

SP: La automatización en la gestión de ayuda MA2001B: Optimización determinista

Gabriela Marissa Mosquera Orellana
Tecnológico de Monterrey, campus
Querétaro
a01666191@tec.mx

Felipe de Jesús Damián Rodríguez
Tecnológico de Monterrey, campus
Querétaro
a01707246@tec.mx

Paulina Castellanos Chávez
Tecnológico de Monterrey, campus
Querétaro
a01707199@tec.mx

Kira Darían Gómez Pantoja
Tecnológico de Monterrey, campus
Querétaro
a01707324@tec.mx

Arantza Reyes Arredondo
Tecnológico de Monterrey, campus
Querétaro
a01276559@tec.mx

1 Elección de la problemática

Según la ONU, las sequías se duplicarán para 2050, no sólo amenaza la disponibilidad y calidad de la misma; la escasez de agua representa un conflicto entre la administración pública y los usuarios (López, 2023). Si prevalece la escasez y la calidad del servicio no es saludable, entonces surgirá un microsistema en el que los actores privilegiados acaparan más recursos de los necesarios, a pesar de las repercusiones que podría llegar a crear; y extenderán el conflicto con las autoridades, pues ya no será únicamente contra la administración de estos recursos; sino también, contra otros grupos sociales que tienen más acceso o que tienen prioridad, agravando la desigualdad social (García Lirios, 2021).

Las sequías tienen múltiples causas inherentes que incluyen tanto el cambio climático como el crecimiento poblacional, la sobreexplotación del agua y la deforestación (López, 2023). Pues, estas alteran los patrones de precipitación, conduciendo a un mayor consumo. Es un fenómeno natural que deja a su paso deterioros importantes, cuya consecuencia es que los ecosistemas con patrones inestables tardan más tiempo en regular el ciclo hidrológico (Cordova et al., 2021).

En abril de 2021, la Comisión reportó que tres cuartas partes del país se encontraban en estado de padecimiento debido a la falta de lluvias, donde más de la mitad del territorio nacional se encontraba en situación de sequía extrema (Cordova et al., 2021). Se comenzó a observar este desastroso panorama en junio de 2020 en el sur, centro y norte del país. Benjamín Martínez López, investigador del Centro de Ciencias de la Atmósfera de la Universidad Nacional, refirió hace cuatro años que estudios preliminares indicaban que el fenómeno de “La Niña” estaba relacionado con los meses de sequía (Cordova et al., 2021). Sin embargo,

podemos ver que la falta de agua prolongada y recurrente es más profunda, extendiéndose, incapaces de ver un fin adyacente.

Por la misma razón, es importante realizar investigaciones para entender qué está sucediendo, por qué, para de esta forma poder hacer simulaciones y llevar a cabo predicciones. Encontrar patrones. Consideramos debido a su imperatividad, nuestra elección. Durante esta investigación vamos a trabajar sobre Chihuahua, más específicamente sobre sus acuíferos. Sin embargo, no queremos crear un modelo complejo poco realista, por lo que decimos trabajar con el acuífero de Cuauhtémoc.

1.1 Documentación

Uno de los factores más preocupantes es la disminución de las precipitaciones: en junio de 2023, se registró un 61% menos lluvia que el promedio histórico entre 1991 y 2020; a causa de una severa ola de calor (López, 2023). Este déficit ha contribuido a que, hasta abril de 2025, el 45.8% del territorio nacional presente condiciones de sequía, afectando especialmente a estados como Chihuahua, Sinaloa y Sonora (Márquez, 2025). A pesar de que el 93% de los hogares mexicanos cuenta con acceso a agua entubada, un 33% no recibe suministro diario (CEFP, 2023). Esto obliga a las familias a realizar gastos adicionales en pipas, agua embotellada o sistemas de purificación (López, 2023). Estas condiciones amplifican la desigualdad, abriendo una brecha y resentimiento social en sectores marginados, donde el acceso intermitente al agua compromete la salud y la economía familiar.

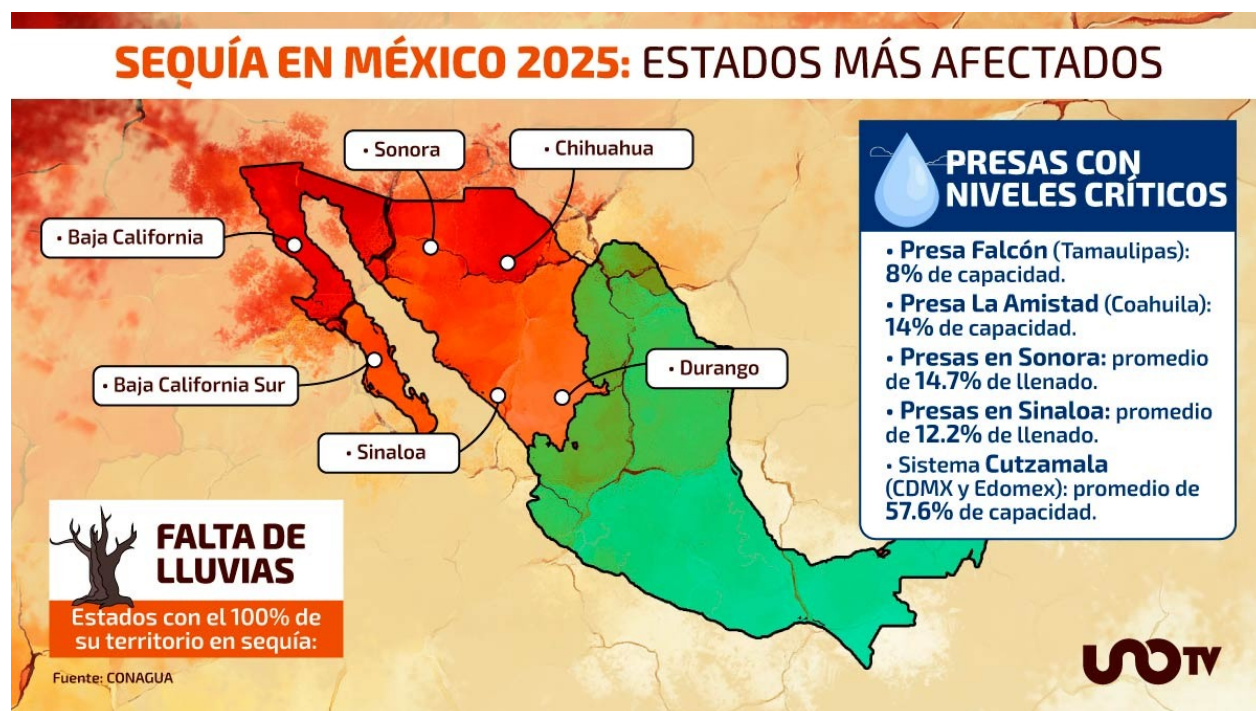


Figure 1: Los estados más afectados por diferentes grados de sequía

La sequía impacta seriamente al sector agrícola. La falta de agua ha generado pérdidas significativas en cultivos esenciales como maíz, frijol y trigo, lo que se refleja en un aumento de precios de alimentos básicos (Márquez, 2025). Esta situación no solo compromete la seguridad alimentaria, sino también la economía rural. En términos de gobernanza, entre 2019 y 2022 las visitas de inspección hídrica se redujeron en un 70%, lo que debilita la capacidad del Estado para garantizar un uso eficiente del recurso (López, 2023). Para revertir esta crisis, es imperativo coordinar acciones entre los distintos niveles de gobierno y la ciudadanía, incluyendo el fortalecimiento de la vigilancia, la mejora de los sistemas tarifarios y la inversión en infraestructura hídrica. Solo mediante estrategias integrales y sostenibles se podrá asegurar el acceso equitativo al agua, mitigar los efectos de la sequía y fortalecer la resiliencia del país ante el cambio climático.

