



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO  
POSGRADO EN CIENCIAS DE LA SOSTENIBILIDAD  
ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS SUPERIORES LEÓN  
VULNERABILIDAD Y RESPUESTA AL CAMBIO GLOBAL

**REÚSO DE AGUA TRATADA COMO UNA ALTERNATIVA SOSTENIBLE QUE  
REDUZCA LA SOBREEXPLOTACIÓN DEL ACUÍFERO VALLE DE LEÓN  
PARA AUMENTAR LA DISPONIBILIDAD DEL AGUA EN LA CIUDAD DE  
LEÓN, GUANAJUATO**

**TESIS**

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE  
MAESTRA EN CIENCIAS DE LA SOSTENIBILIDAD

PRESENTA:

**ANDREA URTAZA RUIZ DE ESPARZA**

Tutora Principal

DRA. MA. CONCEPCIÓN ARENAS ARROCENA  
ENES Unidad León, UNAM

Comité Tutor

DR. DANIEL ALFREDO REVOLLO FERNÁNDEZ  
Departamento de Economía, CONAHCYT-UAM

DRA. ALMA CONCEPCIÓN CHÁVEZ MEJÍA  
Instituto de Ingeniería, UNAM

Asesora Externa

ING. SANDRA PAULINA SÁNCHEZ ZEPEDA  
SAPAL

Revisores

DR. ANTONIO HERNÁNDEZ LÓPEZ  
ENES Unidad León, UNAM

DR. HUGO OLVERA VARGAS  
Instituto de Energías Renovables, UNAM

MTRO. EDUARDO SÁNCHEZ SANMIGUEL  
Universidad Tecnológica de León

LEÓN, GUANAJUATO, MÉXICO, NOVIEMBRE 2023



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

**Coordinación de Estudios de Posgrado**  
**Ciencias de la Sostenibilidad**  
**Oficio: CGEP/PCS/245/2023**  
**Asunto: Asignación de Jurado**

**M. en C. Ivonne Ramírez Wence**  
**Directora General de Administración Escolar**  
**Universidad Nacional Autónoma de México**  
**Presente**

Me permito informar a usted, que el Comité Académico del Programa de Posgrado en Ciencias de la Sostenibilidad, en su sesión 94 del 12 de septiembre del presente año, aprobó el jurado para la presentación del examen para obtener el grado de **MAESTRA EN CIENCIAS DE LA SOSTENIBILIDAD**, de la alumna **Urtaza Ruiz de Esparza Andrea** con número de cuenta **417062363**, con la tesis titulada “Reúso de agua tratada como una alternativa sostenible que reduzca la sobreexplotación del acuífero Valle de León para aumentar la disponibilidad del agua en la ciudad de León, Guanajuato”, bajo la dirección de la Dra. Ma. Concepción Arenas Arrocena.

PRESIDENTE: DR. ANTONIO HERNÁNDEZ LÓPEZ  
VOCAL: MTRO. EDUARDO SÁNCHEZ SANMIGUEL  
SECRETARIA: DRA. ALMA CONCEPCIÓN CHÁVEZ MEJÍA  
VOCAL: DR. HUGO OLVERA VARGAS  
VOCAL: DR. DANIEL ALFREDO REVOLLO FERNÁNDEZ

Sin más por el momento me permito enviarle un cordial saludo.

**ATENTAMENTE,**

**“POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU”**

**Cd. Universitaria, Cd. Mx., 3 de noviembre de 2023.**



**Dr. Alonso Aguilar Ibarra**  
**Coordinador**  
**Posgrado en Ciencias de la Sostenibilidad, UNAM**

## **AGRADECIMIENTOS**

---

Quisiera comenzar agradeciendo a mi alma máter, la UNAM, por brindarme la oportunidad de cursar mis estudios en una institución que no solo me prepara para ser una profesional destacada, sino también para ser una mejor persona en muchos aspectos de la vida.

Al Posgrado en Ciencias de la Sostenibilidad, agradezco por ofrecer un programa que forma a individuos comprometidos con la mejora del mundo que habitamos. Les aseguro que cuentan con alguien que persistirá en la búsqueda de transformar la gestión del agua en León, Guanajuato.

Gracias por su apoyo al proyecto PAPIIT-DGAPA (IN112921): Síntesis in-situ de compositos de politiofenos/sulfuros metálicos funcionalizados para aplicaciones fotovoltaicas, y al Consejo Nacional de Humanidades Ciencia y Tecnología (CONAHCYT), por la beca que estuve recibiendo a lo largo de mi posgrado.

A mi tutora principal, la Dra. Ma. Concepción Arenas, por su respaldo desde antes de iniciar la maestría y hasta el día de hoy. Gracias por orientarme en la postulación al programa de maestría, sus comentarios y sugerencias relacionados al proyecto, su apoyo en la aplicación de encuestas, y su amabilidad constante.

De igual manera agradezco a mi comité tutorial, Dra. Alma Chávez y Dr. Daniel Revollo, por aceptar ser parte de este equipo de trabajo y por dedicar su tiempo ante cualquier situación que se presentara. Agradezco a mi jurado, Dr. Antonio Hernández, Dr. Hugo Olvera y Mtro. Eduardo Sánchez, por su atención y tiempo al revisar este trabajo y enriquecerlo con sus valiosos comentarios.

Un agradecimiento especial a SAPAL, en particular a la Ing. Paulina Sánchez, por su colaboración y por proporcionar la información crucial que permitió que este proyecto se desarrollara de manera veraz y acorde a la realidad.

Gracias a todos los profesores con los que tuve la oportunidad de coincidir durante mi posgrado, por abrirme los ojos en varias ocasiones ante las realidades que enfrentamos hoy en día y por proporcionarme las herramientas necesarias para abordarlas. A mis compañeros y futuros colegas, gracias por compartir y resonar con esta espina que nos mueve a hacer un cambio en nuestro entorno para vivir en un mundo mejor.

Por último, pero no menos importante, agradezco a mis padres, Celia y Ricardo, por haberme inculcado desde temprana edad el gusto por el estudio, la responsabilidad y la dedicación académica. Por su imparable apoyo en todas las etapas de mi vida, dentro y fuera del ámbito académico, gracias. A mis hermanas, por ser mis compañeras de vida que siempre me recuerdan lo capaz que soy y lo mucho que puedo lograr.

A mi esposo, Emilio, le agradezco por acompañarme en este proceso de maestría, incluso en medio de la planificación de nuestra boda. Tu paciencia, ánimo y celebración en cada logro han sido un pilar fundamental. Te amo flaco.

**¡Muchas gracias!**

## ÍNDICE GENERAL

---

1. RESUMEN.....	9
2. ABSTRACT .....	10
3. INTRODUCCIÓN.....	11
4. MARCO CONCEPTUAL .....	14
4.1. Ciencias de la sostenibilidad .....	14
4.2. Agua y sus usos.....	15
4.3. Fuentes de obtención del agua .....	16
4.4. Sobreexplotación de acuíferos .....	18
4.5. Escasez del agua .....	18
4.5.1. Indicadores de escasez del agua.....	19
4.6. Plantas de tratamiento de aguas residuales y reutilización del agua .....	22
4.7. Marco legal .....	25
4.8. Organismo operador: SAPAL .....	30
5. ANTECEDENTES .....	32
6. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	39
7. JUSTIFICACIÓN .....	41
8. HIPÓTESIS .....	43
9. OBJETIVOS.....	43
10. METODOLOGÍA .....	44
10.1. Área de estudio.....	44
10.1.2. Sobreexplotación del acuífero Valle de León .....	45
10.2. Opinión de grupo de estudio .....	45
10.3. Viabilidad económica .....	47
10.4. Viabilidad ambiental .....	48
10.5. Afectaciones ambientales, sociales y económicas .....	49
10.5.1. Impactos ambientales .....	49
10.5.2. Impactos sociales.....	50
10.5.3. Impactos económicos .....	51
11. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	52
11.1. Opinión de grupo de estudio .....	52
11.2. Viabilidad económica .....	63

<b>11.3. Viabilidad ambiental</b> .....	69
<b>11.4. Afectaciones ambientales, sociales y económicas</b> .....	80
<b>11.4.1. Impactos ambientales</b> .....	80
<b>11.4.2. Impactos sociales</b> .....	89
<b>11.4.3. Impactos económicos</b> .....	91
<b>12. CONCLUSIONES</b> .....	92
<b>13. REFERENCIAS</b> .....	94
<b>14. ANEXOS</b> .....	101
<b>Anexo 1. Lista de colonias abastecidas por la Planta Potabilizadora El Palote (SAPAL, 2022c)</b> .....	101
<b>Anexo 3. Resultados de la prueba piloto de la encuesta “Percepción del consumo y escasez del agua en la ciudad de León, Guanajuato” (n=10)</b> .....	104
<b>Anexo 4. Encuesta “Percepción del abastecimiento y escasez del agua en la ciudad de León, Guanajuato”</b> .....	107
<b>Anexo 5. Metodología Box-Jenkins.</b> .....	109

## Índice de Figuras

---

Figura 1. Distribución de volúmenes concesionados para usos agrupados consuntivos en el 2018. ....	16
Figura 2. Modelación de la dispersión de DBO <sub>5</sub> en la Presa El Palote (101° 41' 18" oeste, 21° 10' 50" norte) al día uno (izquierda) y después de 6 meses (derecha). ....	37
Figura 3. Escala de clasificación de calidad de agua superficial en base a la DBO <sub>5</sub> expedida por la Gerencia de Calidad de Agua de la Subdirección General Técnica de la Comisión Nacional del Agua. ....	37
Figura 4. Delimitación de las colonias que son abastecidas por el agua de la Presa “El Palote”. ....	47
Figura 5. Gráficos de las respuestas referentes a la fuente de abastecimiento y pago por el servicio del agua de la colonia Haciendas de Echeveste. ....	52
Figura 6. Gráficos de las respuestas referentes a la crisis de agua y la alternativa que se presenta en este proyecto de la colonia Haciendas de Echeveste. ....	53
Figura 7. Gráficos de las respuestas referentes al uso de agua en el hogar de la colonia Haciendas de Echeveste. ....	54
Figura 8. Gráficos de las respuestas referentes a la fuente de abastecimiento y pago por el servicio del agua de la colonia Ciudad Aurora. ....	54
Figura 9. Gráficos de las respuestas referentes a la crisis de agua y la alternativa que se presenta en este proyecto de la colonia Ciudad Aurora. ....	55
Figura 10. Gráficos de las respuestas referentes al uso de agua en el hogar de la colonia Ciudad Aurora. ....	56
Figura 11. Gráficos de las respuestas referentes a la fuente de abastecimiento y pago por el servicio del agua de la colonia Gran Jardín. ....	56
Figura 12. Gráficos de las respuestas referentes a la crisis de agua y la alternativa que se presenta en este proyecto de la colonia Gran Jardín. ....	57
Figura 13. Gráficos de las respuestas referentes al uso de agua en el hogar de la colonia Gran Jardín. ....	58
Figura 14. Gráficos de las respuestas referentes a la fuente de abastecimiento y pago por el servicio del agua de la colonia Portones del Campestre. ....	58
Figura 15. Gráficos de las respuestas referentes a la crisis de agua y la alternativa que se presenta en este proyecto de la colonia Portones del Campestre. ....	59
Figura 16. Gráficos de las respuestas referentes al uso de agua en el hogar de la colonia Portones del Campestre. ....	60
Figura 17. Ingreso mensual reportado por los encuestados de cada colonia. ....	63
Figura 18. Precipitación de los últimos cinco años en la ciudad de León, Guanajuato. ....	71
Figura 19. Precipitación de los últimos cinco años en la ciudad de León, Guanajuato. ....	72



Figura 20. Proceso dentro de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Las Joyas.....	83
Figura 21. Proceso dentro de la Planta Potabilizadora El Palote. ....	84
Figura 22. Gráficas de los valores mensuales registrados para los parámetros de DQO y <i>Escherichia coli</i> en la PTAR Las Joyas y el límite establecido por la NOM-001-SEMARNAT-2021.....	87
Figura 23. Entrada del agua proveniente de la PTAR Las Joyas a través de la microcuenca La Patiña y localización de la planta potabilizadora “El Palote”. ....	88
Figura A5. Diagrama de flujo del proceso para construcción de un modelo Box-Jenkins. ....	109

## Índice de Tablas

---

Tabla 1. Agrupación de usos de la clasificación del REPDA. ....	16
Tabla 2. Indicadores adicionales de escasez del agua. ....	21
Tabla 3. Volumen de agua extraída del acuífero Valle de León para diferentes usos en León, Guanajuato. ....	39
Tabla 4. Respuestas más relevantes de las encuestas aplicadas a las colonias abastecidas por la PPEP. ....	60
Tabla 5. Costos de operación de un m <sup>3</sup> de agua en la PTARJ y en la PPEP. Fuente: SAPAL, 2022. ....	64
Tabla 6. Suma de los costos para la reutilización de agua tratada y potabilizada. ....	65
Tabla 7. Importe del precio por consumo de m <sup>3</sup> de agua para uso doméstico. ....	66
Tabla 8. Escenarios para el balance de costos del proyecto. ....	67
Tabla 9. Resumen de los balances de costos para cada escenario posible en el proyecto. ....	68
Tabla 10. Volumen producido y caudal para la PTARJ. ....	70
Tabla 11. Precipitación promedio mensual en León, Guanajuato. ....	71
Tabla 12. Estimación de la precipitación promedio mensual (mm) para los próximos 12 meses en la ciudad de León, Guanajuato. ....	73
Tabla 13. Estimación de la recarga de la presa El Palote. ....	75
Tabla 14. Caudal de potabilización y perdido para la PPEP en el 2022. ....	77
Tabla 15. Volumen producido para el año 2022 y con la estimación para el año 2024_25. ....	78
Tabla 16. Comparación entre los límites máximos permisibles para contaminantes básicos establecidos en la NOM-001-SEMARNAT-2021 y los valores obtenidos de las muestras de la salida de la PTARJ y entrada a la PPEP. ....	85
Tabla 17. Comparación entre los límites máximos permisibles para metales y cianuros establecidos en la NOM-001-SEMARNAT-2021 y los valores obtenidos de las muestras de la salida de la PTARJ y entrada a la PPEP. ....	85

## 1. RESUMEN

---

La presente investigación aborda la problemática de escasez de agua en León, Guanajuato, analizando la viabilidad de implementar un proyecto de reúso de agua tratada y potabilizada como una alternativa sostenible para aumentar la disponibilidad del agua y disminuir la actual sobreexplotación que enfrenta el acuífero Valle de León. La investigación se enfoca en los pilares económico, ambiental y social, así como en los posibles impactos del proyecto.

Mediante encuestas realizadas a las colonias abastecidas por la Planta Potabilizadora El Palote (PPEP), se obtuvieron datos sobre su conocimiento acerca de la fuente de abastecimiento que llega a su hogar, la percepción de la crisis hídrica y la aceptación del proyecto. Se identificó la necesidad de crear confianza entre el organismo operador y la ciudadanía, destacando la importancia de informar sobre la calidad del agua potabilizada y fomentar un diálogo participativo desde el inicio del proyecto.

El análisis de costos presentó cuatro escenarios posibles, donde uno de ellos demostró la viabilidad económica del proyecto, lo cual podría reducir la tarifa del servicio del agua y destinar recursos para futuras iniciativas ambientales. Sin embargo, se reconoció que esta acción podría provocar un efecto rebote, resultando en un aumento del consumo y desperdicio de agua si no se promueve una gestión responsable del recurso hídrico.

La viabilidad ambiental se evaluó mediante cálculos de flujos y precipitación, encontrando que la extracción de agua se reduciría un 0.57%, por lo que se necesitarían otras alternativas para lograr un cambio significativo en la sobreexplotación del acuífero Valle de León. Asimismo, se destacó la importancia de mejorar la calidad del agua tratada en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de las Joyas (PTARJ), asegurando el cumplimiento de los parámetros establecidos por la norma actualizada, para evitar impactos negativos en la presa y en el proceso de potabilización.

Se concluye que el proyecto de reutilización de agua tratada y potabilizada se presenta como una alternativa sostenible para aumentar la disponibilidad de agua en León. No obstante, se requiere de una visión integral y participativa, junto con la implementación de estrategias complementarias, para reducir la sobreexplotación del acuífero Valle de León, abordar de manera más efectiva la crisis hídrica y lograr una gestión sustentable del recurso hídrico en la ciudad.

## 2. ABSTRACT

---

This research addresses the water scarcity problem in Leon, Guanajuato, analyzing the feasibility of implementing a treated and drinking water reuse project as a sustainable alternative to increase the water resources availability and reduce the overexploitation currently faced by the Valle de Leon aquifer. The research focuses on the economic, environmental, and social aspects, as well as the possible impacts of the project.

Through surveys conducted in the neighborhoods supplied by El Palote Potable Water Plant (PPEP), data was obtained regarding their knowledge of the water supply that reaches their homes, their perception of the water crisis, and their acceptance of the project. The need to build trust between the operating agency and the public was identified, emphasizing the importance of providing information about the quality of potable water and promoting a participatory dialogue from the beginning of the project.

The cost analysis showed four possible scenarios, one of which demonstrated the economic viability of the project, potentially leading to a reduction in water service fees and the allocation of resources for future environmental initiatives. However, it was acknowledged that a decrease in water tariffs could lead to a rebound effect, resulting in increased water consumption and wastage if responsible water management practices are not in place.

Environmental feasibility was evaluated through flow and precipitation calculations, finding that water extraction would be reduced by 0.57%, so other alternatives would be needed to achieve a significant change in the overexploitation of the Valle de León aquifer. The importance of improving the quality of the water treated at the PTARJ was also highlighted, ensuring compliance with the parameters established by the updated regulatory parameters, to avoid negative impacts on the dam and the drinking water treatment process.

It is concluded that the treated and drinking water reuse project is presented as a sustainable alternative to increase water availability in León. However, a comprehensive and participatory vision is required, along with the implementation of complementary strategies, to reduce the overexploitation of the Valle de León aquifer, address the water crisis more effectively, and achieve sustainable water resource management in the city.

### 3. INTRODUCCIÓN

---

A principios del siglo XXI, las perspectivas de desarrollo humano se vieron amenazadas por una crisis mundial de agua, donde los desafíos del agua también impactaron de manera creciente a cada región del mundo, enfrentándose a los efectos del cambio climático, a la urbanización y a los desastres naturales (UNESCO i-WSSM, 2019). La disponibilidad de los recursos de agua dulce por persona ha disminuido en más de un 20% (Naciones Unidas, 2020) en las últimas dos décadas debido al incremento de la tasa poblacional del 30.21% en el último siglo (Naciones Unidas, 2023), así como al crecimiento económico y al cambio climático, lo que probablemente provocará una grave crisis mundial del agua (Motoshita et al., 2018; Müller et al., 2020a).

A pesar de la disponibilidad de agua en el mundo, una quinta parte de la población mundial enfrenta escasez de la misma (Chandra et al., 2018). De acuerdo con las Naciones Unidas, el 85% de la población mundial vive en las zonas más secas de la Tierra, mientras que entre 6 y 8 millones de personas mueren cada año debido a enfermedades relacionadas al agua, como diarrea, cólera, disentería, fiebre tifoidea y poliomielitis (Chandra et al., 2018). De igual manera, más de 2 billones de personas no tienen acceso a agua limpia y casi 0.8 billones de personas no tienen un suministro básico de agua (UNICEF & WHO, 2019).

Como resultado de lo anterior, la importancia global del suministro de agua se ha institucionalizado con el sexto objetivo de desarrollo sostenible, donde se menciona el abastecimiento equitativo de agua y saneamiento a las poblaciones, esto debido a que existen miles de millones de personas que aún carecen de estos servicios básicos, por lo que se debe conseguir una equidad en la prestación del suministro de agua y su saneamiento (Asamblea General de las Naciones Unidas, 2015; López, 2021). Además, se reconoció como derecho humano el acceso al agua y al saneamiento por parte de la Asamblea General de las Naciones Unidas en 2010 (Molina-Maturano et al., 2020). El agua es un recurso esencial e irremplazable, por lo que la escasez de este recurso tiene un gran impacto en regiones rurales y en las zonas más marginadas del mundo (UNICEF & WHO, 2019).

De acuerdo con la CONAGUA, en el 2020 aproximadamente 5 millones de habitantes en México vivían sin acceso a agua potable (CONAGUA, 2022), y un buen número de las grandes concentraciones urbanas del país están experimentando escasez de agua y falta de equidad en la

distribución; en buena medida porque los recursos dedicados a resolver los problemas del agua y la seguridad hídrica no son suficientes (López, 2021). Particularmente, la ciudad de León, Guanajuato destaca en la zona Bajío por su acelerado crecimiento urbano y económico, dando lugar a un aumento en la demanda de agua (110.6% en los últimos 10 años) en una región que padece de la misma (CONAGUA, 2022; Hernández González & Tagle Zamora, 2020). Adicionalmente, otros factores que propician la escasez del agua en esta misma ciudad son la contaminación de residuos sólidos y líquidos por parte de las empresas curtidoras (industria dominante en la ciudad), la ausencia de supervisión ambiental, entre otros (Gobierno de México, 2023; Tagle-Zamora et al., 2018).

La principal fuente de abastecimiento de agua del municipio de León proviene de agua subterránea extraída del acuífero Valle de León, de los 149 pozos con los que cuenta la ciudad, el 97.59% de ellos surte agua que es extraída del acuífero para después ser consumida internamente; el porcentaje restante es extraído de la Presa “El Palote” (2.41%) (Gobierno Municipal de León, 2018). El acuífero Valle de León anualmente recibe una recarga de 156.3 millones de metros cúbicos, sin embargo, dentro del mismo lapso de tiempo se extraen 204 millones de metros cúbico, teniendo una sobreexplotación anual de 47.4 millones de metros cúbicos (Gobierno Municipal de León, 2018).

Al saber las complicaciones que provocaría la escasez del agua, se ha sugerido que una gestión efectiva del agua puede revertir la crisis de dicho recurso, tomando en cuenta otros factores que intervienen en el problema, tal como el cambio climático (Zhang et al., 2021). Además, se debe lograr la seguridad hídrica<sup>1</sup>, esto, para garantizar su accesibilidad en una apropiada cantidad y calidad para consumo humano, considerando el respeto del agua como parte integral del ecosistema (Müller et al., 2020a). Se requiere de una visión basada en las ciencias de la sostenibilidad, es decir, de un compromiso, roles y responsabilidades entre los distintos actores (el gobierno, la sociedad y el sector privado) para el desarrollo, gestión y uso de recursos hídricos (Zhang et al., 2021).

De hecho, se han realizado diversos estudios que destacan la reutilización de agua tratada como una solución efectiva para hacer frente a la escasez de agua. Estas prácticas ya han sido

---

<sup>1</sup> Seguridad hídrica: “Capacidad de una sociedad, para disponer de agua en cantidad y calidad aceptable para su supervivencia y la realización de diferentes actividades recreativas” (IMTA, 2018).

implementadas con éxito a nivel local en plantas de tratamiento destinadas al abastecimiento de agua potable, uso industrial y agricultura en varios municipios de Europa (European Commission, 2020). A pesar de que las estrategias para la reutilización de agua ya estén implementadas en Europa, estas son difíciles de desarrollar, ya que la responsabilidad de la disponibilidad y la demanda de agua recae en distintos sectores (agrícola e industrial) (Wu et al., 2016). De igual manera, las conexiones dentro del sistema de agua dulce y otros sistemas ambientales a menudo no son tan notorias, por lo que la aplicación de la reutilización de agua en un lugar puede afectar la disponibilidad de agua en otro (Pronk et al., 2021).

Por lo antes mencionado, la presente investigación expone la siguiente: ¿Es el reúso de agua tratada una alternativa sostenible para reducir la sobreexplotación del Valle de León que permita aumentar la disponibilidad del agua en la ciudad de León, Guanajuato?

Este trabajo se enfoca en plantear y analizar una alternativa sostenible para abordar la problemática del agua en la ciudad de León, Guanajuato. Se evaluará su viabilidad desde las perspectivas social, ambiental y económica, además de analizar los posibles impactos que pueda generar. La alternativa propuesta consiste en utilizar agua tratada proveniente de la planta de tratamiento de las Joyas y trasladarla a la presa "El Palote". El objetivo es aumentar el flujo de entrada de la Planta Potabilizadora El Palote, lo que permitiría incrementar el porcentaje de abastecimiento de agua para el sector público urbano y, al mismo tiempo, reducir la cantidad de agua extraída del acuífero Valle de León. De esta manera, se busca reducir la sobreexplotación que actualmente afecta al acuífero y mejorar la disponibilidad de agua en la ciudad.

## 4. MARCO CONCEPTUAL

---

### 4.1. Ciencias de la sostenibilidad

---

El término de sostenibilidad ha sido utilizado desde los años setenta, pero su definición más conocida es la que se encuentra en el *Reporte de Brundtland* en 1987, donde se explica que:

*“el desarrollo sostenible se alcanza cuando se satisfacen las necesidades de las generaciones presentes sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para poder satisfacer sus propias necesidades”* (Harlem Brundtland, 1987).

En la actualidad, resulta difícil lograr el desarrollo sostenible, ya que los retos y problemas socio-ecológicos son cada vez más complejos. Estos pueden experimentarse tanto a niveles locales como globales y cuentan con altos niveles de incertidumbre y complejidad, un ejemplo de ello es el incremento poblacional, la desigualdad social, el cambio climático y sus consecuencias, como la escasez del agua (Van Kerkhoff, 2014). Debido a esta complejidad, este último aspecto y muchos otros problemas deben ser analizados desde diferentes perspectivas, donde la ciencia de la sostenibilidad puede ser una pieza importante en dicho análisis.

La ciencia de la sostenibilidad es una disciplina que estudia la interacción entre los sistemas naturales y sociales en problemas que no pueden resolverse de una manera tradicional (disciplinaria), además de estudiar las afectaciones que tienen los mecanismos naturales y sociales en las necesidades de las generaciones presentes y futuras (Blok et al., 2016; Kates, 2011). Por otro lado, se caracterizan por tener un enfoque transdisciplinario, es decir, un enfoque que incluye múltiples disciplinas científicas (interdisciplinariedad) para abordar problemas en conjunto, considerando el aporte activo de profesionales fuera de la academia. En el mismo proceso de la transdisciplinariedad, se combina, interpreta, y comunica conocimiento de diversos puntos de vista, de tal manera que la totalidad de la red causa-efecto de un problema puede ser evaluada desde una perspectiva sinóptica, brindando valor agregado y que finalmente los resultados ofrecen información útil para los tomadores de decisiones a diferencia de las evaluaciones de una sola disciplina (Spangenberg, 2011). Además, esto proporciona soluciones que promueven la sostenibilidad ambiental, económica y social (Brandt et al., 2013; Dedeurwaerdere, 2014).



## 4.2. Agua y sus usos

---

El agua, además de ser una fuente importante de vida, también es fundamental en el desarrollo social, económico y ambiental en el mundo (Zhang et al., 2021). El agua no es solo esencial para mantener saludables a los ecosistemas y la biodiversidad, también es importante para actividades humanas donde se busca la calidad y cantidad apropiada para usarse en producción de energía o alimentos para consumo humano, propiciando la supervivencia elemental (López-Morales & Rodríguez-Tapia, 2019). Es por esto que, a pesar de que el agua presenta un serio desafío para el desarrollo sostenible, si se gestiona de manera eficiente y equitativa, puede desempeñar un papel clave en el fortalecimiento de la resiliencia de los sistemas sociales, económicos y ambientales, en dado caso de presentarse cambios rápidos e impredecibles (Postel, 2015).

En el caso de México, los volúmenes concesionados o asignados a los usuarios se registran en el Registro Público de Derechos de Agua (REPGA), donde estos se agrupan para usos consuntivos<sup>2</sup> (agrícola, abastecimiento público, industria autoabastecida y termoeléctricas) y no consuntivos (hidroeléctricas y conservación ecológica). La Tabla 1 muestra ambas categorías desglosadas con los sectores pertenecientes a cada una y, el volumen de agua concesionado (lado izquierdo); así como los usos agrupados consuntivos, el volumen concesionado y el porcentaje que representa dicho volumen (lado derecho) (CONAGUA, 2019).

El mayor volumen concesionado para usos consuntivos al 2018 lo representa en primer lugar el uso agrupado del sector agrícola, para el riego con 75.7 (Tabla 1 y Figura 1), en segundo lugar, el uso agrupado de abastecimiento público con 14.7% de volumen concesionado, lo que quiere decir que ambos usos agrupados representaban el 90.4% del volumen concesionado a nivel nacional en el 2018 (CONAGUA, 2019).

---

<sup>2</sup> Uso consuntivo: “El volumen de agua de una calidad determinada que se consume al llevar a cabo una actividad específica, el cual se determina como la diferencia del volumen de una calidad determinada que se extrae, menos el volumen de una calidad también determinada que se descarga, y que se señalan en el título respectivo” (Ley de Aguas Nacionales)

Tabla 1. Agrupación de usos de la clasificación del REPDA.

