sedimentables
 - 1.7. Determinar conductividad eléctrica
2. Estimar la disponibilidad de agua en la región de estudio a partir del análisis de datos históricos de precipitación anual.
 - 2.1. Recopilar datos estadísticos históricos de precipitaciones en la región de estudio.
 - 2.2. Realizar un análisis estadístico de los datos de precipitación para determinar patrones y variaciones relevantes.
3. Plantear un modelo de optimización para el manejo eficiente del recurso hídrico en el contexto del nexo agua-alimentos.
4. Aplicar el modelo de optimización propuesto al caso de estudio de la zona lacustre de Zirahuén, para evaluar su efectividad en un contexto real.
5. Proporcionar recomendaciones a partir del modelo de optimización desarrollado, con el propósito de ayudar a la formulación de políticas públicas orientadas al uso sostenible del agua y la seguridad alimentaria en la región.

CAPITULO 2. MARCO TEÓRICO

2.1. NEXO AGUA-ALIMENTOS

La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, por sus siglas en inglés Food and Agriculture Organization) plantea el nexo agua-energía-alimentos como un enfoque conceptual útil para describir y abordar la interrelación entre estos recursos esenciales, de los cuales depende el cumplimiento de diversos objetivos sociales, económicos y ambientales. En términos prácticos, este enfoque permite comprender y analizar sistemáticamente las interacciones entre el medio ambiente y las actividades humanas, promoviendo una gestión y uso más coordinados y sostenibles de los recursos naturales en todos los sectores y escalas.

La implementación del enfoque del nexo puede contribuir a una planificación, toma de decisiones, ejecución, monitoreo y evaluación más integradas, eficaces y rentables (FAO, 2014). Este marco resulta especialmente relevante frente a las proyecciones hacia 2050, las cuales estiman un aumento de hasta el 60% en la demanda global de alimentos (FAO, 2022). En este contexto, se vuelve urgente impulsar estrategias que permitan producir más alimentos utilizando menos recursos, particularmente el agua (Cansino-Loeza & Ponce-Ortega, 2023).

La Tabla 1 ilustra los requerimientos de agua para distintos productos alimenticios, considerando que el consumo de agua varía según el tipo de cultivo y las condiciones hidrometeorológicas de la región.

Tabla 1. Requerimientos de agua por tonelada de producto alimenticio(Cansino-Loeza & Ponce-Ortega, 2023).

Alimento	Agua requerida por producto (m ³ /ton)
Carne de res	15,415.00
Mantequilla	5553.00
Cereales	1644.00
Carne de pollo	4325.00
Huevos	3265.00
Frutas	962.00
Leche	1020.00
Nueces	9063.00
Aceites comestibles	2364.00
Carne de cerdo	5988.00
Legumbres	4055.00
Carne de borrego	8763.00
Cultivos de azúcar	197.00
Vegetales	322.00

2.2. DISPONIBILIDAD DE AGUA

El agua dulce representa un recurso limitado a nivel mundial. De los aproximadamente 1,386 millones de hectómetros cúbicos de agua que existen en el planeta, solo el 2.5% corresponde a agua dulce y, de esta fracción, únicamente un 0.77% es accesible para el consumo humano, principalmente en lagos, ríos, acuíferos y humedad del suelo (CONAGUA, 2019). Esta disponibilidad se ve aún más restringida por la localización geográfica, ya que gran parte de estas fuentes se encuentran alejadas de los principales centros de población. En el caso de México, la precipitación anual promedio equivale a 1.449 billones de metros cúbicos. Sin embargo, del total, el 72.1% se evapotranspira y retorna a la atmósfera, el 21.4% fluye superficialmente y solo el 6.4% se infiltra para recargar los acuíferos. Al integrar estos procesos, la disponibilidad real de agua dulce renovable se estima en 451,584.7 millones de metros cúbicos al año (CONAGUA, 2019).

En cuanto al caso de estudio, la región lacustre del lago de Zirahuén (Ríos et al., 2019) estimaron una disponibilidad hídrica subterránea de 11.31 millones de metros cúbicos por año, y una disponibilidad hídrica superficial de 131.52 millones de metros cúbicos anuales. Estas cifras corresponden a los cálculos realizados para el año 2015. Las Figuras 1 y 2 ilustran gráficamente la distribución del agua en el planeta y la proporción de agua dulce disponible para el ser humano, respectivamente.

2.3. CALIDAD DEL AGUA

La calidad del agua se evalúa mediante la caracterización física, química y, en muchos casos, microbiológica, estas se comparan con normas y estándares establecidos para usos específicos. Esta evaluación permite determinar si el recurso hídrico es apto para un propósito determinado, como el consumo humano, el uso agrícola, o la preservación de ecosistemas acuáticos. El deterioro de la calidad del agua puede deberse a procesos naturales, pero con mayor frecuencia es resultado de actividades antropogénicas (CONAGUA, 2019). Por ello, conocer el estado de la calidad del agua es fundamental para interpretar adecuadamente la disponibilidad real del recurso.

Entre los factores más determinantes para el desarrollo de actividades productivas, especialmente la agricultura, se encuentra la calidad y la cantidad del agua disponible en cada región. El agua es indispensable en todas las etapas del sistema alimentario: desde la producción agrícola hasta la preparación y el consumo final de los alimentos. En este contexto, diversos estudios señalan que los cambios en los patrones de consumo de alimentos, así como las prácticas agrícolas intensivas o ineficientes, afectan significativamente la seguridad hídrica a escala local y global (Molajou et al., 2021).

En la actualidad, uno de los desafíos emergentes en la gestión de la calidad del agua es la presencia de microplásticos. Aunque en este proyecto no se evalúan de forma directa, estudios recientes, como el de Pérez-Méndez et al., 2025, destacan su presencia en la zona de estudio y advierten sobre sus posibles efectos adversos. Estos contaminantes emergentes están adquiriendo relevancia en el análisis de la contaminación hídrica, debido a su persistencia, capacidad de acumulación y posibles interacciones con otros compuestos, como oligoelementos o agroquímicos.

Desde el enfoque del nexo agua-alimentos, esta situación cobra especial importancia, ya que la presencia de microplásticos podría influir negativamente en los sistemas de tratamiento de aguas residuales, en la calidad del agua destinada al riego agrícola, e incluso en la inocuidad de los productos alimentarios. Por ello, se recomienda profundizar en la investigación sobre estos contaminantes para entender mejor sus impactos y anticipar riesgos que podrían comprometer tanto la disponibilidad como la calidad del recurso hídrico, afectando a su vez a la sostenibilidad de la producción alimentaria en la región.

2.4. AGRICULTURA

La agricultura es el conjunto de actividades técnicas, económicas y sociales que el ser humano ha desarrollado con el propósito de cultivar la tierra para obtener productos vegetales, tales como granos, frutas, hortalizas y forrajes, destinados a la alimentación humana y animal (FAO, 2006). Además de su función alimentaria, la agricultura desempeña un papel fundamental en la economía de muchas regiones, ya que representa una fuente de empleo, ingresos y sustento para millones de personas en todo el mundo.

Sin embargo, la agricultura también es el sector que más agua dulce consume a nivel global, con un estimado de hasta el 70% del total extraído (FAO, 2022). Esta alta demanda de agua hace que la actividad agrícola esté estrechamente ligada al manejo eficiente de los recursos hídricos, especialmente en regiones con escasez o estrés hídrico. En este sentido, la calidad y cantidad del agua disponible determinan directamente la productividad agrícola y, por tanto, la seguridad alimentaria.

Los sistemas agrícolas actuales enfrentan desafíos crecientes debido al cambio climático, la degradación del suelo, la contaminación del agua y la expansión de monocultivos intensivos. Estos factores afectan tanto la sostenibilidad del ambiente como la equidad en el acceso a los recursos naturales. Por ello, es indispensable replantear el uso del agua en la agricultura, incorporando prácticas sostenibles, tecnologías eficientes y marcos normativos que permitan una gestión equitativa y racional de los recursos. El análisis del nexo agua-alimentos se vuelve entonces esencial para garantizar una producción agrícola sostenible que no comprometa los recursos hídricos ni la disponibilidad de alimentos para las futuras generaciones.

2.5. USO DE AGUA EN LA AGRICULTURA

La agricultura es el mayor consumidor de agua dulce a nivel mundial, representando aproximadamente el 70% del consumo global. No obstante, en algunos países esta proporción puede superar el 90% (Molajou et al., 2021). En México, el sector agrícola también es el principal consumidor de agua dulce, utilizando cerca del 75.7% del total disponible. Según la Comisión Nacional del Agua, aproximadamente el 50% del volumen utilizado (31,136 hm³) se desperdicia, principalmente debido a sistemas de riego ineficientes, infraestructura en mal estado, obsoleta o con fugas (CONAGUA, 2019).

De acuerdo con datos actualizados de CONAGUA, para el año 2020 el uso agrícola representó el 67.52 del volumen total nacional, equivalente a 60,460.3 hm³ destinados al riego de cultivos. Además, seis estados concentran el 50.51% de este volumen: Sinaloa, Chihuahua, Michoacán, Tamaulipas y Guanajuato. Durante el periodo 2015-2020, el volumen destinado a riego agrícola creció 3.4% al pasar de 58,450.12 a 60,460.3 hm³ (CONAGUA, 2020).

En el caso específico de la región lacustre de Zirahuén, se estima que el uso agrícola representa aproximadamente el 60% del total de agua disponible en la zona (CEAC, s/f).

La distribución del uso del agua en México puede observarse en la Figura 2.

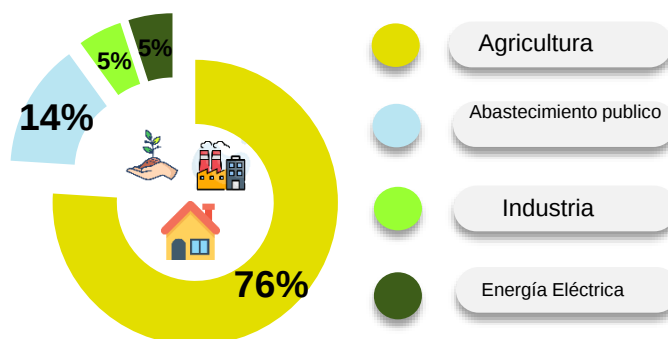


Figura 2. Usos del agua en México (CONAGUA, 2019).

2.6. OPTIMIZACIÓN

La optimización es el enfoque para encontrar la mejor solución a un problema determinado (Edgar & Himmelblau, 2001). Esto significa que para cualquier problema existen varias soluciones posibles; sin embargo, solo uno es el mejor para un punto de vista determinado y corresponde a la solución óptima (Biegler et al., 1997). En este contexto, el primer paso en el proceso de optimización corresponde a la formulación de un modelo de optimización,

que involucra una función objetivo sujeta a un conjunto de restricciones de igualdad y/o desigualdad (Grossmann, 2021).

La optimización es ampliamente reconocida como una herramienta basada en formulaciones matemáticas. Emplea métodos específicos, tanto deterministas como evolutivos, para resolver problemas complejos, con el objetivo de reducir costos, minimizar el uso de recursos, diseñar procesos eficientes o encontrar soluciones óptimas a diversos desafíos. En muchos casos, la optimización involucra múltiples variables interrelacionadas; sin embargo, a medida que se incrementa la cantidad de variables consideradas, también aumenta la complejidad del modelo (Sánchez-Zarco, 2021).

Debido a su capacidad para reducir el consumo de recursos y mitigar el impacto ambiental de los procesos industriales, la optimización se ha consolidado como una herramienta fundamental en la búsqueda de procesos más sostenibles. En consecuencia, se ha convertido en un pilar dentro de diversas disciplinas, facilitando el diseño e implementación de procesos más eficientes y ambientalmente responsables (Ponce-Ortega et al., 2024).

2.7. PROGRAMACIÓN MATEMÁTICA

La programación matemática es una rama de la optimización que se enfoca en minimizar o maximizar una función objetivo univalente f , definida sobre n variables reales $(x_1, x_2, \dots, x_n)$, y que puede estar sujeta a un número finito de restricciones, formuladas como ecuaciones o desigualdades (Holzman, 1981).

Esta técnica constituye una herramienta poderosa para la toma de decisiones, ya que permite modelar de manera estructurada problemas complejos. La formulación de un problema de programación matemática implica diversas etapas clave (Sánchez-Zarco, 2021):

- Identificación del problema y de las decisiones posibles: consiste en definir con claridad las variables involucradas, que representan las decisiones a tomar.
- Determinación de las decisiones factibles: se traduce en el establecimiento de restricciones, las cuales delimitan el conjunto de soluciones viables, conocido como la región factible.
- Definición de la función objetivo: también denominada índice de rendimiento o criterio de elección, esta función representa la meta que desea optimizar, ya sea minimización de costos, maximización de beneficios o eficiencia en el uso de recursos.

La correcta aplicación de estos pasos permite estructurar modelos matemáticos que pueden ser resueltos mediante métodos analíticos o computacionales, ofreciendo

soluciones óptimas y justificadas para problemas en diversas áreas como ingeniería, economía, logística y gestión de recursos.

En el contexto del nexo agua-alimentos, la programación matemática se convierte en una herramienta estratégica, ya que permite articular la relación entre la disponibilidad, la calidad y la demanda de agua con las necesidades de producción agrícola y el abastecimiento humano. Este enfoque no solo aborda la distribución del recurso hídrico en términos de cantidad, sino que también posibilita la incorporación de aspectos cualitativos como parámetros fisicoquímicos, indispensables para garantizar tanto la productividad agrícola como la salud pública. A través de este tipo de modelos, es posible plantear escenarios que integren:

- La variabilidad temporal y espacial del recurso hídrico, considerando periodos de abundancia y escasez.
- Los requerimientos hídricos específicos de los cultivos, vinculados a su productividad y valor económico.
- La demanda de agua para consumo humano, que debe satisfacer volúmenes mínimos y condiciones de potabilidad.
- Las restricciones ambientales y ecológicas, como caudales ecológicos, recarga de acuíferos o límites de extracción sustentable.
- La eficiencia en el uso y distribución del agua, contemplando pérdidas en transporte, almacenamiento o infiltración.

Para dar solución a este tipo de problemas complejos, la programación matemática se apoya en tecnologías computacionales avanzadas. Herramientas como MATLAB y Python cuentan con librerías especializadas (por ejemplo, PuLP, Pyomo o SciPy.optimize) que facilitan la formulación y resolución de modelos de optimización. Asimismo, GAMS, ofrece un entorno robusto para el modelado algebraico y la solución de problemas de gran escala, particularmente en el ámbito de la gestión de recursos hídricos y la seguridad alimentaria. Estas tecnológicas no solo permiten resolver los modelos, sino también integrar grandes volúmenes de datos y realizar análisis de escenarios, simulaciones y visualización de resultados que enriquecen la toma de decisiones.

En este sentido, la programación matemática, en combinación con herramientas computacionales modernas, ofrece un marco robusto para diseñar políticas de gestión integrada del recurso hídrico, equilibrando objetivos múltiples: seguridad alimentaria, conservación ambiental y bienestar social. Así, los modelos de optimización permiten no solo determinar asignaciones óptimas de agua, sino también explorar escenarios de conflicto, trade-offs y soluciones sostenibles que apoyen la toma de decisiones a nivel regional y nacional.

2.8. GAMS

Para la formulación y resolución del modelo de optimización propuesto en este estudio, se utilizó General Algebraic Modeling System (GAMS), un lenguaje de programación algebraico diseñado específicamente para modelar y resolver problemas complejos de programación matemática, tales como programación lineal, no lineal, entera y mixta.

GAMS fue seleccionado debido a su capacidad para expresar de forma clara, estructurada y flexible modelos de optimización a gran escala, permitiendo definir fácilmente conjuntos, parámetros, variables, ecuaciones y restricciones. Esto es especialmente útil en el presente proyecto, ya que el modelo involucra múltiples dimensiones (como fuentes de agua, cultivos, tanques de almacenamiento y periodos de tiempo) y diversas restricciones relacionadas con balances de materia, demanda, calidad del agua y costos.

El uso de programas computacionales especializados como GAMS representa una herramienta poderosa para abordar problemas industriales, ambientales, sociales y económicos de alta complejidad, como lo es la gestión integrada de recursos hídricos. Algunos beneficios clave son:

- Precisión y rigor matemático: permiten representar con exactitud las relaciones entre variables, restricciones físicas y condiciones socioeconómicas del sistema.
- Eficiencia en el análisis de escenarios: facilitan la evaluación de múltiples escenarios (climáticos, de uso de suelo, de calidad del agua, en este caso) en poco tiempo, lo que sería inviable con métodos manuales.
- Optimización de recursos: ayudan a identificar soluciones óptimas que minimicen costos, maximicen beneficios o garanticen la sostenibilidad del sistema, con base en criterios definidos por el investigador o tomador de decisiones.
- Toma de decisiones informada: los resultados obtenidos pueden ser utilizados por instituciones gubernamentales, gestores del agua o comunidades locales para diseñar estrategias de manejo más eficientes, equitativas y sustentables.
- Reproducibilidad y escalabilidad: los modelos pueden adaptarse fácilmente a diferentes regiones o escalarse a niveles más detallados sin necesidad de rediseñar todo el proceso.,

En este estudio, GAMS fue fundamental para implementar el modelo matemático en la región lacustre de Zirahuén.

2.9. QGIS

Para el estudio se utilizó el software QGIS (Quantum GIS), una plataforma libre y de código abierto para el análisis espacial, que permitió procesar información geográfica esencial del área de estudio. Entre los usos destacados del SIG se encuentran:

- Delimitación de la cuenca hidrográfica de Zirahuén.

- Localización y caracterización espacial de fuentes de agua y puntos de muestreo.
- Mapeo del uso actual del suelo, especialmente áreas cultivadas con aguacate, maíz y arándano.
- Cálculo de áreas agrícolas y correlación con datos climáticos (precipitación y evapotranspiración).
- Análisis espacial de vulnerabilidad en función de calidad del agua y presión sobre los recursos.

2.10. CASO DE ESTUDIO: ZIRAHUÉN

La cuenca del lago de Zirahuén ha experimentado alteraciones significativas en sus condiciones naturales durante las últimas tres décadas. La problemática que enfrenta esta región es diversa y compleja. Por un lado, el crecimiento poblacional ha generado un aumento en las descargas de aguas residuales; por otro, se han producido cambios en los sistemas de producción agrícola, intensificación del uso del suelo y modificaciones en la cobertura vegetal. Estos factores han deteriorado la calidad del agua y afectado las condiciones del vaso lacustre, cuyo volumen es de aproximadamente 157 millones de metros cúbicos, con una fluctuación anual estimada de 12 millones de metros cúbicos (Chávez et al., 2019).

En años recientes, uno de los principales factores de presión ambiental en la zona ha sido la expansión de la industria del aguacate. Esta actividad ha reemplazado importantes áreas boscosas (cruciales para la recarga de los acuíferos) por cultivos de aguacate, afectando no solo la disponibilidad de agua, sino también la biodiversidad local. (Sommaruga & Eldridge, 2021) advierten sobre el crecimiento exponencial del consumo de aguacate y las consecuencias ambientales y socioeconómicas negativas que ello implica.

México es el principal productor mundial de aguacate (*Persea americana*), concentrando cerca de un tercio de la producción global. El país cuenta con aproximadamente 180.5 mil hectáreas dedicadas a este cultivo, de las cuales el 90% se ubican en la zona centro. Dentro de esta región se encuentra la llamada Franja Aguacatera de Michoacán (conformada por los municipios de Peribán, Los Reyes, Uruapan, Tancítaro, Salvador Escalante, Tacámbaro, Ario de Rosales, Nuevo Parangaricutiro, y Ziracuaretiro), de la cual la zona lacustre de Zirahuén forma parte. Según estimaciones, cerca del 45% de la producción nacional se concentra en esta franja.

En términos de consumo de agua, los productores de aguacate afirman una huella hídrica de 600 m³ por tonelada, sin embargo, estudios independientes reportan que la huella hídrica media en México es de aproximadamente 1012 m³ por tonelada (Gómez-Tagle et al., 2022; Record, 2018). Además, se ha comparado el uso de agua entre un árbol de aguacate y especies nativas como *Pinus devoniana* y *P. pseudostrobus* (de 2 y 2.5 años, respectivamente). El árbol de aguacate mostro un consumo de entre 0.541 y 0.987 L/m²/día,

mientras que *P. pseudostrobilus* registro 0.190 L/m²/día, y *P. devoniana* apenas 0.123 L/m²/día (Gómez Tagle et al., 2018).