Las mujeres, niñas y otros grupos vulnerables son las más afectadas por la falta de agua. En Oaxaca, en el municipio de San Antonino Castillo Velasco, se creó una movimiento para salvar el acuífero de Valles Centrales. De acuerdo con Arellano, 2023, el acuífero desde 1997 se había reportado que se estaba secando. Esto afectó mucho a las comunidades indígenas de la zona, especialmente en la agricultura. El gobierno y la Conagua los estaban multando injustamente, mientras que grandes empresas podían ocupar la agua que deseaban.

Debido a estas razones, las comunidades decidieron que tenían que hacer algo. En 2006, 16 comunidades se unieron y crearon la Coordinadora de Pueblos Unidos en Defensa del Agua (Copuda). Tras informarse descubrieron que podían captar o guardar el agua con pozo de absorción o retenes. Los pozos de absorción tienen aproximadamente entre 1.5 a 4 metros de profundidad. Los retenes son más grandes y pueden llegar a medir más de 50 metros de ancho con una profundidad de 80 cm. Esta tecnología permite que el suelo absorba el agua y/o llenar o revivir pozos secos de la zona.

No solo se construyeron pozos de absorción, sino que también se dio la educación y capacitación necesaria. Las personas de la comunidad cuidan más el agua, captan agua de los techos, reciclan la basura, y riegan los cultivos por goteo. Esta iniciativa ha tenido éxito. Para 2010, tenían 136 pozos funcionando y el nivel del agua del acuífero había subido. Otro gran logro que tuvieron fue la parte fiscal, en 2020 obtuvieron la concesión comunitaria del agua.

Hay muchas iniciativas privadas y ONGs en México que están combatiendo la escasez del agua y difundiendo la importancia de cuidar el agua. Uno es IslaUrbana, que capacita y educa a las personas sobre la captación del agua pluvial. Han instalado más de 30,000 sistemas de captación de agua pluvial en todo la república y beneficiado a más de medio millón de personas. Otro ejemplo es la Fundación Salvemos el Agua que también instala sistemas de captación de agua pluvial. Igualmente esta fundación hace otras acciones para el medio ambiente, que impacta de forma indirecta al cuidado del agua, como recolecta de basura, reforestación entre muchas otras.

La Comisión Nacional del Agua, 2024 también ha implementado muchos programas y propuestas para disminuir la escasez del agua como el Programa Nacional Hídrico 2020 -

2024. De acuerdo con el informe, Estadísticas del Agua en México 2023, a finales del 2023 ya se habían incorporado más de 400,000 habitantes al sistema de agua potable. Se mejoraron ciertas instalaciones de saneamiento, se realizaron múltiples estudios, incluyendo el estado de Querétaro (Comisión Nacional del Agua, 2024). El programa de desafectación de agua alcanzó a menos 15 millones de personas en zonas rurales. El proyecto no cumplió con todos sus objetivos, pero hubo un avance que benefició a muchas personas, especialmente a los grupos más vulnerables.

A pesar de que la condición de sequía en México ha disminuido debido a la época, expertos han señalado que este problema puede agravar nuestra relación con la Unión Americana; pues el gobierno del presidente Trump, nos está exigiendo el pago de miles de metros cúbicos de agua del Río Bravo, sin embargo, debido a nuestra situación de sequías no las hemos podido entregar (N+, 2025). Como una forma de presión para que se cumpla con el pago, Trump detuvo la entrega de agua del Río Colorado a Tijuana, Baja California. La presidenta Sheinbaum, por su parte, está manteniendo diálogos constantes con las autoridades de los estados del norte para poder entregar lo que México debe de agua, sin afectar a los productores mexicanos y al mismo tiempo cumpliendo con el Tratado de 1944 (N+, 2025).

Sin embargo, especialistas señalan que el intentar cumplir con el acuerdo utilizando otros cuerpos de agua en México aumentará la sequía, hecho que podría provocar una crisis hídrica nacional (N+, 2025). El tratado de aguas de 1944 establece que la gestión del agua de los ríos Colorados y Bravo, entonces, cada cinco años México debe enviar a Estados Unidos alrededor de dos mil ciento cincuenta y ocho millones de metros cúbicos de agua, mientras que Estados Unidos debe enviar mil ochocientos cincuenta millones del Río Colorado. Sin embargo, hasta el veintinueve de marzo de este año, solo hemos cumplido con el 28% de la cifra acordada (N+, 2025).

México se encuentra incapaz de cumplir con el tratado, generando fricciones políticas, las cuales incluyen amenazas de sanciones por parte de Estados Unidos, lo que añade una dimensión geopolítica a la crisis hídrica. Esto se suma a un contexto global de tensiones comerciales y políticas entre ambos países, que podría dificultar la cooperación necesaria para enfrentar la escasez de agua de manera conjunta (Sánchez Jiménez, 2025).

Además, el cambio climático y el crecimiento demográfico han exacerbado la presión sobre los cuerpos de agua en la frontera, agravando la calidad y cantidad del agua disponible. Estudios recientes de organismos internacionales como el Wilson Center y el Banco de Desarrollo de América del Norte (NADBank) advierten que los acuíferos en la región han experimentado descensos significativos en volumen y calidad, lo que complica aún más el manejo binacional del recurso (Sánchez Jiménez, 2025). Expertos y organismos internacionales insisten en la urgencia de establecer mecanismos de colaboración más flexibles y adaptados a las nuevas realidades climáticas y sociales, que permitan manejar de manera sostenible y equitativa los recursos hídricos compartidos (Sánchez Jiménez, 2025). Esto incluye la modernización del marco legal, la inversión en infraestructura conjunta y la implementación de estrategias para mitigar el impacto del cambio climático en la región fronteriza.

El gobierno tiene varias propuestas para combatir la escasez del agua. Su objetivo es garantizar que todos los habitantes tengan acceso a agua potable. Disminuir los efectos de las sequías y el impacto económico y social del problema. En muchos estados se están implementando de acuerdo al Comisión Nacional del Agua, 2024 un Programas de Medidas Preventivas y de Mitigación a la Sequía (PMPMS) como Puebla, Durango y Jalisco. Por ejemplo en Monterrey algunas de las estrategias son las siguientes:

- Elaborar decretos para limitar el uso del agua en periodos de sequía.
- Recuperar derechos de agua
- Capacitar y educar en temas ambientales y del agua hídrica
- Tener escuelas de agua que cuenten con diferentes talleres como revisión de fugas en casa.
- Reactivar pozos y presas abandonados
- Construir depósitos de reservas
- Promover y aplicar W.C y otros aparatos más ahorradores y eficientes
- Monitorear la calidad del agua

Las estrategias se dividen en Administrativas o legales, educación, infraestructura y operativas.

Igualmente el Gobierno Mexicano el 12 de marzo de 2025 presentó 17 proyectos de Infraestructura Hídrica. Estos se realizaron en diferentes estados, como el Estado de México, Zacatecas, Tamaulipas, Durango, etc (Gobierno de México, 2025). En Colima se planea construir un acueducto en Zacualpan y en teoría la construcción empieza en julio, de acuerdo con el Gobierno de México, 2025. En Oaxaca se planea seguir la construcción de la presa Paso Ancho. En Veracruz, Tamaulipas y Guanajuato también se propuso hacer acueductos. En San Luis Potosí, Durango, Baja California Sur y Zacatecas se busca mejorar y construir presas. El Gobierno Mexicano informó que creen que beneficiará a más de 36 millones de personas. Se tiene planeado que para agosto del 2025 todas las construcciones ya hayan empezado.