Clave	Rubro de clasificación del REPDA	Vol. concesionado (hm <sup>3</sup> )	Usos agrupados consuntivos	Definición	Vol. concesionado (hm <sup>3</sup> )	%
A	Agrícola (inscrito+pendiente)	59 950	Agrícola	A+D+G+I+L	67 264	75.7
B	Agroindustrial	4.16	Abastecimiento público	C+H	13 094	14.7
C	Doméstico	38				
D	Acuacultura	1 160	Industria autoabastecida	B+E+F1+K	4 335	4.9
E	Servicios	1 637				
F1	Industrial	2 694	Electricidad excluyendo hidroelectricidad	F2	4 147	4.7
F2	Termoeléctricas	4 147				
G	Pecuario	226	<b>Subtotal consuntivo</b>		<b>88 840</b>	<b>100.0</b>
H	Público Urbano	13 056	<b>Uso agrupado no consuntivo</b>			
I	Múltiples	5 927	Hidroeléctricas	J	182 504	
K	Comercio	0.08	Conservación Ecológica	N	9.46	
L	Otros	1				
<b>Subtotal consuntivo</b>		<b>88 840</b>	<b>Subtotal no consuntivo</b>		<b>182 513</b>	
J	Hidroeléctricas	182 504	<b>Total</b>		<b>271 353</b>	
N	Conservación Ecológica	9.46				
<b>Subtotal no consuntivo</b>		<b>182 513</b>				
<b>Total</b>		<b>271 353</b>				

Fuente: Elaborado con base en la Estadística del Agua en México (2019)

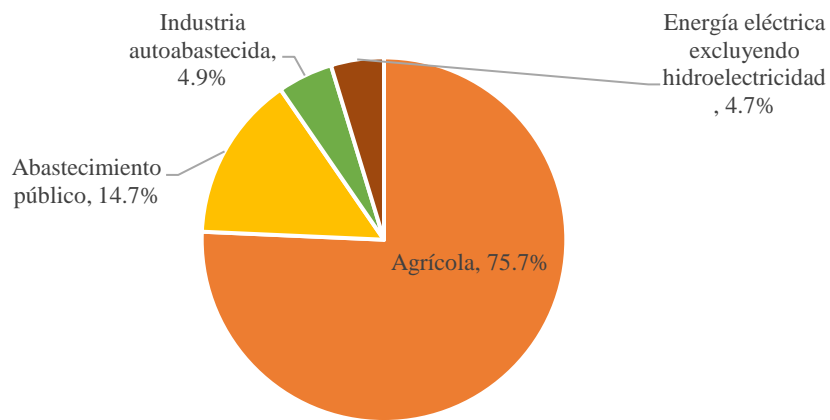


Figura 1. Distribución de volúmenes concesionados para usos agrupados consuntivos en el 2018.

Fuente: Elaborado con base en la Estadística del Agua en México (2019).

### 4.3. Fuentes de obtención del agua

El agua que se utiliza para los sectores antes presentados puede obtenerse de diferentes fuentes, ya sea por abastecimiento superficial o subterráneo. Por un lado, el agua superficial es aquella que se acumula en el suelo o en un arroyo, río, lago, embalse u océano (Katsanou & Karapanagioti, 2019). El volumen de agua depende principalmente de la cantidad de lluvia, el

tamaño de la cuenca, la pendiente del terreno, el tipo de suelo y vegetación, y el uso de la tierra. Las ventajas del uso de este tipo de fuente para abastecimiento de agua doméstica son muchas, una de ellas es que es fácil de extraer mediante un bombeo directo y puede tratarse después de su uso y devolverse a algún cuerpo de agua. Sin embargo, el agua superficial es estacional y siempre necesitará tratamiento (Katsanou & Karapanagioti, 2019).

Por otro lado, las aguas subterráneas son una gran fuente de agua potable en todo el mundo y se encuentran debajo de la corteza terrestre dentro de los acuíferos. La recarga hidrológica de los acuíferos varía geográficamente y depende, entre otros factores, del clima, geología, tipo de suelo, vegetación y uso de suelo. Esta fuente de agua se recarga de la precipitación, la cual es complementada por infiltración natural del agua superficial o por recargas artificiales. A escala global, el 20% de agua utilizada para los sistemas de riego y el 40% de agua utilizada en la industria, proviene del agua subterránea. En México, la importancia del agua subterránea se manifiesta en la magnitud del volumen utilizado por los principales usuarios, donde el 39.2% del volumen total concesionado para usos consuntivos procede de agua subterránea. Es por eso que, para fines de administración del agua subterránea, el país cuenta con 653 acuíferos, distribuidos en diferentes estados (Sonora, Guanajuato, Sinaloa, etc.), cuyos nombres oficiales se publicaron en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 5 de diciembre de 2001 (CONAGUA, 2019; Katsanou & Karapanagioti, 2019).

Generalmente, se prefiere el agua subterránea sobre el agua superficial para el abastecimiento del recurso, esto debido a que funciona como presa de almacenamiento, mejorador de la calidad y red de distribución, lo que hace posible extraer agua durante todo el año de prácticamente cualquier punto de la superficie del acuífero, además de que se encuentra, en la mayor parte de los casos, cerca del área que se abastece (o directamente debajo de la misma)(CONAGUA, 2019). De igual manera, se necesita de un tratamiento mínimo para alcanzar una calidad permitida en la NOM-127-SSA1-2021, *Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua*, ya que las capas de suelo funcionan como filtro contra contaminantes físico, químicos o biológicos, y es menos susceptible a las sequías y otras variaciones climáticas que enfrenta el agua superficial (Katsanou & Karapanagioti, 2019; Mahlkecht et al., 2015). Asimismo, se prefiere el agua subterránea por el tipo de inversiones que se hacen para el desarrollo de infraestructura para su extracción, donde se puede invertir

paulatinamente si se planea adecuadamente la inversión, lo que permite que se dé una creciente demanda privada, municipal e industrial con menos inversión y gastos de operación (Howard & Gelo, 2003).

#### **4.4. Sobreexplotación de acuíferos**

---

El desarrollo de recursos hídricos subterráneos ha contribuido significativamente al bienestar de muchos países, pero en las últimas décadas, se ha aumentado la preocupación sobre el impacto antropogénico que el desarrollo agrícola y la urbanización han tenido sobre el recurso. La calidad del agua subterránea se ha deteriorado debido a actividades humanas, además de que su extracción en exceso y sin control ha hecho que baje progresivamente el nivel freático en muchas ciudades, provocando el aumento del costo de extracción debido a la necesidad de perforar cada vez a más profundidad, al igual que un estrés hídrico que podría convertirse en escasez (Katsanou & Karapanagioti, 2019; Mahlknecht et al., 2015).

En México, existe un proceso de delimitación y estudio de los acuíferos para dar a conocer de manera oficial la disponibilidad media anual de éstos. La disponibilidad representa un indicador básico para la preservación del recurso a través de la administración de las aguas nacionales, esto mediante instrumentos de concesión o asignación de derechos para el uso de estas. Con esto, se delimitaron 408 acuíferos en condiciones de disponibilidad y 115 acuíferos sobreexplotados (CONAGUA, 2019), por lo que se vuelve un reto para los organismos operadores y el gobierno reducir la sobreexplotación de los acuíferos y que pasen a la categoría de disponibilidad.

#### **4.5. Escasez del agua**

---

La escasez del agua, vista por Aguilar y colaboradores (2021), es una condición donde la demanda de agua excede la disponibilidad de la misma. Por otro lado, Liu y colaboradores (2017) la describen como la condición donde la demanda de agua por todos los sectores, incluido el medio ambiente, no puede satisfacerse completamente debido al impacto del uso de agua en el suministro o la calidad del agua. Por lo tanto, la escasez del agua se puede definir como la falta de disponibilidad de agua necesaria para satisfacer la demanda o necesidades de los sectores, esto debido al impacto que hay sobre el uso y/o calidad del recurso.

Los recursos hídricos están cada vez más presionados en cantidad y calidad por el desarrollo demográfico, el crecimiento económico, el cambio alimenticio (hacia más productos animales) y el cambio climático, lo que probablemente conduzca a una grave crisis mundial del agua. Es por esto que uno de los desafíos mundiales más urgentes es contar con la disponibilidad en cantidades adecuadas de agua, para sostener la salud y bienestar de las personas y los ecosistemas en los que viven. Con el fin de abarcar este desafío, se necesita de una descripción más precisa de la escasez del agua para definir una métrica cuantitativa sólida, la cual mediría y evaluaría el progreso hacia la reducción de la escasez de agua e identificaría dónde y cuándo podría ocurrir la escasez de agua en el futuro (Damkjaer & Taylor, 2017; Liu et al., 2017a; Müller et al., 2020b). A continuación, se enlistan indicadores utilizados como métricas para medir de diferentes maneras la presencia de la escasez del agua en cualquier zona específica.

#### **4.5.1. Indicadores de escasez del agua**

---

Desde finales de 1980, cuando la escasez del agua empezó a convertirse en un problema, muchos indicadores se han ido desarrollando para facilitar la evaluación del estado de la escasez del agua alrededor del mundo (Liu et al., 2017a). A continuación, se presentan algunos de ellos que capturan diferentes características de la escasez del agua.

***Indicador de Falkenmark.*** Desarrollado en 1989, este marcador simple pero bastante utilizado para medir la escasez del agua requiere el número de personas viviendo dentro de un dominio espacial específico y el volumen de agua disponible dentro de ese dominio. El volumen de agua disponible por persona se calcula en  $\text{m}^3/\text{hab}/\text{año}$ . Se debe considerar que la cantidad de agua disponible en una región depende de la precipitación total, su temporalidad, los patrones estacionales de temperatura y radiación solar, y la topografía regional. Las regiones que cuentan con un valor de  $1,700 \text{ m}^3/\text{hab}/\text{año}$  se considera que presentan “estrés hídrico”, donde puede haber escasez con frecuencia (Liu et al., 2017b). Cuando la disponibilidad del agua cae debajo de  $1,000 \text{ m}^3/\text{hab}/\text{año}$ , entonces la región experimenta un alto estrés hídrico, por lo que las consecuencias pueden ser más severas y pueden conducir a problemas en la producción de alimentos y el desarrollo económico, a menos que la región pueda invertir en nuevas tecnologías para el uso, conservación y reúso del agua. Valores por debajo de los  $500 \text{ m}^3/\text{hab}/\text{año}$ , se considera que la región presenta una escasez absoluta. Una limitación de este indicador es que pasa por alto la

variabilidad temporal y los impulsores de la demanda, relacionados con el crecimiento económico, el estilo de vida y los avances tecnológicos (Liu et al., 2017a; Sistema Nacional de Información Ambiental y de Recursos Naturales, 2010).

***Intensidad de uso.*** Indicador que se utiliza ampliamente para medir la escasez del agua, también conocido como la relación entre el uso del agua y la disponibilidad. La ventaja de este indicador es que describe la relación entre la extracción total con respecto a los recursos hídricos renovables disponibles en la zona. Se utiliza como una medida de la vulnerabilidad del país frente a la escasez de agua. Basándose en esta relación, un alto grado de estrés hídrico ocurre cuando la extracción de agua excede un 40% de la disponibilidad del mismo recurso. Es importante señalar que parte del agua extraída regresa a los cuerpos de agua y que la proporción de este flujo puede variar entre las diferentes regiones dependiendo de sus condiciones naturales, socioeconómicas y tecnológicas, por lo que utilizar el 40% como umbral de escasez de agua puede ser inconsistente para reflejar el estado de escasez de agua en todas las regiones (Damkjaer & Taylor, 2017; Liu et al., 2017a; Sistema Nacional de Información Ambiental y de Recursos Naturales, 2010).

***Indicador 6.4.2 – Nivel de estrés hídrico: extracción de agua dulce en proporción a los recursos de agua dulce disponibles.*** Parecido al anterior, este indicador da como resultado la razón entre el total de agua dulce extraída por los principales sectores económicos y el total de recursos hídricos renovables, teniendo en cuenta las necesidades ambientales de agua. Este indicador pretende medir los progresos hacia la meta 6.4 de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), el cual busca

*“De aquí a 2030, aumentar considerablemente el uso eficiente de los recursos hídricos en todos los sectores y asegurar la sostenibilidad de la extracción y el abastecimiento de agua dulce para hacer frente a la escasez de agua y reducir considerablemente el número de personas que sufren falta de agua”* (Naciones Unidas, n.d.).

Con este fin, el indicador busca ampliar el conocimiento sobre la eficiencia y sostenibilidad del uso del agua, y asegurar que los recursos hídricos apoyen a los ecosistemas y sigan disponibles para generaciones futuras (FAO & UN Water, 2021).

**Acuíferos sobreexplotados y con problemas de salinización.** Cuando se extrae una proporción importante de los recursos hídricos subterráneos, se puede producir una disminución regional de los niveles de agua subterránea, además de ocasionar que haya pozos secos, mayores costos de extracción al aumentar la profundidad en el nivel freático y la superficie, hundimientos del terreno, intrusión salina y disminución del flujo en los ecosistemas dulceacuícolas. Este indicador pretende mostrar la magnitud del problema a través del número de casos en los que el mal manejo del acuífero ha resultado en su sobreexplotación, y además dar de manera indirecta información sobre el riesgo de abasto futuro de este recurso (Sistema Nacional de Información Ambiental y de Recursos Naturales, 2010).

Existen otros indicadores que no se describirán a profundidad, pero estudian otras variables específicas (ver Tabla 2).

Tabla 2. Indicadores adicionales de escasez del agua.

<b>Nombre de indicador</b>	<b>Medición</b>
Escasez de agua verde-azul	Se mide la relación de consumo y disponibilidad de agua azul (superficial y subterránea) y verde (aguas utilizadas para la producción agrícola) para determinar el nivel de estrés hídrico de la zona.
Medición basada en la huella hídrica	Magnitud que se determina por el agua que se utiliza para producir bienes y servicios para uso humano en una zona específica.
Escasez física y económica del agua. El indicador IWMI (International Water Management Institute por sus siglas en inglés)	Se toma en cuenta la proporción del suministro de agua, de un país en cuestión, procedente de recursos renovables de agua dulce disponible para las necesidades humanas, y al mismo tiempo toma en cuenta la infraestructura hídrica existente. Este índice considera el potencial de un país individual para desarrollar infraestructura hídrica y mejorar la eficiencia del uso del agua de riego.
Razón acumulativa de abstracción a demanda: considerando variaciones temporales	Considera que la escasez del agua en muchas áreas del mundo se presenta de manera estacional, donde en ciertos meses del año ocurre un estrés hídrico, pero puede haber suficiente agua para cubrir las necesidades anuales de la sociedad.

Fuente: Water scarcity assessments in the past, present, and future (Liu y colaboradores, 2017).

Para más información de los indicadores, se puede revisar el trabajo de Liu y colaboradores (2017).

## **4.6. Plantas de tratamiento de aguas residuales y reutilización del agua**

---

Las plantas de tratamiento han surgido a partir de la preocupación de abordar el tema de la escasez del agua y contaminación de ríos. A estas llegan aguas residuales, es decir, aguas contaminadas que se producen por diferentes actividades industriales y municipales, esto con el fin de remover contaminantes del agua para cumplir con normas y regulaciones de la calidad del agua. La meta de la gestión de aguas residuales es establecer medidas de protección ambiental, mientras que las preocupaciones económicas y sociales son tomadas en cuenta (Padrón-Páez et al., 2020).

Una de las preguntas principales que deben responderse antes de instalar o diseñar una planta de tratamiento de aguas residuales, está relacionada con el costo de la tecnología que mejor cumpla con las regulaciones ambientales del agua descargada, al igual que promueva el desarrollo de la comunidad y la aceptación pública (Padrón-Páez et al., 2020).

El agua puede ser reutilizada de muchas maneras y para diversos propósitos. Los reúsos más comunes son para el sector agrícola, industrial, riego de áreas verdes y agua potable. De manera general, es importante considerar la diferencia entre cada uno de los reúsos ya que tienen diferentes implicaciones en términos de salud humana y su regulación. A continuación, se detallan los distintos tipos de reuso de agua.

*Riego agrícola:* Para este tipo de reuso hay dos fuentes principales de agua que se pueden reutilizar, 1) agua regenerada de sitios industriales y, 2) efluentes municipales tratados, los cuales se pueden recuperar indirectamente extrayéndolo de un río que contiene efluentes de una planta de tratamiento de aguas residuales, o directamente por medio de un suministro no potable entubado de una planta de tratamiento de aguas residuales. La calidad de dichas aguas residuales puede variar de acuerdo con el desarrollo del país. De igual manera, el reuso en este sector puede ser restringido o irrestringido, esto basado en el crecimiento de los cultivos y la exposición que tenga el humano con los constituyentes del agua (O'Connor et al., 2008; Ryan, 2016).

*Uso industrial:* El sector industrial puede obtener agua para reutilización de diferentes formas, 1) recuperar agua industrial, tratarla para que llegue a un estándar apropiado y luego recircular a través del proceso industrial y, 2) recuperar efluentes tratados municipales de obras



de tratamiento de aguas residuales a gran escala para después desviarlos a sitios industriales para reemplazar el suministro principal o una extracción de agua subterránea. Se debe considerar que el agua a reutilizar debe contar con una calidad específica para cierto tipo de procesos, especialmente si aquellos tienen contacto directo con el agua (Ryan, 2016).

*Riego urbano:* La reutilización de agua puede dividirse en aplicaciones restrictas e irrestrictas. El reúso restricto incluye el riego de áreas donde el acceso público puede ser controlado, por ejemplo, un campo de golf, cementerio, etc. El reúso irrestricto incluye el riego en las áreas donde el acceso público no es controlado (parques, jardín de escuelas, residencias), al igual que la reutilización de agua para el inodoro de edificios comerciales o industriales, protección contra fuegos, construcción, fuentes, entre otros. En el caso de reutilizarse para regar jardín, se colocan letreros para informar a las personas que el agua no es potable y no se debe ingerir (O'Connor et al., 2008; Ryan, 2016).

*Uso doméstico no potable:* En este tipo de reúso, el agua es capturada, tratada, y usada para usos que no involucran su ingesta, como la descarga del inodoro, lavado de ropa y riego. Hay varios tipos de fuentes no potables, entre ellas la recolección de agua de lluvia doméstica *in situ* o el reciclaje de aguas grises, o la distribución de un efluente tratado de una planta de tratamiento centralizada a través de una red de suministro secundaria. Este tipo de reúso busca reducir el volumen utilizado de agua dulce para disminuir la presión sobre el medio ambiente (EPA, 2022; Ryan, 2016).

*Mejora ambiental:* Las extracciones de agua de una cuenca de captación puede afectar los flujos y los niveles en los humedales. En lugar de reducir esas extracciones y encontrar fuentes alternativas de agua para el suministro, puede resultar más efectivo el apoyar al humedal mismo utilizando efluentes tratados apropiadamente. Con esto se busca la mejora y restauración de humedales, la creación de humedales para hábitat y refugio de vida silvestre y el aumento de corrientes (O'Connor et al., 2008; Ryan, 2016).

*Agua potable:* este tipo de reúso se divide en dos categorías:

- Reúso potable indirecto: En este caso, el agua será tratada y conducida hacia un amortiguador ambiental para su posterior uso como agua potable. Por ejemplo, las aguas pluviales o residuales se dirigen primero a una planta de tratamiento de

aguas residuales, una vez tratada, se dirige a una zona de amortiguamiento ambiental, como un lago, un río o un acuífero subterráneo que se utiliza como fuente de agua potable. Finalmente, el agua se trata en una planta potabilizadora y se dirige al sistema de distribución de agua potable (AECOM, 2009; EPA, 2022).

- Reúso potable directo: En este reúso, el agua será tratada y utilizada para potabilización sin un amortiguamiento ambiental. En este sistema, las aguas residuales se tratan a niveles más altos que en las plantas convencionales de agua residual (de preferencia doméstico) y luego se introducen, ya sea a una planta de potabilización para su posterior tratamiento, en el sistema de distribución de suministro de agua potable río abajo de una planta de tratamiento de agua, o en el suministro de agua sin tratar río arriba de una planta de tratamiento de agua y suele combinarse con agua potable proveniente del acuífero. Este es el tipo de escenario de reutilización de agua potable más polémico, ya que no existe un amortiguador ambiental ni una dilución externa (AECOM, 2009; EPA, 2022; Ryan, 2016).

La reutilización del agua o el uso de agua residual tratada para diversos fines se discute ampliamente como otro medio para aumentar la disponibilidad de agua en diversos rangos de calidad, teniendo como finalidad la reducción de extracciones de agua dulce para “aliviar” la escasez de agua. Este remedio para resolver una parte de la problemática de la escasez del agua no es el único, existen otras alternativas como la desalinización, transferencia de agua entre cuencas y restricciones de extracción de agua. Sin embargo, la implementación de reutilización de agua ha crecido en regiones que se enfrentan a la escasez del agua (Müller et al., 2020).

En los últimos años, el reúso de aguas residuales está ganando interés en diferentes regiones del país, especialmente en el norte y principalmente para actividades de agricultura, pero la infraestructura hídrica no incluye sistemas de reúso y las iniciativas para expandir la aplicación de esta alternativa son aún muy bajas. Esta situación implica retos importantes que deben ser abarcados de manera colaborativa entre el gobierno, la industria, la academia y la sociedad (Ramos et al., 2019).

## 4.7. Marco legal

---

Con el fin de priorizar el manejo sostenible y mejorar la gestión de los recursos hídricos considerando que estos se deben preservar en calidad y cantidad, en México varios marcos legales que respaldan diferentes aspectos relacionados al agua. A continuación, se hará una breve mención de las legislaciones referentes al agua con un enfoque en el acceso, la reutilización, y la calidad de esta.

### *Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos*

**Artículo 4.** “Toda persona tiene derecho al acceso, disposición y saneamiento de agua para consumo personal y doméstico en forma suficiente, salubre, aceptable y asequible.”

### *Ley de Aguas Nacionales*

**Artículo 9 – XXX.** “La Comisión Nacional del Agua, deberá promover y propiciar la investigación científica y el desarrollo tecnológico, la formación de recursos humanos, así como difundir conocimientos en materia de gestión de los recursos hídricos, con el propósito de fortalecer sus acciones y mejorar la calidad de sus servicios, para lo cual se coordinará en lo conducente con el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.”

**Artículo 14 BIS.** “La Comisión Nacional del Agua, conjuntamente con los Gobiernos de los estados, del Distrito Federal y de los municipios, los organismos de cuenca, los consejos de cuenca y el Consejo Consultivo del Agua, promoverá y facilitará la participación de la sociedad en la planeación, toma de decisiones, ejecución, evaluación y vigilancia de la política nacional hídrica.”

**Artículo 14 BIS 3.** “El Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (...) tiene por objeto (...) realizar investigación, desarrollar, adaptar y transferir tecnología, prestar servicios tecnológicos y preparar recursos humanos calificados para el manejo, conservación y rehabilitación del agua y su entorno, a fin de contribuir al desarrollo sustentable.”

### **Artículo 14 BIS 5**

**I.** “El agua es un bien de dominio público federal, vital, vulnerable y finito, con valor social, económico y ambiental, cuya preservación en cantidad y calidad y sustentabilidad es tarea fundamental del Estado y la Sociedad, así como prioridad y asunto de seguridad nacional.”

**IX.** “La conservación, preservación, protección y restauración del agua en cantidad y calidad es asunto de seguridad nacional, por tanto, debe evitarse el aprovechamiento no sustentable y los efectos ecológicos adversos.”

**XII.** “El aprovechamiento del agua debe realizarse con eficiencia y debe promoverse su reúso y recirculación.”

**XX.** “La participación informada y responsable de la sociedad, es la base para la mejor gestión de los recursos hídricos y particularmente para su conservación; por tanto, es esencial la educación ambiental, especialmente en materia de agua.”

**Artículo 44.** “Corresponde al municipio (...) el tratamiento de las aguas residuales de uso público urbano, previa a su descarga a cuerpos receptores de propiedad nacional, conforme a las Normas Oficiales Mexicanas respectivas o a las condiciones particulares de descarga que les determine "la Autoridad del Agua".”

**Artículo 47 BIS.** “"La Autoridad del Agua" promoverá entre los sectores público, privado y social, el uso eficiente del agua en las poblaciones y centros urbanos, el mejoramiento en la administración de agua en los sistemas respectivos, y las acciones de manejo, preservación, conservación, reúso y restauración de las aguas residuales.”

**Artículo 84 BIS.** “"La Comisión", con el concurso de los Organismos de Cuenca, deberá promover entre la población, autoridades y medios de comunicación, la cultura del agua acorde con la realidad del país y sus regiones hidrológicas”

**I.** “Coordinarse con las autoridades Educativas en los órdenes federales y estatales para incorporar en los programas de estudio de todos los niveles educativos los conceptos de cultura del agua, en particular, sobre disponibilidad del recurso; su valor económico, social y ambiental; uso eficiente; necesidades y ventajas del tratamiento y reúso de las aguas residuales; la conservación del

agua y su entorno; el pago por la prestación de servicios de agua en los medios rural y urbano y de derechos por extracción, descarga y servicios ambientales.”

**IV.** “Proporcionar información sobre efectos adversos de la contaminación, así como la necesidad y ventajas de tratar y reusar las aguas residuales.”

*Ley General de Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente*

**Artículo 92.** “Con el propósito de asegurar la disponibilidad del agua y abatir los niveles de desperdicio, las autoridades competentes promoverán el ahorro y uso eficiente del agua, el tratamiento de aguas residuales y su reúso.”

**Artículo 117.**

**I.** “La prevención y control de la contaminación del agua, es fundamental para evitar que se reduzca su disponibilidad y para proteger los ecosistemas del país.”

**IV.** “Las aguas residuales de origen urbano deben recibir tratamiento previo a su descarga en ríos, cuencas, vasos, aguas marinas y demás depósitos o corrientes de agua, incluyendo las aguas del subsuelo.”

**Artículo 121.** “No podrán descargarse o infiltrarse en cualquier cuerpo o corriente de agua o en el suelo o subsuelo, aguas residuales que contengan contaminantes, sin previo tratamiento y el permiso o autorización (...).”

Entre las NORMAS Oficiales Mexicanas en materia de calidad para abastecimiento público y reúso de agua, y aguas residuales se enlistan las siguientes:

**NOM-001-SEMARNAT-2021.** “Que establece los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación”.

**NOM-003-SEMARNAT-1997.** “Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público”.

**NOM-014-CONAGUA-2003.** “Requisitos para la recarga artificial de acuíferos con agua residual tratada”.

**NOM-127- SSA1-2021.** “Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua”.

**NOM-179-SSA1-1998.** “Vigilancia y evaluación del control de calidad del agua para uso y consumo humano, distribuida por sistemas de abastecimiento público”.

**NOM-230- SSA1-2002.** “Agua para uso y consumo humano, requisitos sanitarios que se deben cumplir en los sistemas de abastecimiento públicos y privados durante el manejo del agua”.

#### *Iniciativa Ciudadana de Ley General de Aguas*

La Iniciativa Ciudadana de Ley General de Aguas (ICLGA) (Monroy Hermsillo, 2020), se presenta como muestra de la voluntad ciudadana y de los pueblos indígenas de asumir su lugar al lado de los gobiernos para enfrentar conjuntamente las graves crisis del agua generadas por una política hídrica fallida. En esta, se establece que la resolución de las crisis del agua dependerá de la construcción de instancias participativas que consensarán los planes y las recomendaciones requeridos para lograr la transición hacia el acceso equitativo y sustentable al agua, en un marco de respeto por los derechos humanos y de los pueblos indígenas.

De igual manera, se menciona que solo a través de la democratización de las instancias de toma de decisión sobre el agua se podrá lograr que la política hídrica se base en el bien común. Es por lo anterior que la ICLGA dedica atención a la construcción, composición y funcionamiento de las instancias en donde se consensarían los planes y recomendaciones para las aguas y cuencas y para los sistemas de agua y saneamiento. Por otro lado, la ICLGA busca como objeto establecer las bases para la participación ciudadana, de los pueblos y de los gobiernos para el manejo de las aguas y de las cuencas de una manera que permita cumplir con el derecho humano y de los pueblos indígenas al agua de sus territorios y a los derechos asociados con ella, garantizando a la vez la soberanía de los ciudadanos.

Los artículos y normas aquí citadas sobre temas relacionados con la calidad del agua para el abastecimiento público, la reutilización del agua como medio para asegurar una disponibilidad de agua futura, la calidad y disposición que deben tener las aguas residuales para su posterior uso, y el involucramiento de la ciudadanía en los temas del agua, muestran el interés que se tiene en acciones que ayuden a una mejor gestión y mayor disponibilidad del recurso hídrico. De igual manera, se promueve la sensibilización y concientización en los mexicanos sobre el riesgo de un desabastecimiento de agua si se sigue con las actividades que afectan al agua, por lo que se propone su participación en la gestión del recurso para fomentar su conservación.

No obstante, a pesar de la existencia de numerosas normas y artículos destinados a la protección del medio ambiente, en la realidad, muchos de estos principios quedan meramente en el papel y no se cumplen de manera efectiva. Esto se debe posiblemente a que, para muchas empresas, resulta más conveniente pagar una sanción económica que realizar modificaciones en sus procesos que requerirían una inversión sustancial. Esta situación se ha evidenciado en diversas noticias que denuncian el incumplimiento generalizado de la normativa ambiental en México. Un ejemplo es el informe de la Procuraduría Ambiental y de Ordenamiento Territorial (PAOT), que reveló que el año pasado se impusieron 113 multas a empresas establecidas en Guanajuato y se clausuraron 66 empresas por no cumplir con las regulaciones ambientales (Vázquez, 2023).