En la Figura 3 se presenta un mapa general de la zona de estudio, el cual permite ubicar espacialmente los elementos claves del análisis. Se observa la delimitación de la cuenca de Zirahuén, representada en color rojo, mientras que el Lago de Zirahuén aparece en color azul. Asimismo, se destaca el río “El Silencio”, representado en color azul, el cual constituye uno de los principales afluentes de la cuenca.

En el mapa también se señalan los puntos de muestreo de agua, identificados mediante símbolos en forma de rombo y diferenciados por colores: Agua Verde (naranja), Río (cian), Cerrito Colorado (rojo), Tembucharo (azul) y Copándaro (verde). Estos sitios corresponden a los puntos estratégicos donde se llevaron a cabo los análisis fisicoquímicos, con el fin de obtener información representativa sobre el estado del recurso hídrico en la región.

La representación cartográfica fue elaborada con apoyo de un sistema de información geográfica (QGIS), lo cual permitió integrar tanto la delimitación hidrográfica como la ubicación georreferenciada de los puntos de muestreo. Además, en la parte superior derecha del mapa se incluyen recuadros de localización a escala estatal y nacional, que facilitan la referencia espacial de la cuenca dentro del estado de Michoacán y en el contexto de México.

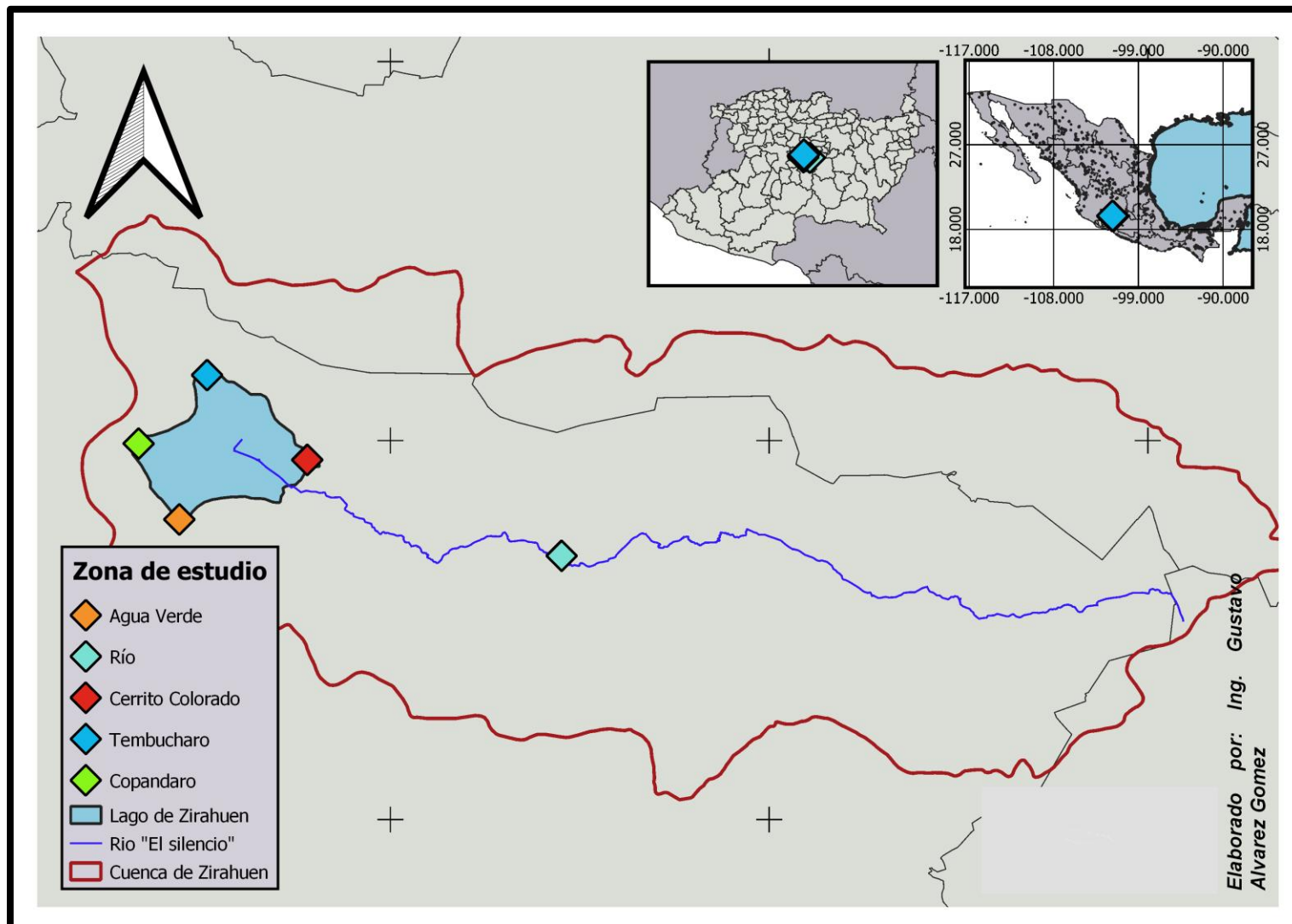


Figura 3. Zona de estudio (elaboración propia).

En cuanto a la red hidrográfica, de los 330.9 km que la conforman, solo el 4% corresponde a cauces perennes (que conducen agua durante todo el año), mientras que el 96% restante (317.66 km) está compuesto por cauces intermitentes (que conducen agua únicamente en temporada de lluvias). El principal afluente es el río El Silencio, con una longitud total de 27.48 km; sin embargo, aproximadamente el 66% de este presenta una condición intermitente, y únicamente el 33.9% mantiene flujo de agua permanente durante el año. Se ha observado una reducción significativa en la cantidad de agua disponible para la infiltración profunda, lo cual también ha disminuido la recarga de acuíferos, manantiales y ojos de agua naturales. El coeficiente de recarga/infiltración paso de 415.8 mm en 1992 a tan solo 45.2 mm en 2015, lo que representa un cambio drástico en los flujos subsuperficiales dentro de la cuenca. Estos flujos podrían verse aún más comprometidos ante la perforación de nuevos pozos o la extracción de agua tanto del lago como de fuentes subterráneas de la región (Chávez et al., 2019).

La Figura 4 muestra la red hidrológica e hidrográfica dentro de la región de estudio, permitiendo identificar los principales cuerpos de agua, arroyos y escurrimientos que conforman el sistema hídrico de la cuenca de Zirahuén.

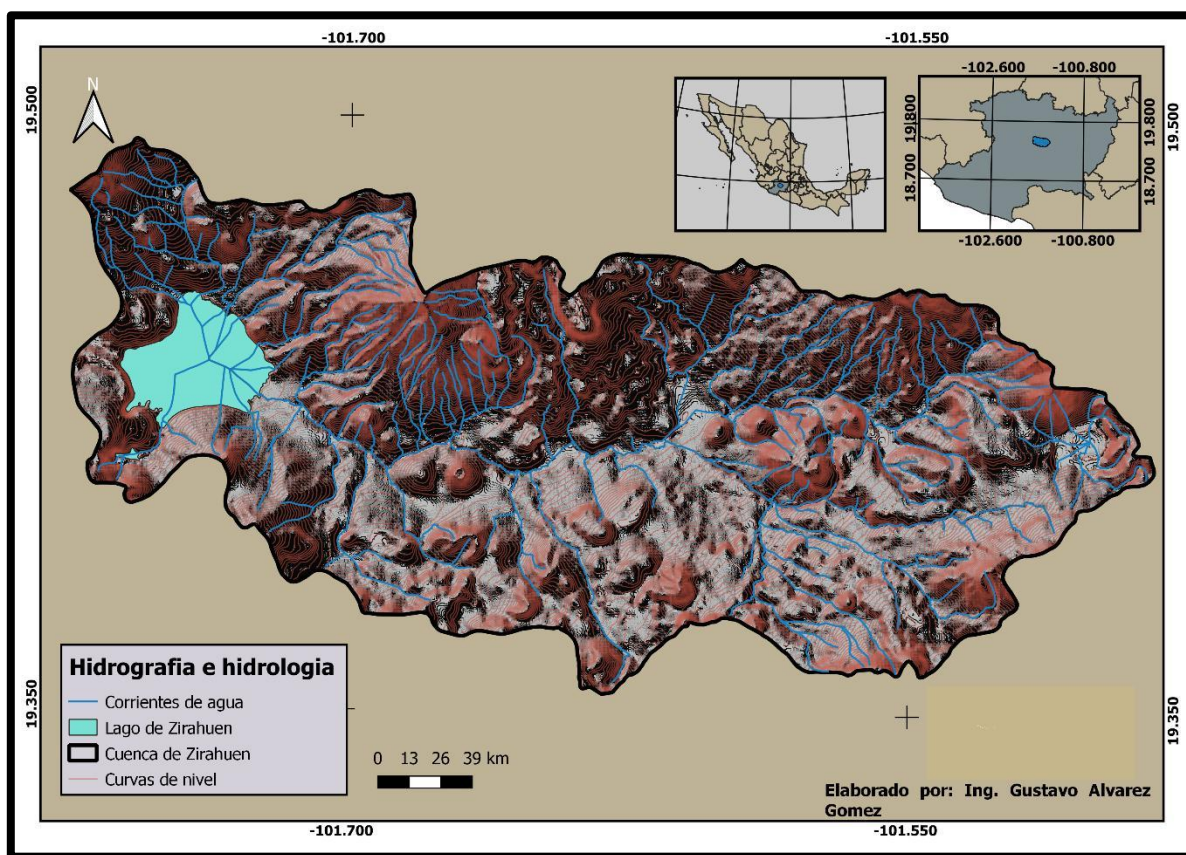


Figura 4. Mapa hidrográfico e hidrológico de la cuenca del lago de Zirahuén (elaboración propia con información del INEGI. Subcuenca RH18le. L. de Zirahuén, Cuenca R. Tepalcatepec-Infiernillo. Edición 2.0, 2010).

CAPITULO 3. METODOLOGIAS

Este capítulo describe detalladamente la metodología utilizada para el desarrollo del proyecto. El trabajo se estructuro en dos etapas principales: la primera enfocada en la recopilación de datos de campo y el análisis hidrológico y de calidad del agua, y la segunda centrada en el diseño de una superestructura y el desarrollo y aplicación de un modelo de optimización multiobjetivo para la gestión sostenible del recurso hídrico.

La figura 5 y 6 resumen la secuencia y las actividades clave de cada una de las etapas mencionadas, proporcionando una visión general del flujo del trabajo:

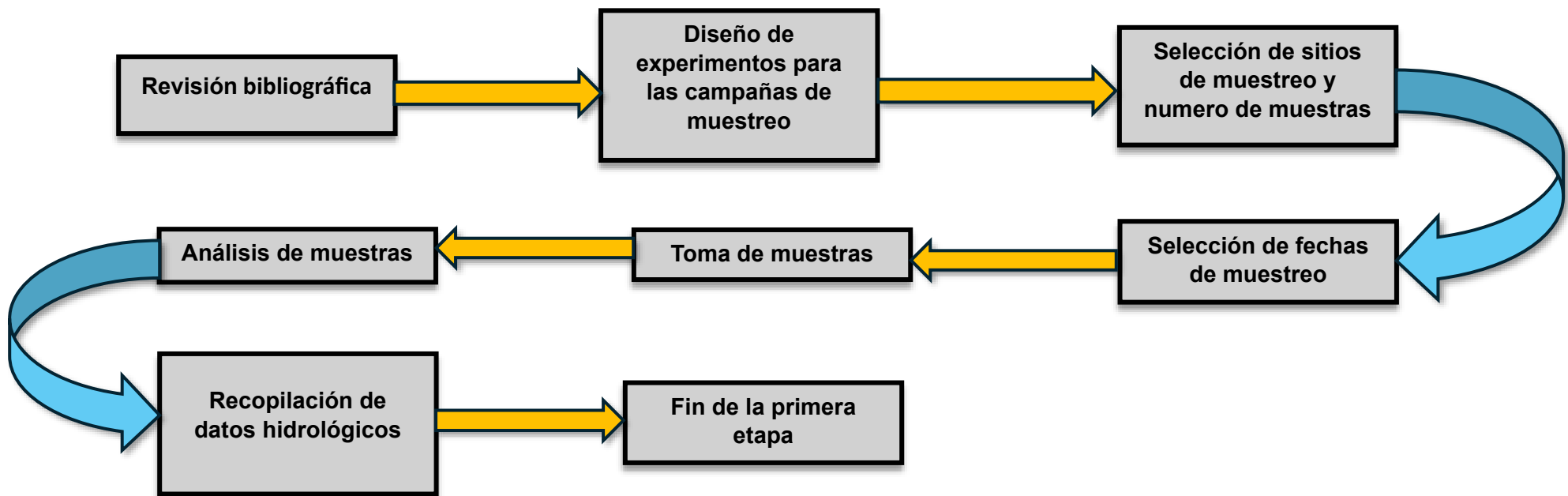


Figura 5. Primera etapa del proyecto de investigación.

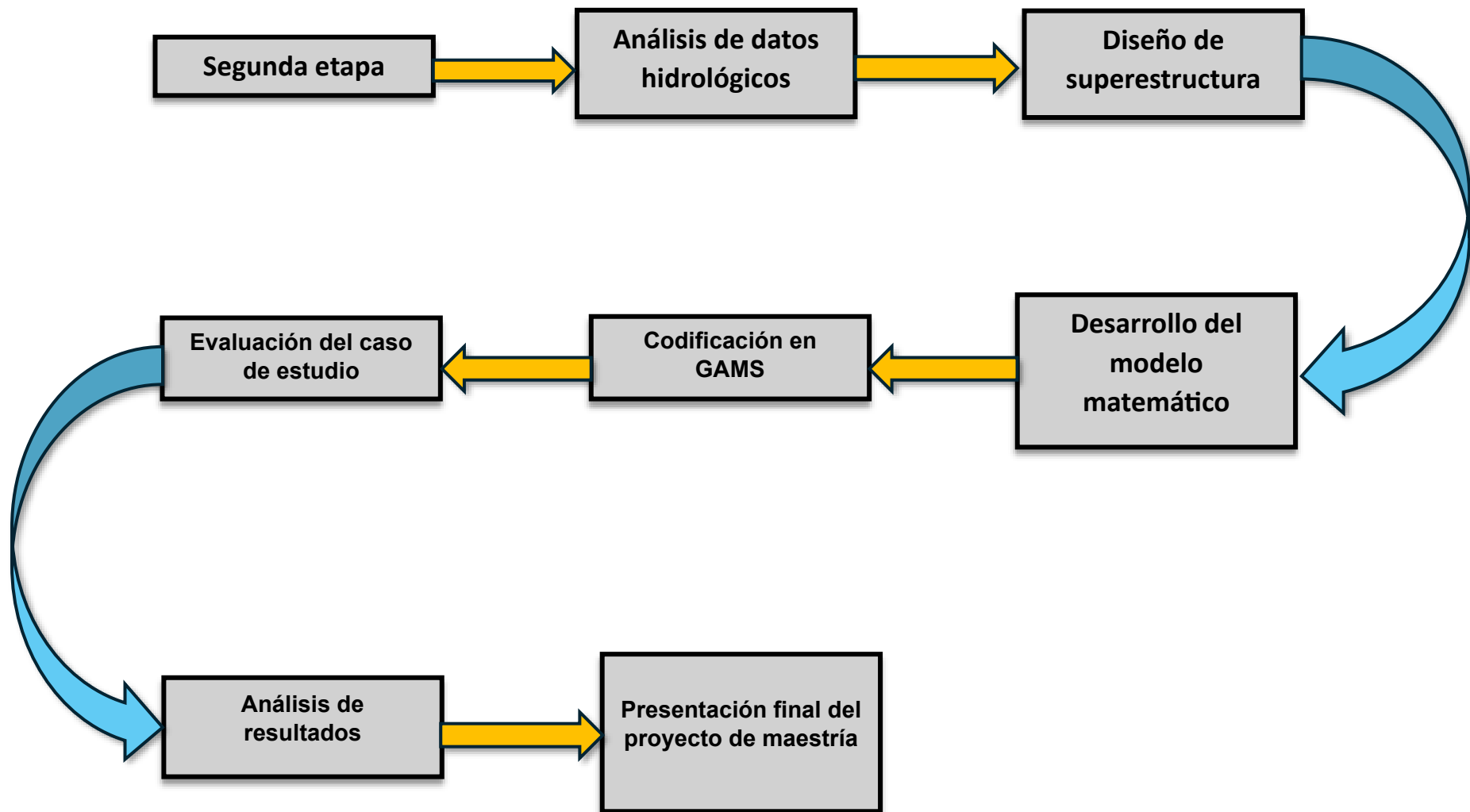


Figura 6. Segunda etapa del proyecto de investigación.

3.1. EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA

Dentro de la primera etapa del trabajo se evaluó la calidad del agua en la zona de estudio, con el propósito de identificar las condiciones fisicoquímicas y microbiológicas del recurso hídrico disponible. Esta fase permitió complementar el análisis de cantidad de agua con información sobre sus condiciones para los diferentes usos, tanto agrícolas como poblacionales. Las muestras fueron colectadas en el mes de mayo de 2024 y posteriormente analizadas en el laboratorio de acuerdo con los lineamientos establecidos por la NOM-001-SEMARNAT-2021 y la NOM-127-SSA1-2021.

Entre los parámetros evaluados se incluyeron: pH, conductividad eléctrica, oxígeno disuelto, demanda química de oxígeno, y temperatura. Los resultados obtenidos fueron comparados con los límites permisibles establecidos en las normas mencionadas, determinando así la calidad del agua y su grado de cumplimiento con respecto a los usos previstos.

En general, los resultados indicaron que el agua se mantiene dentro de los límites aceptables para uso agrícola y doméstico, aunque se identificaron concentraciones elevadas de nutrientes. Estos hallazgos muestran la necesidad de mejorar las prácticas agrícolas y de monitorear continuamente la calidad del agua. En la figura 7 se muestran fotografías de los procesos realizados.



Figura 7. Fotografías de la toma de muestras (lado izquierdo) y del análisis de laboratorio (lado derecho).

3.2. SUPERESTRUCTURA

En una superestructura se representa gráficamente el problema a tratar, permitiendo visualizar de manera integral las interacciones entre los distintos elementos del sistema en estudio. Esto es útil para identificar oportunidades de optimización, evaluar impactos ambientales y proponer soluciones sostenibles. La figura 8 ilustra las diversas fuentes de agua dulce presentes en la zona de estudio, entre las que se encuentran la precipitación, los escurrimientos naturales, manantiales, fuentes subterráneas (pozos) y tanques de almacenamiento. Asimismo, se identifican las principales fuentes de generación de aguas residuales o de desecho, las cuales provienen de actividades agrícolas, ganaderas y domésticas y tienen como destino final el río El Silencio. Estas corrientes de agua contaminada también forman parte del sistema, ya que pueden ser tratadas y reutilizadas, contribuyendo así al cierre de ciclos dentro del enfoque de economía circular.

Aunado a estas fuentes, es importante considerar la influencia de la actividad industrial en Santa Clara del Cobre, localidad cercana a la cuenca, reconocida por su tradición artesanal y productiva en la transformación del cobre. En esta zona, los procesos de fundición, laminado y acabado del metal generan descargas líquidas con presencia de metales pesados (principalmente cobre, aunque también pueden encontrarse trazas de plomo, arsénico y zinc). Estas aguas residuales representan un riesgo ambiental y de salud pública si no reciben un tratamiento adecuado antes de ser vertidas en cuerpos superficiales.

La construcción de esta superestructura permite identificar los puntos críticos del sistema. Además, proporciona una base sólida para aplicar técnicas de programación matemática y optimización, con el objetivo de mejorar los sistemas social, ambiental y económico de la región.