En el estado de Querétaro, el 2024 se anunció se va a implementar un sistema de regeneración de agua. Este proyecto busca que en el estado haya agua en 30 - 50 años. Utilizara el agua pluvial y residual y tras tratamiento con nuevas tecnología convertirla en agua potable, según Nachelly, 2024. Esta agua llegará a la presa de El Batán y ayudará a suministrar el estado de Querétaro.

1.2 Definición

La sequía se ha intensificado en los últimos años debido al cambio climático, la deforestación, el crecimiento poblacional y el uso excesivo del agua por parte de sectores industriales. Como resultado, regiones enteras del país - como Chihuahua, Sonora, Sinaloa o Querétaro- sufren escasez de agua potable, afectando tanto a las familias como al sector agrícola. El estado de Chihuahua cuenta con fuentes de agua superficial y subterráneas. Sin embargo, debido a las escasas precipitaciones en esas zonas, el mayor aprovechamiento de aguas son a nivel subterráneo. Para el suministro de agua empleada en la agricultura se ha explotado desde hace varias décadas el acuífero de Cuauhtémoc.

En las áreas de riego, no se ha logrado medir de manera constante la variación en la superficie cultivada ni en el volumen de agua utilizada para el riego. En este acuífero, las precipitaciones tienen un papel fundamental en la producción agrícola, ya que aportan una cantidad significativa de agua para satisfacer las necesidades de los cultivos, especialmente durante el ciclo de primavera-verano y en los cultivos secundarios, lo que reduce la cantidad de agua de riego necesaria en comparación con los cultivos de otoño-invierno (CONAGUA, 2015). Debido a la gran extensión de tierras irrigadas con agua del acuífero, se han extraído volúmenes superiores a los que se recargan, lo que ha provocado una sobreexplotación severa. Esto ha causado en muchos lugares un descenso considerable en los niveles estáticos del acuífero, generando a su vez problemas sociales y económicos .

Por lo que, la problemática que decidimos abordar es la crisis hídrica en México, enfocándonos específicamente en el acuífero de Cuauhtémoc, Chihuahua. La cual es una de las regiones más afectadas por la escasez de agua. Esta crisis es resultado de sequías prolongadas, sobreexplotación del acuífero, deforestación, cambio climático, y una gestión ineficiente de los recursos hídricos, particularmente en el sector agrícola, donde predomina el riego por canal —uno de los menos eficientes en términos de uso del agua. Para avanzar hacia una solución sustentable, es necesario desarrollar un modelo de optimización que permita simular la distribución y el uso eficiente del agua en esta región, tomando decisiones sobre infraestructura, tecnología y manejo. Proponemos minimizar una combinación de:

- Pérdida de agua (por evaporación o infiltración no controlada). Mediante el cambio del método de riego.
- Costo económico de implementación de nuevas tecnologías (riego por goteo, captación, pozos).
- Impacto social negativo, medido por la falta de acceso de las comunidades al agua.

Estas decisiones buscan el contribuir a una solución sustentable y equitativa. Una la cual promueva la resiliencia de las comunidades frente al cambio climático y fomentando una cultura del agua basada en justicia, prevención e innovación.

2 Datos disponibles y su fuente

Logramos identificar diversos conjuntos de datos que nos permitieron dimensionar la situación actual e intentar simular una solución. A continuación, se enlistan los datos disponibles, su fuente de obtención y los datos que aún no se encuentran accesibles pero que serían relevantes para un abordaje más completo.

Nombre	Descripción	Fuente
Volumen anual extraído del acuífero	Cantidad de agua (m^3) extraída anualmente del acuífero de Cuauhtémoc	Comisión Nacional del Agua, 2024
Uso del agua por sector	Distribución del uso del agua por sector: agrícola, doméstico, industrial	INEGI, 2023c
Superficie agrícola	Número total de hectáreas destinadas a cultivos	INEGI, 2023c
Eficiencia de sistema de riego	Porcentaje de eficiencia del riego por canal y por goteo	Olvera-Salgado et al., 2014
Costos de implementación de riego por goteo	Costo promedio por hectárea para sustituir riego por canal	CONAGUA, 2018
La lámina neta de agua	La lámina de agua que cada cultivo necesita requiere	Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, 2023
Uso del agua del acuífero Cuauhtémoc	Uso del agua del acuífero de Cuauhtémoc y el uso en agricultura	Santos-Hernández et al., 2019b
Uso del agua del manzano	Cantidad del agua que ahora en manzano con diferentes métodos de riego	Parra Quezada et al., 2009

A pesar de que encontramos datos relevantes, por ejemplo, encontramos cuanto volumen anual es extraído del acuífero; no se encontró el porcentaje de agua del acuífero Cuauhtémoc que utiliza cada método de riego. Encontramos información relevante que nos permitirá delimitar el alcance del modelo y justificar ciertas suposiciones. Ajustar el modelo con los datos que encontramos, teniendo en cuenta que para ciertos supuestos no encontramos datos individuales, habría que aplicar técnicas de estimación para poder suplir los datos que ofrecen información importante pero no están a la escala de lo que buscamos.

3 Toma de decisiones

Es importante señalar que el acuífero pertenece al Organismo de Cuenca IV Río Bravo, instalado en 1999 y es jurisdicción territorial de la Dirección Local en el estado de Chihuahua CONAGUA, 2024. Por lo que su territorio se encuentra parcialmente vedado y se encuentra sujeto a dos decretos los cuales se clasifican como tipo III, este solamente permite extracciones limitadas CONAGUA, 2024. Por otro lado, solo una superficie de su extremo nororiental no estaba regido por ningún decreto de veda para la extracción de agua subterránea CONAGUA, 2024.

La CONAGUA, 2022 reportó que, en el acuífero de Cuauhtémoc se extrajeron por bombeo 497.9 hm^3 de agua. La recarga anual del 2022 fue de 299.4 hm^3 lo que generó un déficit de -198.5 hm^3 . En el mismo reporte se menciona que el 95.9% del agua se destina al uso agrícola, lo que corresponde a 477.4 hm^3 extraídos del acuífero. Por esta razón, el problema lineal (PL) se enfoca exclusivamente en el sector agrícola.

3.1 Selección de los cultivos

En el estado de Chihuahua, la agricultura enfrenta desafíos significativos debido a la escasez de agua y la sobreexplotación de acuíferos. De acuerdo al INEGI, 2023b, en el estado de Chihuahua, la superficie con vocación agrícola y la superficie de aprovechamiento forestal sumaron 15.4 millones de hectáreas, de las cuales 1 709 006 hectáreas se destinan a uso agrícola.

Entre los cultivos, la alfalfa destaca por su alta demanda hídrica, siendo uno de los principales consumidores de agua en la región. El Plan Estatal Hídrico 2040 de Chihuahua identifica a la alfalfa y al nogal como cultivos de alto consumo de agua y recomiendan su sustitución por alternativas más eficientes Junta Central de Agua y Saneamiento de Chihuahua, 2022. Dada la necesidad de optimizar el uso del recurso hídrico en Chihuahua se propone incluir una variable de decisión que presenta la sustitución de alto consumo de agua por cultivos más eficientes. Esta decisión se basa en la evidencia de que cultivos como la alfalfa y el nogal requieren volúmenes más significativos de agua, mientras que las alternativas como la avena y el sorgo presentan menos demandas hídricas. La superficie agrícola de la superficie de Cuauhtémoc está dominada por maíz (87%) y manzana (12%) Gobierno del Estado de Chihuahua, 2021. Es importante, por lo tanto, reconocer que Cuauhtémoc es parte de la reconocida "Ruta de la Manzana", con producción de manzanas de alta calidad a cargo de empresas como La Norteña S.A. En 2012, Cuauhtémoc produjo aproximadamente 630,533 t de manzana, lo que representa un 73% de la producción nacional Gobierno del Estado de Chihuahua, 2021.