Esta falta de cumplimiento pone de manifiesto la necesidad de no solo establecer legislaciones más rigurosas, sino también de involucrar a la ciudadanía en acciones concretas para garantizar la aplicación efectiva de dichas normas. Es fundamental que los habitantes se conviertan en actores comprometidos en la regulación del cumplimiento de las normas ambientales y que ejerzan presión sobre el gobierno para que se apliquen sanciones más severas a aquellos que no cumplan con las reglas establecidas. La participación ciudadana adquiere un papel relevante en la protección del medio ambiente, ya que puede contribuir a crear una cultura de respeto hacia las regulaciones ambientales y fomentar una mayor responsabilidad social en las empresas y ciudadanos. Al impulsar una mayor conciencia y compromiso con el cuidado del entorno, se puede avanzar hacia una gestión ambiental más eficiente y sostenible, en beneficio de las generaciones presentes y futuras.

## **4.8. Organismo operador: SAPAL**

---

El Sistema de Agua Potable y Alcantarillado de León (SAPAL) creado en 1985, es un organismo público descentralizado de la administración municipal, con personalidad jurídica y patrimonio propio. Los objetivos reglamentarios de SAPAL son prestar los servicios públicos domiciliarios de agua potable, alcantarillado sanitario y aprovechamiento de las aguas residuales tratadas a la población urbana de León, donde se incluye la revisión de proyectos hidráulicos, drenaje pluvial, limpieza y custodia de arroyos, cuidado del medio ambiente y protección de acuíferos, entre otros (SAPAL, 2012).

Como parte de su misión, SAPAL busca “brindar los servicios de agua potable, saneamiento y aprovechamiento del agua tratada a la población urbana de León, siendo un organismo con capacidad técnica y financiera que garantice los servicios con calidad, oportunidad y sostenibilidad, y contribuya a sus expectativas de salud y desarrollo, dentro del marco legal y normativo, con respeto al medio ambiente, buscando permanentemente la máxima eficiencia”. Con el fin de garantizar un futuro con agua para la ciudad de León, el Consejo Directivo de SAPAL ha asumido las siguientes responsabilidades:

1. Identificar y desarrollar nuevas fuentes de agua, confiables y de buena calidad, que tengan la capacidad de cubrir necesidades presentes y futuras de la sociedad leonesa.
2. Velar porque los leoneses cuenten con agua todos los días.
3. Contribuir a conservar el ambiente, tratando el 100% de sus aguas residuales y propiciando su reúso.
4. Promover una cultura del agua para contribuir al desarrollo sostenible de León.
5. Propiciar innovación tecnológica en la prestación de los servicios.
6. Brindar un servicio de calidad, atendiendo reportes en tiempo y forma.

Desde el 2008, SAPAL contaba con proyectos de reutilización de agua tratada en las industrias curtidoras, encontrando como beneficios la seguridad de la viabilidad y responsabilidad ecológica de dicha industria, cumplimiento de la normativa, solución a una problemática de índole social, económica y ambiental, abatimiento de los costos dentro de la industria, abasto garantizado, y calidad del agua constante (SAPAL, 2012). Por lo anterior, actualmente SAPAL es miembro de la asociación *WaterReuse*, que promueve leyes, políticas,



financiamiento y aceptación pública del agua reciclada. Con esto, el organismo operador busca intercambiar conocimientos y proyectos del tratamiento de agua residual con otros expertos, además de poder acceder a precios preferenciales de maquinaria e infraestructura (SAPAL, 2022b).

Por el momento, SAPAL habilita puntos de recarga para pipas e informa las zonas donde se puede contratar el servicio domiciliado de agua tratada para procesos industriales, de construcción y riego de áreas verdes. Adicionalmente, el agua tratada en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Municipal es destinada a diferentes usos, entre ellos se rebombee a ejidatarios para su uso en el riego agrícola, en temporadas de lluvias los excedentes se vierten al río de Los Gómez, apoyando al saneamiento del Río Turbio y al reúso en procesos de curtido (SAPAL, 2020).

## 5. ANTECEDENTES

---

Se llevó a cabo una revisión bibliográfica en las plataformas de bases de datos *Web of Science* y *EBSCOhost* empleando palabras claves como *water scarcity*, *wastewater reuse*, *sustainability assesment*, *social acceptance of wastewater reuse* y *México*. La búsqueda se ejecutó tanto con palabras clave individuales como en combinaciones, con el propósito de encontrar estudios más especializados y pertinentes al tema de investigación. Además, se limitó la consideración a trabajos realizados a partir del año 2017 para asegurar la obtención de información actualizada. Como resultado se obtuvieron trabajos relacionados con opciones para localizar y medir la escasez del agua, reutilización de aguas residuales tratadas como medio para afrontar la escasez del agua y percepción social respecto a la escasez y reúso de agua. A continuación, se mencionan los que resultaron ser más relevantes.

Liu y colaboradores (2017) presentan una variedad de indicadores que se han desarrollado para reconocer diferentes características de la escasez del agua. Destacan elementos clave de estos indicadores como la población, disponibilidad del agua y uso del agua. Mencionan que la mayoría de los progresos que se han hecho en las últimas décadas se basan en la cuantificación de agua disponible y su uso aplicando modelos espaciales explícitos. Sin embargo, resaltan que hay un reto en la incorporación de más elementos para la medición de la escasez del agua, entre ellos el agua verde, calidad del agua, requisitos de flujo ambiental, globalización y agua virtual. Los autores concluyen que existen limitaciones sobre la utilidad de los indicadores dada la complejidad de los retos de la gestión del agua. En consecuencia, proponen fomentar la investigación interdisciplinar o transdisciplinar en los estudios sobre la escasez del agua, lo que permitirá establecer marcos conceptuales claros y, como resultado, mejorar la comprensión de los sistemas hídricos. Este trabajo contribuye para hacer comparaciones de escasez del agua entre diferentes regiones del mundo utilizando los indicadores propuestos en el trabajo, además de resaltar la relevancia de abordar esta problemática a través de enfoques interdisciplinarios o transdisciplinarios para lograr una comprensión más completa.

Referente a la percepción social sobre la escasez del agua, el estudio realizado por Cauberghe y colaboradores (2021) examina la percepción de los individuos sobre el valor del agua para explorar cómo éstas se relacionan con los comportamientos de conservación hídrica. A través de encuestas que realizaron en un país de Europa Occidental (país anónimo), encontraron

que el valor del agua podría activar un sentido de obligación moral de las personas (a través de una mediación de las preocupaciones de la escasez del agua), la cual estará relacionada positivamente con el comportamiento de conservación del agua. El objetivo de su estudio es identificar maneras en las que se pueda dirigir el comportamiento de conservación del agua, esto en función de los valores intrínsecos y personales que los consumidores le atribuyen al recurso hídrico. Además, sus resultados buscan proporcionar una visión más profunda de la dinámica de cómo se puede promover la conservación del agua en países con percepciones de alta disponibilidad de agua, ya que encontraron que las mujeres mayores y las personas con menor nivel de educación percibieron una alta singularidad del agua, es decir, que la perciben como escasa y le dan un mayor valor y cuidado. Por otro lado, obtuvieron que cuando las personas se acercan al agua como “una mercancía”, es probable que la necesidad de conservarla se mantenga baja. En este sentido, las preocupaciones respecto a la escasez del agua aumentan cuando los consumidores le dan más significado al agua, lo que influye en la obligación moral de conservarla.

En el trabajo realizado por Mautner y colaboradores (2020) utilizan un enfoque de análisis multiobjetivo para evaluar el desempeño de alternativas de manejo de acuíferos distribuidas espacialmente para el área metropolitana de la Ciudad de México. Los autores evaluaron alternativas de recarga usando un modelo de agua subterránea con base física que incorpora las tendencias de uso de la tierra y el agua, e incluye: reparaciones a la red de distribución de suministro de agua, mayor tratamiento e infiltración de aguas residuales y mayor infiltración de suministros de agua importada. Sus resultados indican que las alternativas de gestión mejoran el almacenamiento y la extracción de agua subterránea. Además, la combinación de múltiples alternativas da como resultado un riesgo de inundación de aguas subterráneas, lo que demuestra la necesidad de mitigar el aumento de los niveles freáticos. Los autores facilitan un modelo que servirá para futuros estudios y que tendrá una amplia aplicabilidad en otras regiones que se urbanizan rápidamente y que dependen del suministro de agua subterránea.

En un estudio realizado por los autores Seguí Amórtegui y colaboradores (2019), se menciona que muchos países (Japón, Estados Unidos, Australia, Israel, entre otros) realizan diferentes tipos de regeneración y reutilización de aguas residuales, especialmente aquellos industrializados, los cuales han desarrollado numerosos proyectos e investigaciones para la

regeneración y reúso de aguas residuales, satisfaciendo demandas específicas de agua y obteniendo beneficios adicionales de protección ambiental y prevención de riesgos para la salud. Por otro lado, los países subdesarrollados, como México, también necesitan cubrir estos aspectos, sin embargo, debido a deficiencias económicas y tecnológicas, se requiere el uso de sistemas eficientes de menor costo y sofisticación. Los autores proponen un modelo de manejo de agua reciclada para asegurar un suministro continuo de agua desde la perspectiva técnica, sanitaria, económica, legal y ambiental para preservar la calidad y aumentar el stock del recurso en la región. En este, se considera utilizar un acuífero como almacenamiento, permitiendo la producción durante todo el año, incluso en aquellas épocas donde no hay demanda de agua por parte de los usuarios. Además, presentan algunos argumentos básicos (técnica, legal, sanitaria, ambiental, social y económica) con los que normalizan la recarga de acuíferos con aguas residuales o regeneradas. Los autores concluyen que, dentro de una gestión integrada del agua, los resultados de estos estudios abren la posibilidad de incrementar el recurso del agua en México.

El trabajo de Lefebvre (2018) examina la implementación del reúso indirecto de agua potable en Singapur durante los últimos 15 años. El autor detalla las estrategias empleadas por *NEWater* (marca del agua regenerada) para satisfacer aproximadamente el 30% de la demanda total de agua en el país. Se destaca la relevancia de la aceptación social en el éxito de este programa, lograda a través de una narrativa positiva que relaciona la reutilización del agua con la seguridad hídrica y las preocupaciones ambientales, convirtiendo el reciclaje del agua en un imperativo social. Además, se mencionan los avances tecnológicos que se están considerando para mejorar la eficiencia y reducir los costos energéticos de las plantas, como la integración de membranas, procesos de oxidación avanzada y métodos electroquímicos. Aunque actualmente una parte del agua de dichas plantas es destinada a las industrias y el resto se lleva a las reservas para su remineralización y uso potable indirecto, *NEWater* busca desarrollar un biorreactor de membrana para mejorar la calidad de sus efluentes. También busca la manera de lograr un reúso directo del agua y que ésta sea un componente en la economía circular del país.

Ramos y colaboradores (2019) presenta una evaluación de tres aplicaciones potenciales para las aguas tratadas municipales en una región semiárida al norte de México (Saltillo y Ramos Arizpe, Coahuila, México). Los autores resaltan los beneficios y riesgos que implica la

reutilización de aguas residuales tratadas, entre los beneficios están: reducir a la par el estrés en los cuerpos de agua y la contaminación de agua dulce, incrementar la disponibilidad de agua para uso urbano, mejorar la economía por el precio del reúso de agua, entre otros. Por el lado de los riesgos, se presentan la acumulación de contaminantes químicos y biológicos en el suelo, procesos de tratado más complejos, entre otros. De igual manera, se destaca el reciente interés de implementar el reúso de aguas residuales tratadas en México, especialmente en el norte para actividades agrícolas. En sus resultados, donde evaluaron la aplicación del reúso de aguas tratadas en la agricultura, la industria y el riego de áreas verdes urbanas, encontraron que es posible ofrecer 1100 L/s de aguas residuales tratadas a diferentes aplicaciones, los cuales se repartirían 150 L/s a las industrias, 980 L/s a las actividades agrícolas, y 70 L/s para riego de áreas verdes urbanas. De igual manera, los autores identificaron beneficios, alternativas y limitantes en la evaluación. Con este trabajo, los autores consideran posible mejorar las condiciones ambientales y sociales de la zona de estudio.

Respecto a la aceptación social del reúso de agua residual tratada, el trabajo realizado por Baawain y colaboradores (2020) llevó a cabo una encuesta en Muscat, Oman donde se recolectaron opiniones y percepciones de sus habitantes para entender de mejor manera su disposición hacia la reutilización de aguas residuales tratadas. El objetivo de la encuesta fue determinar el conocimiento que tenían diferentes actores (ingenieros, estudiantes, técnicos, médicos, empleados y otros) respecto al reúso de aguas residuales, agua recuperada, y preocupaciones relacionadas a los riesgos de ambas. En sus resultados encontraron una falta de conocimiento en ciertos temas que afectan la percepción y la actitud del público hacia el tratamiento y la reutilización de aguas residuales, por lo que los autores mencionan la necesidad de un mayor esfuerzo para difundir conocimiento a los residentes, ya que el éxito de cualquier proyecto relacionado al reúso de agua está directamente asociado a la aceptación y conocimiento público. Por otro lado, también identificaron que las personas pueden tener una menor disposición al reúso de agua si está directa o indirectamente relacionada al ser humano debido a la presencia de patógenos y/o materiales tóxicos en el agua, así como su preocupación sobre la seguridad de reutilizar agua tratada y el desconocimiento de los efectos en la salud a largo plazo.

Noyola Robles (2020) realizó un análisis donde considera apoyos financieros, administrativos y tecnológicos, además de la aceptación social, para mejorar las estrategias de

gestión del tratamiento y reúso del agua residual municipal en México. En primer lugar, menciona la importancia de fortalecer a los organismos operadores de agua en el país para que realmente se pueda avanzar en la cobertura de acceso al agua y saneamiento. Además, propone que las plantas de tratamiento modernas deben ser planeadas y diseñadas de manera sustentable, es decir, que puedan ahorrar, reducir y optimizar el uso de insumos, reciclar, e integrar los flujos de materia y energía. Con lo anterior, el autor menciona el incremento de la rentabilidad del servicio que, junto con el pago de los usuarios, permitirá que el organismo operador mantenga la infraestructura, así como la ampliación del servicio, asegurando calidad y cantidad en el suministro. En conclusión, el autor establece cuatro elementos para lograr que un sistema de reúso sea exitoso: a) la integración de un tren de tratamiento capaz de lograr la calidad de agua deseada con los menores costos; b) la rentabilidad del servicio mediante una estructura de tarifas que recupere el costo real del servicio de tratamiento y suministro de agua tratada; c) la aceptación y apropiación del sistema por parte del usuario o de la sociedad involucrada; y d) contribuir a la sustentabilidad hídrica de la región donde se implemente esta alternativa.

Un antecedente directo del proyecto que se está evaluando en esta investigación es el análisis del comportamiento de los contaminantes dentro de la presa “El Palote”<sup>3</sup>, que será el cuerpo receptor de aguas tratadas. Este análisis se realizó mediante una modelación presentada en la Figura 2, la cual fue hecha por SAPAL con el objetivo de mostrar la dispersión del indicador de materia orgánica mediante la demanda bioquímica de oxígeno (DBO<sub>5</sub>) cuando es introducido a la Presa “El Palote”. Para establecer los valores que se utilizarían en la modelación, se basaron en la escala de clasificación de calidad de agua superficial en base a la DBO<sub>5</sub> expedida por la Gerencia de Calidad de Agua de la Subdirección General Técnica de la Comisión Nacional del agua, la cual se muestra en la Figura 3. La selección de DBO<sub>5</sub> se debió a que, en el momento de la simulación, la demanda química de oxígeno (DQO) no estaba incluida como parámetro normado por la NOM-001-SEMARNAT-1996. En cuanto a los sólidos suspendidos totales (SST), el valor de 40 mg/L establecido por la norma para la descarga los clasificaba como "Agua de buena calidad", lo que implicaba un criterio menos riguroso. Por el contrario, la DBO<sub>5</sub> presentaba un límite más estricto, fijado en 30 mg/L para la descarga, lo que la ubicaba en la categoría de "Agua aceptable", siendo el parámetro más representativo de la calidad del agua.

---

<sup>3</sup> Información confidencial proporcionada por SAPAL

Para este caso, se seleccionó la condición más desfavorable, en donde la calidad del embalse sea la mejor posible de acuerdo con esta clasificación ( $DBO_5 = 3\text{mg/l}$ ) y la calidad de la descarga sea la peor posible ( $DBO_5 = 30\text{ mg/l}$ ) de acuerdo a la norma de descarga. Los valores de calidad de agua se representan por medio de colores para observar gráficamente el flujo y la dispersión de este a lo largo del tiempo al interior del cuerpo de agua.

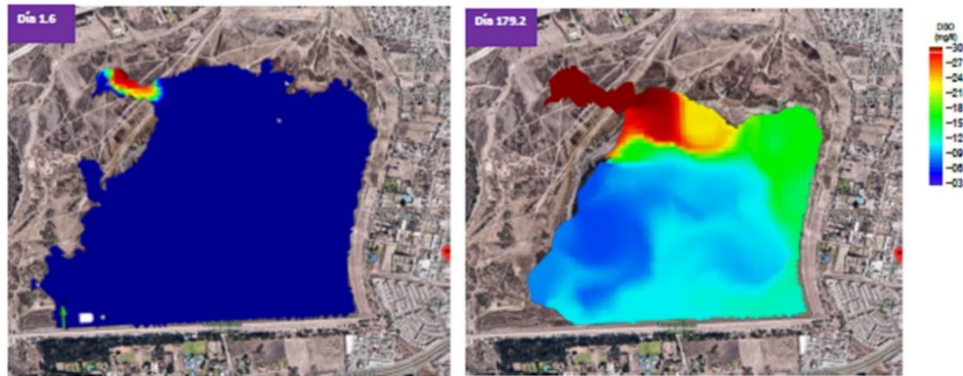


Figura 2. Modelación de la dispersión de  $DBO_5$  en la Presa El Palote ( $101^\circ 41' 18''$  oeste,  $21^\circ 10' 50''$  norte) al día uno (izquierda) y después de 6 meses (derecha).

Zona de potabilización	Criterio (mg/l)	Clasificación	Color
	$DBO_5 \leq 3$	<b>EXCELENTE</b> No contaminada	<b>AZUL</b>
	$3 \leq DBO_5 \leq 6$	<b>BUENA CALIDAD</b> Aguas superficiales con bajo contenido de materia orgánica biodegradable	<b>VERDE</b>
	$6 \leq DBO_5 \leq 30$	<b>ACEPTABLE</b> Con indicio de contaminación. Aguas superficiales con capacidad de autodepuración o con descargas de aguas residuales tratadas biológicamente.	<b>AMARILLO</b>
	$30 \leq DBO_5 \leq 120$	<b>CONTAMINADA</b> Aguas superficiales con descargas de aguas residuales crudas, principalmente de origen municipal	<b>NARANJA</b>
	$DBO_5 > 120$	<b>FUERTEMENTE CONTAMINADA</b> Aguas superficiales con fuerte impacto de descargas de aguas residuales crudas municipales y no municipales	<b>ROJO</b>

Figura 3. Escala de clasificación de calidad de agua superficial en base a la  $DBO_5$  expedida por la Gerencia de Calidad de Agua de la Subdirección General Técnica de la Comisión Nacional del Agua.

Después de 6 meses, se observa que la dispersión de  $DBO_5$  se da sobre todo el embalse y que su concentración es variable respecto al punto de entrada del mismo. Algo a resaltar es que la concentración de  $DBO_5$  en la zona de toma de agua para la Planta Potabilizadora El Palote (PPEP) es de alrededor de  $12\text{ mg/L}$ , por lo que se encuentra dentro del criterio aceptable de acuerdo a la escala de clasificación de las aguas superficiales para el uso siguiente que se le dará al agua. Teniendo esta modelación, se podría prever como los contaminantes se distribuirían alrededor de la presa y cómo afectarían la calidad del agua que es tomada para el proceso de

potabilización. De igual manera, este estudio también es de utilidad para saber cuál de las entradas de agua que abastecen a la presa se tendría que considerar para la entrada de agua tratada, debido a que la concentración de contaminantes debe de ser lo menor posible cerca de la toma de la PPEP.



## 6. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

---

En la actualidad, el agua que abastece a la ciudad de León, Guanajuato proviene de dos fuentes: 2.41% de la presa El Palote y 97.59% de aguas subterráneas, donde el acuífero Valle de León es la principal fuente de abastecimiento (SAPAL, 2021). La Tabla 3 muestra el volumen de agua extraída para diferentes usos en el 2020 en la ciudad de León (CONAGUA, 2020).

Tabla 3. Volumen de agua extraída del acuífero Valle de León para diferentes usos en León, Guanajuato.

Tipo	m <sup>3</sup>	Porcentaje
Agrícola	83,562,511	53.16%
Agroindustrial	31,000	0.02%
Diferentes usos	3,176,243	2.02%
Doméstico	29,681	0.02%
Industrial	4,621,906	2.94%
Pecuario	2,170	0.001%
Público urbano	63,152,302	40.18%
Servicios	2,614,308	1.66%
<b>Total</b>	<b>157,190,121</b>	<b>100%</b>

Debido a esta demanda de agua por parte del sector agrícola, el uso público urbano, industrial y otros, el acuífero Valle de León presenta una elevada presión hídrica, especialmente debido al uso del papel de la curtiduría, la fabricación de zapato y artículos de piel (Caldera Ortega & Tagle Zamora, 2020). La difícil situación que ha provocado la sobreexplotación del acuífero es el resultado de un mayor volumen de extracción de agua del subsuelo con respecto a la cantidad que se infiltra. Al año, el acuífero Valle de León se recarga con cerca de 124.5 millones de metros cúbicos, tanto de forma natural como incidental, y se extraen 176.38 millones en el mismo lapso. Esto resulta en un déficit de 54.88 millones de metros cúbicos de agua al año, según lo registrado a principios del 2020 por la CONAGUA (Subdirección General Técnica & Gerencia de Aguas Subterráneas, 2020).

Considerando que 157.19 m<sup>3</sup> de agua son extraídos del acuífero Valle de León para abastecer la ciudad de León, el consumo de dicha ciudad representa aproximadamente un 89.12% de la extracción total que tiene el acuífero anualmente. Todo lo anterior refleja la necesidad de adoptar medidas urgentes que reduzcan la sobreexplotación del acuífero Valle de León, esto con

la finalidad de aumentar la disponibilidad de agua para consumo humano y mejorar la calidad de vida de los habitantes de la ciudad de León, al igual que promover una utilización del recurso más eficiente y que la propuesta sea responsable con el medio ambiente.

Entre estas medidas, la reutilización del agua se presenta como una opción altamente beneficiosa. En la actualidad, la ciudad de León cuenta con programas que promueven el reúso de agua tratada en sectores como la agricultura, la industria y el riego de áreas verdes. No obstante, dado el continuo crecimiento de la ciudad, resulta igualmente necesario fomentar el reúso del agua en los hogares. Por lo tanto, la evaluación de sostenibilidad de este proyecto busca determinar la viabilidad de llevar agua tratada desde la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de las Joyas a la presa El Palote, someterla al proceso de potabilización y hacerla apta para su uso en los hogares. Esta evaluación constituye un primer paso fundamental en el camino hacia una mayor reutilización de agua tratada y potabilizada en los hogares, sentando las bases para un futuro en el que esta medida sea aplicada en más municipios dentro del Estado de Guanajuato.

## 7. JUSTIFICACIÓN

---

La escasez del agua se ha incrementado en los últimos años debido a varios factores, entre ellos el aumento poblacional, el incremento de la actividad económica, el uso de agua como diluyente de desechos y la contaminación proveniente de las actividades humanas. Adicionalmente, los efectos del cambio climático hacen que la escasez sea cada vez más frecuente (Valdivia Alcalá et al., 2022). En el mundo se registran países y ciudades con preocupantes condiciones de falta de agua y México no es la excepción (He et al., 2021; Kuzma et al., 2023). De acuerdo con la CONAGUA (2019), México solo dispone del 1% de agua dulce a nivel mundial, recibe una precipitación aproximada de 1'449,471 millones de metros cúbicos y el uso del agua predomina para el sector agrícola con un 75.7% y posteriormente para el público urbano con un 14.7%.

Un factor que ha causado un aumento en el suministro de agua potable en la ciudad de León, Guanajuato, tanto para la población como para el funcionamiento de las actividades productivas y de servicios, es el crecimiento poblacional que ha tenido la ciudad en las últimas décadas (Valdivia Alcalá et al., 2022). Actualmente, León tiene una población de 1'721,215 habitantes, número que ha sido influenciado por el desarrollo económico del Bajío y que ha provocado que la urbanización y metropolización se haya expandido a las áreas rurales. En consecuencia, la gran demanda de agua que ha provocado este fenómeno, entre otras cosas, está causando la sobreexplotación del acuífero Valle de León, principal fuente de agua en la ciudad de León (IMPLAN, 2020; Valdivia Alcalá et al., 2022).

Es por esto, la necesidad de buscar alternativas que alivien la sobreexplotación de dicho acuífero y que la falta de agua no sea un problema que tenga que enfrentar la población a corto plazo. Además de que la propuesta sea guiada con el sexto Objetivo de Desarrollo Sostenible, el cual consiste en garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible y el saneamiento para todos (Naciones Unidas, n.d.). Por lo antes mencionado, se busca aprovechar el progreso del tratamiento de agua residual en el Estado de Guanajuato promoviendo la reutilización de agua en la ciudad de León (CONAGUA, 2021) que permita tener una opción para reducir la sobreexplotación del acuífero Valle de León y a la par incrementar la disponibilidad hídrica para los habitantes y para las diferentes actividades que se llevan a cabo en la capital del calzado.

Siguiendo esta línea, la presente investigación se enfoca en evaluar la propuesta de reutilizar el agua residual tratada proveniente de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales “Las Joyas” ubicada en la ciudad de León, Guanajuato, para introducirla a la Presa El Palote y que posteriormente sea extraída por la Planta Potabilizadora “El Palote” para después encontrarse disponible para su distribución a los hogares. Con esta acción se pretende aumentar el porcentaje de abastecimiento proveniente de la Planta Potabilizadora “El Palote”, considerando la expansión del área que actualmente se abastece de la misma, y con ello reducir el porcentaje extraído del acuífero Valle de León. Se busca que la propuesta sea factible financieramente y además que cumpla con una sostenibilidad social, económica y ambiental.

## **8. HIPÓTESIS**

---

El reúso de agua tratada potabilizada es una alternativa sostenible y viable para reducir la sobreexplotación del acuífero Valle de León y aumentar la disponibilidad de agua en la ciudad de León, Guanajuato.

## **9. OBJETIVOS**

---

General:

Determinar la viabilidad del reúso de agua tratada como una alternativa sostenible que reduzca la sobreexplotación del acuífero Valle de León y aumente la disponibilidad de agua en León, Guanajuato a través de un análisis de sostenibilidad.

Particulares:

- Obtener la percepción de diferentes actores referente a la sobreexplotación hídrica y del agua tratada potable para uso doméstico a través de herramientas cualitativas.
- Analizar la viabilidad económica del reúso de agua tratada y potabilizada por medio de un balance de costos.
- Determinar la viabilidad ambiental de la alternativa a través de un cálculo de flujos para contrastar la disponibilidad media anual del acuífero al implementar la alternativa con la disponibilidad actual.
- Identificar las posibles afectaciones ambientales, económicas y sociales de la propuesta mediante evaluaciones de impacto.

## 10. METODOLOGÍA

---

### 10.1. Área de estudio

---

La ciudad de León se encuentra en el noroeste del estado de Guanajuato, colindando con los municipios de San Felipe, Guanajuato, Silao, Romita, San Francisco del Rincón y Purísima del Rincón; al igual que con Lagos de Moreno y Unión de San Antonio pertenecientes al estado de Jalisco. El municipio tiene una extensión territorial de 1,183.20 km<sup>2</sup>, dividiéndose en 639 localidades. Su clima es templado semiseco con lluvias en verano; el mes más caluroso suele ser mayo con una temperatura media máxima de 32 °C, y el más frío el mes de enero con una temperatura media mínima de 7 °C. La precipitación media de León es de 690 mm al año, siendo diciembre el mes más seco con una precipitación media de 3.8 mm, y el mes de julio el más lluvioso con una precipitación media de 111.8 mm (SAPAL, 2012).

León pertenece a la Región Hidrológica VIII Lerma-Santiago Pacífico (CONAGUA, 2019). Dentro de la ciudad, una de las fuentes de abastecimiento doméstico de agua es de la presa El Palote, donde su agua solo se aprovecha cuando el volumen almacenado supera la mitad de su capacidad. Esto se debe a que la presa tiene como función principal controlar las inundaciones causadas por las pequeñas corrientes que provienen de las elevaciones del noroeste y desembocan en ella. Estas corrientes provienen de las microcuencas La Patiña, Rincón de los Caballos y El Calvillo. Además de la captación de agua proveniente de las corrientes mencionadas anteriormente, la presa también se recarga a través de la precipitación pluvial (SAPAL, 2012).

No obstante, la principal fuente de abastecimiento de agua para la ciudad de León es la proveniente del acuífero Valle de León (SAPAL, 2018b). El acuífero Valle de León, con la clave 1113 en el Sistema de Información Geográfica para el Manejo de Aguas Subterráneas (SIGMAS) de la CONAGUA, se encuentra en el extremo centro-occidental del estado de Guanajuato, en el límite con el estado de Jalisco, cubriendo una superficie aproximada de 1,321 km<sup>2</sup>. El acuífero comprende casi la totalidad del territorio del municipio de León, porciones menores de Silao y Romita, así como pequeñas áreas de los municipios de San Francisco del Rincón, Guanajuato capital y San Felipe. Hoy en día, se cuenta con 132 pozos en nueve baterías: Poniente 1, Poniente 2, Oriente, Ciudad, Saucillo, Sur, Turbio, Muralla I y Muralla II; extrayendo de estos pozos 2,533 litros por segundo. La cobertura de agua potable es del 98.86% en la zona urbana regularizada,

donde de las 357,846 tomas de agua, 89% son domésticas, 10% comerciales y 1% industriales (SAPAL, 2012, 2018b; Subdirección General Técnica & Gerencia de Aguas Subterráneas, 2020).