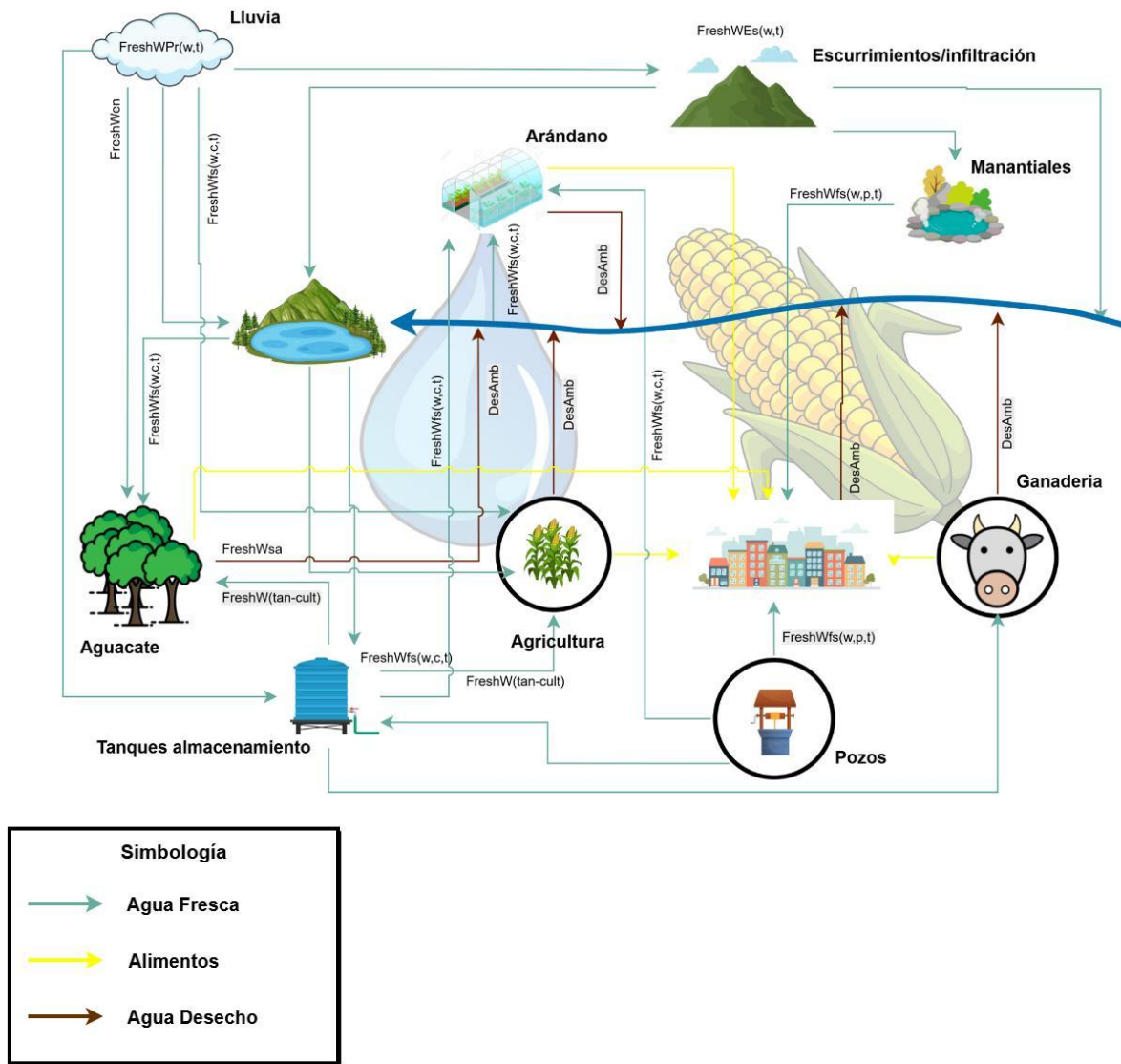


Figura 8. Superestructura propuesta.

3.3. MODELO MATEMÁTICO

Un modelo matemático es una herramienta analítica que permite representar un sistema real mediante un conjunto de ecuaciones y expresiones numéricas. En el contexto de la gestión del agua en una cuenca hidrográfica, este tipo de modelo permite simular y optimizar la distribución de recursos hídricos con base en variables como la oferta, la demanda, la calidad del agua y las restricciones impuestas por factores ambientales, técnicos o sociales.

Para este proyecto, el modelo matemático se construyó con el objetivo de evaluar y optimizar el uso del agua en la región lacustre de Zirahuén, considerando tanto la

disponibilidad de agua, como la demanda de distintos sectores: agrícola, doméstico y ambiental. El modelo se basa en principios de balance de materia, es decir, que la cantidad de agua que entra en el sistema debe ser igual a la que sale, distribuyéndose adecuadamente según las necesidades y restricciones impuestas. El modelo se clasifica como determinístico, ya que todas las variables de entrada se definen como valores fijos y previamente establecidos, sin incorporar elementos de incertidumbre o aleatoriedad. En este sentido, parámetros como la disponibilidad de agua proveniente de la precipitación y escurrimientos, los costos asociados al manejo y almacenamiento, la eficiencia de conversión de agua en alimento, así como las demandas mínimas para la población, se encuentran especificados. Bajo este enfoque, los resultados obtenidos dependen exclusivamente de los valores asignados en la etapa de parametrización, generando una única solución óptima para las condiciones dadas. Es decir, el modelo no contempla la variabilidad inherente de fenómenos externos como la variabilidad climática, los cambios en los precios de insumos agrícolas o la incertidumbre en la demanda de alimentos, aspectos que serían característicos de un modelo estocástico. Y en contraste con un modelo metaheurístico, que busca soluciones aproximadas, el modelo se formula como un problema de programación mixto-entero (MIP) y se resuelve mediante un solver exacto, lo que garantiza la obtención de una solución óptima y no de una aproximación.

Se han definido los siguientes balances de masa que describen el flujo de agua y alimentos en la zona de estudio:

- Balance general de agua fresca en la región.
- Balance de agua en los cultivos, considerando entradas y salidas.
- Balance desde los tanques de almacenamiento hacia los cultivos.
- Balance desde los cultivos hacia las poblaciones (flujo de alimentos).
- Balance desde los cultivos hacia el ambiente (descarga de agua al río).
- Balance desde las poblaciones hacia el ambiente (descarga de aguas residuales).

Estos balances permiten representar de forma sistemática el uso y transformación del recurso hídrico en sus diferentes etapas.

Asimismo, se han definido los siguientes conjuntos (sets) para estructurar el modelo:

- **w**: Conjunto de fuentes de agua fresca.
- **c**: Conjunto de alimentos o cultivos.
- **p**: Conjunto de poblaciones.
- **s**: Conjunto de tanques de almacenamiento.
- **t**: Conjunto de periodos de tiempo.

3.3.1. BALANCE GENERAL DE AGUA FRESCA

Se inicia con el balance para el recurso más importante del sistema: el agua fresca, ya que es fundamental para el desarrollo adecuado del nexo agua-alimentos. Este balance considera la disponibilidad de agua fresca proveniente de diversas fuentes en la región.

El caudal total de agua fresca disponible desde cada fuente **w** en cada periodo de tiempo **t**, denotado como $FreshWf_{w,t}^{tot}$ es igual a la suma de los caudales de agua fresca enviados hacia los cultivos **c** y hacia las poblaciones **p**, representados por:

- $FreshWfs_{w,c,t}$: agua fresca enviada desde la fuente **w** hacia el cultivo **c** en el tiempo **t**.
- $FreshWfs_{w,p,t}$: agua fresca enviada desde la fuente **w** hacia la población **p** en el tiempo **t**.

Dado que el agua no es infinita, es necesario imponer una restricción de disponibilidad máxima:

$$FreshWf_{w,t}^{tot} \leq \theta_{w,t}^{max} \quad \forall w, \forall t \quad \dots (1)$$

Donde:

- $\theta_{w,t}^{max}$: cantidad máxima de agua fresca disponible

Esta restricción garantiza que no se extraiga más agua de una fuente de la que realmente está disponible y que representa la cantidad máxima de agua fresca disponible, dependiente de la precipitación, el escurrimiento superficial y el almacenamiento inicial, descontando las pérdidas por evaporación e infiltración.

Adicionando al balance las entradas principales de agua fresca que son la precipitación y los escurrimientos, el balance es el siguiente:

$$FreshWf_{w,t}^{tot} = FreshWPr_{w,t} + FreshWES_{w,t} - \sum_c FreshWfs_{w,c,t} - \sum_p FreshWfs_{w,p,t} \quad \forall w, \forall t \quad \dots (2)$$

Donde:

- $FreshWPr_{w,t}$: agua proveniente de la precipitación.
- $FreshWES_{w,t}$: agua disponible por escurrimientos.
- $FreshWfs_{w,c,t}$: agua enviada a cultivos.
- $FreshWfs_{w,p,t}$: agua enviada a poblaciones.

3.3.2. BALANCE EN CULTIVOS (ENTRADAS Y SALIDAS)

A. ENTRADAS

El agua que ingresa a cada cultivo proviene de distintas fuentes de agua fresca. Esta se representa como la suma del agua que se asigna desde cada fuente w al cultivo c en el tiempo t :

$$FreshW_{c,t}^{en} = \sum_w FreshW_{w,c,t}^{fs} + \sum_s FreshW_{s,c,t}^{use} \quad \forall c, \forall t \quad \dots (3)$$

Donde:

- $FreshW_{c,t}^{en}$: es el total de agua que recibe cada cultivo
- $FreshW_{w,c,t}^{fs}$: es el caudal de agua fresca proveniente de la fuente w hacia el cultivo c en el tiempo t .
- $FreshW_{s,c,t}^{use}$: agua entregada desde el tanque s al cultivo c .

B. SALIDAS

Se toma en cuenta el agua que entro y se quitara lo que cada cultivo requiere para el crecimiento del alimento, el agua que se pierde por evaporación y el agua que se descarga al ambiente desde el cultivo, ya sea por escurrimiento superficial o infiltración no aprovechada:

$$FreshW_{c,t}^{sa} = FreshW_{c,t}^{en} - FreshW_{c,t}^{abs} - FreshW_{c,t}^{evap} - FreshW_{c,t}^{amb} \quad \forall c, \forall t \quad \dots (4)$$

Donde:

- $FreshW_{c,t}^{en}$: es el total de agua que recibió cada cultivo
- $FreshW_{c,t}^{abs}$: agua que es realmente absorbida por el cultivo para el crecimiento del alimento
- $FreshW_{c,t}^{evap}$: agua que se pierde por evapotranspiración
- $FreshW_{c,t}^{amb}$: descarga al ambiente desde el cultivo (río El Silencio)

Finalmente, el balance para el agua en los cultivos queda como:

$$FreshW_{c,t}^{en} = FreshW_{c,t}^{sal} \quad \forall c, \forall t \quad \dots (5)$$

3.3.3. DESCARGAS AL AMBIENTE

A. POBLACIONES-AMBIENTE

La ecuación 6 representa el balance de agua desechada por la población. En este caso, se asume que una parte del agua que llega a las comunidades de la región lacustre ($FreshW_{p,t}^{en}$) no es completamente consumida, y el sobrante regresa al ambiente como agua residual, ya sea sin tratamiento o con tratamiento. Por lo tanto, el agua descargada se obtiene al restar del volumen de entrada a las poblaciones el consumo de estas mismas ($FreshW_{p,t}^{cons}$).

$$FreshW_{p,t}^{amb} = FreshW_{p,t}^{en} - FreshW_{p,t}^{cons} \quad \forall p, \forall t \quad \dots (6)$$

Donde:

- $FreshW_{p,t}^{amb}$: agua que se descarga al ambiente, usualmente como residual.
- $FreshW_{p,t}^{en}$: agua que entra a la población p en el tiempo t.
- $FreshW_{p,t}^{cons}$: agua consumida por la población (ej., bebida, limpieza, cocina, etc.).

En este balance se observa que el agua no consumida se convierte en una descarga (por ejemplo, aguas negras o grises).

3.3.4. BALANCE DE CULTIVOS A POBLACIONES

A. AGUA TOTAL DESDE ALMACENAMIENTO HACIA CULTIVOS:

La ecuación 7 establece el balance proveniente del almacenamiento hacia los cultivos. El termino $FreshW_{c,t}^{stor}$ representa el volumen total de agua suministrado a cada cultivo desde los tanques de almacenamiento. Este valor se obtiene al sumar el agua extraída de todos los tanques.

$$FreshW_{c,t}^{stor} = \sum_s FreshW_{s,c,t}^{use} \quad \forall c, \forall t \quad \dots (7)$$

Donde:

- $FreshW_{c,t}^{stor}$: agua total almacenada en tanques, disponible para uso en cultivos.
- $FreshW_{s,c,t}^{use}$: agua extraída desde el tanque de almacenamiento y utilizada en el cultivo c durante el tiempo t.

Este balance se toma como el agua total aportada por los tanques de almacenamiento a los cultivos.

B. PRODUCCIÓN TOTAL DE ALIMENTOS EN FUNCION DEL AGUA EN CADA CULTIVO:

La ecuación 8 describe la producción total de alimentos. En este balance, la producción $FreshW_{c,t}^{prod}$ depende directamente del volumen total de agua disponible, el cual proviene tanto de las fuentes naturales $FreshWfs_{w,c,t}$ como del agua almacenada en los tanques $FreshW_{c,t}^{stor}$. Este volumen total se multiplica por la eficiencia de conversión η_c , que representa la cantidad de alimento producida (kg) por cada metro cubico de agua utilizado. De esta manera, la ecuación relaciona el uso del agua con la producción agrícola.

$$FreshW_{c,t}^{prod} = \eta_c \cdot \sum_w FreshWfs_{w,c,t} + FreshW_{c,t}^{stor} \quad \forall c, \forall t \quad \dots (8)$$

Donde:

- η_c : es la eficiencia de conversión de agua en alimentos (kg/m³).
- $FreshF_{c,t}^{prod}$: producción de alimentos del cultivo c en el tiempo t.
- $FreshWfs_{w,c,t}$: agua enviada a cultivos.
- $FreshW_{c,t}^{stor}$: agua total almacenada en tanques, disponible para uso en cultivos.

C. LIMITE DE DISPONIBILIDAD DE AGUA EN TANQUES:

La ecuación 9 establece la restricción de disponibilidad de agua en los tanques de almacenamiento. Esta condición asegura que el volumen de agua utilizado para el riego de los cultivos $FreshW_{s,c,t}^{use}$ no exceda la cantidad disponible en los tanques de almacenamiento durante los periodos requerida $FreshW_{s,t}^{disp}$.

$$FreshW_{s,c,t}^{use} \leq FreshW_{s,t}^{disp} \quad \forall s, \forall t \quad \dots (9)$$

Esta restricción indica que no se puede usar más agua desde un tanque de la que está disponible.

Donde:

- $FreshW_{s,t}^{disp}$: agua almacenada disponible en el tanque.

D. DEMANDA ALIMENTARIA DE LA POBLACIÓN:

La ecuación 10 representa la restricción de la demanda alimentaria de la población. Esta condición asegura que la cantidad total de alimentos enviada desde los cultivos hacia la población $FreshF_{c,p,t}^{dem}$ sea suficiente para cubrir las necesidades mínimas de consumo de la comunidad. El termino Cp_t expresa el consumo per cápita promedio de alimentos por persona en México (poner referencia), mientras que $Pt_{p,t}$ corresponde al número total de habitantes. Con esto, la ecuación garantiza que el modelo desarrollado sea capaz de satisfacer la demanda alimentaria local.

$$FreshF_{c,p,t}^{dem} \geq Cp_t + Pt_{p,t} \quad \forall p, \forall t \quad \dots (10)$$

Donde:

- $FreshF_{c,p,t}^{dem}$: cantidad de alimento del cultivo c enviada a la población p en el tiempo t.
- Cp_t : consumo per cápita promedio de alimentos por persona.
- $Pt_{p,t}$: población del lugar.

E. FLUJO DE ALIMENTOS DESDE CULTIVOS A POBLACIONES:

La ecuación 11 define el flujo de alimentos desde los cultivos a las poblaciones. Esta restricción garantiza que la cantidad total de alimentos distribuidos $FreshF_{c,p,t}^{dem}$ no exceda el volumen producido por cada cultivo $FreshF_{c,t}^{prod}$. Así, se asegura que el modelo tenga coherencia, evitando asignaciones mayores a la capacidad productiva del modelo.

$$FreshF_{c,p,t}^{dem} \leq FreshF_{c,t}^{prod} \quad \forall c, \forall t \quad \dots (11)$$

El flujo indica que el total de alimentos enviados desde un cultivo no debe superar su producción. En este balance ya se incluye la parte tanques-cultivos.

3.4. ANÁLISIS DE COSTOS

A. COSTO PARA EL AGUA FRESCA:

La ecuación 12 representa el costo total asociado al uso de agua fresca dentro del sistema estudiado. Este costo se calcula considerando el volumen de agua enviada desde cada fuente hacia los cultivos y las poblaciones. $Pu_{w,t}$ indica el costo unitario del agua fresca, expresado generalmente en dólares por metro cubico (USD/m³). La sumatoria incorpora el agua signada tanto a los cultivos $FreshWfs_{w,c,t}$ como a las poblaciones $FreshWfs_{w,p,t}$, obteniendo así el gasto total de agua fresca en función de su precio y cantidad utilizada.

$$FreshWC = \sum_w \sum_c \sum_p \sum_t Pu_{w,t} \cdot (FreshWfs_{w,c,t} + FreshWfs_{w,p,t}) \quad \dots (12)$$

Donde:

- $Pu_{w,t}$: costo unitario para el agua fresca w en el tiempo t.
- $FreshWfs_{w,c,t}$: agua enviada a cada cultivo.
- $FreshWfs_{w,p,t}$: agua enviada a cada población.

B. COSTO DE CAPITAL PARA TANQUES DE ALMACENAMIENTO:

La ecuación 13 define el costo de capital para los tanques de almacenamiento. Este costo está compuesto por una parte fija y una parte variable. El termino x_s^{Aw} es una variable binaria que indica si el tanque s esta activo o no dentro del sistema; cuando su valor es 1, el tanque está en operación y genera costos. El parámetro Cf_s^{Aw} representa el costo fijo unitario por tanque, mientras que Cv_s^{Aw} corresponde al costo variable, el cual depende directamente de la cantidad de agua almacenada o manejada Tst_s , expresada en metros cúbicos. La ecuación refleja que cuanto mayor sea el volumen de agua procesado o almacenado, mayor será el costo operativo, además del gasto fijo de la infraestructura instalada.

$$Aw_s = x_s^{Aw} Cf_s^{Aw} + Cv_s^{Aw} Tst_s \quad \forall s \quad \dots (13)$$

Donde:

- x_s^{Aw} : variable binaria para tanques.
- Cf_s^{Aw} : costo fijo unitario.
- Cv_s^{Aw} : costo variable.
- Tst_s : capacidad máxima de almacenamiento de los tanques (m³).

El costo variable indica que el equipo que procesa una mayor cantidad de materia tendrá mayor costo.