Entonces, siendo conscientes de la importancia de ciertas frutas dentro del municipio, se seleccionaron los tres cultivos más representativos: el maíz de grano, la manzana y el frijol. El maíz de grano es el cultivo con mayor superficie sembrada en el estado, abarcando aproximadamente el 87% de la superficie agrícola.

Concepto	Costo por ha
Preparación del terreno	\$2,294.00
Siembra	\$6,404.00
Fertilización	\$9,051.00
Labores culturales	\$1,810.00
Riegos	\$12,506.00
Control de plagas, malezas y enf.	\$3,955.00
Cosecha, selección y empaque	\$3,880.00
Comercialización	\$2,710.00
Diversos	\$1,532.00
Total:	\$44,132.00

Table 1: Sistema de costos agrícolas. Resumen de costos Chihuahua, 2025 FIRA, 2025

Nota. Estimación de costo de producción de maíz con uso de terreno y maquinaria propia. El rendimiento estimado, corresponde al promedio de 22,248 hectáreas, en los últimos 3 ciclos agrícolas de las principales regiones productoras. Sería óptimo implementar un proceso de labranza de conservación o labranza cero en colaboración con los productores para preservar el suelo e implementar la captación de agua. El proceso de labranza es un factor importante, pues reduce al mínimo la perturbación del suelo y mantiene cobertura vegetal parcial o total, todo esto mientras se hace una siembra semi-directa, se usa maquinaria para una preparación mínima del suelo. Donde promueven la conservación del suelo y mejora su calidad reduciendo el impacto de las labores. En zonas semiáridas o con suelos degradados, como es el caso del municipio de Cuauhtémoc; la labranza cero, siembra directa sin maquinaria, se prefiere para conservar humedad, aumentar la infiltración de agua y evitar la erosión severa de la tierra. Tal vez, un modelo mejorado tendría como variable de decisión cuantas ha estarían destinadas a cierto tipo de labranza. Pues también pueden ahorrar la utilización del agua al tener una reducción de 30-50% por una infiltración más eficiente.

El frijol también destaca por su extensión en el municipio de Cuauhtémoc.

Concepto	Costo por ha
Preparación del terreno	\$3,432.00
Siembra	\$4,129.00
Fertilización	\$4,041.00
Labores culturales	\$1,693.00
Riegos	\$5,417.00
Control de plagas, malezas y enf.	\$3,155.00
Cosecha, selección y empaque	\$1,265.00
Diversos	\$2,145.00
Total:	\$25,277.00

Table 2: Sistema de costos agrícolas. Resumen de costos Chihuahua, 2023 FIRA, 2025

No se obtuvieron valores de la manzana en el estado de Chihuahua. La superficie destinada a cada cultivo se obtuvo a partir de la investigación de Santos-Hernández et al., 2019b. De

acuerdo con este estudio, en Cuauhtémoc hay 47,106.83 hectáreas de maíz de grano, 6,459.17 hectáreas de manzana y 218 hectáreas de frijol, que utilizan agua proveniente del acuífero de Cuauhtémoc.

3.2 Hectáreas destinadas por cultivo y método de riego

Los métodos de riego considerados para la formulación del problema son: riego por gravedad, riego por aspersión (incluyendo microaspersión) y riego por goteo. Con la información disponible, no fue posible identificar cuántas hectáreas de cada cultivo utilizan dependiendo del tipo de riego. Por esta razón, se recurrió a los datos reportados por el INEGI, 2024 para el estado de Chihuahua. En INEGI, 2023b, el 73.09% de las unidades de producción agrícola (UP) empleaban riego por gravedad, el 22.59% riego por aspersión y el 9.91% riego por goteo.

Un problema que surgió es que la suma de estos porcentajes excede el 100%, lo que indica que algunas UP utilizan más de un método de riego. Dado que no se dispone de información específica sobre qué UP combinan métodos, se ajustaron las proporciones de manera que la suma total de los tres métodos equivalga al 100%.

Los porcentajes de hectáreas por tipo de riego ajustados son:

- Riego por gravedad: $73.09/105.59 = 69.22\%$
- Riego por aspersión: $22.59/105.59 = 21.39\%$
- Riego por goteo: $9.91/105.59 = 9.39\%$

Utilizando la información sobre las hectáreas destinadas a cada cultivo y el porcentaje de hectáreas por tipo de riego, se calculan las hectáreas de cultivo de manzano y frijol dependiendo del método de riego.

Superficie de maíz por tipo de riego

Maíz con gravedad = $0.6922 \times 47106.83 = 32607.35$ ha

Maíz con aspersión = $0.2139 \times 47106.83 = 10076.15$ ha

Maíz con goteo = $0.0939 \times 47106.83 = 4423.33$ ha

Superficie de frijol por tipo de riego

Frijol con gravedad = $0.6922 \times 218.00 = 150.89$ ha

Frijol con aspersión = $0.2139 \times 218.00 = 46.63$ ha

Frijol con goteo = $0.0939 \times 218.00 = 20.47$ ha

Superficie de manzana por tipo de riego

Para el cultivo de manzana se encontró información más específica sobre la superficie agrícola destinada a este en el municipio de Cuauhtémoc. Santos-Hernández et al., 2019b mencionan las hectáreas destinadas al cultivo de manzana dependiendo de los métodos de riego utilizados. Se aplicó una regla de tres sencilla, ya que los datos reportaban el total de hectáreas, sin distinguir específicamente las que utilizan agua del acuífero.

- Manzana con gravedad = 1127.06 ha
- Manzana con aspersión = 5167.34 ha
- Manzana con goteo = 165.11 ha

3.3 Impacto de la tecnificación del riego en el ahorro del agua

Antes de comenzar con la información relevante, primero vamos a clarificar ciertos conceptos. La eficiencia del método hace referencia a cuanta agua llega efectivamente a la raíz sin que está se evapore o inunde a la planta. Pues, según Sifuentes, investigador del INIFAP, los productores frecuentemente aplican el agua hasta que el terreno adquiere un color oscuro y continúan regando hasta que agua llegó al final de todos los surcos por tiempo indefinido. Esto da como resultado una eficiencia de aplicación menor al 50%. Por lo tanto, sería por cada 100 litros de agua que entren a la parcerla, se aprovecharía menos de la mitad. Como resultado, la parcela se podría encontrar con un déficit de humedad o bien sobreirrigada Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, 2023. Poca agua reduce los rendimientos porque la plantación entra en estado de estrés. Sobreirrigación causa afixia y lavado de fertilizantes móviles, induciendo a su vez enfermedades y afectando la calidad y cantidad del fruto Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, 2023.

Utilizando la eficiencia del método de riego, podemos predecir cuánta agua se podría ahorrar si cambiamos a otro método de riego. Para esto se considera, riego de gravedad a riego por aspersión, riego de gravedad a riego por goteo y riego de aspersión a riego por goteo. Se utiliza la lámina neta anual (requerimientos hídricos del cultivo) para obtener el ahorro del agua. Con la información obtenida del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, 2023, conocemos la lámina neta del frijol de 28 cm² y del maíz de grano 45 cm². Calculamos cuánta agua requieren los cultivos anualmente en una hectárea.