### **10.1.2. Sobreexplotación del acuífero Valle de León**

---

Al ser la fuente principal de abastecimiento de agua de la ciudad de León, el acuífero Valle de León ha tenido que satisfacer las demandas domésticas, agrícolas e industriales de este y otros municipios, por lo que su estabilidad se encuentra en riesgo debido a la sobreexplotación, contaminación y el mal uso que se le da al agua (SAPAL, 2018b).

De acuerdo con la CONAGUA (2019), anualmente el acuífero se recarga con un volumen de 124.5 hm<sup>3</sup>, donde 102.4 hm<sup>3</sup> corresponden a la recarga natural y 22.1 hm<sup>3</sup> a recarga incidental. Sin embargo, en el mismo tiempo se tiene un volumen extraído de 176.38 hm<sup>3</sup>, lo que resulta en un déficit de 51.88 hm<sup>3</sup> de agua anuales. Debido a esta sobreexplotación, en la actualidad se bombea a profundidades mayores de cien metros, cuando hace treinta años se bombeaba a treinta metros de profundidad. Esto pone en riesgo la estabilidad y calidad del agua que se extrae del acuífero, ya que a mayor profundidad existe una mayor probabilidad de encontrar aguas fósiles con altos contenidos de minerales e incluso arsénico (SAPAL, 2012).

Para poder cumplir con los objetivos antes establecidos, se realizaron las siguientes actividades:

## **10.2. Opinión de grupo de estudio**

---

En el Anexo 1 se muestra una lista de las colonias que son abastecidas por la Planta Potabilizadora “El Palote”. De dicha lista, se seleccionaron cuatro colonias (Portones del Campestre, Colinas de Gran Jardín, Ciudad Aurora y Hacienda Echeveste) que se muestran en la Figura 4. Éstas fueron elegidas con base en la accesibilidad que se tenía para realizar la encuesta y con base en los diferentes estratos sociales para contrastar las opiniones de los habitantes, donde las colonias Portones del Campestre y Colinas de Gran Jardín perciben mayores ingresos económicos que las colonias Ciudad Aurora y Hacienda Echeveste.

Las preguntas incluidas en las encuestas fueron adaptadas de los trabajos de Monroy Torres y colaboradores (2018) y el Instituto Universitario de Opinión Pública (2020), éstas están relacionadas con aspectos del agua, tales como forma de abastecimiento y distribución, usos, y

percepción de crisis del agua en la ciudad. Asimismo, se incluyeron preguntas sociodemográficas de las personas encuestadas como la edad, nivel de escolaridad e ingreso económico para segmentar a las personas encuestadas en grupos más específicos, conocer su contexto socioeconómico y hacer una comparación y análisis más profundo entre ellos. Además, al tener esta información, se pueden identificar relaciones y correlaciones entre estas variables y las respuestas dadas.

La encuesta tiene como objetivo conocer el nivel de información de los usuarios sobre el agua que reciben en sus casas, al igual que su percepción sobre la crisis de agua en la ciudad, y su postura respecto al proyecto que aquí se plantea. Como primera fase, se realizó una prueba piloto, con la encuesta mostrada en el Anexo 2, a cinco habitantes de la colonia Ciudad Aurora y a cinco habitantes de Gran Jardín. Esta prueba ayudó en los siguientes aspectos: a) confirmar que las preguntas eran entendibles, b) añadir o cambiar detalles a las preguntas y/o respuestas para hacerlas más específicas y c) eliminar aquellas preguntas cuyas respuestas eran reiterativas. Los resultados de la prueba piloto se muestran en el Anexo 3.

Se realizó un muestreo no probabilístico por conveniencia<sup>4</sup> para aplicar la encuesta titulada “Percepción del consumo y escasez del agua en la ciudad de León, Guanajuato” (Anexo 4). Ésta constó de 10 preguntas distribuidas en tres secciones: 1) forma de abastecimiento y distribución de agua, 2) calidad y usos del agua, y 3) percepción de crisis del agua en la ciudad. Se utilizaron formatos de respuesta de opción múltiple en la mayoría de las preguntas, donde se presentaron diferentes opciones para que los encuestados seleccionaran la que mejor se ajustara a su situación. Sin embargo, en la última sección de la encuesta, específicamente en las preguntas 9 y 10, se les pidió a los encuestados que proporcionaran una explicación detallada de la razón por la que están de acuerdo o en desacuerdo con la implementación de la reutilización de agua residual tratada y potabilizada en el hogar, así como la implementación de la reutilización de agua de lluvia en el hogar. De esta manera, se buscó obtener información más completa y enriquecedora sobre las opiniones y percepciones de los encuestados con respecto a estas propuestas.

---

<sup>4</sup> Muestreo no probabilístico por conveniencia: “Suponen un procedimiento de selección orientado por las características de la investigación, estas muestras están formadas por los casos disponibles a los cuales se tiene acceso” (Hernández Sampieri, 2014)



La encuesta se aplicó a aproximadamente 50 habitantes de cada colonia (n ~ 200 encuestas). Se encuestaron a personas adultas que vivían o contaban con residencia en las colonias Hacienda de Echeveste, Ciudad Aurora, Gran Jardín y Portones del Campestre. Se excluyeron viviendas con un negocio o que formaran parte de un edificio con departamentos, ya que el consumo o pago por el servicio del agua podía variar en los dos casos. Los fraccionamientos privados de Gran Jardín y Portones del Campestre se caracterizan por ser áreas residenciales donde la mayoría de las viviendas cuentan con terrenos de 300 m<sup>2</sup> o más. Estas propiedades suelen incluir espacios ajardinados internos, y los residentes tienen acceso a un parque comunitario. Por otro lado, Hacienda Echeveste y Cd. Aurora son colonias de carácter popular, en las cuales las casas se encuentran en terrenos de aproximadamente 100 m<sup>2</sup>. Estas colonias comparten la misma calle principal, Hermenegildo Bustos, la cual alberga una variedad de negocios como restaurantes, tiendas de abarrotes y boutiques, entre otros.

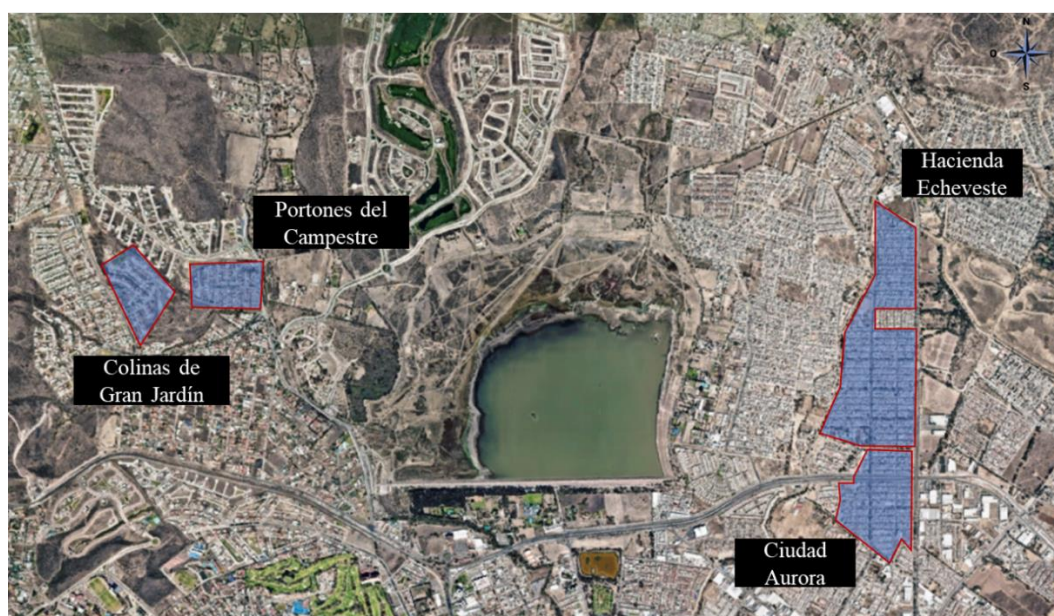


Figura 4. Delimitación de las colonias que son abastecidas por el agua de la Presa “El Palote”.

### 10.3. Viabilidad económica

---

Analizar la viabilidad económica del proyecto ayudará a que se puedan tomar decisiones dentro del mismo, ya sea el cambio de algún proceso para disminuir costos, adicionar materiales o elementos que ayuden a hacer más eficiente el proyecto, o suprimir procedimientos que signifiquen un mayor costo, ya sea para los usuarios o en el costo general del proyecto. En este

sentido, la viabilidad económica nos ayudará a conocer posibles aumentos o disminuciones en el costo del servicio del agua para las colonias abastecidas por la Planta Potabilizadora El Palote (PPEP) si el proyecto de reúso de agua tratada y potabilizada se llegara a implementar.

Por lo anterior, se recopiló información a través del Plataforma Nacional de Transparencia y la Ley de Ingresos de SAPAL para realizar un minucioso balance de costos. Este análisis abarcó los costos por metro cúbico de agua, contemplando el proceso de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Las Joyas (PTARJ), el transporte de agua desde la PTARJ hasta la presa El Palote, el proceso de potabilización en la Planta Potabilizadora El Palote (PPEP) y su posterior distribución a las colonias. Posteriormente, se contrastaron estos costos con los ingresos generados a través de la cuota base y el pago por metro cúbico de agua por parte de los usuarios. Para ello, se establecieron cuatro escenarios que consideraron diferentes aspectos de los costos e ingresos involucrados en el proyecto. El objetivo fue determinar el escenario más óptimo desde el punto de vista económico.

El resultado obtenido a partir de este análisis será determinante para establecer la necesidad de ajustar el precio del servicio de agua. Podría demostrar si es necesario un aumento en el precio para equilibrar los costos, o si, por el contrario, la reutilización del agua tratada resulta más rentable, permitiendo incluso una disminución del costo para los usuarios. Asimismo, se evaluará la posibilidad de mantener los precios actuales sin afectar la viabilidad económica del proyecto.

#### **10.4. Viabilidad ambiental**

---

El objetivo central de evaluar la viabilidad ambiental en esta investigación es determinar la capacidad de recuperación del acuífero Valle de León en caso de implementar la alternativa propuesta. Para ello, se recopiló información relevante a través de la Plataforma Nacional de Transparencia, SAPAL y CONAGUA, con el fin de realizar cálculos precisos que permitieran obtener el volumen estimado de recuperación del acuífero al llevar a cabo el proyecto. Entre los datos obtenidos, se incluyó el flujo de entrada y salida de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Las Joyas (PTARJ), el flujo correspondiente a la Planta Potabilizadora El Palote (PPEP), la capacidad de almacenamiento de la presa, el volumen de recarga y extracción del acuífero Valle de León, y la precipitación promedio mensual en la ciudad de León.

Se comenzó verificando que la PTARJ tuviera un flujo de salida igual o mayor a 60 L/s, ya que ese flujo fue predeterminado por SAPAL para ser utilizado en el proyecto. Posteriormente, se procedió a analizar y graficar la precipitación histórica de la ciudad durante los últimos cinco años. Con esta información, se utilizó el programa RStudio y la metodología Box-Jenkins aplicado al Modelo Autorregresivo Integrado con Media Móvil (ARIMA) y se estimó la precipitación futura en los próximos 12 meses. La descripción de la metodología Box-Jenkins que utiliza el programa RStudio se muestra en el Anexo 5.

Una vez obtenida la estimación de la precipitación futura, se procedió a calcular el tiempo necesario para que la presa El Palote alcance un nivel por encima de la mitad de su capacidad y, de esta manera, permita la extracción de agua para su potabilización. Se determinó un flujo de entrada posible para la PPEP, asegurando que no comprometiera el nivel de agua en la presa. Finalmente, se calculó el volumen de agua producido con ese flujo de entrada y se obtuvo el porcentaje de disminución en la extracción de agua del acuífero Valle de León, tanto para el uso público urbano como de manera general.

## **10.5. Afectaciones ambientales, sociales y económicas**

---

### **10.5.1. Impactos ambientales**

---

Para evaluar las posibles afectaciones ambientales que podrían surgir con la implementación del proyecto, se llevó a cabo una comparación de los contaminantes presentes en el agua de salida de la PTARJ con los que se encuentran en el agua de la presa El Palote. El objetivo fue verificar que la calidad del agua tratada proveniente de la PTARJ cumpla con los estándares establecidos en la sección cuatro de *Especificaciones* de la NOM-001-SEMARNAT-2021.

Las muestras fueron recolectadas por SAPAL en el año 2022, siguiendo el protocolo de muestreo *PM-003* y la norma *NMX-AA-003-1980*, tanto para las muestras provenientes del agua de la presa El Palote como para las muestras de la PTARJ. Los informes<sup>5</sup> de estos análisis se encuentran disponibles en la liga mostrada al pie de página. Los valores utilizados para la comparación de contaminantes se calcularon a partir del promedio de los valores de las muestras

---

<sup>5</sup> <https://drive.google.com/drive/folders/1iQltOH47tbPTMRLaeWV0LO2tWuS1O6nG?usp=sharing>

obtenidas a lo largo del año. Para el análisis de las muestras de agua de la presa El Palote, SAPAL llevó a cabo aproximadamente tres tomas de muestras mensuales, lo que resultó en un promedio calculado a partir de un total de 36 muestras. Por otro lado, en el caso de la PTARJ, SAPAL realizó un análisis mensual, obteniendo así un promedio a partir de 12 muestras.

Durante este análisis, se destacó la importancia de actualizar las mediciones a los parámetros establecidos en la normativa vigente, garantizando así una evaluación precisa y actualizada de los niveles de contaminación. En caso de que algunos contaminantes excedieran los límites permitidos en la norma, se examinó en detalle cómo afectarían dichos contaminantes tanto a la presa como a la salud humana. Además, se identificaron los procesos específicos tanto en la PTARJ como en la PPEP donde sería necesario enfocar esfuerzos para reducir los niveles de los contaminantes y mantenerlos dentro de los límites permitidos. Este análisis apunta a garantizar que el proyecto tenga un impacto ambiental mínimo y cumpla con los estándares de calidad del agua, protegiendo así el entorno natural y la salud de los ciudadanos.

### **10.5.2. Impactos sociales**

---

Para obtener las posibles afectaciones sociales derivadas del proyecto, se llevó a cabo un análisis de los beneficios o impactos que tendría en las diferentes partes involucradas. Se consideraron especialmente los siguientes actores: los pescadores de la zona, las colonias abastecidas por la PPEP, el gobierno y otros sectores relevantes.

El análisis se enfocó en identificar cómo cada uno de estos actores se vería afectado positiva o negativamente por la implementación del proyecto. Se tomaron en cuenta diferentes aspectos como el acceso al agua potable para las colonias, el empleo y sustento de los pescadores, así como las implicaciones económicas y sociales para el gobierno y otros sectores interesados como el agrícola e industrial.

La información obtenida de este análisis de afectaciones sociales permitió tener una visión completa de los posibles efectos del proyecto en la comunidad y la sociedad en general. Este enfoque integrador busca garantizar que las decisiones relacionadas con el proyecto tomen en cuenta los intereses y necesidades de todas las partes involucradas, promoviendo así una planificación más equitativa y sostenible.

### **10.5.3. Impactos económicos**

---

Se realizó un análisis con el fin de identificar las potenciales afectaciones económicas, tanto positivas como negativas, que surgirían como resultado de la aplicación del presente proyecto. En este análisis, se tomaron en cuenta los resultados obtenidos en la evaluación de la viabilidad económica del proyecto, así como los datos recopilados a través de las encuestas realizadas en la sección de opinión de grupo.

Con base en los resultados del análisis, se formularon sugerencias y recomendaciones para abordar los impactos económicos identificados y garantizar una gestión financiera sólida y responsable del proyecto, asegurando su viabilidad y éxito en el contexto económico actual. Este análisis permitirá tomar decisiones informadas para maximizar los beneficios y mitigar los riesgos económicos asociados.

## 11. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 11.1. Opinión de grupo de estudio

De las encuestas realizadas a la colonia Haciendas de Echeveste ( $n=55$ ), se obtuvieron los siguientes resultados:

El promedio de edad de las personas encuestadas fue de 56 años, con una desviación estándar ( $\sigma$ ) de  $\pm 13$  años, y el número promedio de personas viviendo en la misma casa es de 4 con una  $\sigma$  de  $\pm 1$ . De las 55 personas encuestadas, un poco más de la mitad (53%) sabe que el agua que llega a su hogar proviene de la planta potabilizadora y más de un tercio (40%) desconocía la fuente de abastecimiento de agua hacia su hogar, esto se puede observar en la Figura 5a. Según los resultados de la encuesta, la mayoría de los encuestados (39) reportaron tener agua en su vivienda en la mayor parte o toda la semana. Sin embargo, un número considerable de personas opinaron que el precio que pagan por el servicio del agua es poco o nada justo, argumentando que su consumo era bajo debido al número reducido de habitantes en sus hogares, pero aun así recibían facturas elevadas (Figura 5b).

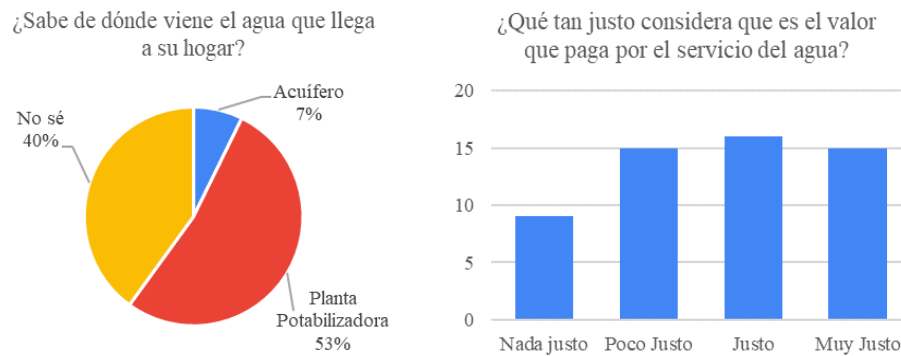


Figura 5. Gráficos de las respuestas referentes a la fuente de abastecimiento y pago por el servicio del agua de la colonia Haciendas de Echeveste.

Algunos encuestados mencionaron que el costo del servicio de agua en León es más alto en comparación con otras ciudades. Por ejemplo, en León se pagan \$223.95 por  $10 \text{ m}^3$  (SAPAL, 2023a) de agua, mientras que en Guadalajara el costo es de \$167.10 (SIAPA, 2022) y en la Ciudad de México es de \$174.16 (tarifa de clasificación media) (SACMEX & Gobierno de la Ciudad de México, 2020) por la misma cantidad de  $10 \text{ m}^3$ . Este último resultado es de gran relevancia, ya que refleja la opinión de las personas con respecto al precio actual que pagan por el

agua. Por lo tanto, si se produce algún aumento en la tarifa del servicio al implementar el proyecto, podría generar conflicto con los residentes de las colonias abastecidas. Sin embargo, también existe la posibilidad de que el proyecto contribuya a reducir el costo del servicio, lo cual podría resultar en un beneficio para los usuarios.

La Figura 6 muestra la postura de los habitantes encuestados respecto a la presencia actual de crisis de agua en la ciudad de León y la reutilización de agua residual tratada y potabilizada como alternativa para evitar la escasez de agua en la ciudad. Como se puede observar, el 80% de los habitantes encuestados consideran que existe una crisis de agua en la ciudad, donde las razones más populares por las cuales consideraban que había crisis son: por la falta de agua en la ciudad, la falta de agua en los ríos o cuerpos de agua, la mala distribución del recurso en la ciudad, el desperdicio de agua por parte de los ciudadanos, y el alto consumo que tienen las empresas. Al momento de presentar la propuesta de reutilizar agua residual tratada y potabilizada, poco más del 80% estuvo de acuerdo con la implementación, sin embargo, la mayoría mencionaba que solo la utilizarían para regar su jardín, los baños o el aseo de la casa, no para consumo o uso directo.

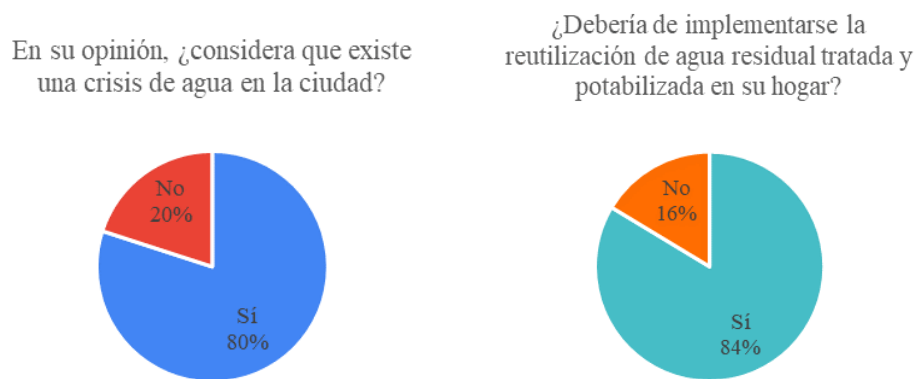


Figura 6. Gráficos de las respuestas referentes a la crisis de agua y la alternativa que se presenta en este proyecto de la colonia Haciendas de Echeveste.

Además, las personas cuya respuesta fue negativa argumentaban que no confían en que el agua cuente con la calidad suficiente para que pudiera consumirse. Esto último puede relacionarse con que 19 personas contestaron que utilizan el agua de la llave para preparar sus alimentos y solo 4 para beberla (Figura 7), donde en la mayoría de los casos se le da un tratamiento antes de ser ingerida ya que no confían en la calidad del agua.

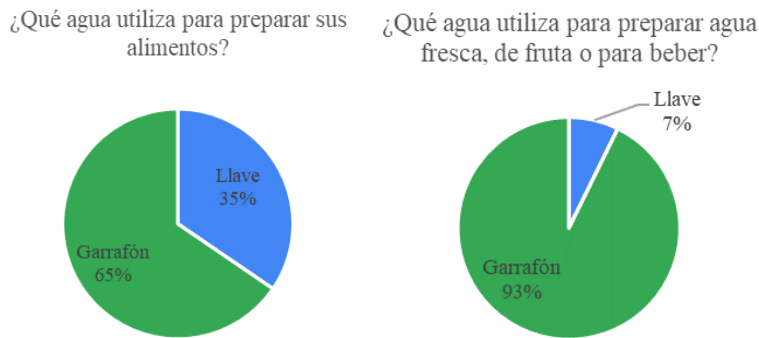


Figura 7. Gráficos de las respuestas referentes al uso de agua en el hogar de la colonia Haciendas de Echeveste.

*De las encuestas realizadas a la colonia Ciudad Aurora (n=54), se obtuvieron los siguientes resultados:*

El promedio de edad de las personas encuestadas fue de 50 años, con una  $\sigma$  de  $\pm 16$  años, y el número de personas viviendo en la misma casa es de 4 con una  $\sigma$  de  $\pm 2$  personas. En la Figura 8, se muestra que menos de una tercera parte conoce que el agua que llega a su hogar proviene de la planta potabilizadora y poco más del 65% desconocía la fuente de abastecimiento de agua hacia su hogar, además de que dos personas consideran que el agua que llega a su hogar proviene del acuífero.

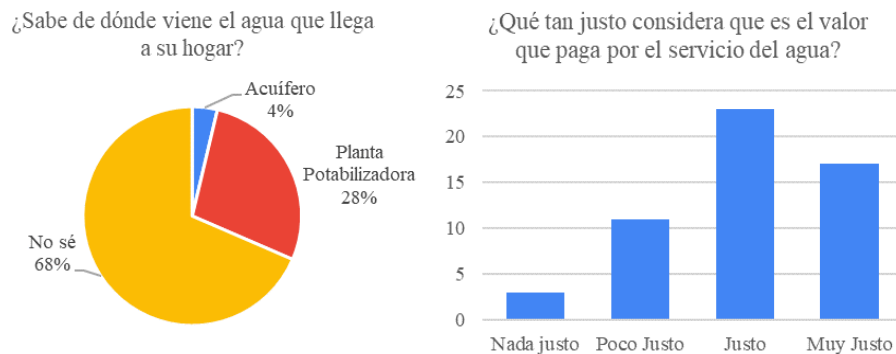


Figura 8. Gráficos de las respuestas referentes a la fuente de abastecimiento y pago por el servicio del agua de la colonia Ciudad Aurora.

Para el caso de la colonia de Ciudad Aurora, el valor que los encuestados consideran que pagan por el servicio del agua se centra en lo justo o muy justo, teniendo pocas personas que lo consideran nada justo o poco justo. Con base a lo anterior, resulta importante que el precio que se paga por el servicio de agua se mantenga de la misma manera, es decir, que el  $m^3$  de agua se



mantenga en el rango de precio presentado más adelante en la viabilidad económica, ya que los encuestados reflejan que en la colonia se paga lo justo por lo que utilizan de agua en sus hogares.

La Figura 9 muestra la opinión de los encuestados en la colonia de Ciudad Aurora respecto a la crisis hídrica en la ciudad y su postura con la reutilización de agua residual tratada y potabilizada en sus hogares. Los resultados muestran que la mayoría de los encuestados consideran que la ciudad presenta una crisis de agua (Figura 9a), principalmente debido a la falta de agua, el alto consumo de las empresas y la falta de lluvia. Además, muchos de los encuestados comentaron que otro factor importante en la crisis hídrica en León es que las personas no son conscientes de la problemática y no administran bien el consumo del agua, desperdiciándola y dándole un uso inadecuado. Por otro lado, las personas que no creen que haya una crisis de agua mencionaron que les parecía que aún no llegaba a León, pero que en otros lados de México si se presentaba.

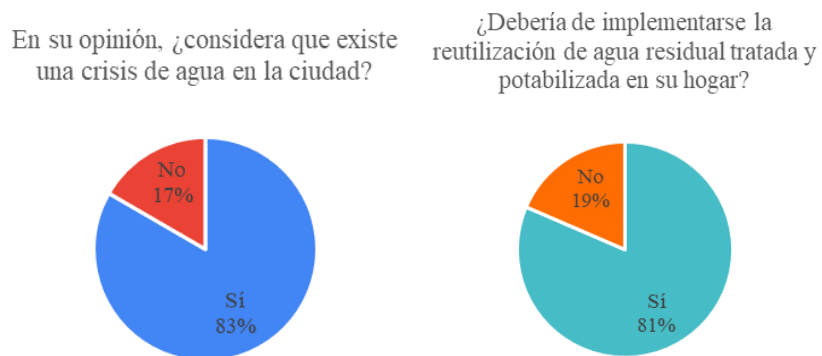


Figura 9. Gráficos de las respuestas referentes a la crisis de agua y la alternativa que se presenta en este proyecto de la colonia Ciudad Aurora.

Respecto a la implementación de la reutilización de agua residual tratada y potabilizada (Figura 9b), muchos de los encuestados que respondieron de manera afirmativa comentaron que es una buena alternativa para darle un continuo reúso al recurso, además de que se ahorrarían agua en sus hogares, podría llegar el agua a más habitantes y se daría un gran paso hacía nuevas tecnologías en la ciudad de León. Sin embargo, el agua solo la utilizarían para usos indirectos, debido a que en algunos casos no se sienten seguros respecto a la calidad con la que llega el agua a sus casas.

Algo a destacar en esta colonia es que 11.11% de las personas que beben agua de la llave comentaron que no le dan un tratamiento antes de ser ingerida, ya que confían en que SAPAL

menciona que el agua que reciben en sus hogares cumple con los estándares de calidad para ser potable y ellos puedan beberla sin preocupación, mostrando que unas pocas personas cuentan con credibilidad en el gobierno sobre la calidad con la que cuenta el agua. Sin embargo, como se muestra en la Figura 10, la mayor parte de los encuestados sigue inclinándose al consumo de agua del garrafón y otras cuantas personas (7.4%) le dan un tratamiento al agua que es tomada de la llave.

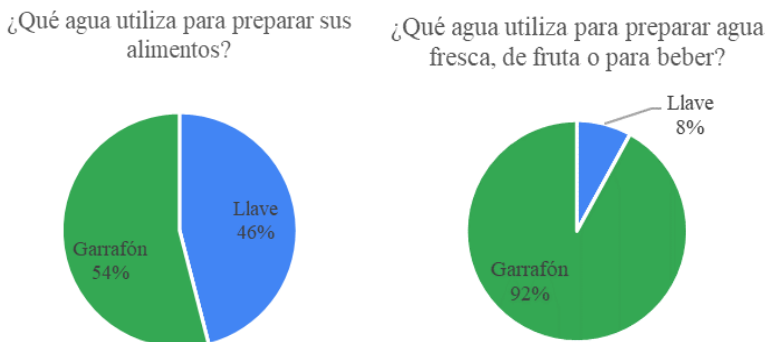


Figura 10. Gráficos de las respuestas referentes al uso de agua en el hogar de la colonia Ciudad Aurora.