C. COSTO DE CAPITAL PARA BOMBAS EN LA REGIÓN:

La ecuación 14 representa el costo total de los sistemas de bombeo entre tanques y cultivos, considerando tanto el costo fijo de instalación como el costo variable derivado del volumen de agua movilizado.

$$Bombas_{c,s}^{bomb} = x_{c,s}^{bomb} Cf_{c,s}^{bomb} + Cv_{c,s}^{bomb} Tsb_{c,s} \quad \forall c, \forall s \quad \dots (14)$$

- **Suponiendo bombeo de agua cultivo-cultivo:**

En este caso, el bombeo se realiza directamente entre cultivos. El costo total depende de si la infraestructura de bombeo es instalada $x_{c,c1}^{bomb} = 1$ y del volumen de agua.

$$Bombas_{c,c1}^{bomb} = x_{c,c1}^{bomb} Cf_{c,c1}^{bomb} + Cv_{c,c1}^{bomb} Tsb_{c,c1} \quad \forall c, \forall s \quad \dots (15)$$

- **Suponiendo bombeo de agua a las poblaciones:**

Donde el bombeo se destina al suministro de agua para uso poblacional. Se incluyen los costos fijos de instalación y los costos variables de operación, determinados por el volumen de agua transportados desde los tanques hasta las comunidades.

$$Bombas_{p,s}^{bomb} = x_{p,s}^{bomb} Cf_{p,s}^{bomb} + Cv_{p,s}^{bomb} Tsb_{p,s} \quad \forall c, \forall s \quad \dots (16)$$

D. COSTO DE CAPITAL DE TUBERIAS:

Representa el costo total del sistema de distribución mediante tuberías que conectan los tanques de almacenamiento con los cultivos y poblaciones.

$$Tubs_{c,s} = x_{c,s}^{tub} Cf_{c,s}^{tub} + Cv_{c,s}^{tub} Tstub_{c,s} \quad \forall c, \forall s \quad \dots (17)$$

- **Entre cultivos:**

Esta ecuación describe los costos de las tuberías necesarias para transportar agua entre cultivos. Considerando tanto los gastos de instalación como los operativos.

$$Tubs_{c,c1} = x_{c,c1}^{tub} Cf_{c,c1}^{tub} + Cv_{c,c1}^{tub} Tstub_{c,c1} \quad \forall c, \forall s \quad \dots (18)$$

- **A poblaciones:**

Finalmente, esta ecuación expresa el costo total de las tuberías que abastecen de agua a las poblaciones de la zona de estudio, sumando los componentes fijos de infraestructura y los costos variables asociados al transporte del recurso hídrico

$$Tubs_{c,s} = x_{p,s}^{tub} Cf_{p,s}^{tub} + Cv_{p,s}^{tub} Tstub_{p,s} \quad \forall c, \forall s \quad \dots (19)$$

CAPITULO 4. RESULTADOS

4.1. DATOS HIDROLÓGICOS

Como parte de la metodología del proyecto, se llevó a cabo la recopilación y análisis de datos climatológicos, con énfasis en la precipitación pluvial, debido a que este parámetro permite estimar el volumen de agua disponible en la región durante distintas épocas del año. Esta información es clave para comprender la dinámica hidrológica local y establecer los límites de disponibilidad del recurso hídrico dentro del modelo de optimización propuesto. Para ello, se consultaron bases de datos nacionales, seleccionando la información proveniente de la estación climatológica “Zirahuén” (clave C16146), localizada en el poblado del mismo nombre y operada por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). Con el objetivo de realizar una caracterización representativa de la temporada de sequía, se analizaron los registros históricos de precipitación correspondientes al periodo 2019-2020. Se identificó que los meses de febrero, marzo y abril presentan los niveles más bajos de precipitación pluvial en la región, de acuerdo con los registros históricos obtenidos de la estación climatológica “Zirahuén”. Esta información fue clave para delimitar el periodo de sequía y permitió seleccionar estratégicamente la temporada de muestreo, en la cual fue posible evaluar con mayor claridad la disponibilidad real de agua superficial en condiciones críticas. La precipitación pluvial se consideró con especial énfasis, ya que constituye una de las principales fuentes naturales de recarga hídrica en la zona, y su análisis permite estimar de forma aproximada el volumen de agua potencialmente disponible durante el año. En función de estos resultados, se programó la campaña de muestreo para la fecha 13 de abril de 2024, durante la cual se realizaron mediciones en cinco puntos estratégicos de la zona de estudio.

Con base en este análisis, se definió fecha para realizar los muestreos. Se seleccionaron cinco puntos representativos dentro de la cuenca de estudio, en los cuales se recolectaron muestras de agua para su análisis. Dichas muestras fueron evaluadas mediante pruebas en campo y laboratorio, permitiendo caracterizar parámetros fisicoquímicos y establecer una línea base sobre la calidad y disponibilidad del recurso hídrico. En el siguiente apartado se presentan los resultados obtenidos para cada uno de los sitios muestreados.

4.2. CALIDAD DEL AGUA

Como parte de la metodología de la campaña de muestreo, se evaluaron diversos parámetros fisicoquímicos con el objetivo de determinar el estado de la calidad del agua en la zona de estudio. Algunos de estos parámetros, como el pH y la temperatura, fueron medidos directamente in situ utilizando equipos portátiles calibrados previamente.

Para el análisis de parámetros más complejos, se siguieron procedimientos de laboratorio conforme a las Normas Oficiales Mexicanas (NOM), garantizando así la fiabilidad y comparabilidad de los resultados. En particular:

- Oxígeno Disuelto (OD): evaluado mediante la norma **NMX-AA-012-2001**.
- Demanda Química de Oxígeno (DQO): analizada conforme a la norma **NMX-AA-030/2-SCFI-2011**.

Los resultados se presentan en la figura 9 y 10:

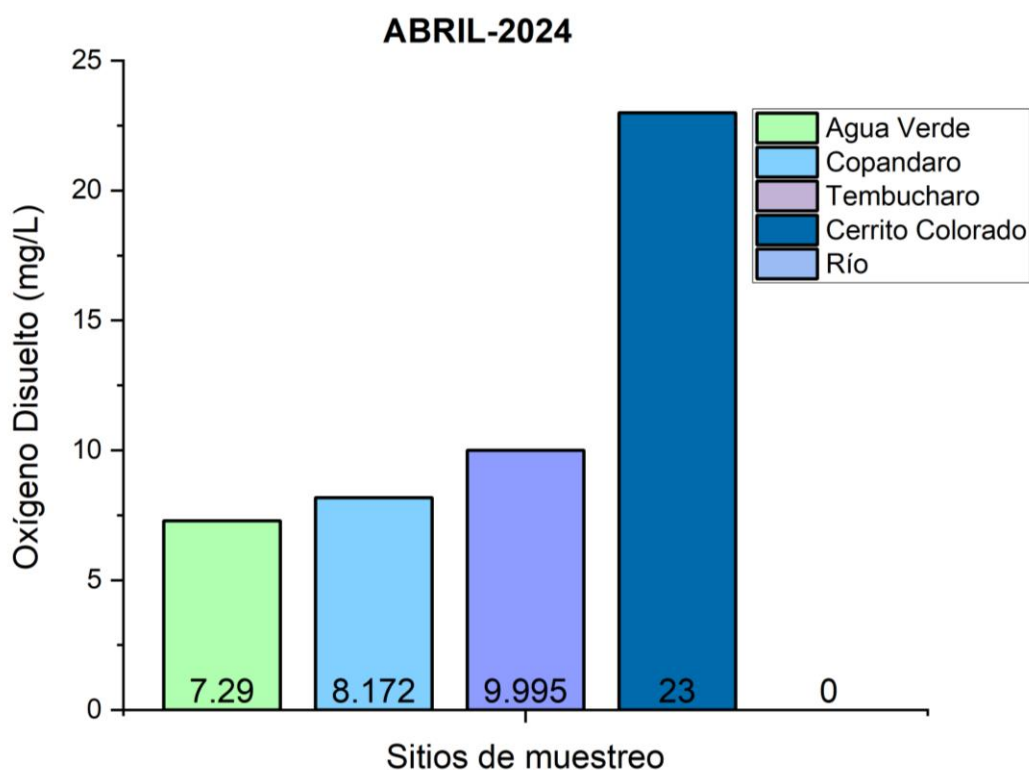


Figura 9. Concentración de oxígeno disuelto en la zona de estudio.

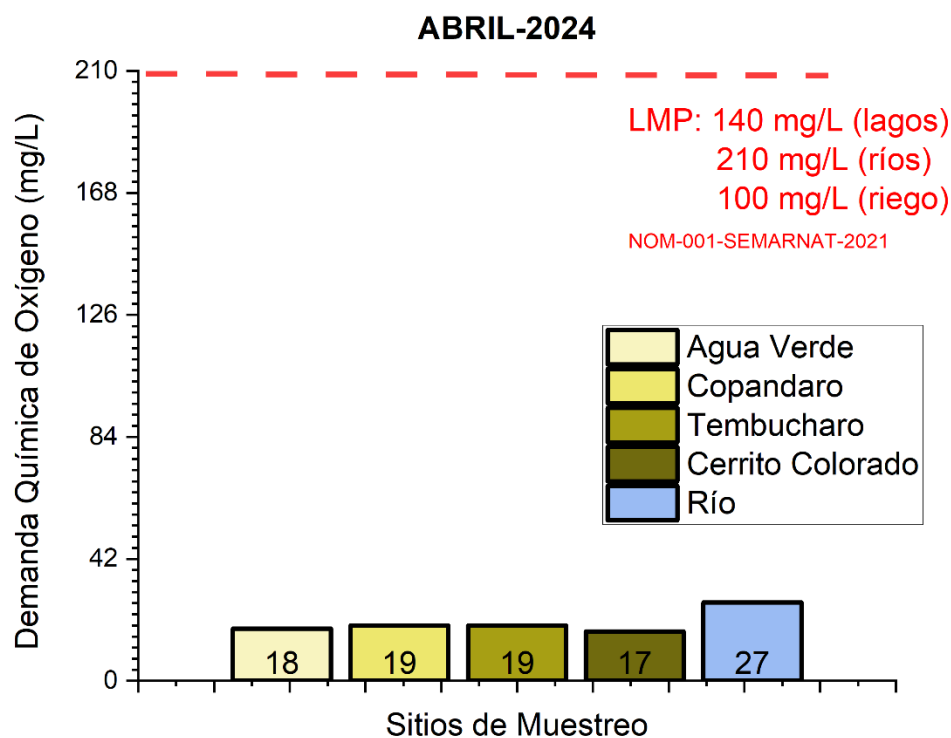


Figura 10. Demanda química de oxígeno en la zona de estudio.

Los resultados indicaron una ausencia de oxígeno disuelto en el punto de muestreo identificado como “Río”, acompañada de un incremento notable en la DQO. Esta combinación sugiere una fuerte presencia de contaminantes orgánicos que demandan oxígeno, probablemente derivados del uso intensivo de fertilizantes nitrogenados y fosfatados en las actividades agrícolas de la región y por las descargas de las comunidades aledañas.

La escasez de oxígeno disuelto en cuerpos de agua es un indicador crítico de deterioro en la calidad del agua, ya que impide el desarrollo y sostenimiento de comunidades acuáticas saludables. Por lo tanto, este hallazgo representa un riesgo ambiental significativo que debe ser atendido para conservar la funcionalidad ecológica del sistema lacustre y sus afluentes. Adicionalmente, se tiene que hacer mención de que esta condición también limita severamente el uso potencial del agua para actividades productivas, como el riego agrícola, dado que puede provocar efectos adversos en los cultivos. Asimismo, el uso del agua en este punto no es recomendable sin un tratamiento adecuado, debido al riesgo de exposición a contaminantes que afectan la salud humana o animal. Estos resultados reflejan una condición de estrés ambiental en ciertas zonas de la cuenca.

En cuanto a los resultados obtenidos para el pH y la temperatura mostrados en la Figura 11 y Figura 12 respectivamente, ambos parámetros se encuentran dentro de los intervalos establecidos por la normatividad mexicana, lo cual indica una condición fisicoquímica aparentemente aceptable en términos generales. No obstante, debido a los resultados previamente obtenidos en otros parámetros, como la ausencia de oxígeno disuelto y los niveles de DQO, se mantiene una alerta específica para el punto identificado como “río”, ya que estos indicadores reflejan una probable presencia de contaminantes orgánicos que comprometen la calidad del agua, a pesar de que el pH y la temperatura sean adecuados.

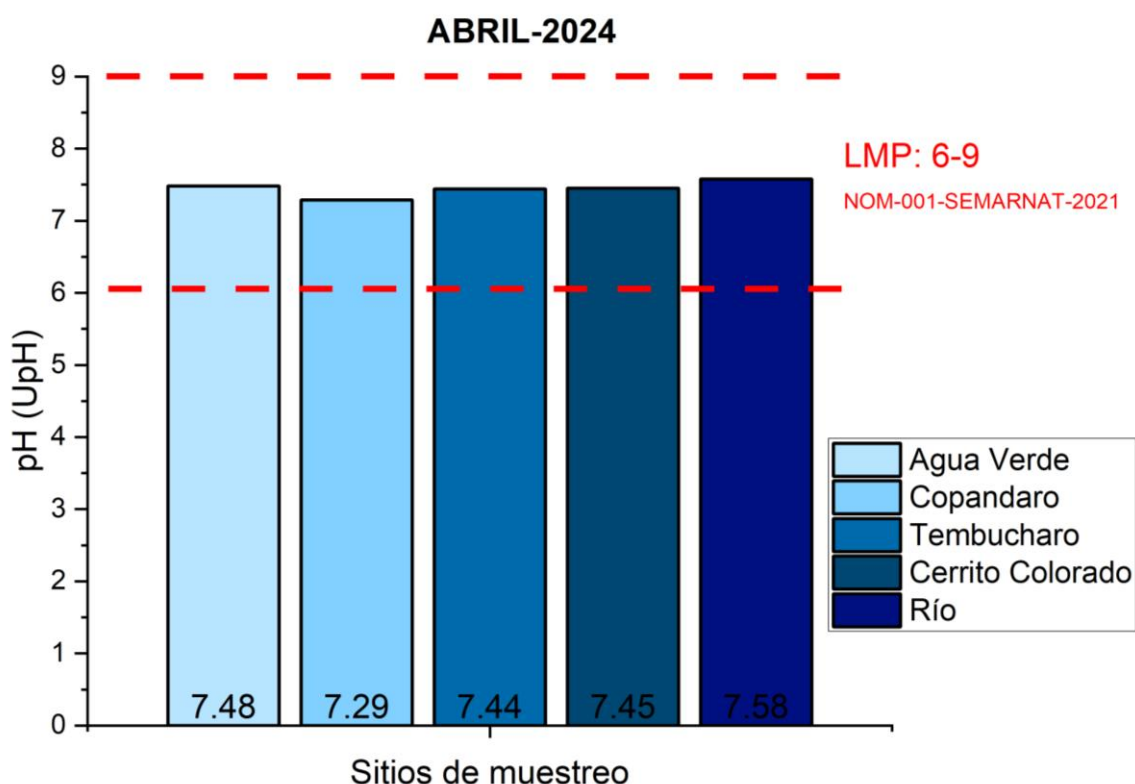


Figura 11. Valores de pH en la zona de estudio.

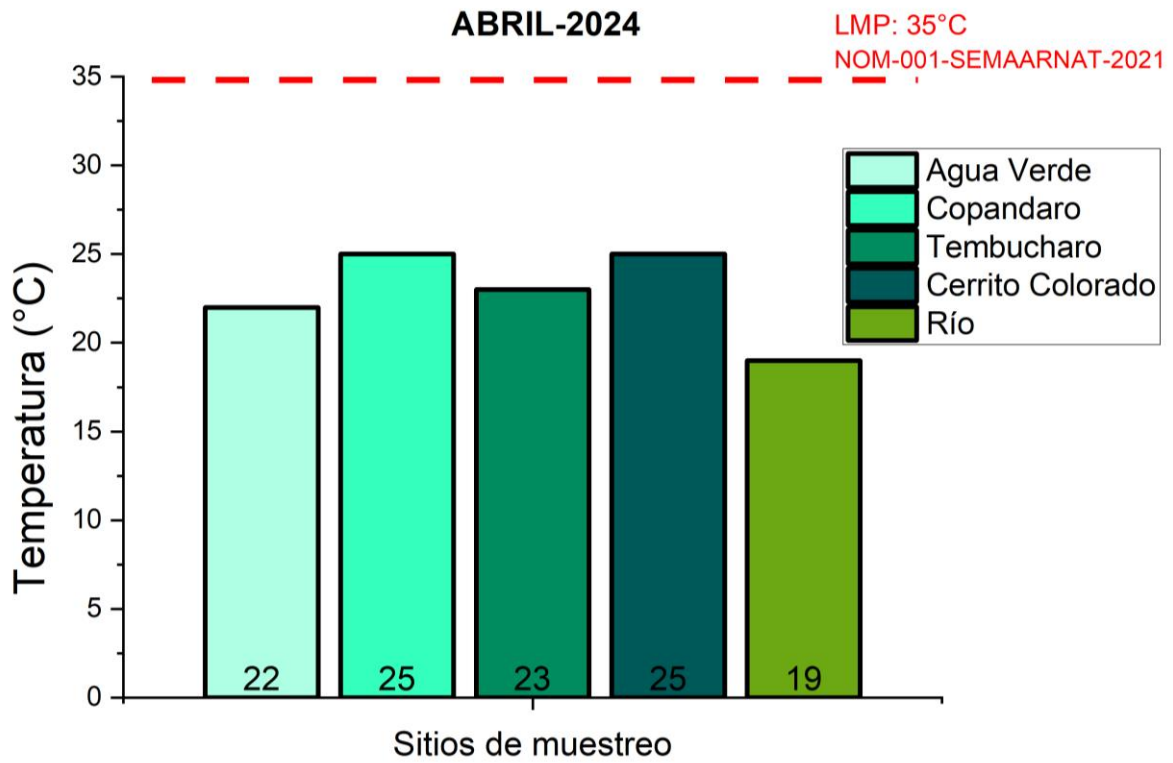


Figura 12. Temperatura del agua en la zona de estudio.

4.3. FACTOR DE ESCURRIMIENTO ESTIMADO

En el presente proyecto se realizó un estudio con el objetivo de estimar el volumen de agua que escurre superficialmente en la región de estudio, como parte del análisis de la presión ejercida por la agricultura y el consumo humano sobre los recursos hídricos disponibles. Este análisis se fundamentó en la NOM-011-CONAGUA-2015, la cual establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales.

Como herramienta de apoyo, se utilizó el software ArcGIS 10.8, dentro del cual se integraron capas vectoriales que incluyen el tipo de suelo y el uso actual del suelo. En la Figura 13 se ilustra parte del procedimiento para estimar el coeficiente de escurrimiento (C_e), donde se puede observar la clasificación espacial de los diferentes tipos y usos del suelo, mismos que se usaron para determinar el valor de K.

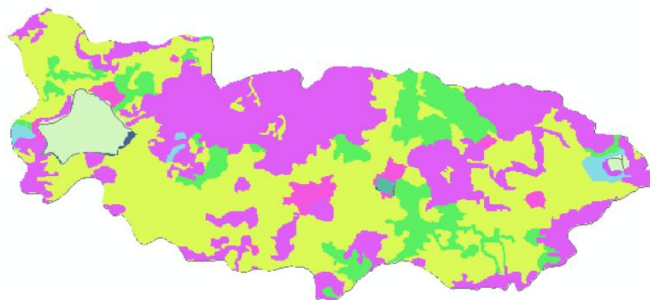


Figura 13. Mapa de uso de suelo y tipos de suelo en la región estudiada (elaboración propia)

De acuerdo con la NOM-011-CONAGUA-2015, se aplicó la siguiente ecuación para calcular el coeficiente de escurrimiento:

$$C_e = \frac{K(P - 250)}{2000} + \frac{K - 0.15}{1.5} \quad \dots (21)$$

Donde:

- C_e : coeficiente de escurrimiento
- P = precipitación anual, en mm
- K = factor k, determinado en base a los resultados de ARCGIS

Utilizando un valor de precipitación de 933.1 mm (correspondiente al año 2020 en la región de estudio) y un valor de $K = 0.32$, se obtuvo un coeficiente de escurrimiento de $C_e = 0.2226$. Este valor fue posteriormente aplicado en la siguiente fórmula para estimar el volumen anual de escurrimiento:

$$VAE = P * a * C_e \quad \dots (22)$$

Donde:

- VAE= volumen anual de escurrimiento.
- P= precipitación anual.
- a= área de la zona de estudio.
- C_e = coeficiente de escurrimiento.

El resultado obtenido fue de 58.97 millones de m^3 de escurrimiento superficial para la región analizada.

A continuación, se evaluó el consumo de agua de los principales usuarios de la zona tomando en cuenta el consumo promedio por persona en México, información proporcionada por el instituto nacional de estadística y geografía (INEGI):

- Maíz de temporal: 27.27 millones de m^3 .
- Arándano; 28,200 m^3 .
- Aguacate: (en etapa de producción, y en promedio): 58.22 millones de m^3 .
- Consumo humano: 6.92 millones de m^3 .

Esto da como resultado una demanda hídrica total estimada entre 92.44 y 96.97 millones de m^3 anuales, incluyendo tanto el sector agrícola como el consumo poblacional.

Los resultados indican que la demanda total de agua en la región de Zirahuén supera significativamente el volumen de escurrimiento superficial disponible (58.97 millones de m^3), evidenciando una situación de déficit hídrico. Esta presión creciente sobre los recursos hídricos compromete la sostenibilidad ambiental, la seguridad hídrica y alimentaria.