Requerimiento hídrico anual:

- Maíz de grano: $0.45 \text{ m}^2 \times 10000 \text{ m} = 4,500 \text{ m}^3/\text{ha}$
- Frijol: $0.28 \text{ m}^2 \times 10000 \text{ m} = 2,800 \text{ m}^3/\text{ha}$

El volumen total de agua utilizada se estima dividiendo el requerimiento hídrico del cultivo entre la eficiencia del método de riego empleado. La eficiencia de cada método de riego se

obtuvo del informe de Olvera-Salgado et al., 2014, utilizando el valor promedio del rango reportado.

La eficiencia de método de riego:

- Riego por gravedad: 40%
- Riego por aspersión: 82.5 %
- Riego por goteo: 92.5%

Volumen total de agua utilizada por método de riego:

$$\text{Volumen de agua} = \frac{\text{Requerimiento hídrico}}{\text{Eficiencia del método}}$$

Maíz de grano

- Riego por gravedad: $4500 / 0.40 = 11,250 \text{ m}^3/\text{ha}$
- Riego por aspersión: $4500 / 0.825 = 5,454.55 \text{ m}^3/\text{ha}$
- Riego por goteo: $4500 / 0.925 = 4,864.86 \text{ hm}^3$

Frijol

- Riego por gravedad: $2,800 / 0.40 = 7,000 \text{ m}^3/\text{ha}$
- Riego por aspersión: $2,800 / 0.825 = 3,393.94 \text{ m}^3/\text{ha}$
- Riego por goteo: $2,800 / 0.925 = 3,027.03 \text{ hm}^3$

Finalmente para calcular el ahorro solo se tienen que restar la cantidad del agua que se utilizó originalmente y cuánta agua se usará con esta nueva tecnología.

Maíz de grano

- Riego de gravedad a riego por aspersión: $11,250 \text{ m}^3 - 5,454.55 \text{ m}^3 = 5,795.45 \text{ m}^3$
- Riego de gravedad a riego por goteo: $11,250 \text{ m}^3 - 4,864.86 \text{ m}^3 = 6,385.14 \text{ m}^3$
- Riego de aspersión a riego por goteo: $5,454.55 \text{ hm}^3 - 4,864.86 \text{ hm}^3 = 589.69 \text{ m}^3$

Frijol

- Riego de gravedad a riego por aspersión: $7,000 \text{ m}^3 - 3,393.94 \text{ m}^3 = 3,606.06 \text{ m}^3$
- Riego de gravedad a riego por goteo: $7,000 \text{ m}^3 - 3,027.03 \text{ m}^3 = 3,972.97 \text{ m}^3$

- Riego de aspersión a riego por goteo: $3,393.94 \text{ hm}^3 - 3,027.03 \text{ hm}^3 = 366.91 \text{ m}^3$

Para el cultivo de las manzanas se encontró otro estudio de Parra Quezada et al. realizado también en el municipio de Cuauhtémoc, Chihuahua que mencionan cuanta agua se puede ahorrar si se cambia de método de riego. En el estudio se calculó que se ahorra 7,000 m³ por hectárea al año, si se paso a un sistema de riego por gravedad a uno por goteo. Utilizando la eficiencia y una regla de tres se calculo ahorro.

Manzana

- Riego de gravedad a riego por aspersión: $7,000 \text{ m}^3$
- Riego de gravedad a riego por goteo: $6,234.24 \text{ m}^3$
- Riego de aspersión a riego por goteo: 756.76 m^3

3.4 Costos implementación de método de riego

Uno de los principales factores por los cuales no se han tecnificado los cultivos ni los métodos de riego es el alto costo de implementar sistemas más eficientes. Para estimar los costos del cambio de método de riego, se calculó un promedio a partir de distintas fuentes.

Costo de riego por gravedad a riego por aspersión: Los precios fueron obtenidos de Fundación Produce y NDSU (2021), se utilizó el promedio entre ambas fuentes, el cual fue de \$41,770.

Costo de riego por gravedad a riego por goteo: Los precios se recopilaron de FIRA (2022), del Gobierno de México (2025) y de Luna M. (2024). El promedio calculado fue de \$66,380

Costo de riego por aspersión a riego por goteo: El precio de este cambio no está claramente definido. Según Abellán Sánchez (2019), el costo depende del tipo de sistema de aspersión existente, el estado de las tuberías, el equipo disponible, la mano de obra, entre otros factores. Para efectos prácticos, se asume que el sistema de filtración y bombeo es compatible, lo cual podría representar un ahorro aproximado de \$15,000 pesos. El costo final estimado para el cambio de riego por aspersión a riego por goteo es de \$51,390.

3.5 Excel

Toda la información se presenta de forma más clara en el archivo de Excel, el cual también incluye datos adicionales que permiten comprender el problema con mayor profundidad.

Link: Archivo en Excel

4 Formulación del modelo

La función objetivo busca maximizar el ahorro de agua, cambiando a un método de riego más tecnificado. Este modelo considera como variables de decisión: la superficie agrícola por cultivo y la eficiencia del riego en función de la tecnología implementada, los costos asociados a tecnologías: riego por goteo y riego por aspersión. Las decisiones están restringidas por: un límite de presupuesto total para intervenciones y las hectáreas por cultivo.

4.1 Problema

El objetivo de este modelo es la maximización del ahorro de agua en zonas agrícolas del acuífero de Cuauhtémoc, Chihuahua, mediante la implementación de soluciones hídricas de alta eficiencia. Específicamente, se consideran tres tipos de intervención: el cambio de tecnologías de riego a métodos más eficientes (como aspersión o goteo).

Estas decisiones están sujetas a restricciones presupuestales (limitación de inversión pública) y restricciones físicas (como la superficie agrícola máxima disponible para intervención) y los porcentajes máximos de cambio de tecnología).

La función objetivo está expresada en m^3 de agua ahorrada por año, lo cual permite cuantificar directamente el impacto hídrico de las intervenciones.

4.2 Función objetivo

El objetivo del modelo es maximizar el ahorro total de agua (en metros cúbicos por año), derivado del cambio de método de riego en distintas superficies agrícolas.

$$\begin{aligned} \text{Max } Z = & 6234.24x_1 + 7000x_2 + 756.76x_3 + 5795.45x_4 \\ & + 6385.14x_5 + 589.69x_6 + 3606.06x_7 \\ & + 3972.97x_8 + 366.91x_9 \end{aligned} \tag{1}$$

Cada término tiene la forma:

$$(\text{Agua ahorrada por hectárea}) \times (\text{Número de hectáreas convertidas})$$

Variable	Significado	Unidad
x_1	Hectáreas de manzana que cambian de riego por gravedad a aspersión	ha
x_2	Hectáreas de manzana que cambian de riego por gravedad a goteo	ha
x_3	Hectáreas de manzana que cambian de riego por aspersión a goteo	ha
x_4	Hectáreas de maíz que cambian de riego por gravedad a aspersión	ha
x_5	Hectáreas de maíz que cambian de riego por gravedad a goteo	ha
x_6	Hectáreas de maíz que cambian de riego por aspersión a goteo	ha
x_7	Hectáreas de frijol que cambian de riego por gravedad a aspersión	ha
x_8	Hectáreas de frijol que cambian de riego por gravedad a goteo	ha
x_9	Hectáreas de frijol que cambian de riego por aspersión a goteo	ha

Table 3: Definición de variables de decisión

4.3 Restricciones del modelo

Las siguientes restricciones son definidas por el área de los cultivos y presupuestales del modelo de optimización propuesto.

4.3.1 Restricciones de disponibilidad de superficie

La cantidad de hectáreas, según el tipo de cultivo y el método de riego, que pueden ser tecnificadas o mejoradas.