*De las encuestas realizadas a la colonia Gran Jardín (n=50), se obtuvieron los siguientes resultados:*

El promedio de edad de las personas encuestadas fue de 50 años, con una  $\sigma$  de  $\pm 11$  años, y el número de personas viviendo en la misma casa es de 3 con una  $\sigma$  de  $\pm 1$  personas. De las 50 personas encuestadas, menos de una tercera parte conocía que el agua que llega a su hogar proviene de la planta potabilizadora el 70% desconocía la fuente de abastecimiento de agua hacia su hogar, esto se puede observar en la Figura 11a.

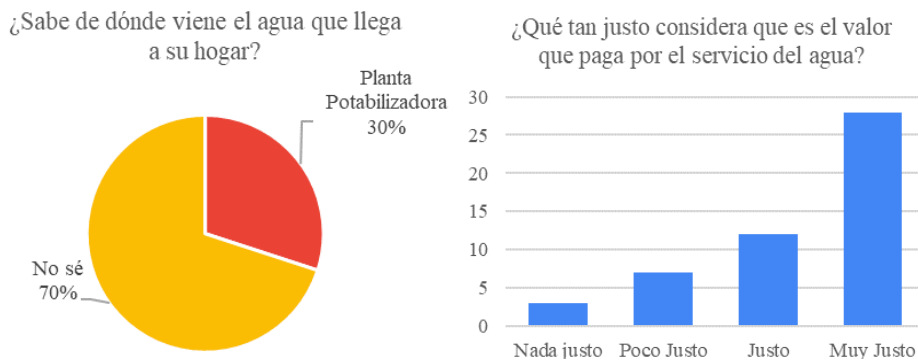


Figura 11. Gráficos de las respuestas referentes a la fuente de abastecimiento y pago por el servicio del agua de la colonia Gran Jardín.

A diferencia de la colonia de Hacienda de Echeveste, los encuestados de Gran Jardín reportaron tener agua en su hogar todos los días y la mayoría considera que el valor que paga por el servicio del agua es justo o muy justo (Figura 11b). Lo anterior resulta importante debido a la comparación que se puede hacer sobre la capacidad que puede tener una colonia u otra para poder pagar una diferencia en el servicio si la tarifa del agua cambia debido a la aplicación del proyecto, esto de acuerdo con como consideran que es el valor que pagan por el agua actualmente.

La Figura 12 muestra la opinión de los encuestados en Gran Jardín respecto a la crisis de agua en la ciudad y su postura respecto a la alternativa que presenta este proyecto.

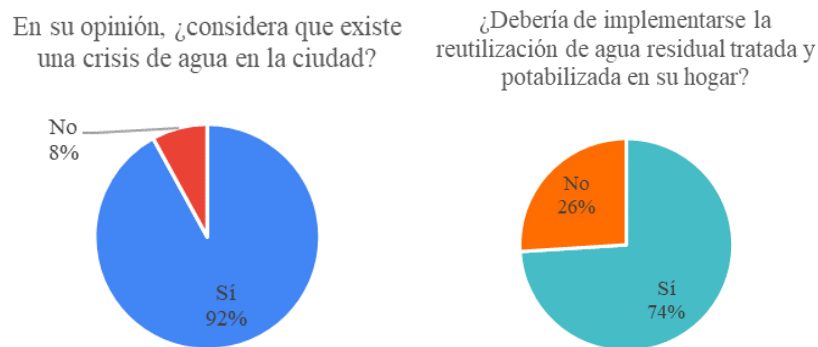


Figura 12. Gráficos de las respuestas referentes a la crisis de agua y la alternativa que se presenta en este proyecto de la colonia Gran Jardín.

En estas gráficas se muestra un porcentaje mayor en la respuesta afirmativa de la crisis de agua en la ciudad y un porcentaje menor a la implementación de agua reutilizada a comparación de la colonia Hacienda de Echeveste. Algo que también ocurrió con los encuestados de esta colonia es que consideran que la principal razón de la crisis hídrica es la falta de agua en la ciudad, donde recalcaron que en su colonia no falta agua, pero han escuchado que varias zonas en la ciudad presentan este problema.

Asimismo, la mayoría de los encuestados remarcaron que están de acuerdo con la propuesta, pero solo si el agua es utilizada para usos indirectos, ya que desconfían de la capacidad del gobierno para tener una infraestructura que pueda potabilizar y cumplir con la calidad necesaria en el agua para que esta pueda tener un uso directo en los hogares. Esto se puede comprobar debido a que muy pocos de los encuestados toman agua de la llave, pero si la utilizan para preparar sus alimentos, le dan un tratamiento antes de usarla debido a que no confían en la calidad del agua (Figura 13).

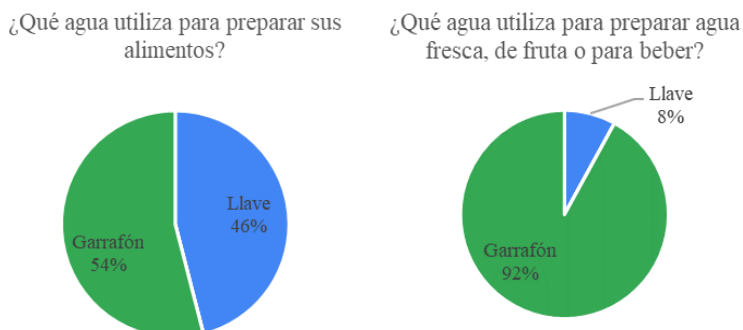


Figura 13. Gráficos de las respuestas referentes al uso de agua en el hogar de la colonia Gran Jardín.

*De las encuestas realizadas a la colonia Portones del Campestre (n=51), se obtuvieron los siguientes resultados:*

El promedio de edad de las personas encuestadas fue de 54 años, con una  $\sigma$  de  $\pm 12$  años, y el número de personas viviendo en la misma casa es de 3 con una  $\sigma$  de  $\pm 1$  personas. De las personas encuestadas, menos de la tercera parte conocían que el agua que llega a su colonia proviene de la planta potabilizadora, 1.9% (4 personas) contestaron que provenía del acuífero y el 65% desconocían la fuente de abastecimiento del agua que llegaba a su hogar, esto se puede observar en la Figura 14. Al igual que la colonia Gran Jardín, la mayor parte de los encuestados de Portones del Campestre consideran que el valor que pagan por el servicio del agua es justo o muy justo, teniendo a pocas personas que creen es poco justo o nada justo. Este es otro ejemplo de la importancia de considerar las diferentes capacidades que tienen las colonias de pagar el servicio del agua y como pueden verse afectadas por un cambio en su tarifa.

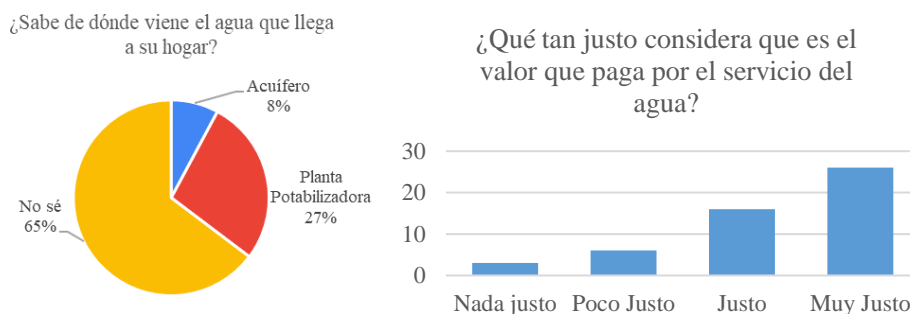


Figura 14. Gráficos de las respuestas referentes a la fuente de abastecimiento y pago por el servicio del agua de la colonia Portones del Campestre.

La Figura 15 muestra la postura de los habitantes de la colonia Portones del Campestre respecto a la crisis hídrica en la ciudad de León y la implementación de la reutilización de agua residual tratada y potabilizada.

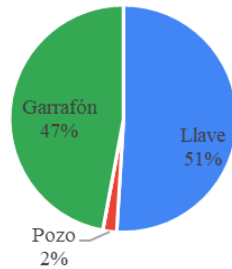


Figura 15. Gráficos de las respuestas referentes a la crisis de agua y la alternativa que se presenta en este proyecto de la colonia Portones del Campestre.

En comparación con las otras colonias, en Portones del Campestre solo una persona consideró que no existía una crisis de agua en la ciudad, mientras que las demás aseguraban que si había una crisis hídrica. Las principales razones por las que los habitantes creían que había crisis fueron la falta de agua en la ciudad y la sequía que se estaba generando debido a la falta de lluvia, además de que se tenía poca conciencia de esta problemática y, en consecuencia, se seguía desperdiciando agua. Por otro lado, más del 85% de los encuestados en la colonia consideran que debería de implementarse la reutilización de agua residual tratada y potabilizada en los hogares, ya que esto promueve el reciclaje y aprovechamiento del agua que ya ha sido utilizada.

Sin embargo, como ocurrió en las colonias, solo reutilizarían el agua para usos indirectos debido a que no se confía en que León tenga un proceso de potabilización adecuado. Además, el porcentaje de personas que contestaron que no debería de implementarse la alternativa, sus respuestas fueron que no se contaba con la infraestructura para asegurar que el agua llegara con la calidad necesaria para reutilizarse. Esta desconfianza respecto a la calidad del agua puede también observarse en las gráficas de la Figura 16, donde las pocas personas que beben agua de la llave (13.7%) la filtran antes de ser consumida, y la mayoría de las personas que utilizan el agua de la llave para preparar sus alimentos, la filtran o hierven antes de preparar sus alimentos.

¿Qué agua utiliza para preparar sus alimentos?



¿Qué agua utiliza para preparar agua fresca, de fruta o para beber?

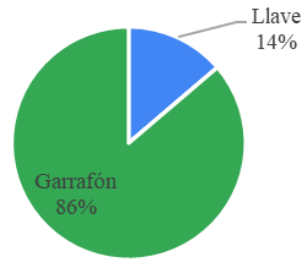


Figura 16. Gráficos de las respuestas referentes al uso de agua en el hogar de la colonia Portones del Campestre.

La Tabla 4 muestra un resumen de las respuestas más relevantes de la encuesta en cada colonia.

Tabla 4. Respuestas más relevantes de las encuestas aplicadas a las colonias abastecidas por la PPEP.

Colonia	Hacienda Echeveste	Ciudad Aurora	Gran Jardín	Portones del Campestre
Promedio de edad	56	50	50	54
Promedio de personas viviendo en el hogar	4	4	3	3
Conocimiento acertado de la fuente de abastecimiento	53%	28%	30%	27%
Respuesta más popular respecto al valor que se paga por el servicio del agua	Justo	Justo	Muy Justo	Muy Justo
Confirman que hay crisis hídrica en León, Guanajuato	80%	92%	83%	98%
Principales razones de la crisis hídrica	<ul style="list-style-type: none"> <li>Falta de agua en la ciudad</li> <li>Mala distribución del agua</li> <li>Desperdicio de agua</li> <li>Alto consumo de las empresas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Falta de agua en la ciudad</li> <li>Alto consumo de las empresas</li> <li>Falta de lluvia</li> <li>Desperdicio de agua</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Falta de agua en la ciudad (otras colonias)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Falta de agua en la ciudad</li> <li>Falta de lluvia</li> <li>Desperdicio de agua</li> </ul>

<b>Colonia</b>	<b>Hacienda Echeveste</b>	<b>Ciudad Aurora</b>	<b>Gran Jardín</b>	<b>Portones del Campestre</b>
De acuerdo con la implementación del reúso de agua tratada y potabilizada	84%	81%	74%	86%
Uso directo o indirecto del agua tratada y potabilizada	Indirecto	Indirecto	Indirecto	Indirecto

De manera general, se ratifica un desconocimiento por parte de muchos habitantes de las cuatro colonias acerca de la fuente de abastecimiento del agua que llega a sus hogares. Por lo tanto, si se implementa el proyecto de reutilización de agua residual tratada y se informa a la comunidad, es posible que muchos usuarios no se den cuenta de que forman parte de las colonias que recibirán este recurso. Como era de esperarse, la mayoría de los usuarios están conscientes de la crisis hídrica que enfrenta la ciudad de León, debido a las campañas de difusión realizadas por SAPAL para informar a la ciudadanía sobre la escasez de agua que se aproxima. Además, a principios de marzo de este año, se aplicó un recorte en el suministro de agua a las colonias abastecidas por la Planta Potabilizadora El Palote, donde a estas se les suministra agua cada tercer día debido al bajo nivel que presenta la presa por la falta de lluvia que hay en la ciudad, haciendo que la crisis hídrica sea aún más evidente para estas colonias. El programa de racionamiento de agua se mantendrá vigente hasta que comience la temporada de lluvias y la presa recupere un nivel suficiente con el que pueda dar el mismo abastecimiento que se daba con anterioridad.

Algo a destacar es la conciencia manifestada por algunos de los encuestados ante la situación hídrica, quienes compartieron las acciones que llevan a cabo en sus hogares para ahorrar agua y evitar su desperdicio. Por ejemplo, mencionaron la reutilización del agua de la lavadora para la limpieza del patio o el riego de sus plantas, el uso de una cubeta debajo del chorro de la regadera mientras el agua alcanza la temperatura deseada, para después utilizarla en el inodoro o para limpiar los pisos de sus casas. También mencionaron lavar sus automóviles utilizando cubetas en lugar de mangueras, y tener cubetas recolectando agua de lluvia destinada a diversos usos dentro de sus hogares.

La aplicación del proyecto podría ser de ayuda por si llega a presentarse esta problemática de la falta de lluvia, ya que los flujos de entrada de agua a la presa se mantendrían por todo el año, reduciendo o incrementando la cantidad de volumen de agua de acuerdo con el nivel de la presa, pero manteniéndose constantes. Sin embargo, como parte de las respuestas que se obtuvieron, se necesita trabajar socialmente con la confianza que se tiene a las plantas de tratamiento y plantas potabilizadoras en la ciudad, ya que muchos comentaron que no tienen la confianza suficiente para reutilizar el agua en usos directos o que México no cuenta con la tecnología o capacidad para potabilizar de nuevo el agua residual, a pesar de que SAPAL asegura que el agua es potable y puede ser ingerida desde la llave. Por lo tanto, es crucial realizar un estudio más a fondo para identificar las razones subyacentes de la desconfianza de la ciudadanía hacia el organismo operador. Esto permitirá implementar las modificaciones necesarias para lograr recuperar la confianza en la ciudad. No obstante, también hay otras circunstancias que influyen en la calidad del agua que llega a los hogares, entre ellos el mantenimiento que se les da a las tuberías y al aljibe, volviéndose responsabilidad también del usuario darles limpieza o mantenimiento a estos.

Otro aspecto relevante por considerar es el posible impacto en la tarifa del servicio de agua, ya que existe una notable disparidad en la percepción de su valor entre las diferentes colonias. Mientras que en Portones del Campestre y Gran Jardín se considera que el valor que se paga por el servicio del agua está por encima de lo justo, en Hacienda Echeveste y Ciudad Aurora la mayoría la califica como justa o incluso por debajo de lo justo. Esto puede estar relacionado con los ingresos mensuales reportados en cada colonia (ver Figura 17). La mayoría de los encuestados de Portones del Campestre y Gran Jardín tienen ingresos mensuales superiores a \$8,400, mientras que en las colonias de Hacienda Echeveste y Ciudad Aurora, la mayoría informa ingresos mensuales de menos de \$6,500. Además, teniendo en cuenta que estas últimas colonias tienen un poco más de habitantes, las respuestas sobre el valor del pago por el servicio de agua parecen estar influenciadas por los ingresos y gastos que representan para sus familias.



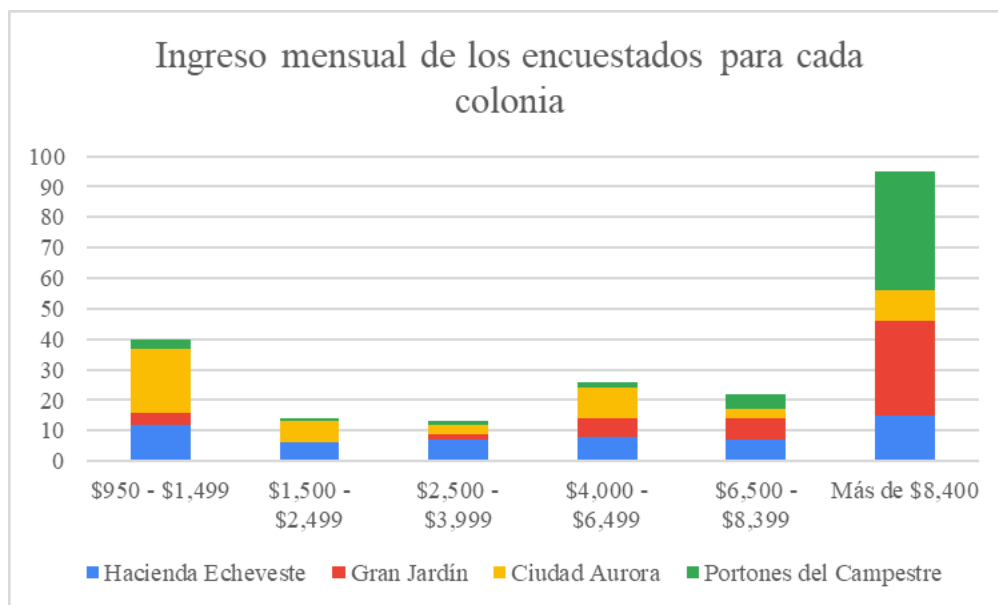


Figura 17. Ingreso mensual reportado por los encuestados de cada colonia.

Por lo tanto, la modificación de la tarifa como resultado de la reutilización del agua puede conllevar ventajas y desafíos. Si la tarifa disminuye, esto podría ser bien recibido por los usuarios, pero también podría llevar a un efecto rebote, es decir, un aumento en el consumo y desperdicio de agua debido a la disminución de su costo si no se promueve una gestión responsable del recurso. Por otro lado, un aumento en la tarifa podría generar descontento entre los usuarios, especialmente en las colonias que ya perciben el costo actual como elevado.

## 11.2. Viabilidad económica

Un balance de costos puede ser de ayuda para conocer la viabilidad económica de un proyecto. En este caso, puede ayudar a conocer los posibles aumentos o disminuciones en el costo del servicio del agua para las colonias abastecidas por la Planta Potabilizadora El Palote (PPEP) si el proyecto de reúso de agua tratada y potabilizada se implementa.

Para evaluar la viabilidad económica de la reutilización de agua tratada y su potabilización, es crucial comprender los costos asociados con los diferentes procesos involucrados. En este sentido, se deben considerar los costos de operación en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Las Joyas (PTARJ), el transporte desde la PTARJ hasta la presa El Palote (PEP), así como el proceso y la distribución de la PPEP a las colonias

correspondientes. La Tabla 5 presenta los costos de operación para la PTARJ y la PPEP, ambos correspondientes al año 2022 (SAPAL, 2023e). Los costos incluyen mano de obra, químicos, energía eléctrica, mantenimiento y los procesos de tratamiento y bombeo.

Tabla 5. Costos de operación de un m<sup>3</sup> de agua en la PTARJ y en la PPEP. Fuente: SAPAL, 2022

Mes (2022)	Planta de Tratamiento Las Joyas (PTARJ)		Planta Potabilizadora El Palote (PPEP)	
	Costo de operación (\$/m <sup>3</sup> )	Costo promedio	Costo de operación (\$/m <sup>3</sup> )	Costo promedio
Enero	1.8	\$1.80	2.33	\$2.95
Febrero	0.87	<b>Costo mínimo</b>	2.7	<b>Costo mínimo</b>
Marzo	1.09	\$0.87	2.84	\$1.98
Abril	1.59	<b>Costo máximo</b>	2.7	<b>Costo máximo</b>
Mayo	1.84	\$4.69	2.64	\$4.20
Junio	2.02		1.98	
Julio	1.2		2.89	
Agosto	1.29		3.06	
Septiembre	2.1		4.2	
Octubre	1.39		3.93	
Noviembre	1.74		3.08	
Diciembre	4.69		3.07	

Según la información proporcionada por SAPAL (2023b), la tubería adaptada a la infraestructura existente, la cual se utilizará para transportar el agua tratada desde la PTARJ hasta la presa El Palote, tiene un diámetro de 12 pulgadas y está fabricada con plástico reforzado con fibra de vidrio (PRFV). Este material presenta varias ventajas, entre ellas su resistencia a la corrosión, peso ligero, sistema de juntas, condiciones flexibles, y buenas propiedades hidráulicas que producen escasas pérdidas de carga por fricción. De manera general estas características reducen los costos de mantenimiento a largo plazo, alargan su vida útil y disminuyen los gastos de desplazamiento y energía de bombeo. La longitud total de esta tubería es de 13 km, lo que permitirá el traslado efectivo del agua desde la PTARJ hasta la presa El Palote.

Actualmente, el costo por el bombeo de un metro cúbico de agua tratada de SAPAL, independientemente de la distancia, es de \$10.41 (SAPAL, 2023e) para aquellas colonias, parques, usuarios u otros que soliciten este tipo de agua en la ciudad. No obstante, al tratarse de un proyecto dentro de SAPAL, este costo ya se encuentra incluido en los costos de operación expuestos en las tablas anteriores. Por lo tanto, se considerará en el balance de costos como un

posible escenario donde el costo de bombeo deba ser evaluado por separado del costo de operación.

La Tabla 6 muestra la suma total de costos para dos escenarios. En el primer escenario, se consideran únicamente los costos de operación de la PTARJ y la PPEP, asumiendo que el costo por el bombeo del agua desde la PTARJ hasta la presa El Palote ya está incluido en el proceso de operación, ya que no se trata de un usuario privado solicitando agua tratada. Por otro lado, el escenario dos incluye los costos de operación de la PTARJ y PPEP, así como el costo asociado al bombeo del agua tratada, ya que este último costo no está cubierto dentro del servicio de operación. En este escenario, se considera que el bombeo del agua tratada es un gasto adicional que debe ser tomado en cuenta por separado. En resumen, el primer escenario asume que el costo de bombeo del agua tratada ya está incluido en los costos de operación, mientras que el segundo escenario considera el costo de bombeo como un gasto independiente a los costos de operación. Para ambos escenarios se incluyen los costos mínimos, máximos y promedio. Esta información proporciona una visión general de los costos totales que se tendrían al aplicar la reutilización de agua tratada y potabilizada.

Tabla 6. Suma de los costos para la reutilización de agua tratada y potabilizada.

	Escenario 1			Escenario 2		
	Mínimo	Máximo	Promedio	Mínimo	Máximo	Promedio
Costo de operación PTARJ	\$0.87	\$4.69	\$1.80	\$0.87	\$4.69	\$1.80
Costo de bombeo	\$0	\$0	\$0	\$10.41	\$10.41	\$10.41
Costo de operación PPEP	\$1.98	\$4.20	\$2.95	\$1.98	\$4.20	\$2.95
<b>Total (\$/m<sup>3</sup>)</b>	<b>\$2.95</b>	<b>\$8.89</b>	<b>\$4.75</b>	<b>\$13.26</b>	<b>\$19.30</b>	<b>\$15.16</b>

De acuerdo con los resultados obtenidos, se puede observar que el costo mínimo, sin considerar el costo de bombeo por separado, es de \$2.95 por m<sup>3</sup>, mientras que el costo máximo es de \$8.89 por m<sup>3</sup>. Por otro lado, al incluir el costo de bombeo, los valores mínimos y máximos ascienden a \$13.26 por m<sup>3</sup> y \$19.30 por m<sup>3</sup>, respectivamente. Dado que los costos presentan variaciones a lo largo del año, se tomará en cuenta el costo promedio para llevar a cabo el balance de costos en el proyecto.

Como parte de los ingresos, la Ley de Ingresos del SAPAL (SAPAL, 2022a) tiene como tarifa para el servicio de agua potable para uso doméstico en la ciudad de León, incluidas las

colonias abastecidas por la PPEP, una cuota base de \$127.45 y la suma del importe que resulte de multiplicar los metros cúbicos consumidos por el precio unitario que corresponde a la Tabla 7:

Tabla 7. Importe del precio por consumo de m<sup>3</sup> de agua para uso doméstico.

Consumo m <sup>3</sup>	Importe por m <sup>3</sup>	Consumo m <sup>3</sup>	Importe por m <sup>3</sup>	Consumo m <sup>3</sup>	Importe por m <sup>3</sup>	Consumo m <sup>3</sup>	Importe por m <sup>3</sup>
0		8	\$9.70	16	\$17.80	24	\$30.56
1	\$9.31	9	\$9.75	17	\$19.94	25	\$31.69
2	\$9.37	10	\$9.81	18	\$22.06	26	\$32.28
3	\$9.43	11	\$10.11	19	\$24.19	27	\$32.87
4	\$9.48	12	\$11.16	20	\$26.31	28	\$33.47
5	\$9.53	13	\$12.19	21	\$27.38	29	\$34.06
6	\$9.59	14	\$13.23	22	\$28.44	30	\$34.64
7	\$9.64	15	\$15.30	23	\$29.51		

Fuente: Ley de Ingresos del SAPAL, 2023.

Para el suministro de agua potable, SAPAL debe de aplicar acciones operativas que se basan en la extracción, conducción y distribución del agua para hacerla llegar a cada domicilio de León. Esto significa que SAPAL debe de aplicar costos por energía eléctrica, costos operativos y de mantenimiento, y costos por derechos de extracción que se pagan conforme al Artículo 222 de la Ley Federal de Derechos a la Comisión Nacional de Agua. Por lo anterior, la cuota base representa la suma de los importes relativos a pago de energía eléctrica por la operación de los pozos, el pago de mantenimiento operativo de las redes de conducción y distribución, y el pago de derechos que debe hacerse a la federación por la extracción del volumen de agua de la suma de todos los pozos que se tienen operando para garantizar el suministro de agua al Municipio de León (SAPAL, 2023c).

En este sentido, la cuota base puede considerarse como un valor fijo, lo que permite dejarla fuera del balance de costos. No obstante, también existe la posibilidad de incluir la cuota base dividiéndola entre el consumo de agua promedio en los hogares, y el resultado obtenido se sumaría a los ingresos. Basándonos en esta premisa, se presentan cuatro escenarios para el balance de costos, como se muestra en la Tabla 8. Estos escenarios considerarán diferentes enfoques para evaluar la cuota base y el costo de bombeo, y cómo estos tienen un impacto en el balance económico del proyecto.

Tabla 8. Escenarios para el balance de costos del proyecto.

Escenario	1	2	3	4
<b>Ingresos</b>	Pago por el m <sup>3</sup> de agua (PA)	Pago por el m <sup>3</sup> de agua (PA)	Pago por el m <sup>3</sup> de agua (PA) + Fracción de cuota base (FCBa)	Pago por el m <sup>3</sup> de agua (PA) + Fracción de cuota base (FCBa)
<b>Costos</b>	Costo de operación PTARJ (COPTARJ) + Costo de operación PPEP (COPPEP)	Costo de operación PTARJ (COPTARJ) + Costo de bombeo (CBo) + Costo de operación PPEP (COPPEP)	Costo de operación PTARJ (COPTARJ) + Costo de operación PPEP (COPPEP)	Costo de operación PTARJ (COPTARJ) + Costo de bombeo (CBo) + Costo de operación PPEP (COPPEP)

Con el objetivo de lograr un balance de costos más realista y aproximado al consumo de agua en la ciudad, no se consideró simplemente el valor de un metro cúbico, sino que se investigó y obtuvo el consumo promedio de agua en los hogares. Actualmente, el consumo promedio de agua por hogar es de 9 m<sup>3</sup> (SAPAL, 2023g), por lo que este valor fue utilizado para realizar el cálculo del pago por cada m<sup>3</sup> de agua y para obtener la fracción correspondiente a la cuota base. De esta manera, se busca obtener estimaciones más precisas y acertadas en el análisis económico del proyecto, considerando los consumos reales de agua en la ciudad. Los balances de costos resultantes para cada uno de los escenarios se presentan a continuación:

#### Escenario 1

$$\text{Ingresos (\$)} - \text{Costos (\$)} = \text{Balance (\$)}$$

$$PA (\$) - [COPTARJ (\$) + COPPEP (\$)] = \text{Balance (\$)}$$

$$(9m^3 * \$9.75/m^3) - (9m^3 * \$4.75/m^3) = \text{Balance (\$)}$$

$$\$87.75 - \$42.75 = \text{Balance}$$

$$\text{Balance E1} = \$45$$

#### Escenario 2

$$\text{Ingresos (\$)} - \text{Costos (\$)} = \text{Balance (\$)}$$

$$PA (\$) - [COPTARJ (\$) + CBo(\$) + COPPEP (\$)] = \text{Balance (\$)}$$

$$(9m^3 * \$9.75/m^3) - (9m^3 * \$15.16/m^3) = \text{Balance (\$)}$$

$$\$87.75 - \$136.44 = \text{Balance}$$

$$\text{Balance E2} = -\$49.44$$

### Escenario 3

$$\text{Ingresos (\$)} - \text{Costos (\$)} = \text{Balance (\$)}$$

$$[\text{PA (\$)} + \text{FCBa (\$)}] - [\text{COPTARJ (\$)} + \text{COPPEP (\$)}] = \text{Balance (\$)}$$

$$[(9\text{m}^3 * \$9.75/\text{m}^3) + \$127.45/9\text{m}^3] - (9\text{m}^3 * \$4.75/\text{m}^3) = \text{Balance (\$)}$$

$$\$101.91 - \$42.75 = \text{Balance}$$

$$\text{Balance E3} = \$59.16$$

### Escenario 4

$$\text{Ingresos (\$)} - \text{Costos (\$)} = \text{Balance (\$)}$$

$$[\text{PA (\$)} + \text{FCBa (\$)}] - [\text{COPTARJ (\$)} + \text{CBo (\$)} + \text{COPPEP (\$)}] = \text{Balance (\$)}$$

$$[(9\text{m}^3 * \$9.75/\text{m}^3) + \$127.45/9\text{m}^3] - (9\text{m}^3 * \$15.16/\text{m}^3) = \text{Balance (\$)}$$

$$\$101.91 - \$136.44 = \text{Balance}$$

$$\text{Balance E4} = -\$34.53$$

Un resumen de los balances para cada escenario se muestra en la Tabla 9.