Se destaca lo siguiente:

- El cultivo de aguacate representa el mayor consumidor individual, con más del 60% del escurrimiento anual estimado.
- El maíz, aunque menos intensivo en consumo por unidad de área, tiene un peso importante debido a su extensa superficie cultivada.
- El consumo poblacional, aunque menor en volumen, es constante y vital, por lo que debe ser prioritario en cualquier escenario de gestión.

Es importante aclarar que el escurrimiento superficial no representa la totalidad de agua dulce disponible en la región, ya que el volumen total en la cuenca es mayor debido a que existen otras fuentes como la infiltración a acuíferos subterráneos. Sin embargo, el

escurrimiento es un indicador clave de la recarga hídrica superficial efectiva, la cual abastece tanto a cuerpos de agua como a sistemas de captación y riego.

4.4. MODELO APLICADO AL CASO DE ESTUDIO

Como se ha mencionado anteriormente, se ha desarrollado un modelo de optimización en GAMS (General Algebraic Modeling System) para abordar la compleja interrelación entre los recursos hídricos y la producción de alimentos, un aspecto crucial del nexo agua-alimentos en regiones lacustres como la cuenca de Zirahuén. Este modelo busca simular y optimizar la distribución y el uso del agua en la cuenca, considerando tanto las necesidades hídricas para la producción agrícola (específicamente, los cultivos de aguacate, maíz y arándano, representativos de la actividad económica de la zona) como el abastecimiento a la población residente.

La implementación de este enfoque nos permite analizar la dinámica de este nexo. Se examina la interrelación entre las fuentes de agua disponibles (precipitación y escurrimientos), la capacidad de almacenamiento de los tanques, la eficiencia de conversión del agua en alimento por cada tipo de cultivo, y las demás fuentes fijas de agua y alimentos de la comunidad. Este modelo no solo proyecta escenarios de uso óptimo del agua, fundamental para la sostenibilidad del ecosistema lacustre y sus comunidades, sino que también identifica posibles puntos de conflicto y oportunidades para una gestión más eficiente y sostenible del recurso hídrico.

Los resultados obtenidos de este modelo son de gran valor para la toma de decisiones. Nos permiten identificar en qué meses la disponibilidad del agua es más tensa, lo que es crítico para la planificación. Asimismo, el análisis revela qué cultivos son más eficientes en el uso del agua o cuáles deberían priorizarse estratégicamente dadas las limitaciones de recursos. El modelo también ilumina cómo se puede lograr un balance óptimo entre la demanda agrícola y la poblacional, ofreciendo recomendaciones prácticas que pueden derivar en políticas públicas más informadas para los gestores del agua en la región. Adicionalmente, el modelo permite simular diferentes escenarios futuros, como cambio climático, aumento en la población, lo que es importante para una planificación a largo plazo.

El modelo desarrollado se clasifica como un problema mixto entero lineal (MIP), ya que la función objetivo y todas las restricciones son lineales, aunque algunas de las variables de decisión son discretas. La resolución se realizó utilizando el solver CPLEX a través de GAMS, logrando integrar de manera eficiente la asignación de recursos hídricos para la producción agrícola y la satisfacción de la demanda poblacional.

El modelo incluyó 9,342 ecuaciones y 16,397 variables, de las cuales 2,051 son discretas. La optimización produjo una solución óptima para la función objetivo, con un valor de -5,511,630.67 alcanzada de manera directa sin necesidad de iteraciones adicionales ni

exploración de nodos, lo que evidencia la eficiencia del solver en este caso. El tiempo total de cálculo fue de 0.516 segundos, mostrando que incluso un modelo con gran número de variables y restricciones puede resolverse rápidamente con el hardware utilizado: un procesador Intel i5 7300HQ 2.50 GHz, 16 GB de RAM, tarjeta gráfica GeForce GTX 1050 y un SSD de 512 GB.

Estos resultados permiten afirmar que el modelo es robusto y confiable para apoyar la toma de decisiones en la gestión del agua y planificación agrícola, ofreciendo un balance entre eficiencia computacional y precisión en la asignación de recursos.

4.5. VALOR DE LA FUNCIÓN OBJETIVO: MAXIMIZACIÓN DE LA PRODUCCIÓN TOTAL DE ALIMENTOS Y MINIMIZACIÓN DE LOS COSTOS

El modelo de optimización implementado es multiobjetivo, diseñado para integrar de manera simultánea dos metas fundamentales del nexo agua-alimentos:

1. Minimización de los costos asociados a la extracción, almacenamiento y distribución del agua.
2. Maximización de la producción agrícola de cultivos estratégicos (aguacate, maíz y arándano), asegurando la disponibilidad de alimentos para la población.

Para definir la importancia de cada meta, se asignaron los siguientes pesos o ponderaciones:

Tabla 2. Porcentajes de prioridad asignados a función objetivo.

Objetivo	Parámetro	Peso	Porcentaje de prioridad
Minimizar costo	PesoCosto	0.7	70%
Maximizar Producción	PesoProduccion	0.3	30%

La solución a este problema se logra mediante la variable z , la cual es definida como la minimización de una combinación ponderada de ambas metas:

$$\text{Minimizar } z = (\text{PesoCosto} \times \text{Costos Totales}) - (\text{PesoProduccion} \times \text{Produccion Total})$$

El valor de z obtenido en la solución óptima para el escenario base fue:

$$Z = -5,511,630.67$$

Que el valor de Z sea negativo es el resultado óptimo y esperado. A pesar de que la minimización de costos tuvo un peso mayor asignado (0.7), el signo negativo confirma que:

$$(\text{PesoProduccion} \times \text{Produccion Total}) > (\text{PesoCosto} \times \text{Costos Totales})$$

Esto significa que el impacto de la producción (el termino negativo) es mayor en magnitud que el impacto ponderado de los costos (el termino positivo). En términos del modelo, la meta de maximización fue más influyente que la meta de minimización en la solución final. El modelo encontró la asignación de recursos más eficientes donde el beneficio de

maximizar la producción supera los gastos mínimos necesarios, logrando el menor valor posible para Z.

El valor exacto de -5,511,630.67 representa el punto exacto de optimalidad. Es la prueba matemática de que el modelo encontró el mejor compromiso posible para la ponderación definida (0.7/0.3), donde:

- Se alcanzan el costo mínimo y la producción máxima simultáneamente, sin violar ninguna restricción (disponibilidad de agua, capacidad de la infraestructura, etc.).
- El algoritmo garantiza que no existe otra solución que cumpla con todas las restricciones y que, al mismo tiempo, genere un valor de z más pequeño (más negativo) que el obtenido, ya que, si el algoritmo intentara encontrar un número más negativo, tendría que romper alguna de las restricciones.

4.6. USO Y DISPONIBILIDAD DE AGUA POR PERIODO

El análisis de la dinámica del agua a lo largo de los diferentes meses estudiados (12 meses) es crucial para identificar cuándo el recurso es más o menos abundante y cómo impacta en su gestión. En particular, el análisis de la variable $FreshWfstot_{w,t}$ (agua fresca total) en conjunto con los parámetros $FreshWPr_{w,t}$ (precipitación) y $FreshWEs_{w,t}$ (escurrimientos) indican los patrones estacionales existentes. Los meses de mayor disponibilidad de agua fresca corresponden con la temporada de lluvias (junio-noviembre), mientras que otros periodos muestran una marcada reducción en el caudal natural (marzo y diciembre). Esta estacionalidad muestra la importancia de una gestión hídrica adecuada. Los periodos de baja disponibilidad son críticos, sin embargo, los periodos de abundancia ofrecen oportunidades para la recarga y satisfacción de las demandas.

4.7. ASIGNACIÓN DE AGUA DESDE LA FUENTE INICIAL A CULTIVOS Y POBLACIÓN

La distribución del agua entre los usos agrícola y poblacional es un eje central del problema del nexo agua-alimentos.

- **Aguacate:** recibe un flujo constante de aproximadamente 5,800,000 m³/mes desde la fuente 1 durante todo el año.
- **Maíz:** recibe un flujo de aproximadamente 2,800,000 m³/mes desde la fuente 1 en todo el año.
- **Arándano:** a diferencia de los otros cultivos, el arándano no recibe asignación directa de la fuente principal. La restricción impuesta en el modelo, que refleja las prácticas agrícolas reales en invernaderos, establece que sus necesidades de riego deben ser cubiertas exclusivamente con agua proveniente de los tanques de almacenamiento y redistribución.

- **Población:** un aspecto importante, y que resultado de una modificación en la formulación del modelo, es que la demanda fija para la población (500,000 m³ mensuales) es satisfecha en su totalidad en cada periodo.

Como observación, los meses críticos identificados por el modelo son marzo, abril y diciembre, coincidiendo con periodos donde la demanda agrícola y poblacional supera la capacidad de la fuente inicial, especialmente los arándanos. Durante estos meses se hace uso de agua almacenada en tanques para cumplir las demandas. En la Figura 14 y Figura 15 se puede observar de manera grafica como se distribuye el agua desde la fuente inicial a los cultivos y a la población respectivamente, además de demanda totalmente cubierta a la población de todo el municipio de salvador Escalante, aun y cuando la zona de estudio no abarca la totalidad de dicho municipio.

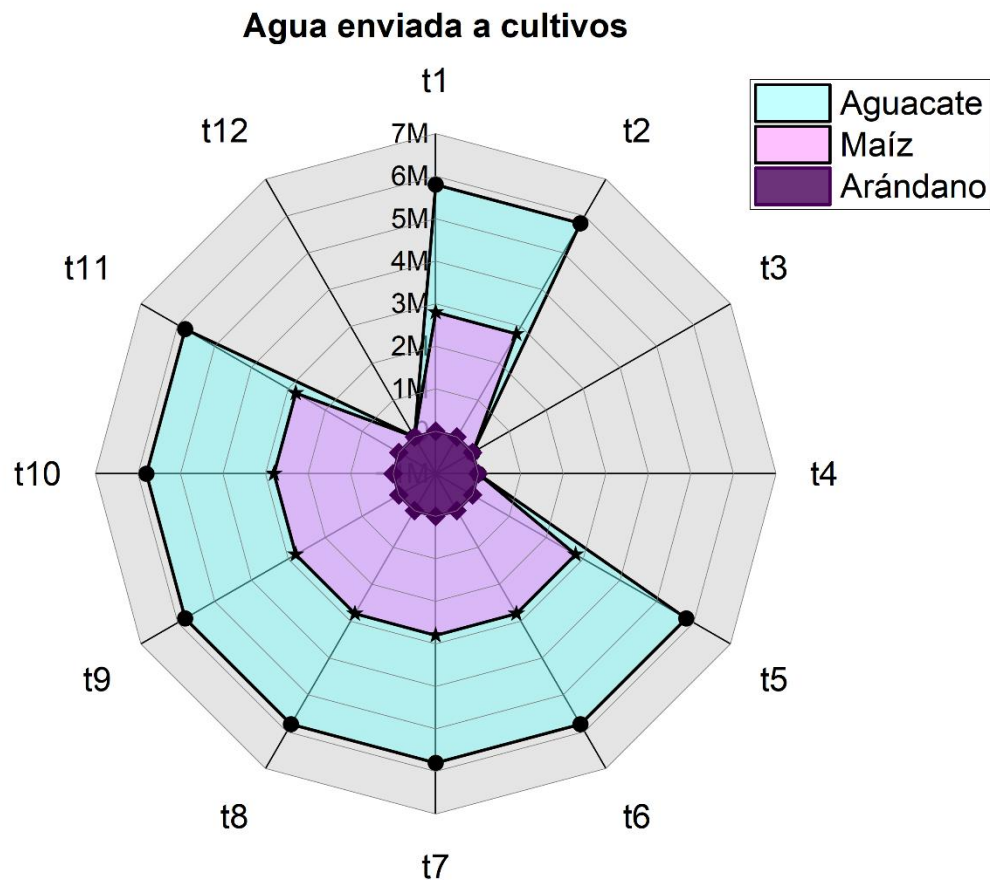


Figura 14. Agua enviada desde la fuente inicial a cada cultivo de interés.

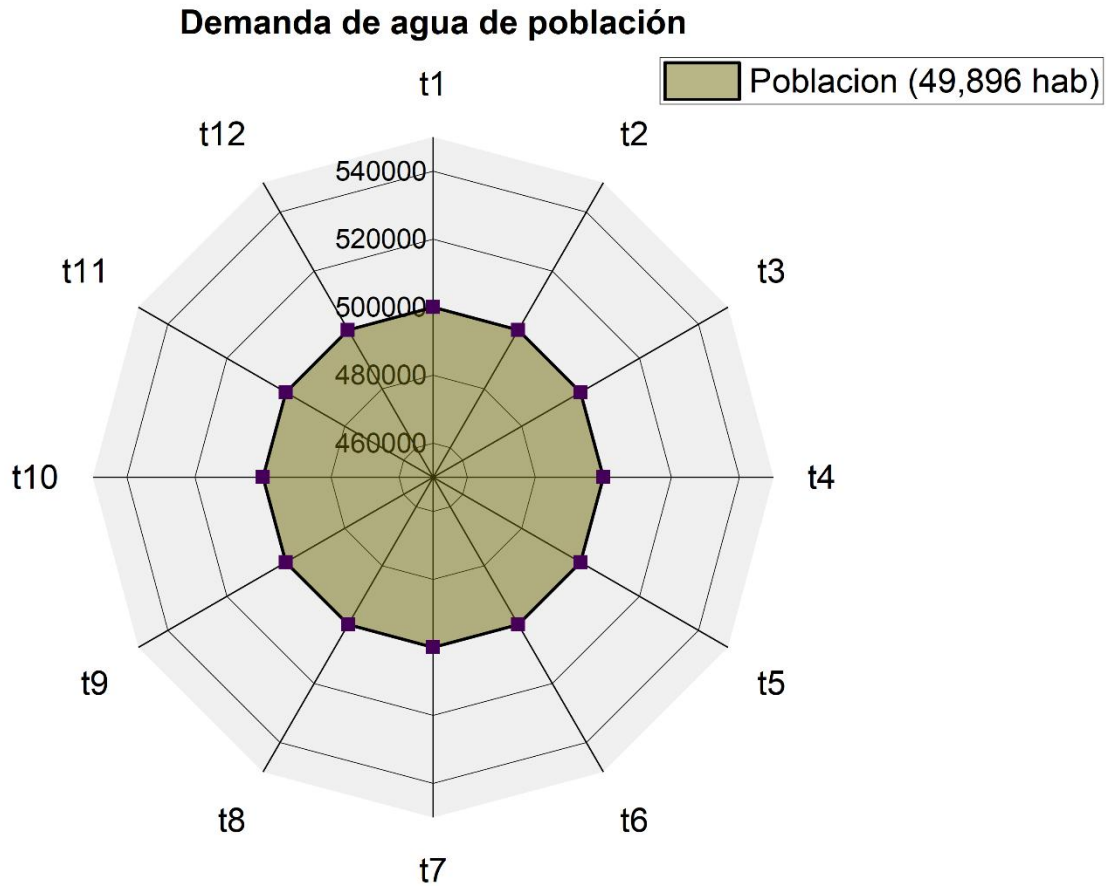


Figura 15. Agua enviada a satisfacer la demanda de la población.

4.8. USO DE TANQUES DE ALMACENAMIENTO HACIA CULTIVOS

Los resultados del modelo muestran un papel diferenciado del agua de almacenamiento en función del tipo de cultivo y su entorno productivo:

- **Arándano:** el modelo asigna de manera constante aproximadamente 10 m³ mensuales por cada tanque durante todo el año. Esto se explica porque el arándano se cultiva en invernaderos, lo que impide el aprovechamiento directo de la precipitación. En consecuencia, depende exclusivamente del agua de los tanques para mantener su productividad, reflejando cómo la infraestructura hídrica es clave para sostener cultivos de alto valor comercial bajo sistemas controlados.
- **Aguacate:** presenta un uso suplementario del agua almacenada, con un mínimo de 10 m³ en los meses críticos (marzo, abril y diciembre). Esto demuestra que el aguacate requiere apoyo hídrico en periodos de menor precipitación, subrayando la importancia de la gestión estacional del agua para garantizar su continuidad productiva y su aporte a la seguridad alimentaria.
- **Maíz:** no recibe agua de los tanques, pues al ser un cultivo de temporal, depende directamente de la precipitación pluvial. Esto evidencia como los cultivos básicos

pueden sostenerse sin infraestructura adicional, aunque permanecen más expuestos a la variabilidad climática.

En conjunto, estos resultados reflejan dos estrategias de gestión hídricas diferenciadas:

1. Un riego constante y estructural para el arándano, sustentado exclusivamente en el almacenamiento.
2. Un riego suplementario para el aguacate en épocas críticas, que asegura estabilidad productiva en condiciones de escasez.

En términos de volúmenes, se estima una disponibilidad total de 300 a 360 mil m³ en tanques, de los cuales alrededor de 35 mil m³ se destinan al arándano y cerca de 316 mil m³ al aguacate. Aunque el arándano demanda agua durante todo el año, el aguacate resulta ser el principal consumidor de agua almacenada debido a sus mayores requerimientos en temporadas de sequía.

Este análisis evidencia cómo la infraestructura de almacenamiento hídrico no solo equilibra la oferta y demanda de agua, sino que también fortalece la resiliencia alimentaria, asegurando tanto la producción local de cultivos básicos como el mantenimiento de cultivos especializados en entornos vulnerables a la variabilidad climática.

La Figura 16 muestra cómo se realiza la distribución del agua de los tanques de almacenamiento hacia los cultivos demandantes a lo largo del año.

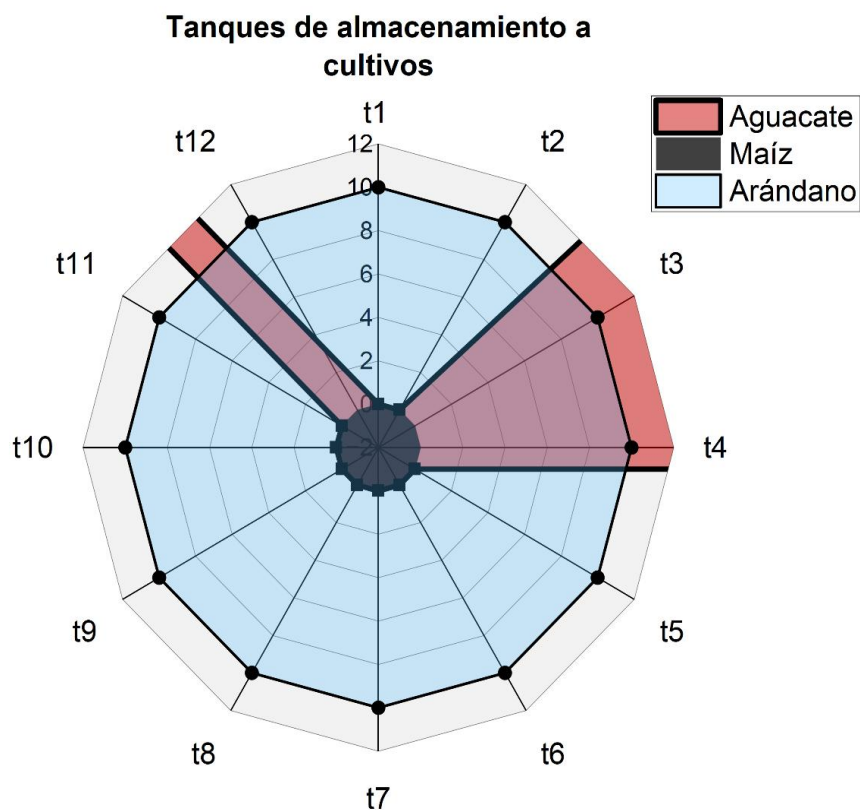


Figura 16. Uso de agua de tanques por cultivo.

En resumen, la ausencia de asignación de agua de los tanques al maíz sugiere que su demanda se satisface de la precipitación y el escurrimiento en la región, y esto ayuda positivamente a cubrir las necesidades sin recurrir a los costosos recursos de los tanques.

4.9. PRODUCCIÓN Y DEMANDA DE ALIMENTOS POR CULTIVO

Los resultados del modelo muestran una relación directa entre el uso eficiente del agua y la capacidad de satisfacer la demanda alimentaria de la población. La producción mensual estimada por cultivo es la siguiente:

- **Aguacate:** alrededor de 5.6 millones de kg al mes (5,564 ton), con picos de hasta 5.9 millones en los meses de 1, 3, 4 y 12.
- **Maíz:** mantiene una producción constante de aproximadamente 2.36 millones de kg mensuales (2,360 ton), lo que asegura un aporte estable a la dieta local.
- **Arándano:** presenta una producción estable de 3,315 kg al mes (3.3 ton), reflejando su escala más reducida en comparación con los otros cultivos.