- $x_1 + x_2 \leq 1127.06$ ha (Manzana con riego por gravedad)
- $x_4 + x_5 \leq 32607.35$ ha (Maíz con riego por gravedad)
- $x_7 + x_8 \leq 150.9$ ha (Frijol con riego por gravedad)
- $x_3 \leq 5167.34$ ha (Manzana con aspersión)
- $x_6 \leq 10076.15$ ha (Maíz con aspersión)
- $x_9 \leq 46.63$ ha (Frijol con aspersión)

4.3.2 Restricción presupuestal

El presupuesto total disponible es de \$200,000,000 MXN. Los costos por hectárea son:

- Gravedad \rightarrow aspersión: \$41,770 / ha
- Gravedad \rightarrow goteo: \$66,380 / ha
- Aspersión \rightarrow goteo: \$51,390 / ha

La restricción queda expresada como:

$$41\,770(x_1 + x_4 + x_7) + 66\,380(x_2 + x_5 + x_8) + 51\,390(x_3 + x_6 + x_9) \leq 200\,000\,000$$

4.4 Naturaleza de las variables

- $x_i \geq 0$, $i = 1, \dots, 9$ (Variables continuas en hectáreas)

5 Validación del Modelo

La validación del modelo permite verificar si existe una solución factible y si el problema lineal está acotado. Para ello, se asumieron los siguientes valores.

- $x_1 = 10$ hectáreas de manzana que cambian de riego por gravedad a aspersión
- $x_2 = 10$ hectáreas de manzana que cambian de riego por gravedad a goteo
- $x_3 = 10$ hectáreas de manzana que cambian de riego por aspersión a goteo
- $x_4 = 10$ hectáreas de maíz que cambian de riego por gravedad a aspersión
- $x_5 = 10$ hectáreas de maíz que cambian de riego por gravedad a goteo
- $x_6 = 10$ hectáreas de maíz que cambian de riego por aspersión a goteo
- $x_7 = 10$ hectáreas de frijol que cambian de riego por gravedad a aspersión
- $x_8 = 10$ hectáreas de frijol que cambian de riego por gravedad a goteo
- $x_9 = 10$ hectáreas de frijol que cambian de riego por aspersión a goteo

Posteriormente, se revisa si se cumplen todas las restricciones.

Restricciones de disponibilidad de superficie

- $10 + 10 \leq 1127.06$ ha (Manzana con riego por gravedad)
- $10 + 10 \leq 32607.35$ ha (Maíz con riego por gravedad)

- $10 + 10 \leq 150.9$ ha (Frijol con riego por gravedad)
- $10 \leq 5167.34$ ha (Manzana con aspersión)
- $10 \leq 10076.15$ ha (Maíz con aspersión)
- $10 \leq 46.63$ ha (Frijol con aspersión)

Restricción presupuestal

$$\begin{aligned}
 41\,770 \cdot (10 + 10 + 10) + 66\,380 \cdot (10 + 10 + 10) + 51\,390(10 + 10 + 10) \\
 = 41\,770(30) + 66\,380(30) + 51\,390(30) \quad (2) \\
 = 4\,786\,200
 \end{aligned}$$

$$4\,786\,200 \leq 200\,000\,000 \quad (3)$$

Este resultado confirma que el modelo tiene una región factible y una solución básica factible. El valor de la función objetivo sería de 347 072.2 m³ de agua ahorrada.

Como se ha señalado en clase, así como en la literatura especializada (Hillier y Lieberman, 2010; Taha, 2012), la formulación de problemas de programación lineal implica definir un conjunto de restricciones lineales que delimitan un espacio de soluciones factibles. Si el modelo no está bien construido —si se introducen restricciones incompatibles, o si se omiten límites esenciales— se corre el riesgo de obtener regiones factibles vacías o funciones objetivo no acotadas.

En concordancia con la metodología expuesta, expresamos la función objetivo en metros cúbicos por año (m³/año), una unidad que como se señaló permite representar el volumen de agua ahorrada o recuperada de manera estandarizada. Por su parte, las restricciones asociadas a superficie agrícola y presupuesto fueron ajustadas para mantener uniformidad en sus magnitudes: la superficie intervenida se reporta en hectáreas (ha), mientras que los costos en millones de pesos.

En la teoría de programación lineal, cada restricción lineal representa un hiperplano dentro del espacio n-dimensional de las variables de decisión. Cuando estas restricciones son compatibles entre sí, sus intersecciones delimitan una región factible convexa, es decir, un conjunto cerrado, acotado y convexo en el que se localizan las soluciones viables (Hillier y Lieberman, 2010). En el presente caso, la conjunción de límites presupuestales, cotas máximas de superficie, y condiciones de no-negatividad genera un poliedro cerrado y acotado.

Aun así, es de suma importancia verificar mejor esto por ello como parte del proceso de validación estructural del modelo se propondrán instancias simplificadas que permitirán verificar que la región factible no sea vacía y que la función objetivo esté acotada superiormente.

Con esta instancia sencilla pudimos comprobar que el PL sí tiene una región factible. También el PL puede tener una Solución Básica Factible en el punto de origen.

6 Obtención de Soluciones

Para resolver el modelo propuesto de programación lineal, se emplearon dos enfoques complementarios: primero, se implementó en Python utilizando la biblioteca PuLP, sin recurrir a paquetes adicionales como NumPy o SciPy. Posteriormente, con el objetivo de realizar un análisis de sensibilidad detallado y obtener información dual enriquecida, se resolvió el mismo modelo utilizando el software comercial **Xpress IVE**, lo cual permitió validar la robustez de la solución obtenida y generar reportes avanzados de análisis postóptimo.

La formulación inicial del modelo contenía variables continuas que representan superficies agrícolas (en hectáreas) sujetas a ser intervenidas mediante tres tecnologías de riego (gravedad, aspersión y goteo), considerando tres cultivos estratégicos: manzana, maíz y frijol. El modelo prioriza la maximización del ahorro de agua anual en m^3 , sujeto a restricciones técnicas de superficie por cultivo y a una restricción presupuestal con costos diferenciados por tipo de conversión tecnológica.

En cuanto a la solución, el modelo determinó un óptimo único bajo los parámetros definidos en la instancia principal. La función objetivo —maximizar el ahorro hídrico anual— alcanzó un valor de **28,243,884.29 $\text{m}^3/\text{año}$** , mediante la siguiente asignación de recursos:

- $x_1 = 1127.06$ ha (hectáreas de manzana convertidas de *gravedad* a *aspersión*),
- $x_4 = 3661.07$ ha (hectáreas de maíz convertidas de *gravedad* a *aspersión*),
- Todas las demás variables (x_2 a x_9) toman valor cero, es decir, no se realizaron conversiones hacia goteo ni intervenciones sobre frijol.

Esta solución satisface todas las restricciones del modelo, incluyendo la totalidad del presupuesto disponible. Por consiguiente, en términos estratégicos, es inferido que la combinación más eficiente para maximizar el ahorro hídrico bajo los costos y eficiencias actuales es convertir superficies de riego por gravedad a aspersión en los cultivos de manzana y maíz.

En suma, la solución refleja un uso óptimo de los recursos técnicos y económicos disponibles, y evidencia que las estrategias más costo-eficientes en este caso no necesariamente requieren las tecnologías más avanzadas (como el goteo), sino aquellas que logran una mejora significativa en la eficiencia de riego a un costo proporcionalmente menor.