Tabla 9. Resumen de los balances de costos para cada escenario posible en el proyecto.

Escenario	1	2	3	4
Balance	\$45	-\$49.44	\$59.16	-\$34.53

Los resultados anteriores mostraron el escenario más favorable, siendo los escenarios uno y tres los que presentan un valor positivo, mientras que los escenarios dos y cuatro muestran un valor negativo. Estos últimos demuestran que el proyecto carece de viabilidad económica, ya que los costos superan los ingresos que se pueden generar, principalmente debido al elevado costo asociado al bombeo del agua tratada. Esto implica una pérdida económica para SAPAL, lo que podría requerir ajustes en los procesos de la PTARJ o PPEP para reducir los costos operativos. Alternativamente, podría implicar un aumento en el costo del servicio de agua para los usuarios, de modo que los ingresos se igualan a los costos y se logre la viabilidad económica del proyecto.

El escenario tres es el que presenta la mayor ganancia, ya que considera una fracción de los ingresos generados por la cuota base, dividiéndola entre los 9 m<sup>3</sup> que representan el consumo promedio en los hogares de León, Guanajuato. Sin embargo, es importante destacar que la cuota base tiene la función de cubrir costos fijos previamente mencionados, por lo que tomar una fracción de ella podría resultar en la insuficiencia de ingresos para cubrir estos costos fijos, generando una problemática para SAPAL.

En este sentido, el escenario uno se muestra como el más viable económicamente para el proyecto, siempre y cuando el costo por el bombeo se encuentre incluido en los costos de operación presentados en la Tabla 5. La ganancia obtenida en este escenario podría destinarse a futuros proyectos en favor de la conservación del agua que SAPAL pueda desarrollar. Otra opción sería la reducción del costo del servicio del agua para las colonias involucradas en el proyecto, aunque esto podría ocasionar conflictos con otros habitantes de la ciudad debido a las diferencias de costos. Para abordar estas posibles situaciones, es esencial comunicar claramente que estas colonias contarán con agua tratada y potabilizada en sus hogares o, en su defecto, expandir la reutilización de agua tratada y potabilizada a más colonias de la ciudad para lograr reducir los costos y, por ende, disminuir el costo del servicio de agua doméstica en León, Guanajuato. Estas opciones permitirían equilibrar los beneficios y costos del proyecto, asegurando su viabilidad económica y social a largo plazo.

### **11.3. Viabilidad ambiental**

---

Uno de los principales objetivos de la aplicación de este proyecto es reducir la sobreexplotación del acuífero Valle de León logrando aumentar el porcentaje de abastecimiento de la Planta Potabilizadora El Palote (PPEP) al reutilizar agua residual tratada. A continuación, se muestran los cálculos y modelos realizados para conocer la cantidad de volumen extra que se producirá de la PPEP y, como consecuencia, el porcentaje que se disminuirá de la extracción del acuífero Valle de León al implementar la propuesta.

Según la información proporcionada por (SAPAL, 2023e), se ha establecido que el flujo de agua proveniente de la PTARJ, considerado para el proyecto, es de 60 litros por segundo (L/s). Este flujo constante se ha determinado con el propósito de asegurar una disponibilidad continua de agua para su reutilización y potabilización en las colonias abastecidas por la PPEP. Además,

en caso de existir un flujo adicional, este se destinará a cuerpos de agua u otros fines. La Tabla 10 presenta el volumen producido y el caudal del proceso en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Las Joyas (PTARJ) para cada mes del año 2022 (SAPAL, 2023f). Los valores están desglosados por mes, y se observa que el caudal de tratamiento se mantiene por encima de los 60 L/s en todos los meses. Esta información asegura que siempre se contará con el flujo constante necesario para ser destinado a la presa El Palote y llevar a cabo su reutilización de manera efectiva.

Tabla 10. Volumen producido y caudal para la PTARJ.

Año 2022	Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Las Joyas	
	Volumen producido (m <sup>3</sup> )	Caudal de tratamiento (L/s)
Enero	185,100	69.11
Febrero	230,000	95.07
Marzo	227,200	84.83
Abril	203,400	78.47
Mayo	178,600	66.68
Junio	186,700	72.03
Julio	204,600	76.39
Agosto	217,400	81.17
Septiembre	157,600	60.8
Octubre	222,900	83.22
Noviembre	207,100	79.9
Diciembre	197,000	73.55
<b>Promedio</b>	<b>201,467</b>	<b>76.77</b>

La presa El Palote juega un papel fundamental en el proyecto, ya que será el cuerpo de agua que recibirá el agua tratada proveniente de la PTARJ y será la fuente de abastecimiento para la potabilización en la PPEP. Como se mencionó previamente, esta presa se recarga principalmente por pequeñas corrientes que desembocan en ella y por la precipitación pluvial. La cantidad de lluvia anual es un factor crucial para mantener el nivel de la presa en un punto que permita su aprovechamiento, ya que solo se puede extraer agua cuando su volumen almacenado supera la mitad de su capacidad total, es decir, más de 4,000,000 m<sup>3</sup>, ya que la capacidad total de la presa es de 8,000,000 m<sup>3</sup>. La Tabla 11 presenta los datos de precipitación registrados en la ciudad de León durante los últimos cinco años (SAPAL, 2023d).



Tabla 11. Precipitación promedio mensual en León, Guanajuato.

Año/ mes	ene.	feb.	mar.	abr.	may.	jun.	jul.	ago.	sep.	oct.	nov.	dic.	total
2023	0.55	0.0	0.3	0.7	6.2	11.7	-	-	-	-	-	-	-
2022	0.0	0.0	0.0	3.9	1.1	32.3	146.0	203.9	19.2	30.8	6.8	0.0	444.0
2021	8.8	0.0	0.0	1.1	30.9	106.4	151.8	180.7	213.0	73.5	0.5	2.9	769.5
2020	6.3	19.5	4.7	0.7	31.0	71.8	123.2	135.9	100.9	11.1	0.0	0.8	505.8
2019	0.9	0.0	1.1	0.6	10.0	139.9	185.6	156.9	67.7	73.2	20.4	6.3	662.5
2018	2.4	17.9	0.0	13.6	37.5	305.1	107.3	158.6	240.1	52.3	45.5	0.0	980.1
2017	0.0	0.3	3.5	0.0	10.5	141.3	199.7	142.2	133.5	0.7	0.1	0.0	631.9

Se empleó la herramienta RStudio para crear una gráfica que ilustra el comportamiento de la precipitación en la ciudad de León durante los últimos cinco años (Figura 18), utilizando los datos proporcionados en la Tabla 12. Al observar el gráfico, se aprecia claramente un patrón estacional constante, con un pico que abraza los meses de junio a septiembre, durante los cuales se registra una mayor cantidad de precipitación en comparación con los demás meses. Además, la gráfica muestra una notable variación en la cantidad de precipitación a lo largo de los años, evidenciando una disminución gradual en la lluvia conforme transcurre el tiempo. Esta tendencia podría atribuirse al impacto del cambio climático, el cual ha ocasionado un aumento en las temperaturas y ha alterado los patrones de precipitación y todo el ciclo del agua en la región.

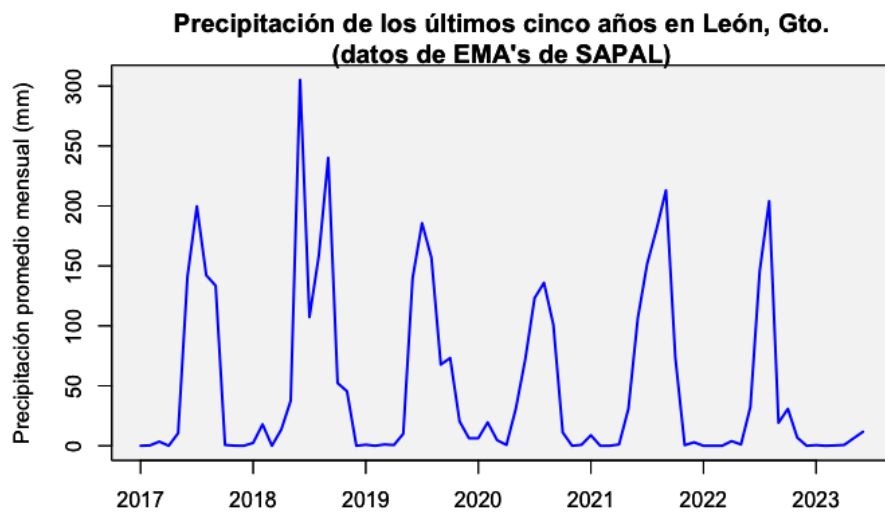


Figura 18. Precipitación de los últimos cinco años en la ciudad de León, Guanajuato.

La información sobre la precipitación es de vital importancia para el proyecto, ya que afecta directamente la disponibilidad de agua en la presa El Palote. A través del análisis de los registros de precipitación, se puede determinar la relación entre la cantidad de lluvia y el nivel de la presa, lo que permitirá planificar y gestionar de manera efectiva la utilización del recurso hídrico en el proceso de reutilización de agua tratada. Con ayuda de la Tabla 11, el programa RStudio y la metodología Box-Jenkins (ARIMA), se hizo una estimación de la cantidad de precipitación para los próximos 12 meses, cuyos resultados se presentan en la Figura 19.

Esta proyección es de gran utilidad para anticipar el comportamiento de la lluvia en los meses venideros y, consecuentemente, comprender cómo se verá afectada la presa El Palote debido a la cantidad de agua pluvial que recibirá. Como era de esperarse, se observa una tendencia de disminución en los niveles de precipitación en comparación con años anteriores, lo que resulta en una proyección de recargas mensuales más bajas para la presa El Palote en los próximos meses. Esta tendencia también puede observarse dentro de la precipitación total de los últimos cinco años, mostrada en la Figura 18.

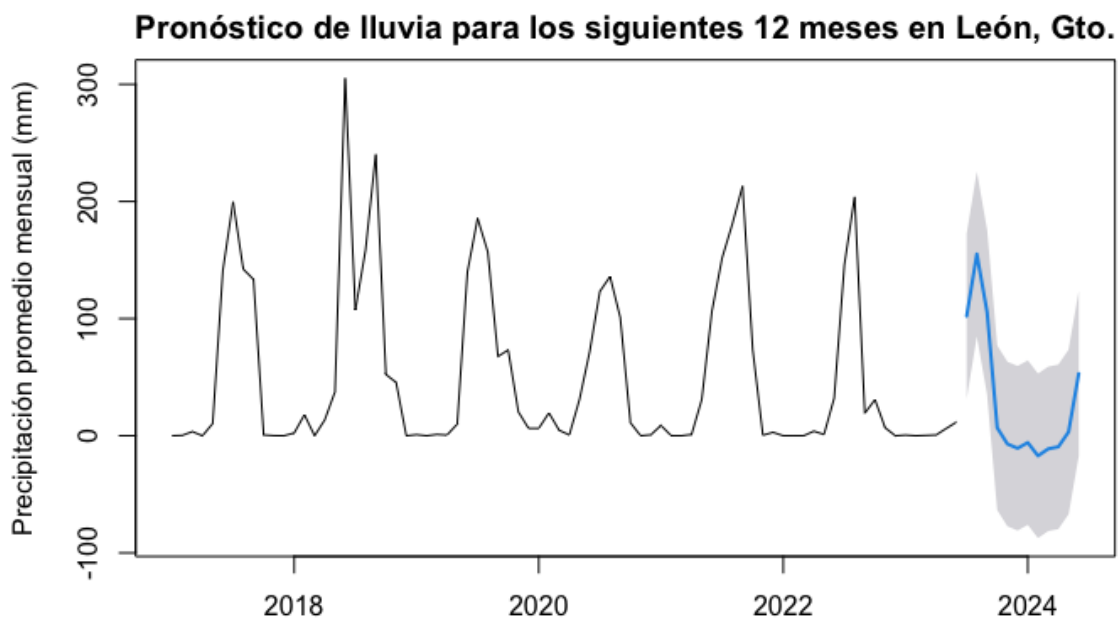


Figura 19. Precipitación de los últimos cinco años en la ciudad de León, Guanajuato.

La Tabla 12 presenta los valores estimados con ayuda de la función ARIMA en el programa RStudio para la precipitación promedio mensual en mm de los próximos 12 meses, además de los mínimos y máximos mensuales con un nivel de significancia del 95%

Tabla 12. Estimación de la precipitación promedio mensual (mm) para los próximos 12 meses en la ciudad de León, Guanajuato.

Mes	Precipitación promedio (mm)	Precipitación mínima (mm)	Precipitación máxima (mm)
Julio 2023	102.17	37.98	172.34
Agosto 2023	155.08	84.89	225.26
Septiembre 2023	105.77	35.59	175.95
Octubre 2023	6.76	0	76.94
Noviembre 2023	0	0	63.14
Diciembre 2023	0	0	59.50
Enero 2024	0	0	64.31
Febrero 2024	0	0	53.01
Marzo 2024	0	0	58.96
Abril 2024	0	0	60.72
Mayo 2024	0	0	73.42
Junio 2024	0	0	123.21

Las estimaciones de la Tabla 12 proporcionan una visión detallada de los valores aproximados que se esperan para la precipitación en los próximos meses. Tener en cuenta los valores mínimos y máximos también permite comprender la variabilidad climática y los posibles escenarios en cuanto a la disponibilidad de agua en la presa El Palote. Algo relevante para destacar de la gráfica y la tabla es que, en las estimaciones con significancia de 95%, se muestra que los pronósticos generados por ARIMA son negativos en algunos meses, por lo que se hizo un ajuste a *cero* debido a que los valores negativos no tienen sentido real. Es importante mencionar que los modelos matemáticos pueden producir resultados negativos en ciertos escenarios, pero estos valores no tienen sentido físico o práctico, ya que no puede haber precipitación negativa en la realidad. Es por lo anterior que, al tomar estos valores negativos como cero, se busca garantizar la coherencia y la interpretación adecuada de los datos estimados.

Para llevar a cabo el proyecto de reutilización de agua tratada y potabilizada en la presa El Palote, es esencial que el nivel de la presa regrese a un punto por encima de la mitad de su

capacidad, lo cual permitirá la extracción y potabilización del agua. Según los informes de SAPAL, el volumen actual de la presa ronda alrededor de los 1,450,000 m<sup>3</sup> (SAPAL, 2023b). Para estimar el tiempo necesario para alcanzar el nivel requerido, se ha considerado la precipitación promedio mensual estimada para los próximos 12 meses y el área de captación de lluvia de la presa, que es de aproximadamente 3,376,300 m<sup>2</sup> (SAPAL, 2019). A partir de estos datos, se han realizado los cálculos pertinentes para determinar el periodo necesario para que la presa alcance más de la mitad de su capacidad y permita el inicio de la extracción y potabilización del agua.

***Precipitación promedio (m)***

$$\text{Precipitación promedio (m)} = \text{Precipitación promedio (mm)} * \frac{1 \text{ m}}{1000 \text{ mm}}$$

***Captación de lluvia (m<sup>3</sup>)***

$$\text{Captación de lluvia (m}^3\text{)} = \text{Precipitación promedio (m)} * \text{Área de captación presa (m}^2\text{)}$$

$$\text{Captación de lluvia (m}^3\text{)} = \text{Precipitación promedio (m)} * 3,376,300 \text{ m}^2$$

***Flujo diario PTARJ***

$$\text{Flujo diario PTARJ} = \left( 60 \frac{\text{l}}{\text{s}} * \frac{0.001 \text{ m}^3}{\text{l}} \right) * 3,600 \frac{\text{s}}{\text{hora}} * 24 \frac{\text{h}}{\text{día}}$$

$$\text{Flujo diario PTARJ} = 0.06 \text{ m}^3/\text{s} * 3,600 \text{ s/hora} * 24 \text{ h/día}$$

$$\text{Flujo diario PTARJ} = 5184 \text{ m}^3/\text{día}$$

***Volumen de la PTARJ (m<sup>3</sup>)***

$$\text{Volumen de la PTARJ} = \text{Flujo diario PTARJ} * \text{núm días del mes}$$

***Recarga presa El Palote (m<sup>3</sup>)***

$$\text{Recarga presa El Palote} = \text{Captación de lluvia} + \text{Volumen de la PTARJ}$$

***Acumulado de recarga (m<sup>3</sup>)***

$$\text{Acumulado de recarga (n)} = [\text{Recarga presa El Palote (1)} + \text{Recarga presa El Palote (2)} + \dots + \text{Recarga presa El Palote (n)}] + 1,450,000 \text{ m}^3$$

donde  $n$  es igual al número de meses

En la Tabla 13 se muestran los resultados para la estimación de la recarga de la presa El Palote, donde se utilizaron las fórmulas anteriores para cada uno de los siguientes 12 meses.

Tabla 13. Estimación de la recarga de la presa El Palote.

Mes	Días	Precipitación promedio (m)	Captación de lluvia (m <sup>3</sup> )	Volumen de la PTARJ (m <sup>3</sup> )	Recarga presa El Palote (m <sup>3</sup> )	Acumulado de recarga (m <sup>3</sup> )
Julio 2023	31	0.10217	344,956.57	160,704.00	505,660.57	1,955,660.57
Agosto 2023	31	0.15508	523,596.60	160,704.00	684,300.60	2,639,961.18
Septiembre 2023	30	0.10577	357,111.25	155,520.00	512,631.25	3,152,592.43
Octubre 2023	31	0.00676	22,823.79	160,704.00	183,527.79	3,336,120.21
Noviembre 2023	30	0	0.00	155,520.00	155,520.00	3,491,640.21
Diciembre 2023	31	0	0.00	160,704.00	160,704.00	3,652,344.21
Enero 2024	31	0	0.00	160,704.00	160,704.00	3,813,048.21
Febrero 2024	28	0	0.00	145,152.00	145,152.00	3,958,200.21
Marzo 2024	31	0	0.00	160,704.00	160,704.00	<b>4,118,904.21</b>
Abril 2024	30	0	0.00	155,520.00	155,520.00	<b>4,274,424.21</b>
Mayo 2024	31	0.00326	11,006.74	160,704.00	171,710.74	<b>4,446,134.95</b>
Junio 2024	30	0.05305	179,112.72	155,520.00	334,632.72	<b>4,780,767.67</b>

La proyección muestra que, a partir de marzo de 2024, la presa alcanzaría el 50% de su capacidad considerando tanto la precipitación como el agua tratada proveniente de la PTARJ. No obstante, para asegurar una mayor disponibilidad de agua y evitar niveles bajos a corto plazo, se recomienda esperar hasta junio de 2024, cuando se estima que la presa alcanzaría el 60% de su capacidad, es decir, aproximadamente 4,800,000 m<sup>3</sup>. En este volumen de recarga, la precipitación

contribuyó con un 43.19% del total, mientras que el agua tratada de la PTARJ representó un 56.81%. Aunque la diferencia entre ambas no es tan amplia, el aporte de agua tratada de la PTARJ es significativo, ya que, si solo se confiara en el agua de la precipitación para recargar la presa, el tiempo necesario para alcanzar el nivel de agua deseado se duplicaría. Lo anterior subraya la notable contribución de la reutilización de agua tratada. Si el proyecto se detuviera en esta fase, estaría desempeñando un papel crucial en el mantenimiento de un nivel de agua apropiado en la presa, beneficiando al ecosistema tanto dentro como en los alrededores de ésta.

El escenario anterior sería el óptimo para iniciar la extracción y potabilización del agua de la presa El Palote en el proyecto de reutilización de agua tratada y potabilizada. Los siguientes cálculos se realizaron con el objetivo de conocer el flujo de entrada de la PPEP que se tendría con el proyecto y sin comprometer el nivel de agua de la presa, buscando que se mantenga por encima de la mitad de su capacidad.

#### ***Disminución de la captación de lluvia***

$$\text{Disminución} = \text{Captación de lluvia}_{2022} - \text{Captación de lluvia}_{\text{estimado}}$$

$$\text{Disminución} = 1,499,077.2 \text{ m}^3 - 1,438,607.67 \text{ m}^3$$

$$\text{Disminución} = 60,469.53 \text{ m}^3$$

#### ***Captación de lluvia en dos años (después de la recarga de la presa)***

$$\text{Captación de lluvia}_{2024,25} = \text{Captación de lluvia}_{\text{estimado}} - \text{Disminución}$$

$$\text{Captación de lluvia}_{2024,25} = 1,438,607.67 \text{ m}^3 - 60,469.53 \text{ m}^3$$

$$\text{Captación de lluvia}_{2024,25} = 1,378,138.13 \text{ m}^3$$

El valor de *Captación de lluvia*<sub>2024,25</sub> representa el volumen estimado de lluvia para el siguiente año después de que la presa se recupere y alcance un nivel por encima de la mitad de su capacidad. Con esta información, podemos calcular el flujo adicional que se puede extraer de la presa, además de los 60 L/s provenientes de la PTARJ, sin comprometer su nivel de agua. Para realizar este cálculo, consideraremos un flujo que reduzca a la mitad el volumen estimado de captación de lluvia, es decir:

$$\text{Volumen para flujo} = \text{Captación de lluvia}_{2024,25}/2$$

$$\text{Volumen para flujo} = 1,378,138.13 \text{ m}^3/2$$

$$\text{Volumen para flujo} = 689,069.07 \text{ m}^3$$

**Flujo adicional**

$$\text{Flujo adicional} = \frac{\text{Volumen para flujo}}{365 \text{ días}} * \frac{1 \text{ día}}{86,400 \text{ seg}} * \frac{1 \text{ l}}{0.001 \text{ m}^3}$$

$$\text{Flujo adicional} = \frac{689,069.07 \text{ m}^3}{365 \text{ días}} * \frac{1 \text{ día}}{86,400 \text{ seg}} * \frac{1 \text{ l}}{0.001 \text{ m}^3}$$

$$\text{Flujo adicional} = 21.85 \text{ l/s}$$

Con base en el resultado obtenido para el flujo adicional, se podría contar con un caudal de entrada de 81.85 L/s para la PPEP. Es importante señalar que este flujo puede mantenerse constante o ser ajustado en caso de ser necesario, especialmente si la presa comienza a reducir su nivel de agua y se acerca a estar por debajo de la mitad de su capacidad. La posibilidad de ajustar el flujo es una medida preventiva para garantizar que la presa no se agote y mantener un suministro sostenible de agua para la potabilización y distribución a las colonias abastecidas por la PPEP. Es relevante mencionar que, de acuerdo con la información proporcionada por SAPAL, el caudal de operación para la PPEP está establecido en 300 L/s, por lo que el flujo estimado de 81.85 L/s se encuentra dentro de este límite, asegurando que no habrá problemas en el proceso de potabilización.

Al analizar la Tabla 14, se pudo estimar el caudal de agua perdido durante el proceso de potabilización, que resultó ser de 3.6 L/s. Por lo tanto, al restar este caudal perdido al nuevo flujo de entrada de la PPEP, se obtiene un caudal potabilizado de 78.25 L/s para el año 2024\_25. Esta cantidad representa la cantidad de agua que estará disponible y apta para ser distribuida a las colonias, asegurando así un abastecimiento adecuado y una sostenibilidad en el proceso de reutilización de agua tratada y potabilizada.

Tabla 14. Caudal de potabilización y perdido para la PPEP en el 2022.

Año 2022	Planta Potabilizadora El Palote			
	Flujo de entrada (L/s)	Caudal de potabilización (L/s)	Caudal perdido (L/s)	Volumen producido (m <sup>3</sup> )
Enero	66.7	62.4	4.3	167,223
Febrero	75.7	71.7	4	173,479
Marzo	70.7	67.6	3.1	181,139

Año 2022	Planta Potabilizadora El Palote			
	Flujo de entrada (L/s)	Caudal de potabilización (L/s)	Caudal perdido (L/s)	Volumen producido (m <sup>3</sup> )
Abril	76	71.7	4.3	185,726
Mayo	77.9	76.1	1.8	203,695
Junio	76	72.4	3.6	187,711
Julio	59.3	56.5	2.8	151,422
Agosto	64.4	56.2	8.2	53,410
Septiembre	16.5	13.9	2.6	35,945
Octubre	25.8	20.4	5.4	54,626
Noviembre	34.7	32.4	2.3	84,101
Diciembre	34.6	34	0.6	90,984
<b>Promedio</b>	<b>56.5</b>	<b>52.9</b>	<b>3.6</b>	<b>130,788</b>

La Tabla 15 muestra el volumen de agua potabilizada producida por la PPEP para el año 2022 y con el flujo estimado de 78.25 L/s para el año 2024\_25. Adicionalmente se añadió la producción para el flujo de entrada de 60 L/s, 56.4 L/s considerando el flujo perdido, esto con la finalidad de encontrar cuánto volumen se puede producir sin tomar más agua que la que recibiría la presa de la PTARJ.

Tabla 15. Volumen producido para el año 2022 y con la estimación para el año 2024\_25.

Año 2022	Volumen producido (m <sup>3</sup> )	Año 2024-25	Volumen producido con 56.4 L/s (m <sup>3</sup> )	Volumen producido con 78.25 L/s (m <sup>3</sup> )
Enero	167,223	Julio	151,062	209,585
Febrero	173,479	Agosto	151,062	209,585
Marzo	181,139	Septiembre	146,189	202,824
Abril	185,726	Octubre	151,062	209,585
Mayo	203,695	Noviembre	146,189	202,824
Junio	187,711	Diciembre	151,062	209,585
Julio	151,422	Enero	151,062	209,585
Agosto	53,410	Febrero	136,443	189,302
Septiembre	35,945	Marzo	151,062	209,585
Octubre	54,626	Abril	146,189	202,824
Noviembre	84,101	Mayo	151,062	209,585
Diciembre	90,984	Junio	146,189	202,824
<b>Total</b>	<b>1,569,461</b>	<b>Total</b>	<b>1,778,630</b>	<b>2,467,692</b>

A partir de los resultados previos, se pudo determinar el volumen adicional que se obtendría mediante la implementación del reúso de agua tratada y potabilizada. Se encontró que, con un flujo de entrada de 60 L/s, se tendría un volumen extra de 209,169 m<sup>3</sup>, mientras que con



un flujo de entrada de 81.85 L/s, este volumen adicional aumentaría a 898,231 m<sup>3</sup>, en comparación con la producción del año 2022. Estos valores son susceptibles de cambio según el flujo de entrada que defina el organismo operador. No obstante, estos resultados demuestran que es factible obtener un volumen adicional al que actualmente se produce en la PPEP al reutilizar el agua tratada con este propósito, logrando un incremento del 13.33% en la producción de agua con un flujo de entrada de 60 L/s y un 57.23% con un flujo de 81.85 L/s.

El flujo de entrada tiene un impacto significativo en la cantidad de flujo producido. Por esta razón, es fundamental establecer un flujo de entrada que garantice un volumen sustancial de agua adicional y, al mismo tiempo, que contribuya a mantener un nivel adecuado de agua en la presa. Asimismo, el reúso de agua tratada también permitiría reducir la cantidad de agua extraída del acuífero para uso público urbano, lo cual contribuiría a mitigar la sobreexplotación del acuífero y promover una gestión más sostenible del recurso hídrico en la ciudad. Para obtener cuánto porcentaje se puede disminuir de la extracción de agua del acuífero Valle de León para el uso público urbano y general, se realizaron las siguientes operaciones considerando el volumen producido con el flujo de 81.85 L/s:

### ***Diferencia de volumen***

$$Diferencia\ de\ volumen = Volumen\ producido\ PPEP_{2024,25} - Volumen\ producido\ PPEP_{2022}$$

$$Diferencia\ de\ volumen = 2,467,692\ m^3 - 1,569,461\ m^3$$

$$Diferencia\ de\ volumen = 898,231\ m^3$$

### ***Volumen actual***

$$Volumen\ actual = Volumen\ público\ urbano + Diferencia\ de\ volumen$$

$$Volumen\ actual = 63,152,302\ m^3 + 898,231\ m^3$$

$$Volumen\ actual = 64,050,533\ m^3$$

### ***Reducción de porcentaje uso público urbano***

$$\% \text{ Reducción público urbano} = \left( \frac{Volumen\ público\ urbano - Volumen\ actual}{Volumen\ público\ urbano} \right) * 100\%$$

$$\% \text{ Reducción público urbano} = \left( \frac{63,152,302\ m^3 - 64,050,302\ m^3}{63,152,302\ m^3} \right) * 100\%$$

$$\% \text{ Reducción público urbano} = -1.42\%$$

### ***Volumen actual Valle de León***

$$\text{Volumen actual}_{vDL} = \text{Volumen extracción Valle de León} + \text{Diferencia de volumen}$$

$$\text{Volumen actual}_{vDL} = 157,190,121 \text{ m}^3 + 898,231 \text{ m}^3$$

$$\text{Volumen actual}_{vDL} = 158,088,352 \text{ m}^3$$

### ***Reducción de porcentaje de la extracción del acuífero Valle de León***

$$\% \text{ Reducción Valle de León} = \left( \frac{\text{Volumen extracción Valle de León} - \text{Volumen actual}_{vDL}}{\text{Volumen extracción Valle de León}} \right) * 100\%$$

$$\% \text{ Reducción Valle de León} = \left( \frac{157,190,121 \text{ m}^3 - 158,088,352 \text{ m}^3}{157,190,121 \text{ m}^3} \right) * 100\%$$

$$\% \text{ Reducción Valle de León} = -0.57\%$$

A pesar de haber demostrado que el proyecto de reutilización de agua tratada y potabilizada resulta viable ambientalmente y permitiría una reducción de 1.42% en el volumen de agua destinado al uso público urbano, así como una disminución del 0.57% en la extracción del acuífero Valle de León, los porcentajes obtenidos son todavía bajos para lograr un cambio significativo en la sobreexplotación del acuífero.