En términos de seguridad alimentaria, el modelo confirma que esta producción es suficiente para cubrir la demanda promedio de la población considerada. Sin embargo, es importante destacar que no todos los cultivos evaluados son igualmente esenciales para el consumo local: el maíz es un alimento básico, mientras que el aguacate y el arándano, aunque no son indispensables en la dieta de la población, representan un excedente productivo que se orienta principalmente a la venta comercial y de exportación.

De esta forma, el modelo no solo asegura la satisfacción de las necesidades alimentarias mínimas, sino que también revela el potencial económico de los cultivos de mayor comercial, generando ingresos adicionales para la región de estudio.

4.10. ANÁLISIS SOCIOECONÓMICO

Desde la perspectiva económica, es fundamental ubicar el área dentro de su contexto territorial. El modelo se aplicó a una superficie de 28,390 hectáreas, lo que representa entre el 55 y 58% del total del municipio del salvador Escalante, municipio en el cual se encuentra la zona estudiada. Esta diferencia de escala explica que los resultados obtenidos presenten cifras menores en comparación con los datos reales del municipio. Aun así, el modelo es una herramienta valiosa para evaluar el potencial productivo y la resiliencia ambiental de la zona.

4.11. COMPARACIÓN DE PRODUCCIÓN

- **Aguacate:** el modelo estima una producción de 5,564 a 5,860 toneladas mensuales, mientras que la producción promedio en el municipio alcanza aproximadamente las 15,000 toneladas al mes.
- **Maíz:** Salvador Escalante destina cerca de 5,545 hectáreas al cultivo de maíz, con un rendimiento promedio de 2,272 toneladas mensuales, muy cercano a lo proyectado por el modelo (2,360 toneladas al mes). Esto indica que el modelo reproduce con buena precisión la dinámica real de este cultivo básico.
- **Arándano:** el modelo reporta una producción de apenas 3.3 toneladas al mes, frente a las 108 toneladas mensuales registradas en el municipio. Esto confirma que el modelo está configurado para responder a una demanda local reducida, más que a un esquema de producción a gran escala.

En conjunto, estos resultados muestran que el modelo no busca replicar la totalidad de la producción agrícola municipal, sino ajustarse a una escala específica de consumo y eficiencia hídrica, lo cual permite evaluar escenarios de autosuficiencia local y al mismo tiempo identificar excedentes con potencial económico.

4.12. CONFIGURACIÓN DEL MODELO Y PRIORIDADES

Es importante señalar que la configuración del modelo otorga mayor prioridad a la reducción de gastos y la eficiencia económica, antes que a la maximización de la producción o el crecimiento poblacional. Esto explica porque las cifras de producción pueden ser más conservadoras que las estadísticas reales, reflejando una lógica de uso racional del agua y de equilibrio entre necesidades locales y sostenibilidad.

4.13. PERSPECTIVA DE DIVERSIFICACIÓN ECONOMICA

Actualmente, gran parte de la generación de ingresos agrícolas en la región se concentra en el cultivo de aguacate, lo que ha llevado a una fuerte especialización económica local entorno a este producto. Si bien, el aguacate ha demostrado una sólida rentabilidad económica y una notable competitividad en mercados nacionales e internacionales, esta dependencia representa también un riesgo significativo en términos de sostenibilidad económica y ambiental.

De ahí surge la necesidad de diversificar la economía de la cuenca, explorando otras actividades productivas y servicios ecosistémicos no extractivos, como el ecoturismo, la reforestación con fines de conservación y los esquemas de pago por servicios ambientales. Estas alternativas no solo reducirían la presión sobre el recurso hídrico y el suelo, sino que también fortalecerían la resiliencia económica de las comunidades locales.

Algunas fuentes de inversión para impulsar estas estrategias pueden provenir de la capitalización generada por el propio cultivo de aguacate, que ha consolidado su fortaleza económica y capacidad de atracción de recursos (Paniagua, 2017). De esa manera, aprovechar el éxito actual de la agroindustria del aguacate y el arándano podría constituir un punto de partida estratégico para financiar e implementar modelos de desarrollo más integrales y sostenibles en la región.

4.14. COSTOS ESTIMADOS POR EL MODELO FRENTE A LA REALIDAD AGRICOLA

De acuerdo con datos proporcionados por Fideicomisos Instituidos en Relación con la Agricultura (FIRA, 2025) para los costos de producción de aguacate en Michoacán (meseta purépecha), el costo aproximado por hectárea es de \$147,877 pesos. Este valor contempla gastos de mano de obra (jornaleros), fertilizantes y agroquímicos, renta de maquinaria y preparación del terreno, certificaciones y sanidad vegetal, así como herramientas y gastos financieros.

Si se extrapola este costo a las 11,600 hectáreas de aguacate presentes en la zona de estudio, se obtiene un gasto total de aproximadamente \$1,715,373,200 pesos, equivalente a 92 millones de USD.

En contraste, el modelo de optimización desarrollado en este estudio estima un costo total de 33 millones de USD, lo que en pesos mexicanos equivale a \$617,783,958 pesos.

Esta diferencia refleja cómo el modelo, al centrarse en la eficiencia en el uso del agua y la reducción de costos asociados a infraestructura hídrica, proyecta un escenario significativamente más económico que el observado en la práctica agrícola real. En términos relativos, los resultados muestran un ahorro potencial cercano al 64% respecto a los costos reportados por FIRA, lo que pone en evidencia la utilidad del enfoque de optimización. En la figura 17 se puede observar una gráfica que diferencia los costos de producción marcados por el modelo desarrollado vs los datos proporcionados por FIRA.

Costo modelo vs Costo real

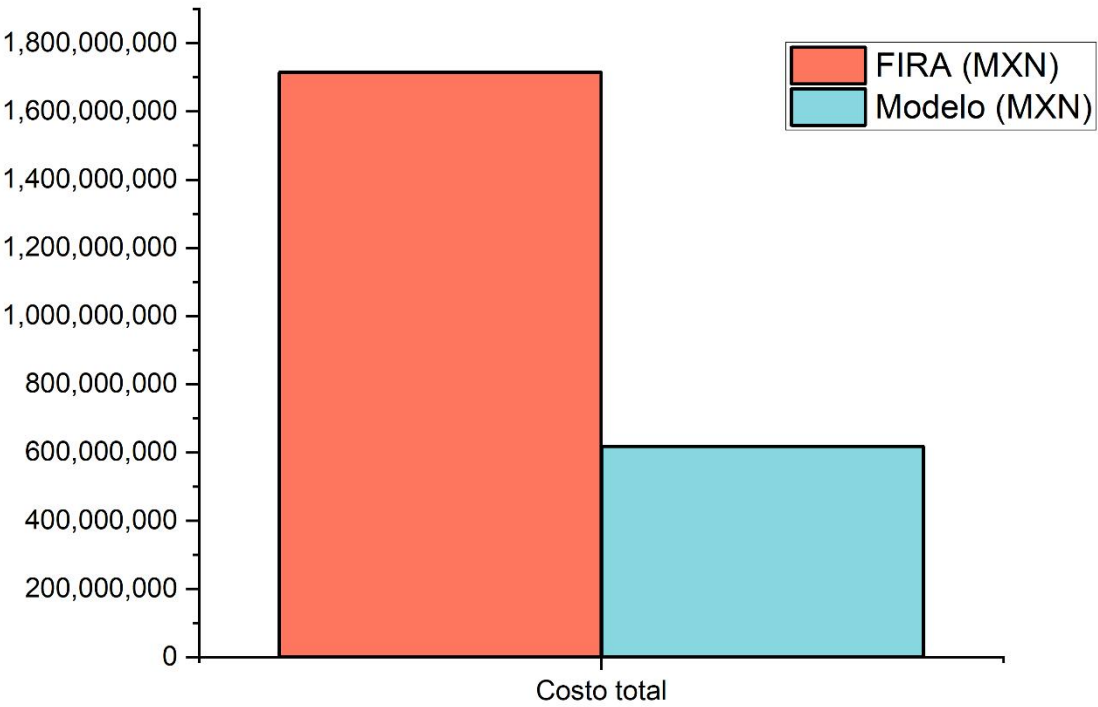


Figura 17. Diferencia de costos de producción de aguacate.

4.15. ESCENARIO ALTERNO: ESCASEZ DE AGUA

Se realizó una simulación modificando los parámetros de agua fresca disponible, considerando una menor precipitación y escurrimiento, con el fin de representar un escenario de estrés hídrico en la región.

Los resultados muestran una disminución significativa en la producción agrícola:

- **Aguacate:** la producción cae de manera drástica como se puede observar en la figura 18, alcanzando 2,928 toneladas en enero y reduciéndose a un promedio de 630 toneladas mensuales durante los 11 meses restantes.

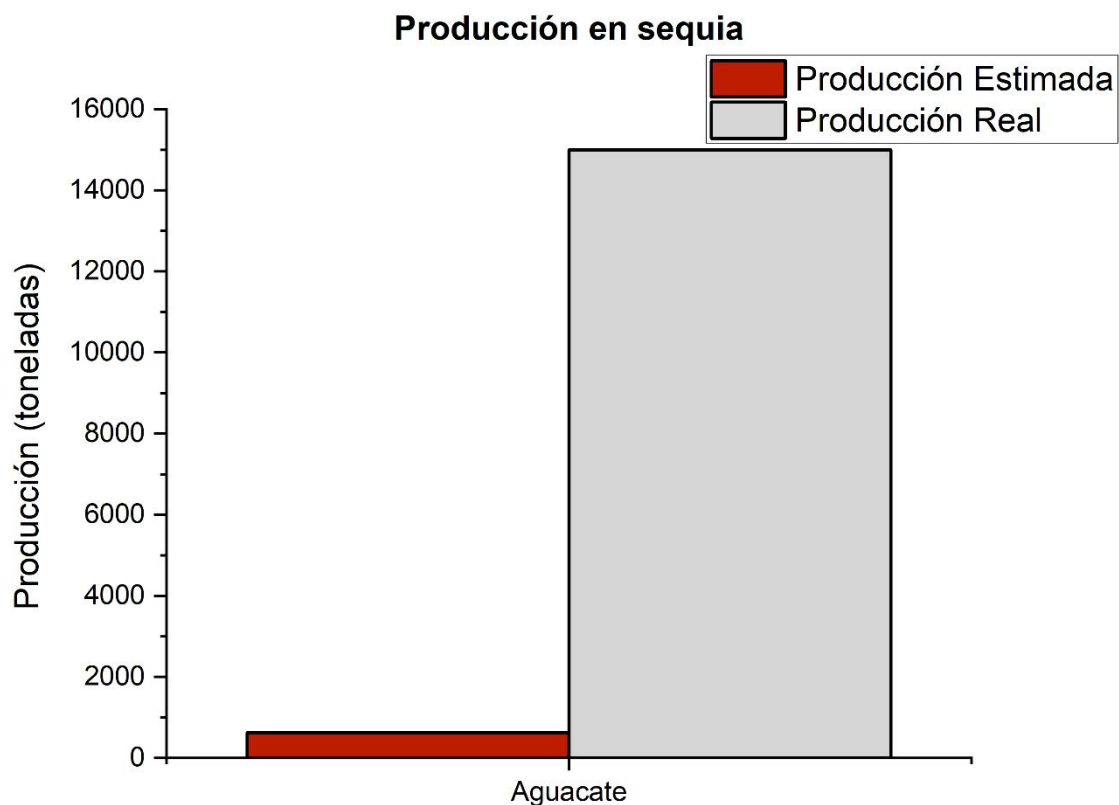


Figura 18. Producción de aguacate en escenario de sequía.

- **Maíz:** la figura 19 indica que en enero se obtienen apenas 61.9 toneladas, mientras que en los meses restantes la producción se estabiliza en torno a 2,360 toneladas mensuales.

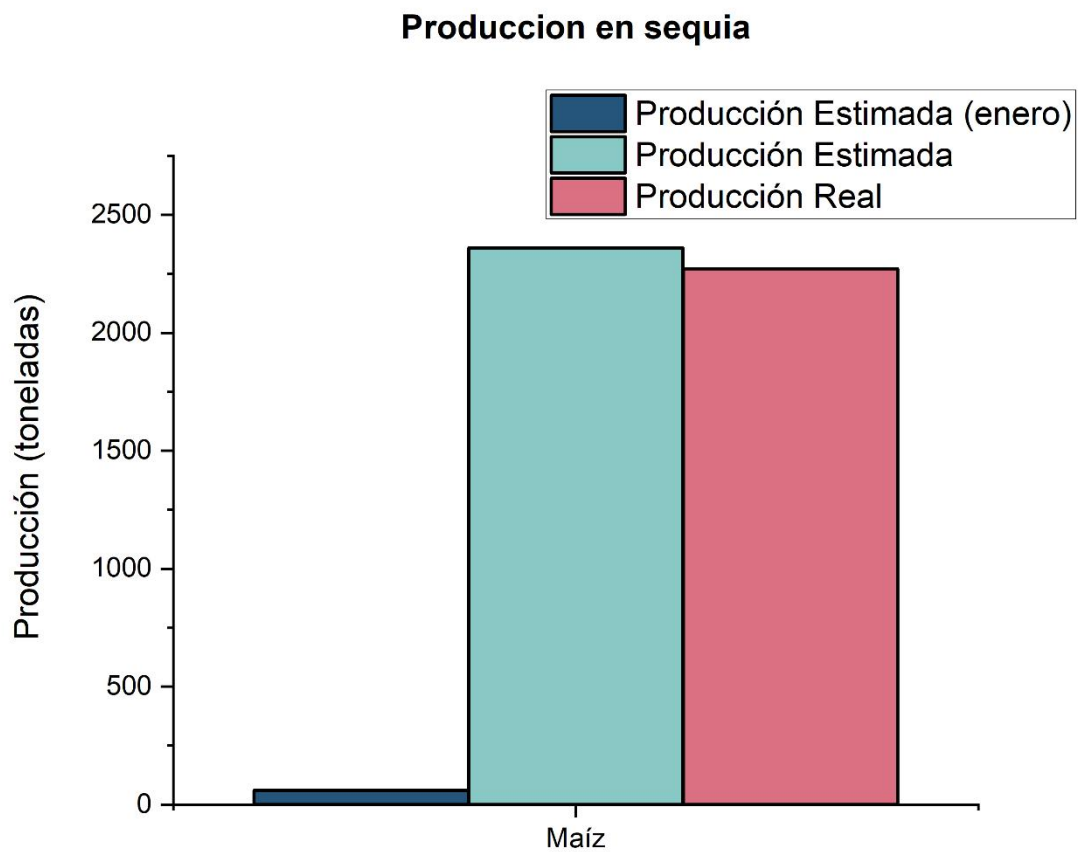


Figura 19. Producción de maíz en escenario de sequía.

- **Arándano:** la producción se mantiene constante en 3.3 toneladas mensuales, sin cambios relevantes frente al escenario base, los resultados se observan graficados en la Figura 20.

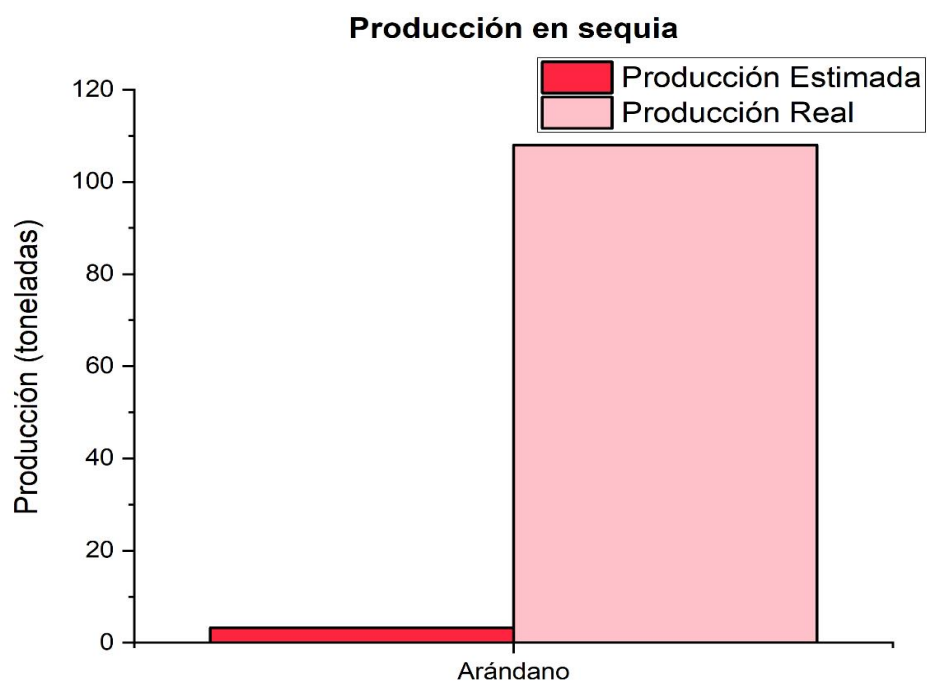


Figura 20. Producción de arándano en escenario de sequía.

En términos de costos, el modelo reporta un gasto total de \$14,359,348 pesos, con un valor de función objetivo de 726,005. Este escenario refleja una reducción en los costos asociados al agua, pero también evidencia una disminución considerable en la producción de alimentos, lo que resalta el impacto directo de la disponibilidad hídrica en el equilibrio del nexo agua-alimentos.

Tabla 3. Comparación de producción entre escenario normal y escenario de sequía

Cultivo	Producción (ton/mes)	Producción en sequia (ton/mes)	Comentarios
Aguacate	5,564-5860	Enero: 2,928; Feb-Dic: 630	Producción reducida debido a menor agua disponible
Maíz	2,360	Enero: 61.9; Feb-Dic: 2,360	Enero afectado; luego se mantiene en niveles base
Arándano	3.3	3.3	Sin cambios significativos

Tabla 4. Comparación de precios del modelo y valor de la función objetivo.

Concepto	Escenario base	Escenario de sequia	Comentarios
Costo total	\$33,029,560	\$14,359,348	Reducción de costos por menor consumo de agua, pero también menor producción
Valor de función objetivo (z)	-5,511,630.6	726,005	Refleja menor eficiencia productiva y priorización de costos en el escenario de sequia

El escenario de sequía reduce drásticamente la producción de aguacate, mientras que maíz y arándano se ven menos afectados debido a su dependencia directa de la lluvia y de los tanques, respectivamente.

La disminución del gasto refleja un ahorro en el uso de agua, pero evidencia que menor disponibilidad hídrica impacta directamente en la producción de alimentos.

La figura 21 muestra una comparación entre la producción agrícola en condiciones normales y bajo un escenario de sequía simulada. En el caso del aguacate, se observa una reducción drástica de la producción, pasando de valores estables cercanos a 5,500-5,800 toneladas mensuales en el escenario normal, a tan solo 2,928 toneladas en enero y alrededor de 630 toneladas en los meses restantes bajo sequía.

En el maíz, el efecto de la sequía es menor pero aun relevante: la producción se mantiene en aproximadamente 2,360 toneladas mensuales en condiciones normales, mientras que en enero cae a 61.9 toneladas, estabilizándose en los meses posteriores.

Por su parte, el arándano muestra una producción constante de 3.3 toneladas por mes en ambos escenarios, reflejando que, al depender únicamente de agua almacenada en tanques para riego en invernaderos, su rendimiento no se ve afectado por la variabilidad hídrica.

Esta gráfica, ilustra como los cultivos más dependientes del agua fresca (aguacate y maíz) son altamente vulnerables a escenarios de sequía, mientras que el arándano presenta mayor resiliencia debido a su sistema de manejo controlado. Esto evidencia la importancia de diversificar estrategias de gestión hídrica y fortalecer prácticas de adaptación frente a escenarios de menor disponibilidad de agua.