7 Análisis Postóptimo

Una vez identificada la solución óptima del modelo de programación lineal, se procedió a realizar un análisis de sensibilidad sobre las restricciones y los coeficientes que definen el comportamiento del sistema. Este análisis fue facilitado por el solver **Xpress IVE**, el cual permitió obtener precios sombra, holguras y rangos de variación de manera precisa y exhaustiva.

7.1 Recursos con mayor efecto en la función objetivo

De acuerdo con los precios sombra calculados, se identifican dos restricciones que influyen directamente en el valor de la función objetivo:

- **Restricción R1** — Superficie máxima de manzana con riego por gravedad: Su precio sombra fue de **438.79** m³/año. Esto significa que, en términos marginales, si se habilitara una hectárea adicional de este cultivo para reconversión (de gravedad a aspersión), el ahorro potencial de agua aumentaría en aproximadamente 438.79 m³ por año.

No obstante, en la práctica, la superficie agrícola está físicamente determinada y no puede ampliarse arbitrariamente. Además, el modelo parte de una estructura tecnológica fija (gravedad → aspersión); sin embargo, en un contexto real de política pública, no tendría sentido reconvertir hectáreas “extra” no existentes, ni modificar arbitrariamente el tipo de riego de origen sin incurrir en nuevos costos estructurales.

- **Restricción presupuestal:**

El precio sombra fue de **0.1387** m³/año por cada peso adicional. Es decir, un incremento marginal de un peso en el presupuesto generaría, teóricamente, un ahorro de 0.1387 m³ de agua por año. Este valor, aunque pequeño en la unidad monetaria, es importante al escalarlo a millones de pesos: un aumento de un millón de pesos implicaría un ahorro potencial adicional de aproximadamente 138,746.7 m³/año, manteniendo constantes las demás condiciones.

Las demás restricciones —correspondientes a superficies máximas de otros cultivos o métodos de riego— tienen precios sombra nulos. Esto implica que, en el estado actual del modelo, sus valores no son limitantes. Aumentar sus lados derechos no modifica la solución óptima, pues el modelo ya opta por no intervenirlas.

Tabla de precios sombra y holgura

Restricción	Tipo	Holgura	Interpretación
R1 (gravedad)	Área máxima	0 ha	Se utilizó al 100%
R2 (aspersión)	Área máxima	5167.34 ha	No se utilizó
R3 (gravedad)	Área máxima	28946.28 ha	Se usó menos del ~11%
R4 (aspersión)	Área máxima	10076.15 ha	Sin uso
R5 (gravedad)	Área máxima	150.9 ha	Sin uso
R6 (aspersión)	Área máxima	46.63 ha	Sin uso
Presupuesto	Financiera	0 pesos	Se usó todo el recurso

Table 4: Holgura de las restricciones e interpretación

La solución óptima se sustenta principalmente en dos factores limitantes: el área cultivable disponible de manzana con riego por gravedad, y el presupuesto total asignado. Estos dos recursos se utilizan completamente y son los que determinan el techo del ahorro hídrico alcanzable en este escenario.

Por otro lado, el resto de las restricciones muestra una amplia disponibilidad de superficie no utilizada, lo cual indica que, bajo los parámetros actuales (eficiencia, costo por hectárea y rendimiento hídrico marginal), esas intervenciones no resultan óptimas; reforzando la necesidad de priorizar inversiones donde se logra mayor eficiencia por unidad de costo.

References

- Arellano, A. (2023, June). Día mundial contra la desertificación y la sequía: Las mujeres que aprendieron a sembrar agua [Accessed: 2025-5-14]. <https://es.mongabay.com/2023/06/dia-mundial-contra-la-desertificacion-y-la-sequia-mujeres-que-aprendieron-a-sembrar-agua/>
- CEFP. (2023, August). Principales resultados de la encuesta nacional de ingresos y gastos de los hogares (ENIGH 2022) [Accessed: 2025-5-24]. <https://www.cefp.gob.mx/publicaciones/nota/2023/notacefp0672023.pdf>
- Comisión Nacional del Agua. (2024, January). Programas de medidas preventivas y de mitigación a la sequía (PMPMS) para ciudades [Accessed: 2025-5-14]. <https://www.gob.mx/conagua/acciones-y-programas/programas-de-medidas-preventivas-y-de-mitigacion-a-la-sequia-pmpms-para-ciudades>
- CONAGUA. (2015, April). Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero de cuahtémoc (0805), estado de chihuahua [Accessed: 2025-5-24]. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/103566/DR_0805.pdf
- CONAGUA. (2018). Estadísticas agrícolas en las unidades de riego [Accessed: 2025-6-11]. <https://files.conagua.gob.mx/conagua/publicaciones/publicaciones/sgih-3-18.pdf>
- CONAGUA. (2020). Catálogo general de construcción de sistemas de agua potable y alcantarillado 2020 [Comisión Nacional del Agua]. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/534108/Catlogo_general_de_construccion_de_sistema_de_agua_potable_y_alcantarillado_2020.pdf.pdf
- CONAGUA. (2022). Catalogo general de agua potable de precios unitarios para la construcción de sistemas de agua potable y alcantarillado 2022 [Accessed: 2025-6-11]. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/716423/CATALOGO_GENERAL_DE_AGUA_POTABLE_DE_PRECIOS_UNITARIOS_PARA_LA_CONSTRUCCION_DE_SISTEMAS_DE_AGUA_POTABLE_Y_ALCANTARILLADO_2022.pdf
- CONAGUA. (2024). *Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero cuahtémoc (0805), estado de chihuahua* (tech. rep.). https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/Edos_Acuiferos_18/chihuahua/DR_0805.pdf
- Cordova, D. G., Flores, E. N., García, R. R., & Salvador, J. C. R. (2021). La sequía severa en México [Accessed: 2025-5-13]. <https://ciencia.unam.mx/leer/1146/la-sequia-severa-en-mexico>