Es evidente que para abordar de manera integral la problemática del agua en la ciudad de León, Guanajuato, se requieren estrategias adicionales. Una de ellas podría ser aumentar el flujo de salida de la PTARJ para incrementar el flujo de entrada a la PPEP y, con ello, obtener un volumen más significativo de agua que pueda ser distribuido a los hogares y reducir el porcentaje de extracción para el uso público urbano. Además, se podría considerar la implementación de la reutilización de agua tratada en otros sectores, como la agricultura o la industria, que también representan una demanda significativa de agua y contribuyen a la extracción del acuífero Valle de León. Estas acciones complementarias podrían sumarse al proyecto actual y generar un impacto más relevante en la conservación y manejo sostenible del recurso hídrico en la región.

## **11.4. Afectaciones ambientales, sociales y económicas**

---

### **11.4.1. Impactos ambientales**

---

La NOM-01-SEMARNAT-2021, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en agua y bienes nacionales, fue actualizada

hace menos de un año debido a que la NOM-001-SEMARNAT-1996, su antecesora, resultaba insuficiente para controlar la contaminación en los cuerpos de agua. Entre las actualizaciones que hubo en la nueva norma, se encuentran las siguientes (Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-2021, Que establece los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación, 2022):

- Actualización del listado de las Normas Mexicanas para el muestreo y análisis de los parámetros, las cuales son utilizadas como referencia para la aplicación de la NOM-001-SEMARNAT-2021, quitando aquellas que han sido canceladas o modificadas.
- Modificación de los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales con el fin de que estos sean más estrictos.
- Incorporación y regulación de nuevos parámetros: Demanda Química de Oxígeno (DQO), toxicidad y color verdadero.
- Se establecen los 35° C como temperatura máxima para las descargas en los ríos.
- Incorporación del parámetro “Carbón Orgánico Total” para medir la carga orgánica de contaminante en aguas con una concentración mayor a 1000 mg/l de cloruros.
- Se reemplaza el parámetro de *Coliformes fecales* por la determinación de *Escherichia coli*.
- Modificación en la clasificación de las descargas de agua residual, suprimiendo el uso del agua a descargar y enfocándose en la naturaleza del cuerpo receptor.

La actualización de esta norma, a pesar de que pueda representar un aumento económico en algunos sectores para cumplir con lo que se establece, también implica que, a partir de la integración de nuevos parámetros y los ajustes en los que siguen en la norma, disminuyan los impactos negativos que puedan generar en el ambiente, además de que no se vea afectada la salud humana. De hecho, la concentración de algunos de los valores establecidos en la norma actual, traerá como consecuencia una reducción en la carga de contaminantes que son vertidos a los cuerpos de agua. Asimismo, esta norma probará la eficiencia de las plantas de tratamiento de aguas residuales en México o si necesitan un cambio en su forma operacional, ya que, si se busca incentivar el reúso del agua tratada, se debe de tener la certeza de que la misma es segura para darle un segundo uso.

El proceso que se lleva a cabo dentro de la PTAR Las Joyas se muestra en la Figura 20, donde en cada proceso unitario se remueven contaminantes en específico con los que llega el agua residual a la planta. Cada uno de ellos se desarrolla a continuación:

1. Agua residual: El agua residual de las descargas domésticas en la zona norponiente de la ciudad llega a la planta de tratamiento a través de la red de drenaje.
2. Pretratamiento: Se hace una separación y eliminación de residuos gruesos, grasas y arenas a través de rejillas y un desarenador vortex.
3. Sedimentador primario: Se realiza una separación de lodos crudos y natas a través de un proceso de sedimentación y flotación, donde se busca eliminar los sólidos suspendidos.
4. Reactores biológicos: Este tratamiento se realiza mediante bacterias suspendidas en presencia del aire. En el tanque, las bacterias están en contacto con los contaminantes de agua para que funcionen como alimento y de esta manera sean eliminados. Dicho proceso elimina la materia orgánica disuelta, además de disminuir en gran parte la DBO, DQO y eliminar el resto de los sólidos sedimentables.
5. Clarificador secundario: Se hace una separación de lodos biológicos y natas a través de un proceso de sedimentación y flotación, buscando eliminar aquello que pudo llegar después del reactor biológico.
6. Tratamiento terciario: Busca la eliminación de sólidos pequeños por medio de filtración a través de arena sílica. Este proceso también busca la eliminación de agentes patógenos, como bacterias de origen fecal, con ayuda de carbón activado.
7. Canal de rayos UV: En este proceso se tiene un sistema de desinfección por medio de lámparas de radiación ultravioleta que busca reducir el número de organismos que se han creado en las etapas intermedias.
8. Tanque de agua tratada: El agua tratada es conducida a un tanque donde se puede disponer de ella para su reúso en el riego de áreas verdes, industrial o de servicios, u otro propósito.

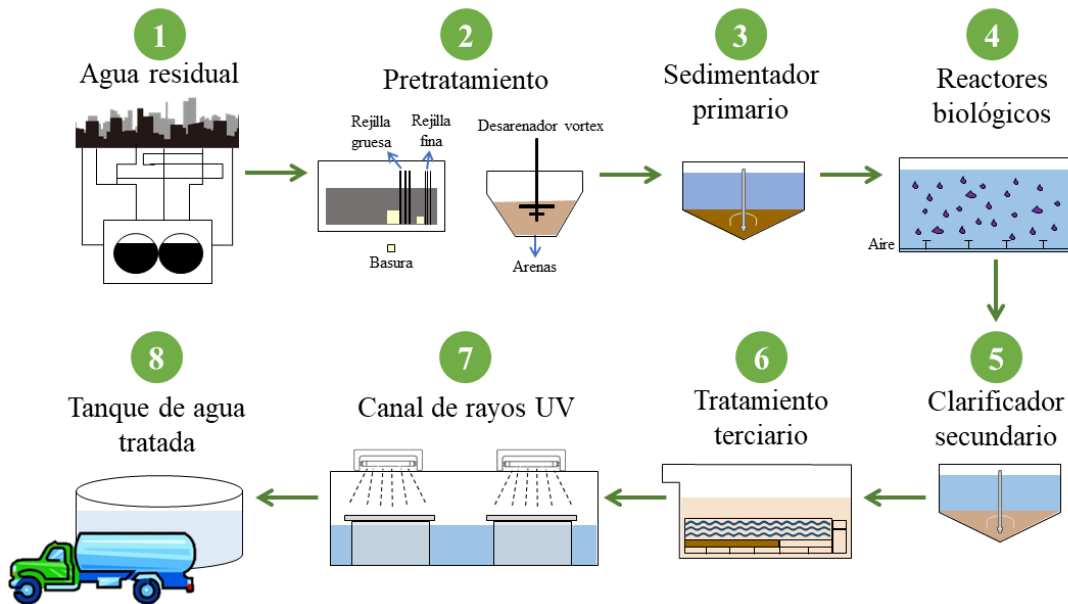


Figura 20. Proceso dentro de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Las Joyas.  
Fuente: Elaborado con la información de SAPAL (2017).

Por otro lado, el proceso que se lleva a cabo en la PPEP se muestra en la Figura 21. De igual manera, cada proceso unitario tiene el objetivo de eliminar contaminantes en específico para que el agua cumpla con la calidad necesaria para ser potable y pueda ser distribuida a los hogares sin que puedan presentar un riesgo para los usuarios. Cada proceso se describe a continuación (SAPAL, 2018a):

1. Agua de la presa: Cuando el volumen de agua de la presa se encuentra por encima de la mitad de su capacidad, esta es conducida a la planta de tratamiento.
2. Alguicida: Debido a la gran cantidad de algas presentes en la presa, el agua se somete a un primer proceso con quelato de cobre, lo cual ayuda con las algas y también para eliminar el mal olor que estas producen.
3. Coagulación: Mediante la dosificación de policloruro de aluminio, se separan partículas para su extracción, las cuales son conocidas como flóculos, coágulos o grumos. En este proceso se eliminan algas y plancton.
4. Sedimentación: En esta etapa, las partículas más pesadas se van al fondo del tanque de concreto que contiene módulos de plástico de alta sedimentación que capta los lodos, los cuales se conducen a un tanque de almacenamiento para su tratamiento.

5. Filtración: Con ayuda de antracita y arena sílica, se favorece el desprendimiento de otros solidos contenidos que son eliminados. En este proceso se debe de dar la garantía de que el agua cumpla con las normas de calidad en cuanto a turbiedad y color.
6. Desinfección: Se incorporan pastillas de hipoclorito de calcio con la finalidad de eliminar organismos y agentes patógenos que causen enfermedades, dando como resultado agua potabilizada.

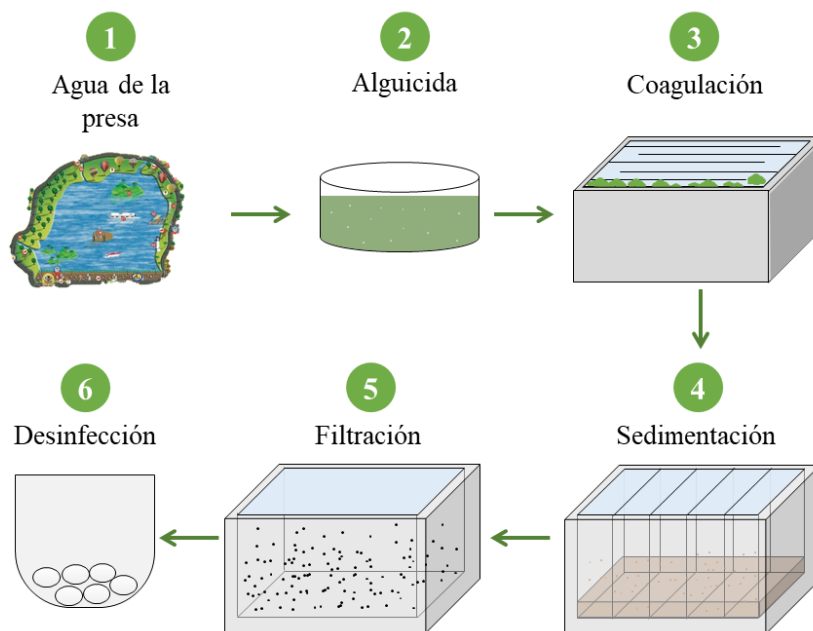


Figura 21. Proceso dentro de la Planta Potabilizadora El Palote.  
Fuente: Elaborado con la información de (SAPAL, 2018a).

Teniendo en cuenta lo anterior, se hizo un contraste entre los valores de los límites máximos permisibles para contaminantes básicos, al igual que metales pesados y cianuros, establecidos en la NOM-01-SEMARNAT-2021, y muestras tomadas de la salida de la PTAR Las Joyas para compararlo con la calidad de agua que se tiene en la presa El Palote. Los valores de cada uno de los anteriores se muestran en la Tabla 16 y 17, donde se tienen los promedios mensuales de cada caso.

Como se puede observar, la mayor parte de los contaminantes presentes en la salida de la PTAR Las Joyas cumplen con lo establecido en la norma. Sin embargo, para el caso de la DQO y *Escherichia coli*, los valores se encuentran por encima de la norma, donde la DQO es un incremento pequeño, pero la *Escherichia coli* se encuentra muy alejado del valor límite. Por otro

lado, la toxicidad aguda aún no se medía en los informes de los contaminantes presentes en las plantas de tratamiento para el 2022.

Tabla 16. Comparación entre los límites máximos permisibles para contaminantes básicos establecidos en la NOM-001-SEMARNAT-2021 y los valores obtenidos de las muestras de la salida de la PTARJ y entrada a la PPEP.

Límites máximos permisibles para contaminantes básicos			
Parámetros	NOM-001-SEMARNAT-2021	Salida Las Joyas	Toma Presa El Palote
(miligramos por litro, excepto cuando se especifique)	Embalses, lagos y lagunas		
Temperatura	35	24	20.9
Grasas y Aceites	15	9.61	n/a
Sólidos Suspendidos Totales	20	9.73	24.33
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	100	106.6	n/a
Nitrógenos Total	25	11.72	n/a
Fósforo Total	10	1.90	n/a
<i>Escherichia coli</i> (NMP/100 ml)	500	1640	n/a
Toxicidad aguda (UT)	2 a los 15 min de exposición	n/a	n/a

Tabla 17. Comparación entre los límites máximos permisibles para metales y cianuros establecidos en la NOM-001-SEMARNAT-2021 y los valores obtenidos de las muestras de la salida de la PTARJ y entrada a la PPEP.

Límites máximos permisibles para metales pesados y cianuros			
Parámetros	NOM-001-SEMARNAT-2021	Salida Las Joyas	Toma Presa El Palote
(miligramos por litro)	Embalses, lagos y lagunas		
Arsénico	0.1	<0.1	0.011
Cadmio	0.1	<0.1	<0.003
Cianuro	1	0.03	n/a
Cobre	4	<0.1	0.008
Cromo	0.5	0.24	<0.003
Mercurio	0.005	<0.004	<0.0005
Níquel	2	<0.1	n/a
Plomo	0.2	<0.1	<0.003
Zinc	10	0.12	<0.01

Un aspecto adicional que no se encuentra contemplado en los informes y que es de gran importancia es el color del agua, ya que este permite identificar de manera evidente la presencia de sustancias disueltas o partículas en suspensión, como la materia húmica, el hierro, el manganeso o el cobre. Estas sustancias pueden afectar tanto la estética del agua como la salud humana (COTEMARNAT, 2021). Por lo tanto, el monitoreo y análisis del color del agua resulta crucial para evaluar la calidad y la idoneidad del agua para su consumo y uso en actividades

domésticas e industriales. Es necesario incluir este parámetro en los informes correspondientes, a fin de obtener una visión completa y precisa de la calidad del agua y poder tomar las medidas necesarias para garantizar la salud y el bienestar de la población.

Dentro de las afectaciones que se podrían tener con el valor de DQO por encima de la norma pueden ser a) el agotamiento de oxígeno en el agua, lo que provocaría la muerte de animales acuáticos presentes en la presa, b) toxicidad en el ser humano, provocando daños a los órganos o sistemas del cuerpo, y c) posible posesión de contaminantes emergentes con alto riesgo de ecotoxicidad. Por otro lado, la alta concentración de *Escherichia coli* puede provocar enfermedades en el ser humano como diarrea, infecciones urinarias, enfermedades respiratorias e infecciones del torrente sanguíneo (OMS, 2018).

En la Figura 22, se muestran los valores del parámetro DQO y *Escherichia coli* en la PTAR Las Joyas durante el año 2022. Para el caso de la DQO, solo los meses de febrero, septiembre y octubre presentaron un valor mucho mayor al que establece la norma (217, 245 y 229.33 mg/l, respectivamente). Estos valores podrían atribuirse a posibles deficiencias en el funcionamiento del reactor biológico. Por un lado, los microorganismos podrían no estar degradando eficientemente la materia orgánica presente en el agua, lo que afectaría el proceso de reducción de la DQO. Por otro lado, la intensidad del aireado podría no haber sido suficiente para lograr una reacción adecuada en toda la materia orgánica presente. Además, es posible que durante esos meses haya habido un aumento en la producción de DQO en las descargas domésticas, cuyas aguas residuales son dirigidas hacia la PTAR Las Joyas.

Por otra parte, se observó que los valores de *Escherichia coli* excedieron el límite establecido por la normativa en la mayoría de los meses del año. Esta situación podría atribuirse a posibles deficiencias en el proceso de desinfección utilizado en la PTAR, lo que resulta insuficiente para mantener niveles bajos de esta bacteria de manera constante. Específicamente, el tratamiento terciario de la PTAR podría carecer de un carbón activado eficiente para lograr la eliminación de la bacteria, o bien, podría no contar con carbón activado en absoluto en este proceso. Asimismo, el proceso de desinfección mediante lámparas UV no demuestra ser eficaz, ya que la bacteria sigue presente en el agua tratada. Para mejorar este último proceso, se podría sugerir la incorporación de un fotocatalizador, como el dióxido de titanio ( $\text{TiO}_2$ ), para lograr la



eliminación de la bacteria *Escherichia coli* de manera más efectiva (Pantoja-Espinoza et al., 2015).

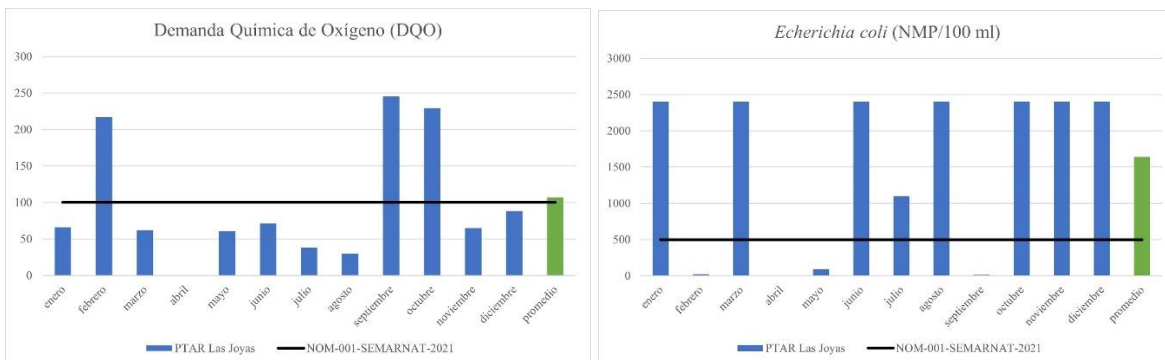


Figura 22. Gráficas de los valores mensuales registrados para los parámetros de DQO y *Escherichia coli* en la PTAR Las Joyas y el límite establecido por la NOM-001-SEMARNAT-2021.

Para ambos casos, el organismo operador debe de revisar cómo se llevan a cabo los procesos mes con mes para que no haya variación en los valores que se obtienen de los parámetros, esto para reducir los valores altos de DQO que se obtienen en los pocos meses del año, pero, especialmente, para mantener un valor constante durante todo el año en el parámetro de *Escherichia coli* y que mes con mes se logre obtener un valor que se encuentre por debajo del límite establecido por la norma.

En comparación a la calidad del agua en la presa El Palote, el agua de la salida de la PTAR Las Joyas cuenta con valores un poco mayores que los del agua de la presa. Si se busca reutilizar el agua de la PTAR y trasladarla a la presa, se podrían sugerir el uso de otras tecnologías u otros procesos dentro de la planta de tratamiento para lograr nivelar un poco más los valores de los contaminantes, tales como los biorreactores de membrana o la nanotecnología. Además, al tener la entrada de agua a la presa cerca de la toma de la planta potabilizadora (Figura 23), y como se observa en el antecedente proporcionado por SAPAL, se debe de tener una concentración de contaminantes baja para que la dispersión de estos no pueda afectar el proceso dentro de la planta potabilizadora y, en consecuencia, la calidad de agua que sale de ella. En este sentido, es fundamental que el organismo operador se asegure de restringir la recepción de aguas residuales industriales en esta PTAR. La mezcla con este tipo de aguas no solo complicaría la eliminación de los contaminantes debido a su mayor concentración, sino que también podría introducir otros tipos de contaminantes para los cuales la PTAR no está diseñada para tratar.

Con estos resultados, es importante que SAPAL trabaje en mejorar la calidad del agua que sale de la PTAR Las Joyas, y en general de todas las PTARs leonesas, para que los valores cumplan con los límites establecidos por la norma, además de integrar a los informes los niveles de toxicidad como medio de alerta para prever que sustancias reguladas o no reguladas sean vertidas a cuerpos de agua y puedan provocar daños a la salud o al ambiente. Si no se logran hacer las modificaciones necesarias para que los contaminantes se encuentren debajo de los límites establecidos por la norma, el proyecto debería de posponerse hasta que se tenga la certeza de que los valores de los contaminantes cumplan con la norma, ya que de lo contrario puede haber una afectación en la flora y fauna de la presa, además de que se pueda generar un gasto mayor en el proceso de potabilización debido a la falta de reducción de los contaminantes provenientes del agua tratada, o que estos mismos lleguen hasta los hogares de las colonias abastecidas por la planta potabilizadora.



Figura 23. Entrada del agua proveniente de la PTAR Las Joyas a través de la microcuenca La Patiña y localización de la planta potabilizadora “El Palote”.

Sin embargo, si el organismo operador logra hacer las modificaciones a la planta de tratamiento de las Joyas, entonces la alternativa de reutilizar el agua residual tratada dentro de la presa resultará benéfica para afrontar la posible escasez del agua en la ciudad, teniendo en cuenta que es una pequeña acción y que se necesitan más para verdaderamente estar listos en dado caso de que se presente una crisis hídrica más severa. Además, puede ser un proyecto que demuestre que tan preparada está la ciudad para la reutilización del agua, logrando que en un futuro se

recicle más porcentaje de agua en los hogares y así darle más vida a este recurso que se encuentra en un estado crítico. Finalmente, aplicar este proyecto en donde el agua se mantenga en constante circulación, logrará que se cumpla el principal objetivo de reducir, aunque sea un porcentaje pequeño, la sobreexplotación del acuífero Valle de León.

#### **11.4.2. Impactos sociales**

---

Dado que el proyecto de reutilización de agua residual tratada en la presa aún no se ha implementado, los posibles impactos sociales se presentan de manera hipotética, incluyendo tanto los beneficios como los riesgos que podrían surgir como resultado de la aplicación del presente proyecto.

En primer lugar, el programa de manejo del Parque Metropolitano menciona que el parque es un hábitat de diferentes aves, mamíferos, anfibios y peces, por lo que la calidad del agua resulta importante para la preservación de estas especies. El hecho de reutilizar el agua tratada dentro del embalse significaría un posible cambio en la calidad del agua, como se vio en el apartado de impactos ambientales, lo cual puede afectar a la fauna que interactúa de manera directa con el recurso. Dicho lo anterior, se debe considerar que dentro del Parque Metropolitano se realizan actividades de pesca recreativa, además de pesca para consumo y venta que es aprovechado por cierta cantidad de familias, de manera que el proyecto puede perjudicar a familias que sus ingresos dependen de la pesca en dicho parque si la calidad del agua no es buena.

Por otro lado, una de las cuestiones relevantes en relación con la implementación del proyecto es la percepción de los habitantes de las colonias abastecidas sobre la calidad del agua que llega a la presa de El Palote y la calidad del agua de salida de la PPEP. En este sentido, resulta fundamental elaborar un informe que analice la calidad de ambas aguas, ya que los usuarios involucrados en el proyecto son los principales afectados y se ha identificado una falta de confianza en la capacidad de León para potabilizar este tipo de agua. El informe será necesario para demostrar que no existen riesgos para la salud de los usuarios que consuman el agua reutilizada, y para cambiar su percepción negativa sobre el reúso del agua residual tratada y potabilizada.

Asimismo, en el último Encuentro con la Sociedad Guanajuatense, se abordaron distintos enfoques para optimizar el uso del agua, en particular en el sector agrícola. El presidente del consejo estatal agropecuario, Francisco López, expresó la importancia de eficientizar el uso del recurso hídrico en la producción de alimentos mediante la tecnificación, con el objetivo de evitar cualquier desperdicio de agua por gravedad. En respuesta a esto, el Secretario de Gobierno reconoció la viabilidad de la tecnificación y modernización para evitar la evaporación y el desperdicio de agua. Se destacó la intención de llevar adelante un proyecto que incorpore estas mejoras en las redes de distribución de agua potable. Sin embargo, se enfrentan obstáculos debido al estado actual de las tuberías y plantas de agua potable en muchos estados, lo que impide la implementación total de esta alternativa. Esto refleja el genuino interés de diversos sectores en incluir más opciones que contribuyan a una gestión más eficiente del agua en el estado de Guanajuato. No obstante, es esencial comprobar la viabilidad de estas propuestas para asegurar que su implementación no resulte contraproducente. La evaluación minuciosa de estas alternativas puede ayudar a realizar ajustes necesarios o incluso proponer otras soluciones similares que sean más viables en los diferentes contextos de las ciudades.

Este proyecto tiene el potencial de extenderse a otros puntos de la ciudad y fomentar la reutilización de agua tratada y potabilizada en sectores como la agricultura, los centros de comercio o la industria. Además, si los resultados del proyecto son positivos, también podría ser implementado en otros municipios del estado de Guanajuato, lo que lo convertiría en uno de los estados que busca esta transición hacia la sostenibilidad en respuesta a la gran problemática ambiental que enfrentamos en la actualidad. Adicionalmente, el aumento en el suministro de la PPEP también puede beneficiar a las colonias que actualmente tienen acceso limitado al agua, ya sea directamente de la PPEP o mediante la red general de agua potable, donde se pueden utilizar los m<sup>3</sup> que se ahorraron gracias a la reutilización de agua.

Sin embargo, es importante tener precaución al implementar este proyecto, ya que como se mencionó anteriormente, existe el riesgo de que los ciudadanos desperdicien más agua al considerar que habrá una mayor disponibilidad debido a la reutilización de esta. Es necesario fomentar la conciencia y educación sobre el agua entre los habitantes de León, para que aprendan a administrar el agua en sus hogares de manera eficiente, optimizando su uso y cuidando este recurso para asegurar su disponibilidad a largo plazo.

### **11.4.3. Impactos económicos**

---

Los resultados obtenidos en el análisis de viabilidad económica revelaron un escenario favorable en el que la reutilización de agua tratada y potabilizada presenta un balance positivo de \$45. Esto significa que los ingresos actuales superan los costos asociados al reúso de agua, lo que indica que el proyecto no tendría un impacto negativo en los usuarios abastecidos por la PPEP. En este contexto, existe la posibilidad de generar beneficios adicionales para los usuarios mediante la reducción de tarifas o la eliminación de costos que no se apliquen a las colonias beneficiadas, lo que podría mejorar la satisfacción y el bienestar de la comunidad.

No obstante, en caso de que el escenario presente un balance negativo, esto implicaría un impacto económico negativo para los usuarios, lo que requeriría encontrar soluciones para cubrir los costos generados por el proyecto. Esto podría traducirse en un aumento en las tarifas del servicio de agua, lo cual podría generar descontento entre los habitantes, especialmente aquellos que consideraban injusto el costo actual del servicio, según lo expresado en las encuestas realizadas a las colonias abastecidas por la PPEP. Asimismo, el aumento de la tarifa podría afectar el presupuesto familiar de algunos residentes, dependiendo de los contextos sociales de cada colonia. En este sentido, es crucial encontrar un equilibrio entre los costos del proyecto y su impacto en los usuarios. Se deben explorar alternativas para reducir los costos o generar ingresos adicionales que permitan mantener tarifas justas y asequibles para los ciudadanos, al tiempo que se asegura la sostenibilidad del proyecto y su beneficio ambiental a largo plazo.

Dentro de los impactos que puede tener a nivel ciudad, es que el organismo operador reduzca un poco la tarifa para las colonias implicadas pero se quede con una fracción para destinarla a futuros proyectos, ya sea abrir una nueva línea que provenga de la PTAR municipal y que un flujo de su agua tratada llegue también a la presa y así se pueda potabilizar un volumen mayor de agua, significando que se pueda expandir el reúso a más colonias y sea más económico a lo que se tiene actualmente; o que se construya una nueva planta potabilizadora que pueda recibir agua de la PTAR municipal para distribuir el agua tratada y potabilizada a otras zonas de la ciudad, teniendo también un impacto económico positivo al reutilizar este recurso.

## 12. CONCLUSIONES

---

El proyecto de reutilización de agua tratada y potabilizada se presenta como una valiosa alternativa sostenible para aumentar la disponibilidad de agua en la ciudad de León, Guanajuato, con una producción adicional de 898,231 m<sup>3</sup> anuales por la PPEP. No obstante, es importante reconocer que por sí solo no puede resolver de manera significativa la problemática de la sobreexplotación del acuífero Valle de León, ya que solo reduciría esta sobreexplotación en un 0.57%. Para lograr una gestión más efectiva del recurso hídrico en León, será necesario complementar el proyecto con otras estrategias que aborden la crisis hídrica de manera más holística. Entre estas se incluye la educación socioambiental de la ciudadanía, cosecha y gestión de lluvia, fomentar el ahorro y consumo responsable del agua, así como la reparación o mantenimiento de la red de abastecimiento y drenaje para reducir o prevenir fugas, entre otras medidas. Una visión integral y participativa, con el involucramiento de todos los sectores interesados, también será esencial para hacer frente a los desafíos que la ciudad enfrenta en materia de agua.