Es importante señalar que la reducción en la producción de aguacate bajo condiciones de sequía no solo implica una menor disponibilidad de alimento, sino también un impacto directo en la economía regional. Una menor producción de este cultivo reduce la demanda de mano de obra, afectando principalmente a los jornaleros agrícolas que dependen de

estas actividades para su sustento. Esto se traduce en una disminución de la derrama económica, tanto en la zona de estudio como en el ámbito estatal y nacional, dado que el aguacate es uno de los principales motores de exportación agrícola en Michoacán. además, una caída en la producción impacta negativamente en otros sectores vinculados, como el transporte, la agroindustria y los servicios asociados al comercio. A nivel macroeconómico, esto puede afectar la balanza comercial agrícola, reduciendo la competitividad del aguacate mexicano en mercados nacionales.

En contraste, cultivos como el arándano muestran mayor resiliencia, pero su escala de producción es significativamente menor y no logra compensar pérdidas económicas que genera la reducción del aguacate. Este escenario resalta la vulnerabilidad económica de la región frente a la dependencia de un solo cultivo y refuerza la necesidad de diversificar la base productiva, integrar estrategias de adaptación climática y fortalecer políticas de gestión del agua.

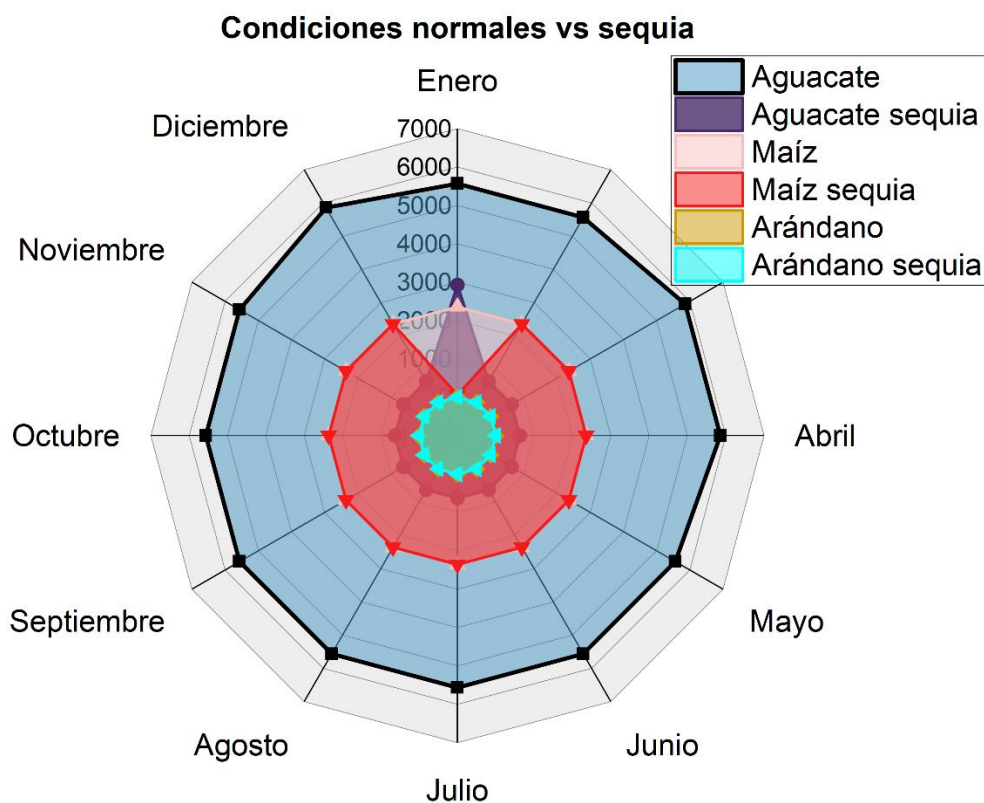


Figura 21. Comparación de producción en condiciones normales y de sequía.

4.16. ESCENARIO CRITICO

En un escenario más severo de sequía, donde la disponibilidad de agua fresca, la precipitación y los escurrimientos son aún menores a los utilizados en la simulación, el modelo de optimización podría dejar de ser factible, es decir, ya no encontraría una solución que cumpla simultáneamente con los objetivos.

El principal motivo sería el incumplimiento de las restricciones de demanda mínima: tanto la población como los cultivos requieren de un volumen básico de agua que no podría

satisfacerse con los recursos disponibles. Esto generaría un modelo inviable, donde las necesidades mínimas de consumo humano no se alcanzan y la producción agrícola cae a 0 en varios cultivos.

- La población enfrentaría escasez de agua potable, comprometiendo la seguridad hídrica y la salud pública
- Los cultivos comerciales (aguacate y arándano) dejarían de producirse en la zona por falta de riego, lo que conllevaría a la pérdida total de ingresos agrícolas en la región
- El maíz de temporal, aunque más resistente, también se vería afectado en los meses críticos, reduciendo aún más la capacidad de abastecer alimentos básicos
- A nivel socioeconómico, la región experimentaría crisis laboral y económica, ya que miles de empleos directos e indirectos vinculados a la agroindustria del aguacate y otros cultivos desaparecerían.

Este escenario pone en evidencia que, sin estrategias de adaptación como la construcción de infraestructura adicional, el uso de tecnologías de riego más eficientes o la diversificación de actividades económicas, la región podría entrar en un colapso del nexo agua-alimentos, dejando de funcionar no solo el modelo matemático, sino también la dinámica real de producción y desarrollo local.

CAPITULO 5. CONCLUSIONES Y TRABAJO A FUTURO

El presente trabajo permitió analizar la interacción entre la disponibilidad de agua, la producción agrícola y las demandas poblacionales en la región de la cuenca hidrológica del lago de Zirahuén, en el municipio de Salvador Escalante, Michoacán; integrando el enfoque del nexo agua-alimentos mediante un modelo de optimización matemática formulado en GAMS.

Los resultados muestran que:

1. **Naturaleza del modelo:** el modelo desarrollado es determinístico y multiobjetivo. Está diseñado para minimizar costos asociados al agua y a la infraestructura, y maximizar la producción agrícola, ponderando ambos objetivos de acuerdo con los pesos asignados. Esto permitió obtener soluciones óptimas bajo supuestos claros y valores fijos de parámetros.
2. **Producción agrícola:** en el escenario base, el modelo generó producciones estables: aguacate entre 5,564 y 5,860 toneladas mensuales, maíz con 2,360 toneladas mensuales y arándano con 3.3 toneladas mensuales. Dichos resultados muestran que el modelo es capaz de garantizar la satisfacción de la demanda poblacional y generar excedentes, principalmente de aguacate, con potencial de comercialización.
3. **Uso del agua:** el aguacate y el maíz dependen directamente del agua fresca disponible, mientras que el arándano se abastece exclusivamente de agua proveniente de tanques de almacenamiento, debido a su producción en invernaderos. Esto refleja la distintiva vulnerabilidad de cada cultivo frente a la variabilidad hídrica.
4. **Escenarios de estrés hídrico:** bajo condiciones simuladas de menor disponibilidad de agua, la producción del aguacate se redujo drásticamente (2,928 toneladas en enero y 630 toneladas en los meses siguientes), mientras que el maíz y el arándano mostraron una mayor estabilidad relativa. Estos resultados evidencian que el aguacate es el cultivo más sensible a la escasez hídrica, lo que implica riesgos socioeconómicos para la región debido a su fuerte dependencia de este producto.
5. **Costos:** el modelo estimó costos anuales de aproximadamente 33 millones de dólares, considerablemente menores en comparación con los 92 millones de dólares reportados en la práctica real (FIRA, 2025) para la misma superficie de aguacate. Esta diferencia resalta el potencial del modelo para identificar esquemas de manejo más eficientes en el uso del agua y la infraestructura.
6. **Calidad del agua:** los resultados evidenciaron concentraciones dentro de los límites permitidos para la mayoría de los parámetros analizados, aunque con algunos indicadores de presión ambiental asociados a la actividad agrícola.
7. **Impacto socioeconómico:** se confirma la alta dependencia económica de la región en torno al aguacate. Una disminución en su producción no solo afecta el ingreso de los productores, sino también la demanda de mano de obra y la derrama económica en escalas local, estatal y nacional. Por ello, la diversificación productiva y la incorporación de servicios ecosistémicos representan alternativas estratégicas para mejorar la resiliencia económica y ambiental.

En síntesis, el modelo confirma la importancia de diseñar estrategias de manejo del recurso hídrico que consideren escenarios de variabilidad climática y presión económica. Asimismo, los resultados constituyen una herramienta útil para respaldar la formulación de políticas públicas orientadas a la seguridad hídrica y alimentaria, promoviendo esquemas de gestión integral que fortalezcan la sostenibilidad ambiental y socioeconómica de la región de estudio.

5.1. TRABAJOS A FUTURO

A partir de los resultados, se identifican diversas líneas de investigación y mejoras metodológicas que pueden desarrollarse en trabajos futuros:

1. **Incorporación de incertidumbre (modelos estocásticos):** ampliar el modelo hacia escenarios que consideren la variabilidad climática (precipitación, escurrimiento, sequías) y la fluctuación de los precios de insumos y productos agrícolas.
2. **Expansión a múltiples fuentes de agua:** incorporar otras fuentes hídricas (aguas subterráneas, aguas residuales tratadas, captación de lluvia, etc.) y evaluar su integración en la matriz de asignación para aumentar la resiliencia del sistema.
3. **Diversificación de cultivos:** analizar la incorporación de mas productos agrícolas, incluyendo cultivos básicos de importancia local, con el fin de balancear la seguridad alimentaria con los ingresos económicos por exportación.
4. **Dimensión social y laboral:** integrar variables relacionadas con el empleo agrícola, la migración de jornaleros y el bienestar de las comunidades, para reflejar los impactos socioeconómicos más allá de la producción y los costos.
5. **Evaluación de políticas públicas:** simular escenarios de regulación, subsidios o incentivos al uso eficiente del agua, así como programas de diversificación productiva y pago por servicios ambientales, para identificar estrategias de gestión más sostenibles.
6. **Integración del nexo agua-energía-alimentos:** ampliar el modelo para incluir el consumo energético asociado al bombeo, almacenamiento y transporte del agua, lo que permitiría analizar el sistema de forma más integral.

5.2. APOORTE DEL TRABAJO A LA POSIBLE GENERACIÓN DE POLITICAS PÚBLICAS

El modelo no solo cumple con el objetivo de analizar la relación entre la disponibilidad de agua y la producción agrícola bajo el enfoque del nexo agua-alimentos, sino que también constituye una herramienta estratégica para la formulación y evaluación de políticas públicas.

En primer lugar, al identificar los cultivos más sensibles a escenarios de escasez hídrica y a los que tienen una mayor resiliencia, el modelo aporta evidencia cuantitativa que puede orientar políticas de uso eficiente del agua, promoviendo incentivos para la adopción de tecnologías de riego y prácticas agrícolas más sostenibles.

En segundo término, la estimación de costos asociados al recurso hídrico y a la infraestructura permite comparar escenarios reales con escenarios óptimos de manejo, lo cual brinda insumos técnicos para diseñar programas de subsidios, tarifas de agua diferenciadas o esquemas de pago por servicios ambientales, fomentando una gestión mas equitativa y eficiente del recurso.

Asimismo, al mostrar los impactos socioeconómicos derivados de la disminución en la producción, como la reducción en la demanda de mano de obra y la caída en la derrama económica, el modelo refuerza la necesidad de políticas orientadas a la diversificación productiva, que reduzcan la dependencia de un solo cultivo y aumenten la resiliencia económica de la región.

Finalmente, este trabajo se presenta como una base para la planificación territorial y la gestión integral de cuencas, ya que permite evaluar escenarios alternativos bajo criterios de sostenibilidad ambiental, eficiencia económica y seguridad alimentaria. De esta manera, el modelo puede ser utilizado como instrumento de apoyo a la toma de decisiones en ámbitos municipales, estatales y nacionales, contribuyendo a políticas mas robustas frente a la variabilidad climática y los retos de la seguridad hídrica y alimentaria.

REFERENCIAS

Alvarez Gómez, G. (2023). Evaluación de la calidad del agua, determinación de elementos traza e identificación de microplásticos en el río “El Silencio”, municipio de Salvador Escalante, Michoacán. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

Arredondo-Ramírez, K., Rubio-Castro, E., Nápoles-Rivera, F., Ponce-Ortega, J. M., Serna-González, M., & El-Halwagi, M. M. (2015). Optimal design of agricultural water systems with multiperiod collection, storage, and distribution. *Agricultural Water Management*, 152, 161–172. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.01.007>

Biegler, L., Grossmann, I., & Westerberg, A. (1997). Systematic methods for chemical process design. Prentice Hall.

Cansino-Loeza, B., & Ponce-Ortega, J. M. (2023). *The Water-Energy-Food Nexus; Optimization Models for Decision Making* (1st ed., Vol. 32). Elsevier.

CEAC. (s/f). Cuenca de Zirahuén. Comisión Estatal del Agua y Gestión de Cuencas. Recuperado el 14 de diciembre de 2023, de <https://ceac.michoacan.gob.mx/areas/subdireccion-de-cuencas/cuenca-zirahuen/>

Chávez, A. G. T., Ramírez, G. L. A., López, M. B. R., A. Francisco Gómez-Tagle Rojas, M. En C. Julio Cesar Medina, & López, S. M. (2019). Programa de Gestión Integral de los Recursos Naturales en la Cuenca del Lago de Zirahuén. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.10992.23046>

CONAGUA. (2019). Estadísticas del Agua en México. https://files.conagua.gob.mx/conagua/publicaciones/Publicaciones/EAM_2019.pdf

CONAGUA. (2020). Usos del agua. <https://sinav30.conagua.gob.mx:8080/UsosAgua/#/agricola>

Edgar, T. F., & Himmelblau, D. M. (2001). Optimization of chemical processes. McGraw-Hill.

FAO. (2000). Medium-term prospects for agricultural commodities: Projections to the year 2005. Food and Agriculture Organization of the United Nations.

FAO (Ed.). (2006). Food aid for food security. FAO.

FAO. (2014). The water-energy-food nexus a new approach in support of food security and sustainable agriculture. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://www.fao.org/3/bl496e/bl496e.pdf>

FAO. (2022). Hunger and food insecurity. <https://www.fao.org/hunger/en/>

FIRA, F. I. en R. con la A. (2025). Resumen de costos agrícolas. file:///E:/Descargas/Aguacate_Est_Mtto_BMF_Michoac%C3%A1n_PN_2025.pdf
file:///E:/Descargas/Aguacate_Est_Mtto_BMF_Michoac%C3%A1n_PN_2025.pdf

Fuerte-Velázquez, D. J., & Gómez-Tagle, A. (2024). Water Footprint and Water Sustainability of Agroindustrial Avocado Production in a Warm Tropical Climate Municipality: A Case Study in the Michoacan Avocado Belt in Central México. *Water*, 16(12), 1719. <https://doi.org/10.3390/w16121719>

- Gómez Tagle, A. F., Morales Chávez, R., Quiroz-Rivera, F., López Toledo, L., & García, Y. (2018). Hydrological Impact of the Green Gold (Avocado Culture) in Central Mexico; Rainfall Partition and Water Use Comparison with Native Forest.
- Gómez-Tagle, A. F., Gómez-Tagle, A., Fuerte-Velázquez, D. J., Barajas-Alcalá, A. G., Quiroz-Rivera, F., Alarcón-Chaires, P. E., & Guerrero-García-Rojas, H. (2022). Blue and Green Water Footprint of Agro-Industrial Avocado Production in Central Mexico. *Sustainability*, 14(15), 9664. <https://doi.org/10.3390/su14159664>
- Grossmann, I. (2021). *Advanced Optimization for Process Systems Engineering*. Cambridge University Press.
- Guadalupe Rojas-Torres, Ma., Nápoles-Rivera, F., Serna-González, M., El-Halwagi, M. M., & Ponce-Ortega, J. M. (2014). Sustainable Water Management in Cities. En *Computer Aided Chemical Engineering* (Vol. 33, pp. 1057–1062). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63455-9.50011-8>
- Hoff, H. (2011). Understanding the nexus. Background Paper for the Bonn2011. Conference: The Water, Energy and Food Security Nexus. Stockholm Environment Institute, Stockholm.
- Holzman, A. G. (1981). *Mathematical Programming for Operations Researchers and Computer Scientists*. CRC Press.
- Liu, B., Wang, Y., Xia, J., Quan, J., & Wang, J. (2021). Optimal water resources operation for rivers-connected lake under uncertainty. *Journal of Hydrology*, 595, 125863. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125863>
- Medina Orozco, L. E., Villanueva Nava, S., Sánchez Duque, A., González Villegas, R., Barrales Martínez, A., Medina Orozco, I., & Perales Rivas, M. A. (2020). Estimación de la huella hídrica, calidad de agua y alternativas para la producción de arándano en el centro de México.
- Mendoza, R., Silva, R., Jiménez, A., Rodríguez, K., & Sol, A. (2015). Lake Zirahuén, Michoacán, Mexico: An approach to sustainable water resource management based on the chemical and bacterial assessment of its water body. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 2, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.scp.2015.10.001>
- Molajou, A., Afshar, A., Khosravi, M., Soleimanian, E., Vahabzadeh, M., & Variani, H. A. (2021). A new paradigm of water, food, and energy nexus. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(49), 107487–107497. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-13034-1>
- Ochoa-Barragán, R., Nápoles-Rivera, F., & Ponce-Ortega, J. M. (2021). Optimal and Fair Distribution of Water Under Water Scarcity Scenarios at a Macroscopic Level. *International Journal of Environmental Research*, 15(1), 57–77. <https://doi.org/10.1007/s41742-020-00297-8>
- Paniagua, C. F. O. (2017). *Agricultura de Exportación de Aguacate y Turismo en Michoacán. Una perspectiva desde los Servicios Ecosistémicos*.
- Pérez-Méndez, M. A., Fraga-Cruz, G. S., Álvarez-Gómez, G., Nápoles-Rivera, F., Jiménez-García, G., & Maya-Yescas, R. (2025). Analysis of the anthropogenic effect on the Silencio River in Salvador Escalante, Michoacán, México. *PeerJ*, 13, e18531. <https://doi.org/10.7717/peerj.18531>

Ponce-Ortega, J. M., Ochoa-Barragán, R., & Ramírez-Márquez, C. (2024). Optimization of Chemical Processes. A Sustainable Perspective. Springer.

Record. (2018, diciembre 8). La APEAM Desarrolló una agenda verde con estrategias para el cuidado de recursos naturales. <https://www.record.com.mx/contra/depende-aguacate-de-michoacan-del-90-de-agua-de-lluvia>

Ríos, M., Prado-Hernández, V., Romero-Bautista, A., Reyes-López, D., & Pascual-Ramírez, F. (2019). Estimación de la disponibilidad hídrica en la cuenca del lago de Zirahuén. *Tecnología y ciencias del agua*, 10(3), 275–288. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2019-03-11>

Ruiz Vigil, A. (2023). Evaluación de la calidad del agua y sedimentos, presencia de elementos traza y microplásticos en el lago de Zirahuén, Michoacán. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

Sánchez-Zarco, X. G. (2021). Optimización de índices de seguridad del nexo agua-energía-alimentos y resiliencia ante catástrofes climatológicas en una zona semiárida. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. (2023). Anuario Estadístico de la Producción Agrícola. <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>

Sommaruga, R., & Eldridge, H. M. (2021). Avocado Production: Water Footprint and Socio-economic Implications. *EuroChoices*, 20(2), 48–53. <https://doi.org/10.1111/1746-692X.12289>

ANEXOS

ANEXO A. GLOSARIO

Agricultura: Conjunto de técnicas y conocimientos relacionados con el cultivo de la tierra para la producción de alimentos y otros recursos esenciales.

Agua virtual: representa el cálculo de la cantidad total de agua que se requiere para obtener un producto, lo cual incluye el agua utilizada durante el cultivo, el crecimiento, procesamiento, fabricación, transporte y venta de los productos.

Agua renovable: se le denomina agua renovable a la cantidad máxima de agua que es factible explotar anualmente en un país sin alterar el ecosistema y que se renueva por medio de la precipitación pluvial.

Antropogénico: el concepto antropogénico hace referencia a todo aquello que proviene o resulta de las actividades de los seres humanos o que es producido por ellas.

Calidad del agua: termino que describe las características químicas, físicas y biológicas del agua dependiendo del uso que se le va a dar.

Desarrollo sostenible: es un modelo de crecimiento que busca satisfacer las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones para satisfacer las suyas. Se basa en el crecimiento económico, inclusión social y protección ambiental.