- Equipozo. (2023). Consideraciones para perforación de pozos [Blog de empresa especializada en pozos]. <https://www.equipozo.com/post/nd.ne>
- FAO. (2006). Modernización del riego en américa latina y el caribe [Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura]. <https://www.fao.org/4/aj470s/aj470s02.pdf>
- FIRA. (2025). PV 2025 [Accessed: 2025-6-13]. <https://www.fira.gob.mx/InfEspDtoXML/TemasUsuario.jsp>
- García Lirios, C. (2021). Escenarios hídricos en la ciudad de México: Revisión de 2019 a 2021. *Revista de Geografía Espacios*, 48–63.
- Gobierno de México. (2023). Proyectos tipo y presupuestos: Sistemas de captación de agua de lluvia y saneamiento básico 2023 [Gobierno de México]. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/792360/PROYECTOS_TIPO_Y_PRESUPUESTOS_SCALL_Y_SANEAMIENTO_BASIC0_2023.pdf
- Gobierno de México. (2025, March). Gobierno presenta 17 proyectos de infraestructura hídrica en beneficio de 36 millones de personas [Accessed: 2025-5-14]. https://www.gob.mx/presidencia/prensa/gobierno-presenta-17-proyectos-de-infraestructura-hidrica-en-beneficio-de-36-millones-de-personas?utm_source=chatgpt.com
- Gobierno del Estado de Chihuahua. (2016). Plan estatal del desarrollo 2017-2021 [Accessed: 2025-5-24]. <https://sds.chihuahua.gob.mx/sdhybc/images/planeacion/plan-estatal/PLAN%20ESTATAL%20DE%20DESARROLLO%202017%20-%202021.pdf>
- Gobierno del Estado de Chihuahua. (2021). Plan municipal de desarrollo cuauhtémoc 2021–2024 [Recuperado de la página oficial del Gobierno del Estado de Chihuahua]. https://chihuahua.gob.mx/atach2/anexo/anexo_04-2022_pmd_cuauhtemoc_2021-2024.pdf
- Gobierno del Estado de Chihuahua. (2023). Perfil económico de la región cuauhtémoc [Accessed: 2025-6-11]. <https://www.chihuahua.com.mx/content/PERFIL%20REGIONAL/2023/Regi%7B%5C'o%7Dn%20Cuauht%7B%5C'e%7Dmoc.pdf>
- González, C., & Morales, F. (2019). Diseño óptimo de pozos de infiltración como técnica de recarga artificial de acuíferos. *Tecnología y ciencias del agua*. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222019000300156
- Hillier, F. S., & Lieberman, G. J. (2010). *Introducción a la investigación de operaciones* (9th ed.). McGraw-Hill.
- IMTA. (2013). Modelo para la recarga artificial de acuíferos [Instituto Mexicano de Tecnología del Agua]. <http://repositorio.imta.mx/bitstream/handle/20.500.12013/864/RD-1307.1.pdf?sequence=1>
- IMTA & SEMARNAT. (2013). COORDINACIÓN DE RIEGO Y DRENAJE [Accessed: 2025-5-24]. <http://repositorio.imta.mx/bitstream/handle/20.500.12013/864/RD-1307.1.pdf?sequence=1>
- INEGI. (2023a). Estadísticas del agua en México 2023 [Instituto Nacional de Estadística y Geografía]. https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/889463913375.pdf
- INEGI. (2023b). *RESULTADOS DEFINITIVOS DEL CENSO AGROPECUARIO 2022 EN EL ESTADO DE CHIHUAHUA* (tech. rep.). https://www.inegi.org.mx/contenidos/saladeprensa/boletines/2023/CA.Def/CA_Def2022.pdf
- INEGI. (2023c, November). Censo agropecuario 2022. resultados definitivos [Accessed: 2025-5-24]. https://www.inegi.org.mx/contenidos/programas/ca/2022/doc/ca2022_rdCHI.pdf

- INEGI. (2024, March). Estadísticas a propósito del día mundial del agua: Desafíos y oportunidades en el uso agrícola en México [Accessed: 2025-5-25]. https://www.inegi.org.mx/contenidos/saladeprensa/aproposito/2024/EAP_DiaMundAgua.pdf
- Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. (2023). Metodología para la eficiencia de aplicación de riego en parcela [Accessed: 2025-6-11]. <https://www.gob.mx/inifap/articulos/metodologia-para-la-eficiencia-de-aplicacion-de-riego-en-parcela>
- Junta Central de Agua y Saneamiento de Chihuahua. (2022). Programa de mediano plazo gestión hídrica 2022–2027. https://portalair.chihuahua.gob.mx/media/archivos/26007_16.-JCAS-Entrega-Final.pdf
- Liotta, M., Carrión, R., Olguín, A., & Ciancaglini, N. (n.d.). Manual de goteo: Riego por goteo [Accessed: 2025-5-25]. <https://alimentacion.conahcyt.mx/glifosato/descargables/alternativas/materiales/RIEGO%20POR%20GOTEO.pdf>
- López, S. (2023, September). Escasez de agua y sequía en México: Crisis actual [Accessed: 2025-5-13]. <https://imco.org.mx/escasez-de-agua-y-sequia-en-mexico-crisis-actual>
- Márquez, J. L. (2025, April). Sequía en México 2025: Estados afectados, pérdidas agrícolas y crisis de agua [Accessed: 2025-5-13]. <https://www.unotv.com/nacional/sequia-en-mexico-2025-municipios-afectados-perdidas-agricolas-y-crisis-de-agua/>
- N+. (2025, April). Escasez de agua en México 2025: ¿En qué estados hay sequía extrema? [Accessed: 2025-5-14]. <https://www.nmas.com.mx/nacional/clima/escasez-agua-mexico-2025-que-estados-del-pais-tienen-sequia-extrema/>
- Nachelly, D. (2024, September). El gobierno de Querétaro se compromete con el cuidado del agua y el futuro de las familias: MKG - comisión estatal de aguas Querétaro [Accessed: 2025-5-14]. <https://www.ceaqueretaro.gob.mx/el-gobierno-de-queretaro-se-compromete-con-el-cuidado-del-agua-y-el-futuro-de-las-familias-mkg/>
- Olvera-Salgado, M. D., Bahena-Delgado, G., Alpuche Garcés, Ó., & García Matías, F. (2014). La tecnificación del riego ante la escasez del agua para la generación de alimentos. estudio de caso en Chihuahua, México. *Ambiente Desarro.*, 18(35), 23.
- Parra Quezada, R., Ortiz Franco, P., Amado Álvarez, J., & Chávez Sánchez, N. (2009). Productividad y crecimiento de manzano bajo déficit de riego controlado. *Terra Latinoamericana*, 27(4), 337–343. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-57792009000400008
- Pedrozo Acuña, A. (2020). Hacia una agricultura eficiente y sustentable. *Perspectivas IMTA*, 1(21).
- Pozos Biobío. (2023). Consideraciones técnicas al planear la perforación de un pozo profundo [Empresa especializada en perforación de pozos]. <https://www.pozosbiobio.cl/2023/09/07/consideraciones-tecnicas-al-planear-la-perforacion-de-un-pozo-profundo/>
- Requena, A., Nordenström, G., & Castillo, E. (2010). COEFICIENTES DE CULTIVO DE MANZANO EN PERÍODO DE FORMACIÓN, OBTENIDOS EN LISÍMETROS DE DRENAJE [Accessed: 2025-6-11]. <https://www.ina.gov.ar/archivos/pdf/CRA-VFERTI/CRA-RYD-36-Requena.pdf>
- Sánchez, J. A. (2019, August 22). ¿cómo cambiar el modelo de regadío de aspersión a goteo? [Consultado el 16 de junio de 2025]. <https://www.gestiriego.com/como-cambiar-el-modelo-de-regadio-de-aspersion-a-goteo/>

- Sánchez Jiménez, A. (2025, April). Alertan sobre deterioro de cuerpos de agua en la frontera México-EU [Accessed: 2025-5-14]. <https://www.jornada.com.mx/2025/04/13/politica/005n1pol>
- Santos-Hernández, A. L., Palacios-Velez, E., Mejia-Saenz, E., Matus-Gardea, J. A., Galvis-Spíndola, A., Vásquez-Soto, D., Ascencio-Hernández, R., & Peña-Díaz, S. A. (2019a). Análisis del uso del agua del acuífero cuauhtémoc, chihuahua, México. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 10(3), 156–189. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2019-03-07>
- Santos-Hernández, A. L., Palacios-Velez, E., Mejia-Saenz, E., Matus-Gardea, J. A., Galvis-Spíndola, A., Vásquez-Soto, D., Ascencio-Hernández, R., & Peña-Díaz, S. A. (2019b). Análisis del uso del agua del acuífero cuauhtémoc, chihuahua, México. *Tecnol. Cienc. Agua*, 10(3), 156–189.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2006). Norma oficial mexicana nom-150-semarnat-2006 que establece las especificaciones técnicas de protección ambiental que deben observarse en las actividades de construcción y evaluación preliminar de pozos geotérmicos para exploración [Diario Oficial de la Federación]. <https://www.dof.gob.mx/normasOficiales/1881/SEMARNA1/SEMARNA1.htm>
- SIAP. (2023). Panorama de la frontera agrícola chihuahua [Accessed: 2025-6-11]. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/821407/Panorama_FA_2023_CHIH.pdf
- Taha, H. A. (2012). *Investigación de operaciones* (9th ed.). Pearson Educación.