Economía circular: es un modelo de producción y consumo que busca reducir el desperdicio y maximizar el uso eficiente de los recursos.

Huella hídrica: es un indicador de toda el agua que utilizamos en nuestra vida diaria; para producir nuestra comida, en procesos industriales y en la generación de energía, así como la que ensuciamos y contaminamos a través de esos mismos procesos.

Microplásticos: diminutas partículas de plástico, menores a 5 milímetros, compuestas de polímeros y aditivos potencialmente tóxicos.

Modelo de optimización: es la representación matemática de un problema real, que busca encontrar la mejor solución dentro de un conjunto de opciones posibles, considerando restricciones y objetivos específicos. Se utiliza en diversas áreas como ingeniería, economía, logística y finanzas para mejorar la eficiencia y reducir costos.

Modelo determinista: es un modelo matemático donde no existe incertidumbre en las variables o parámetros utilizados.

Modelo estocástico: es aquel que incorpora incertidumbre y aleatoriedad en sus variables o parámetros. A diferencia de un modelo determinista, donde todo está completamente

definido, un modelo estocástico considera la variabilidad de ciertos factores, lo que permite representar mejor a sistemas reales donde hay eventos impredecibles.

Nexo agua-alimentos: se refiere a la interdependencia entre los recursos hídricos y la producción de alimentos. Este concepto reconoce que el agua es un insumo esencial para la agricultura, tanto para el riego de cultivos como para la crianza de ganado, y que la gestión eficiente y sostenible del agua es clave para garantizar la seguridad alimentaria.

Políticas públicas: son estrategias, reglamentos y acciones implementadas por el gobierno para abordar problemas específicos en una sociedad.

Región Lacustre: área geográfica caracterizada por la presencia de lagos, cuerpos de agua dulce o ecosistemas asociados a ellos.

Seguridad hídrica: se define como la capacidad de una sociedad para disponer de agua en cantidad y calidad aceptable para su supervivencia y la realización de diferentes actividades recreativas. Asegura la estabilidad económica de una sociedad tomando en cuenta los cambios climáticos y la contaminación ambiental producida por los seres humanos que afectan directamente al agua.

Seguridad alimentaria: se refiere a la disponibilidad, acceso y utilización adecuada de los alimentos para garantizar una nutrición suficiente y saludable para todas las personas en todo momento.

ANEXO B. PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS, BACTERIOLÓGICOS Y MICROPLÁSTICOS EN EL RÍO EL SILENCIO, OBTENIDOS POR (Alvarez Gómez, 2023).

Parámetro (mg/L)	1.º muestreo (11/Julio/2021)					2.º muestreo (23/Octubre/2021)				
	P1	P2	P3	P4	P5	P1	P2	P3	P4	P5
Temperatura*	13.6	13.9	14.7	15	18	19.9	19.7	18	18.9	18.1
pH	7.47	7.34	7.23	7.11	8.21	7.32	7.18	7.25	7.28	8.46
Conductividad*	251.5	290.7	105.8	169	168.8	166.9	186.7	100.4	414.4	147.5
Alcalinidad	105.5	106.53	41.2	63.3	79.3	68.34	69.345	55.275	56.28	63.315
Cloruros (Cl^-)	8.93	11.91	1.48	6.94	9.15	10.42	12.4	8.43	10.42	8.23
Nitrógeno de nitratos ($N - NO_3^-$)	1.1	0.653	0.3	1.002	0.095	0.486	0.233	0.056	0.522	0.061
Nitrógeno amoniacal ($N - NH_3$)	0.06	0.09	0.02	0.112	1.171	0.024	0.036	0	0.0112	0.351
Sulfatos (SO_4^{2-})	7.8	6.524	3.352	8.358	10.594	4.187	4.685	3.436	5.567	6.394
Fosfatos (PO_4^{3-})	0.321	0.526	0.069	0.117	0.014	0.196	0.139	0.063	0.031	0.018
Dureza total ($CaCO_3$)	69.088	75.184	28.448	40.64	58.958	46.92	53.04	32.64	48.96	58.92
Sólidos totales	218	234	156	272	202	180	212	140	320	140
Sólidos suspendidos totales	24	26	6	136	104	2	52	36	52	60
Sólidos disueltos totales	194	208	150	136	98	178	160	104	268	80
Color*	40	30	5	50	20	10	10	5	20	10
Turbiedad	5.3	4.7	2.4	12.8	7.6	3.8	6.2	2.6	8.9	5.6
Microplásticos	0.0022	0.007	0.0013	0.0087	0.0041	N.R.	N.R.	0.0004	0.049	0.036
Coliformes fecales*	710	1424	0	956	1300	726	1195	0	1083	1400

*= temperatura en ° C, conductividad eléctrica en $\mu S/cm$, color en unidades de color (UC Pt-Co), coliformes fecales en UFC.

ANEXO C. PARAMETROS FISICOQUÍMICOS Y BACTERIOLÓGICOS EN EL LAGO DE ZIRAHUÉN, OBTENIDOS POR (Ruiz Vigil, 2023).

Sitio	Campaña de colectas	Turbiedad (UTN)	Color (Pt-Co)	Sólidos totales (mg/L)	Sólidos suspendidos totales (mg/L)	Sólidos disueltos totales (mg/L)	Nitrógeno Ammoniacal (mg/L)	Nitrógeno de nitratos (mg/L)	DBO5 (mg/L)	DQO (mg/L)	Dureza atotal (mg/L)	Alcalinidad total (mg/L)	Coliformes fecales (UFC/100ml)
P1	Julio 21	3.9	5	94	14	80	0.12	0.021	1.63	14.1	62.992	69.345	410
	Octubre 21	3.4	5	84	4	80	0.058	0.017	1.03		58.928	66.33	260
	Marzo 22	3.5	5	86	6	80	0.058	0.129	1.67	18	64.64	74.37	20
P2	Julio 21	3.7	5	90	14	76	0.12	0.015	1.68	15	60.96	68.34	320
	Octubre 21	3.5	5	74	6	68	0.058	0.009	1.16		54.864	66.23	0
	Marzo 22	3.4	5	90	6	84	0.058	0.118	1.27	19	65.65	75.375	0
P3	Julio 21	3.8	10	96	14	82	0.088	0.013	1.054	14.2	58.896	68.34	170
	Octubre 21	3.2	5	100	6	94	0.058	0.002	1		52.832	65.325	290
	Marzo 22	3.2	5	86	6	80	0.058	0.11	0.8	19	66.66	74.37	10
P4	Julio 21	4.9	5	94	16	84	0.176	0.016	1.7	11	58.928	70.35	50
	Octubre 21	3.4	5	84	4	80	0.058	0.002	1.04		56.896	66.33	300
	Marzo 22	3.8	20	88	8	80	0.058	0.119	2.89	17	62.62	70.35	0
P5	Julio 21	7.6	20	202	104	98	1.171	0.095	3.37	22	60.96	79.395	1300
	Octubre 21	5.6	10	140	60	80	0.351	0.061	3.02		58.928	63.315	1400
	Marzo 22	3.3	5	90	10	80	0.088	0.116	1.62	27	64.64	70.35	0
P6	Julio 21	4.1	5	96	16	80	0.088	0.01	1.65	12	60.96	67.335	160
	Octubre 21	3.7	5	58	10	48	0.058	0.031	1.03		52.832	64.32	130
	Marzo 22	3.6	5	88	16	72	0.058	0.122	1.15	16	64.64	72.36	0
P7	Julio 21	2.9	5	94	10	84	0.088	0.02	2.45	16	65.024	68.34	40
	Octubre 21	3	5	68	2	66	0.058	0.003	1.26		52.832	67.335	120
	Marzo 22	3.5	5	84	4	80	0.058	0.113	1.66	22	62.62	73.36	10
P8	Julio 21	3.5	5	90	6	84	0.088	0.05	2.38	16.172	58.928	69.345	40
	Octubre 21	3.3	5	104	4	100	0.058	0.011	1.42		54.864	66.33	460
P9	Marzo 22	3.4	5	80	2	78	0.058	0.107	2.28	23	60.6	69.345	20
	Julio 21	3.6	5	96	8	88	0.058	0.08	2.64	15.92	58.928	70.35	90
	Octubre 21	3.1	5	52	12	40	0.058	0.025	1.5		54.864	68.34	340
	Marzo 22	3.7	5	92	8	84	0.058	0.107	2.05	21	64.64	74.37	90
P10	Julio 21	4	5	92	12	80	0.088	0.033	2.64	16.85	56.896	66.33	180
	Octubre 21	3.3	5	74	2	72	0.058	0.023	1.56		52.832	68.34	160
	Marzo 22	3.1	5	80	6	74	0.058	0.127	2.12	22	62.62	74.872	10

ANEXO D. PARAMETROS FISICOQUÍMICOS EN EL LAGO DE ZIRAHUÉN Y RÍO EL SILENCIO, 2024.

Sitio	Muestreo	pH (UpH)	Oxígeno disuelto (mg/L)	Demanda química de oxígeno (mg/L)	Temperatura (°C)
Agua verde	Abril- 2024	7.48	7.29	18	22
Copandaro	Abril- 2024	7.29	8.172	19	25
Tembucharo	Abril- 2024	7.44	9.995	19	23
Cerrito Colorado	Abril- 2024	7.45	8.239	17	25
Río	Abril- 2024	7.58	0	27	19

ANEXO E. CODIGO EN GAMS

Sets

```

w / Fuente1 /
c / Aguacate, Maíz, Arándano /
p / Poblacion1 /
s / Tanque1*Tanque293 /
t / t1*t12 /;

```

Parameters

```

FreshWPr(w, t) "Precipitación en la fuente w en el tiempo t "
FreshWEs(w, t) "Esguerrimiento en la fuente w en el tiempo t"
ThetaMax(w)    "limite o restricción que indica la cantidad máxima de agua
fresca disponible"
Nc(c)           "Eficiencia de producción del cultivo c"
Cp(t)           "Consumo per cápita de alimentos en el tiempo t"
Pt(p, t)        "Población total"
FreshWdisp(s)   "Capacidad máxima de agua extraíble de cada tanque (m3)"
FreshWconsum(p, t) "Consumo de agua por la población p en periodo t"
Finicial(w)     "Inventario inicial de agua en la fuente"
FreshWMcost(t)  "Costo agua fresca municipal (USD/m3)"
CostTanqFijo    "Costo fijo de tanques USD"
CostTanqVar     "Costo variable de tanques (USD/m3)"
CostBombFijo    "Costo fijo de bombas USD"
CostBombVar     "Costo variable de bombas (USD/m3)"
CostTubFijo     "Costo fijo de tuberías USD"
CostTubVar      "Costo variable de tuberías (USD/m3)"
PesoCosto       "Peso para el objetivo de costo"
PesoProduccion  "Pero para el objetivo de producción";

```

**Estos dos parámetros finales, nos ayudan a decirle al modelo cuan importante es cada objetivo (ya que es multiobjetivo), ya que no se puede minimizar*

**maximizar dos objetivos de manera perfecta; para el valor de peso costo de 0.7 significa que minimizar el costo tiene una importancia del 70%*

**y que maximizar la producción tiene una importancia del 30, entonces, observamos que estamos minimizando el costo y maximizando la producción.*

Asignación de valores a Los parámetros

```

ThetaMax(w)= 395081700;
FreshWdisp(s)= 1200;
Nc('Aguacate')= 1.17;
Nc('Maiz')= 1.028;
Nc('Arandano')= 1.38;
Cp(t)= 60;

```

```

Pt(p, t)= 49896;
FreshWconsum(p, t)= 6000000 / 12;
Finicial(w)= 100000000;
FreshWMcost(t)= 0.30;
CostTanqFijo= 200;
CostTanqVar= 0.22;
CostBombFijo= 100;
CostBombVar= 0.08;
CostTubFijo= 50;
CostTubVar= 0.05;
PesoCosto= 0.7;
PesoProduccion= 0.3;

```

Table FreshWPr(w, t)

	t1	t2	t3	t4	t5	t6	t7
t8	t9	t10		t11	t12		
Fuente1	1561450	9963390	0	1135600	2555100	64280850	79508170
51878140	34929700	32684410		34957090	0;		

Table FreshWEs(w,t)

	t1	t2	t3	t4	t5	t6	t7
t8	t9	t10		t11	t12		
Fuente1	294207	1861334	0	210268	478714	12095367	14959152
9758383	6570759	6146093		6576722	0;		

Positive Variables

```

FreshWfstot(w, t)
FreshWfs(w, c, t)
FreshWfspob(w, p, t)
FreshWuse(s, c, t)
FreshWentra(c, t)
FreshWabs(c, t)
FreshWevap(c, t)
FreshWamb(c, t)
FreshFprod(c, t)
FreshFdem(c, p, t)
FreshWstorage(s, t)
CostAguaFresca
CostTanques
CostBombas
CostTuberias
TotalProduccion;

```

Free variable z;

**¿porque free variable?*

**nos ayuda a tener libertad al solver para que encuentre la mejor solución posible, sin importar si el resultado es positivo o negativo*

Binary Variables

VarBinTanq(s)
VarBinBomb(c, s)
VarBinTub(c, s);

Equations

Eq1, Eq2, Eq3, Eq4, Eq5, Eq6, Eq7, Eq8, Eq9, Eq10, Eq11, Eq12, Eq13, Eq14,
Eq15, EqAguaFresca, EqTanques, EqBombas, EqTuberias, EqTotalProduccion,
objMultiobjetivo;

*-----

-----*

Eq1(w, t)\$(ord(t) eq 1).. FreshWfstot(w, t) =e= Finicial(w) + FreshWPr(w, t)
+ FreshWEs(w, t) - sum(c, FreshWfs(w, c, t)) - sum(p, FreshWfspob(w, p, t));

**Eq1_inv(w, t)\$(ord(t) gt 1).. FreshWfstot(w, t) =e= FreshWfstot(w, t-1) +
FreshWPr(w, t) + FreshWEs(w, t) - sum(c, FreshWfs(w, c, t)) - sum(p,
FreshWfspob(w, p, t));*

Eq2(w, t).. FreshWfstot(w, t) =l= ThetaMax(w);

Eq3(c, t).. FreshWentra(c, t) =e= sum(w, FreshWfs(w, c, t)) + sum(s,
FreshWuse(s, c, t));

Eq4(c, t).. FreshWentra(c, t) =e= FreshWabs(c, t) + FreshWevap(c, t) +
FreshWamb(c, t);

Eq5(p, t).. sum(w, FreshWfspob(w, p, t)) =e= FreshWconsum(p, t);

Eq6(s, t).. FreshWstorage(s, t) =l= FreshWdisp(s) * VarBinTanq(s);

Eq7(s).. sum((c, t), FreshWuse(s, c, t)) =l= FreshWdisp(s) * VarBinTanq(s);

Eq8(c, t).. FreshFprod(c, t) =e= Nc(c) * FreshWabs(c, t);

Eq9(p, t).. sum(c, FreshFdem(c, p, t)) =g= Cp(t) * Pt(p, t);

```

Eq10(c, t).. sum(p, FreshFdem(c, p, t)) =l= FreshFprod(c, t);

Eq11(c, t).. FreshWevap(c, t) =e= 0.10 * FreshWentra(c, t);

Eq12(c, t).. FreshWamb(c, t) =e= 0.08 * FreshWentra(c, t);

Eq13(s, t).. sum(c, FreshWuse(s, c, t)) =l= FreshWstorage(s, t);

Eq14(c,s).. sum(t, FreshWuse(s, c, t)) =l= 10000000 * VarBinBomb(c,s);

Eq15(c,s).. sum(t, FreshWuse(s, c, t)) =l= 10000000 * VarBinTub(c,s);

*-----Analisis de Costos-----
*

EqAguaFresca.. CostAguaFresca =e= sum((w,c,t),
FreshWMcost(t)*FreshWfs(w,c,t)) + sum((w,p,t),
freshWMcost(t)*FreshWfspob(w,p,t));

EqTanques.. CostTanques =e= sum(s, CostTanqFijo * VarBinTanq(s) +
CostTanqVar * sum((c,t), FreshWuse(s,c,t)));

EqBombas.. CostBombas =e= sum((c,s), CostBombFijo * VarBinBomb(c,s) +
CostBombVar * sum(t, FreshWuse(s,c,t)));

EqTuberias.. CostTuberias =e= sum((c,s), CostTubFijo * VarBinTub(c,s) +
CostTubVar * sum(t, FreshWuse(s,c,t)));

EqTotalProduccion.. TotalProduccion =e= sum((c,t), FreshFprod(c, t));

objMultiobjetivo.. z =e= (PesoCosto * (CostAguaFresca + CostTanques +
CostBombas + CostTuberias)) - (PesoProduccion * TotalProduccion);

*-----Restricciones de Operación-----
*
* .fx fijar .up máximo el valor .lo al menos ese valor

FreshWfs.fx(w, "Arandano", t)= 0;

FreshWfs.up(w, "Aguacate", t)= 5800000;

FreshWfs.up(w, "maiz", t)= 2800000;

FreshWuse.fx(s, "Arandano", t)= 10;

```

```
FreshWuse.lo(s, "Aguacate", "t3")=10;
```

```
FreshWuse.lo(s, "Aguacate", "t4")=10;
```

```
FreshWuse.lo(s, "Aguacate", "t12")=10;
```

```
*-----  
-----*
```

```
Model agua /all/;
```

```
Solve agua minimizing z using mip;
```

ANEXO F.

Gustavo Álvarez Gómez Gustavo Álvarez Gómez

ESTUDIO DEL NEXO AGUA-ALIMENTOS EN REGIONES LACUSTRES.pdf

 Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:old::3117:539543459

82 páginas

Fecha de entrega

11 dic 2025, 12:45 p.m. GMT-6

19.703 palabras

Fecha de descarga

11 dic 2025, 12:56 p.m. GMT-6

115.881 caracteres

Nombre del archivo

ESTUDIO DEL NEXO AGUA-ALIMENTOS EN REGIONES LACUSTRES.pdf

Tamaño del archivo

4.0 MB

Formato de Declaración de Originalidad y Uso de Inteligencia Artificial

Coordinación General de Estudios de Posgrado
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



A quien corresponda,

Por este medio, quien abajo firma, bajo protesta de decir verdad, declara lo siguiente:

- Que presenta para revisión de originalidad el manuscrito cuyos detalles se especifican abajo.
- Que todas las fuentes consultadas para la elaboración del manuscrito están debidamente identificadas dentro del cuerpo del texto, e incluidas en la lista de referencias.
- Que, en caso de haber usado un sistema de inteligencia artificial, en cualquier etapa del desarrollo de su trabajo, lo ha especificado en la tabla que se encuentra en este documento.
- Que conoce la normativa de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, en particular los Incisos IX y XII del artículo 85, y los artículos 88 y 101 del Estatuto Universitario de la UMSNH, además del transitorio tercero del Reglamento General para los Estudios de Posgrado de la UMSNH.

Datos del manuscrito que se presenta a revisión		
Programa educativo	Maestría en Ciencias en Ingeniería Química	
Título del trabajo	Estudio del nexa agua-alimentos en regiones lacustres	
	Nombre	Correo electrónico
Autor/es	Gustavo Alvarez Gómez	1364378j@umich.mx
Director	Dr. Fabricio Nápoles Rivera	fabricio.napoles@umich.mx
Codirector	Dr. Mario Alberto Pérez Méndez	mario.perez@umich.mx
Coordinador del programa	Dra. Ma. Del Carmen Chávez Parga	mae.cs.ingenieria.quimica@umich.mx

Formato de Declaración de Originalidad y Uso de Inteligencia Artificial

Coordinación General de Estudios de Posgrado
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



Uso de Inteligencia Artificial		
Rubro	Uso (sí/no)	Descripción
Asistencia en la redacción	Sí	Ayuda en la mejora del estilo de redacción
Traducción al español	No	
Traducción a otra lengua	No	
Revisión y corrección de estilo	Sí	Ayuda en la mejora del estilo de redacción
Análisis de datos	Sí	Ayuda en la revisión de resultados obtenidos
Búsqueda y organización de información	No	
Formateo de las referencias bibliográficas	No	
Generación de contenido multimedia	No	
Otro	No	

Datos del solicitante	
Nombre y firma	Gustavo Alvarez Gómez
Lugar y fecha	Morelia, Michoacán, a 10 de diciembre de 2025