Es importante destacar las limitaciones que emergieron en esta investigación para que puedan ser consideradas en futuros trabajos. Entre estas, destaca el tamaño de la muestra, el cual resultó ser bastante reducido y, por lo tanto, no reflejó de manera representativa la percepción general sobre la crisis del agua en la ciudad, así como la aplicación del reúso de agua residual tratada y potabilizada en el conjunto total de viviendas abastecidas por la PPEP. Además, los escenarios presentados en el análisis de viabilidad económica se basaron en proyecciones actuales, lo que implica que podrían verse afectados por cambios económicos futuros en el organismo operador. Por último, existen otros factores que podrían ejercer influencia en los resultados del análisis de viabilidad ambiental, tales como la evaporación del agua en la presa durante el año, posibles fugas en la red de agua y variaciones en los flujos procedentes de la PTARJ.

En lo que respecta al trabajo futuro, se sugiere llevar a cabo una encuesta con un tamaño de muestra mayor (sin descuidar la representatividad) para obtener una visión más amplia y representativa del conjunto. Esto proporcionaría un mayor grado de confianza y validez estadística en los resultados. Con ello, se podría determinar si las colonias abastecidas por la PPEP comparten una opinión común o si existen diferencias significativas que requieran una

atención específica para fortalecer la confianza en los procesos llevados a cabo por el organismo operador, con el fin de lograr una mayor aceptación del reúso de agua residual tratada y potabilizada en sus hogares. En caso de implementar el proyecto y querer aumentar la credibilidad de los usuarios en el organismo operador, será fundamental llevar a cabo un monitoreo continuo de la calidad del agua tratada y potabilizada para garantizar el cumplimiento de los estándares normativos y la seguridad de los usuarios. Asimismo, la integración y colaboración activa de los diversos usuarios y sectores (incluyendo gobierno, industria y academia) desde las etapas iniciales del proyecto también contribuirían a fortalecer la confianza en el mismo. Esto implica que sus opiniones serían escuchadas y consideradas desde el comienzo, e incluso podrían llegar a ser tomadores de decisiones en situaciones que les conciernen directamente.

Adicionalmente, para mejorar la precisión de las proyecciones ambientales, se recomienda la inclusión de modelos climáticos más avanzados y la utilización de datos hidrológicos actualizados. Esto permitiría realizar ajustes en los flujos de entrada y salida, así como en la capacidad operativa de la PPEP, con el fin de obtener un mayor caudal de agua potable disponible para la distribución en los hogares. Con estas consideraciones, se obtendría un escenario económico más preciso y se posibilitaría la realización de un análisis de sensibilidad económica para evaluar el impacto de posibles cambios en los costos y tarifas asociados al proyecto.

En última instancia, la combinación de diversas alternativas, evaluaciones constantes y una gestión sostenible y responsable serán clave para asegurar un futuro hídrico más resiliente y sustentable para la ciudad de León, Guanajuato. Es mediante un enfoque colaborativo y proactivo que podremos enfrentar con éxito los retos que el agua nos presenta y asegurar una mejor calidad de vida para las generaciones venideras.

### 13. REFERENCIAS

---

- AECOM. (2009). *Water Supply and Water Conservation Management Plan* .
- Asamblea General de las Naciones Unidas. (2015). *Agua y saneamiento - Desarrollo Sostenible*. Objetivos de Desarrollo Sostenible. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/water-and-sanitation/>
- Baawain, M. S., Al-Mamun, A., Omidvarborna, H., Al-Sabti, A., & Choudri, B. S. (2020). Public perceptions of reusing treated wastewater for urban and industrial applications: challenges and opportunities. *Environment, Development and Sustainability*, 22(3), 1859–1871. <https://doi.org/10.1007/s10668-018-0266-0>
- Blok, V., Gremmen, B., & Wesselink, R. (2016). Dealing with the Wicked Problem of Sustainability in advance. *Business and Professional Ethics Journal*, January. <https://doi.org/10.5840/bpej201621737>
- Brandt, P., Ernst, A., Gralla, F., Luederitz, C., Lang, D. J., Newig, J., Reinert, F., Abson, D. J., & von Wehrden, H. (2013). A review of transdisciplinary research in sustainability science. *Ecological Economics*, 92, 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2013.04.008>
- Caldera Ortega, A. R., & Tagle Zamora, D. (2020). *Agua en el bajío guanajuatense*. Universidad de Guanajuato. <https://www.ugto.mx/ugentucasa/images/pdf/libro/agua-en-el-bajio-guanajuatense.pdf>
- Cauberghe, V., Vazquez-Casaubon, E., & Van de Sompel, D. (2021). Perceptions of water as commodity or uniqueness? The role of water value, scarcity concern and moral obligation on conservation behavior. *Journal of Environmental Management*, 292(March), 112677. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112677>
- Chandra, G., Chakraborty, M., & Sinha, A. K. (2018). WSI OC: The Water Sustainability Index for Office Complexes. *Asian Journal of Water, Environment and Pollution*, 15(2), 223–238. <https://doi.org/10.3233/AJW-180035>
- CONAGUA. (2019). *Estadísticas del Agua en México 2019*. [http://sina.conagua.gob.mx/publicaciones/EAM\\_2019.pdf](http://sina.conagua.gob.mx/publicaciones/EAM_2019.pdf)
- CONAGUA. (2021). *Inventario Nacional de Plantas Municipales de Potabilización y de Tratamiento de Aguas Residuales en Operación*. [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/759492/Inventario\\_2021.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/759492/Inventario_2021.pdf)
- CONAGUA. (2022). *Numeragua 2022*.
- COTEMARNAT. (2021). *Análisis de Agua–Medición de Color Verdadero en Aguas Naturales, Residuales, Residuales Tratadas y Marinas - Mediante Coeficientes de Absorción Espectral - Método de prueba*.



- Damkjaer, S., & Taylor, R. (2017). The measurement of water scarcity: Defining a meaningful indicator. In *Ambio* (Vol. 46, Issue 5, pp. 513–531). Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/s13280-017-0912-z>
- Dedeurwaerdere, T. (2014). Sustainability Science for Strong Sustainability. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 01(01).
- EPA. (2022, April 28). *Water Reuse Research*. Water Reuse Publications in Science Inventory. <https://www.epa.gov/water-research/water-reuse-research#:~:text=Non%2Dpotable%20water%20reuse%20%E2%80%93%20Water,and%20used%20for%20drinking%20water.>
- European Commission. (2020). Regulation (EU) 2020/741 of the European Parliament and of the Council of 25 May 2020 on Minimum Requirements for Water Reuse. *Official Journal of the European Union*, 177(32), 32–55. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32020R0741&from=en>
- FAO, & UN Water. (2021). Progress on the level of water stress. In *Progress on the level of water stress*. FAO and UN Water. <https://doi.org/10.4060/cb6241en>
- Gobierno de México. (2023). *León. Municipio de Guanajuato*. Data México. <https://www.economia.gob.mx/datamexico/es/profile/geo/leon?redirect=true&comorbilityOption=positiveOption>
- Gobierno Municipal de León. (2018). *Proyecto de Programa de Gobierno 2018-2021*.
- Hanke, J. E., & Wichern, D. W. (2010). La metodología Box-Jenkins (ARIMA). In *Pronósticos en los negocios* (9th ed., pp. 399–407). Pearson Educación.
- Harlem Brundtland, G. (1987). *Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common Future Towards Sustainable Development*.
- He, C., Liu, Z., Wu, J., Pan, X., Fang, Z., Li, J., & Bryan, B. A. (2021). Future global urban water scarcity and potential solutions. *Nature Communications* 2021 12:1, 12(1), 1–11. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-25026-3>
- Hernández González, J., & Tagle Zamora, D. (2020). Percepciones sociales del proceso de municipalización del agua potable en comunidades periurbanas de León, Guanajuato. *Región Y Sociedad*, 32. <https://doi.org/10.22198/rys2020/32/1257>
- Hernández Sampieri, R. (2014). *Métodología de la Investigación* (C. Fernández Collado & P. Baptista Lucio, Eds.; 6ta ed.). McGraw-Hill Education.
- Howard, K. W. F., & Gelo, K. K. (2003). Intensive groundwater use in urban areas: the case of megacities. In M. R. Llamas & E. Custodio (Eds.), *Intensive use of groundwater. Challenges and opportunities* (pp. 35–58). CRC Press.
- IMPLAN. (2020). *Principales resultados del censo de población y vivienda 2020*.

- IMTA. (2018, October 15). *¿Qué es la seguridad hídrica?* Gobierno de México. <https://www.gob.mx/imta/videos/que-es-la-seguridad-hidrica#:~:text=Sinopsis-,%C2%BFQu%C3%A9%20es%20la%20seguridad%20h%C3%ADdrica%3F,realizaci%C3%B3n%20de%20diferentes%20actividades%20recreativas>.
- Instituto Universitario de Opinión Pública. (2020). *Encuesta sobre el Derecho Humano al Agua*.
- Kates, R. W. (2011). What kind of a science is sustainability science? *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 108(49), 19449–19450. <https://doi.org/10.1073/pnas.1116097108>
- Katsanou, K., & Karapanagioti, H. K. (2019). Surface water and groundwater sources for drinking water. In *Handbook of Environmental Chemistry* (Vol. 67, pp. 1–19). Springer Verlag. [https://doi.org/10.1007/698\\_2017\\_140](https://doi.org/10.1007/698_2017_140)
- Kuzma, S., Saccoccia, L., & Chertock, M. (2023, August 16). *25 Countries, Housing One-quarter of the Population, Face Extremely High Water Stress*. World Resources Institute. <https://www.wri.org/insights/highest-water-stressed-countries>
- Lefebvre, O. (2018). Beyond NEWater: An insight into Singapore’s water reuse prospects. In *Current Opinion in Environmental Science and Health* (Vol. 2, pp. 26–31). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2017.12.001>
- Liu, J., Yang, H., Gosling, S. N., Kummu, M., Flörke, M., Pfister, S., Hanasaki, N., Wada, Y., Zhang, X., Zheng, C., Alcamo, J., & Oki, T. (2017a). Water scarcity assessments in the past, present, and future. In *Earth’s Future* (Vol. 5, Issue 6, pp. 545–559). John Wiley and Sons Inc. <https://doi.org/10.1002/2016EF000518>
- Liu, J., Yang, H., Gosling, S. N., Kummu, M., Flörke, M., Pfister, S., Hanasaki, N., Wada, Y., Zhang, X., Zheng, C., Alcamo, J., & Oki, T. (2017b). Water scarcity assessments in the past, present, and future. *Earth’s Future*, 5(6), 545–559. <https://doi.org/10.1002/2016EF000518>
- López, R. (2021). *México experimenta escasez de agua y falta de equidad en su distribución*. Gaceta UNAM. <https://www.gaceta.unam.mx/mexico-experimenta-escasez-de-agua-y-falta-de-equidad-en-su-distribucion/>
- Mahlknecht, J., Hirata, R., & Ledesma Ruiz, R. (2015). El abastecimiento urbano de agua subterránea en las ciudades de América Latina: panorama y casos de la Ciudad de México y São Paulo. In I. Aguilar Barajas, J. Mahlkecht, J. Kaledin, & M. Kjellén (Eds.), *Agua y Ciudades en América Latina: Retos para el Desarrollo Sostenible* (pp. 120–140). Routledge.
- Mautner, M. R. L., Foglia, L., Herrera, G. S., Galán, R., & Herman, J. D. (2020). Urban growth and groundwater sustainability: Evaluating spatially distributed recharge alternatives in the Mexico City Metropolitan Area. *Journal of Hydrology*, 586(April), 124909. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124909>

- Molina-Maturano, J., Bucher, J., & Speelman, S. (2020). Understanding and evaluating the sustainability of frugal water innovations in México: An exploratory case study. *Journal of Cleaner Production*, 274, 122692. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122692>
- Monroy Hermosillo, O. (2020). *Iniciativa Ciudadana de la Ley General de Aguas*.
- Monroy Torres, R., Naves Sánchez, J., & Melgar-Quiñonez, H. (2018). Experiencias en torno a la falta de acceso al agua en hogares del Estado de Guanajuato, México. *Rev. Esp. Nutr. Comunitaria*, 24(2), 0–0.
- Motoshita, M., Ono, Y., Pfister, S., Boulay, A. M., Berger, M., Nansai, K., Tahara, K., Itsubo, N., & Inaba, A. (2018). Consistent characterisation factors at midpoint and endpoint relevant to agricultural water scarcity arising from freshwater consumption. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 23(12), 2276–2287. <https://doi.org/10.1007/s11367-014-0811-5>
- Müller, A. B., Avellán, T., & Schanze, J. (2020a). Risk and sustainability assessment framework for decision support in “water scarcity – water reuse” situations. *Journal of Hydrology*, 591(August), 125424. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125424>
- Müller, A. B., Avellán, T., & Schanze, J. (2020b). Risk and sustainability assessment framework for decision support in “water scarcity – water reuse” situations. *Journal of Hydrology*, 591(August), 125424. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125424>
- Naciones Unidas. (n.d.). *Objetivos y metas de desarrollo sostenible – Desarrollo Sostenible*. Retrieved June 1, 2020, from <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>
- Naciones Unidas. (2020, November 26). *El agua, un recurso que se agota por el crecimiento de la población y el cambio climático*. Cambio Climático y Medio Ambiente. <https://news.un.org/es/story/2020/11/1484732>
- Naciones Unidas. (2023). *Una población en crecimiento*. Desafíos Globales: Población. <https://www.un.org/es/global-issues/population#:~:text=Una%20poblaci%C3%B3n%20en%20crecimiento&text=Este%20crecimiento%20tan%20dr%C3%A1stico%20se,urbanizaci%C3%B3n%20y%20los%20movimientos%20migratorios>.
- Noyola Robles, A. (2020). Tratamiento y reuso del agua residual municipal como condicionante para el manejo sustentable del agua en centros urbanos. In *Acciones metropolitanas para la gestión sustentable del agua* (1st ed., pp. 83–99). ANUIES, Dirección de Producción Editorial, Universidad Autónoma Metropolitana, CRAM, El Colegio de México.
- O’Connor, G. A., Elliott, H. A., & Bastian, R. K. (2008). Degraded Water Reuse: An Overview. *Journal of Environmental Quality*, 37(S5), S-157-S-168. <https://doi.org/10.2134/jeq2007.0459>

- OMS. (2018, February 7). *E. coli*. Organización Mundial de La Salud. <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/e-coli>
- Pantoja-Espinoza, J. C., Proal-Nájera, J. B., García-Roig, M., Cháirez-Hernández, I., & Osorio-Revilla, G. I. (2015). Eficiencias comparativas de inactivación de bacterias coliformes en efluentes municipales por fotólisis (UV) y por fotocátalisis (UV/TiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub>). Caso: depuradora de aguas de Salamanca, España. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, *14*(1), 119–135.
- Pronk, G. J., Stofberg, S. F., Van Dooren, T. C. G. W., Dingemans, M. M. L., Frijns, J., Koeman-Stein, N. E., Smeets, P. W. M. H., & Bartholomeus, R. P. (2021). Increasing Water System Robustness in the Netherlands: Potential of Cross-Sectoral Water Reuse. *Water Resources Management*, *35*(11), 3721–3735. <https://doi.org/10.1007/s11269-021-02912-5>
- Ramos, A. V., Gonzalez, E. N. A., Echeverri, G. T., Moreno, L. S., Jiménez, L. D., & Hernández, S. C. (2019). Potential uses of treated municipal waste water in a semiarid region of Mexico. *Sustainability (Switzerland)*, *11*(8). <https://doi.org/10.3390/su11082217>
- Ryan, S. (2016). *Water Reuse: A Review of Current Knowledge*. [www.fwr.org](http://www.fwr.org)
- SACMEX, & Gobierno de la Ciudad de México. (2020). *Tarifas de Agua en el Artículo 172*.
- SAPAL. (2012). *SAPAL: Futuro y Trayectoria* (J. Collado & H. Rivas López, Eds.; 1st ed.).
- SAPAL. (2018a). Planta Potabilizadora El Palote. In *YouTube*. Sapal León. <https://www.youtube.com/watch?v=KJ-vZyjjcPo>
- SAPAL. (2018b). *Agua Potable. Servicios*. <https://www.sapal.gob.mx/servicios/aguapotable#:~:text=Le%C3%B3n%20cuenta%20con%20una%20red>
- SAPAL. (2019). *Proyecto Ejecutivo de Línea de Conducción de agua tratada de Blvd. Gómez Morín a Parque Metropolitano*.
- SAPAL. (2020, October 29). *Sapal impulsa la venta de agua tratada en el municipio*. Comunicados de Prensa.
- SAPAL. (2021, May 19). *Solicitud 195/2021*. Unidad de Transparencia. <https://buscador.plataformadetransparencia.org.mx/web/guest/buscadornacional?buscador=SAPAL&coleccion=5>
- SAPAL. (2022a). *Ley de Ingresos 2022*.
- SAPAL. (2022b, August 2). *Compartirá SAPAL sus proyectos de agua tratada*. Comunicados de Prensa.
- SAPAL. (2022c, August 29). *Solicitud 242/2022*. Plataforma Nacional de Transparencia. <https://buscador.plataformadetransparencia.org.mx/web/guest/buscadornacional?buscador=SAPAL&coleccion=5>

- SAPAL. (2023a). *Tarifas de Junio de 2023*.
- SAPAL. (2023b). *Inicio* . Sistema de Agua Potable y Alcantarillado de León. <https://www.sapal.gob.mx/>
- SAPAL. (2023c, April 27). *Solicitud 131/2023*. Plataforma Nacional de Transparencia. <https://buscador.plataformadetransparencia.org.mx/web/guest/buscadornacional?buscador=SAPAL&coleccion=5>
- SAPAL. (2023d, June 5). *Solicitud 175/2023*. Plataforma Nacional de Transparencia. <https://buscador.plataformadetransparencia.org.mx/web/guest/buscadornacional?buscador=SAPAL&coleccion=5>
- SAPAL. (2023e, June 15). *Solicitud 186/2023*. Plataforma Nacional de Transparencia. <https://buscador.plataformadetransparencia.org.mx/web/guest/buscadornacional?buscador=SAPAL&coleccion=5>
- SAPAL. (2023f, July 21). *Solicitud 213/2023*. Plataforma Nacional de Transparencia. <https://buscador.plataformadetransparencia.org.mx/web/guest/buscadornacional?buscador=SAPAL&coleccion=5>
- SAPAL. (2023g, July 21). *Solicitud 220/2023*. Plataforma Nacional de Transparencia. <https://buscador.plataformadetransparencia.org.mx/web/guest/buscadornacional?buscador=SAPAL&coleccion=5>
- Seguí Amórtegui, L. A., Moeller-Chávez, G., & De Andrés Mosquera, A. (2019). Mexico, the Water Stress: Challenges and Opportunities in Wastewater Treatment and Reuse. In H. R. Guerrero García Rojas (Ed.), *Water Policy in Mexico* (Vol. 20, pp. 75–88). Springer International Publishing.
- SIAPA. (2022). *Resolutivo de la Comisión Tarifaria* .
- Sistema Nacional de Información Ambiental y de Recursos Naturales. (2010). *Agua - Disponibilidad*. Gobierno de México.
- Spangenberg, J. H. (2011). Sustainability science: A review, an analysis and some empirical lessons. *Environmental Conservation*, 38(3), 275–287. <https://doi.org/10.1017/S0376892911000270>
- Subdirección General Técnica, & Gerencia de Aguas Subterráneas. (2020). *Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Valle de León (1113), estado de Guanajuato*.
- Tagle-Zamora, D., Azamar-Alonso, A., & Caldera-Ortega, A. (2018). Cosecha de agua de lluvia como alternativa para la resiliencia hídrica en León , Guanajuato: una reflexión desde la nueva cultura del agua. *Expresión Económica*, 40, 5–24.
- UNESCO i-WSSM. (2019). Water Security and the Sustainable Development Goals . *Global Water Security Issues (GWSI) Case Studies*. <http://unesco-iwssm>.

- UNICEF, & WHO. (2019). *Progress on household drinking water, sanitation and hygiene I 2000-2017. Special Focus on Inequalities*. <https://www.unicef.org/reports/progress-on-drinking-water-sanitation-and-hygiene-2019>
- Valdivia Alcalá, R., Antonio Delgadillo Vázquez, M., Ma Sangerman-Jarquín, D., Hernández Ortíz, J., Sandoval Romero, F., & Suhgey Garay Jácome, Á. (2022). Valoración económica de la calidad del agua potable en León, Guanajuato. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 13(3).
- van Kerkhoff, L. (2014). Developing integrative research for sustainability science through a complexity principles-based approach. *Sustainability Science*, 9(2), 143–155. <https://doi.org/10.1007/s11625-013-0203-y>
- Vázquez, L. (2023, April 3). *PAOT impone 113 multas a empresas de Guanajuato por incumplimiento a normas ambientales*. Periódico Correo. <https://periodicocorreo.com.mx/vida-publica/paot-impone-113-multas-a-empresas-de-guanajuato-por-incumplimiento-a-normas-ambientales-20230403-71154.html>
- Wu, Q. yun, Liang, H. qing, Li, M., Liu, B. tong, & Xu, Z. kang. (2016). Hierarchically porous carbon membranes derived from PAN and their selective adsorption of organic dyes. *Chinese Journal of Polymer Science (English Edition)*, 34(1), 23–33. <https://doi.org/10.1007/s10118-016-1723-6>
- Zhang, D., Sial, M. S., Ahmad, N., Filipe, J. A., Thu, P. A., Zia-Ud-din, M., & Caleiro, A. B. (2021). Water scarcity and sustainability in an emerging economy: A management perspective for future. *Sustainability (Switzerland)*, 13(1), 1–10. <https://doi.org/10.3390/su13010144>

## 14. ANEXOS

---

### Anexo 1. Lista de colonias abastecidas por la Planta Potabilizadora El Palote (SAPAL, 2022c)

---

- Balcones del campestre
- Bosque azul
- Colinas de Gran Jardín
- Gran Jardín
- Lomas de Gran Jardín
- Mirador de Gran Jardín
- Porta Fontana
- Porta Toscana
- Portones del Bosque
- Portones del Campestre
- Alameda de la Presa
- Altavista
- Amazonas
- Ampliación La Patiña
- Arboledas de los Castillos I
- Arboledas de los Castillos II
- Arrayanes
- Arrayanes Ira Secc
- Balcones de la Presa
- Balcones de la Presa 2
- Balcones de la Presa III
- Balcones Tulipanes
- Campo Palmyra
- Castillos Viejos
- El Cuarenteño
- El Parador
- El Pochote
- El Potrero
- El Ranchito
- Jardines de la Presa
- La Ladera
- La Noria
- La Norteña
- La Pradera
- Las Tiritas I y II
- Las Tiritas III
- Las Tiritas IV
- Lomas de los Castillos
- Los Colorines
- Luz de la Presa
- Luz del Parque
- Parque del Castillo
- Paseo de la Presa
- Paso del Rio de los Castillos
- Poblado Los Castillos
- Popular Maya
- Pro El Castillo Norte
- Pro Granja Stover
- Pro Nte La Noria
- Pro Rustico Nortera
- Provincia Castell
- Quinta Los Castillos
- Real del Castillo
- Real del Castillo II Secc
- Rinconada de la Presa
- Rivera de los Castillos
- San Isidro Azteca
- San Isidro Labrador
- San Nicolás del Palote Nte
- Torres Alfa
- Torres del Parque
- Valle de las Toronjas Nte
- Valle de los Castillos
- Villas de la Presa
- Villas del Pedregal
- Vistaero
- Hacienda Echeveste
- Privada Echeveste
- Ciudad Aurora
- San Pedrito de Echeveste

## **Anexo 2. Encuesta para la prueba piloto “Percepción del consumo y escasez del agua en la ciudad de León, Guanajuato”**

---

El objetivo de esta encuesta es conocer la opinión de las personas respecto a diferentes aspectos del agua en la ciudad de León. Las preguntas fueron adaptadas de los trabajos de (Monroy Torres et al., 2018) y el (Instituto Universitario de Opinión Pública, 2020).

- |       |                                       |  |
|-------|---------------------------------------|--|
| Edad: | Escolaridad:                          | Colonias:                                    |
|       | <input type="radio"/> Ninguno         | <input type="radio"/> Hacienda de Echeveste  |
| Sexo: | <input type="radio"/> Primaria        | <input type="radio"/> Paseo de la Presa      |
|       | <input type="radio"/> Secundaria      | <input type="radio"/> Gran Jardín            |
|       | <input type="radio"/> Preparatoria    | <input type="radio"/> Portones del Campestre |
|       | <input type="radio"/> Carrera Técnica |  |
|       | <input type="radio"/> Licenciatura    |  |
|       | <input type="radio"/> Maestría        |  |
|       | <input type="radio"/> Doctorado       |  |

### **Sección 1: Forma de abastecimiento y distribución de agua**

- ¿De qué manera se abastece de agua tu hogar?  
a. Drenaje                      b. Pozo                      c. Pipa                      d. Cuerpo de agua
- ¿Sabe de dónde viene el agua que llega a su hogar?  
a. Acuífero                      b. Planta potabilizadora                      c. No sé
- En lo que va del año 2022, ¿ha tenido acceso a agua todos los días?  
a. Sí                      b. No
- ¿Cuántos días a la semana le distribuyen agua?  
a. 0-1 días                      b. 2-3 días                      c. 4-5 días                      d. 6-7 días
- Considera que el costo que paga por el agua de su hogar es:  
a. Aceptable                      b. Costosa
- ¿Qué tan justo considera que es el valor que paga por el servicio del agua?  
a. Muy justo                      b. Algo justo                      c. Poco justo                      d. Nada justo

### **Sección 2. Calidad y usos del agua**

- ¿Qué agua utiliza para preparar sus alimentos?  
a. Llave                      b. Pozo                      c. Pipa                      d. Garrafón
- ¿Qué agua utiliza para preparar agua fresca, de fruta o para beber?  
a. Llave                      b. Pozo                      c. Pipa                      d. Garrafón
- ¿Qué tan contaminada diría usted que está el agua que utiliza en su casa?  
a. Mucho                      b. Algo                      c. Poco                      d. Nada
- Si toma agua de la llave, ¿qué tratamiento le da para su consumo posterior?



- a. Clorar    b. Hervir    c. Desinfectar con gotas    d. Filtrar    e. No tomo agua de la llave (nitrato de plata)

### Sección 3. Crisis del agua en la ciudad

11. En su opinión, ¿considera que existe una crisis de agua en la ciudad?  
a. Sí                                  b. No
12. Si la respuesta de la pregunta anterior fue Sí, ¿Cuál es la principal razón por la que usted considera que hay crisis de agua en la ciudad?  
a. Porque se han secado los ríos    b. Por la mala distribución    c. Por la contaminación del agua y el medio ambiente    d. Por el consumo alto Las empresas gastan mucha agua y no queda para la población    e. La falta de agua en la ciudad
13. ¿Qué tanto le preocupa que dentro de poco tiempo ya no exista suficiente agua para todos en la ciudad?  
a. Mucho                          b. Algo                                  c. Poco                                  d. Nada
14. El reúso de agua tratada que cumpla con los estándares de calidad debería suministrarse para consumo en su hogar  
a. Muy de acuerdo    b. Algo de acuerdo    c. Poco de acuerdo    d. Nada de acuerdo
15. Los sistemas de captación de agua de lluvia deberían de implementarse en los techos de las casas, incluida la suya.  
a. Muy de acuerdo    b. Algo de acuerdo    c. Poco de acuerdo    d. Nada de acuerdo
16. El gobierno debería de construir más plantas de tratamiento de aguas residuales  
a. Muy de acuerdo    b. Algo de acuerdo    c. Poco de acuerdo    d. Nada de acuerdo

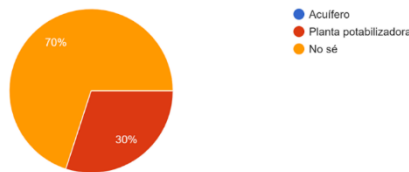
### Anexo 3. Resultados de la prueba piloto de la encuesta “Percepción del consumo y escasez del agua en la ciudad de León, Guanajuato” (n=10)

#### Sección 1: Forma de abastecimiento y distribución de agua

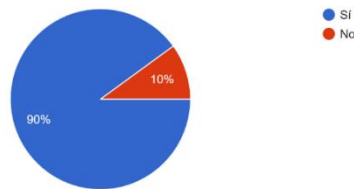
¿De qué manera se abastece de agua tu hogar?  
10 respuestas



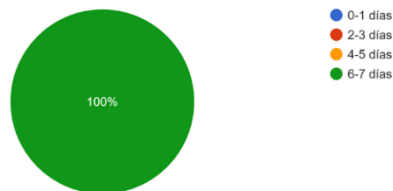
¿Sabe de dónde viene el agua que llega a su hogar?  
10 respuestas



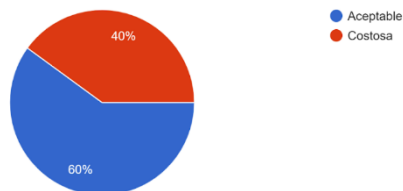
En lo que va del año 2022, ¿ha tenido acceso a agua todos los días?  
10 respuestas



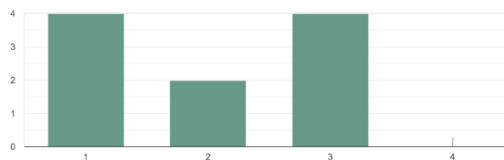
¿Cuántos días a la semana le distribuyen agua?  
10 respuestas



Considera que el costo que paga por el agua de su hogar es:  
10 respuestas

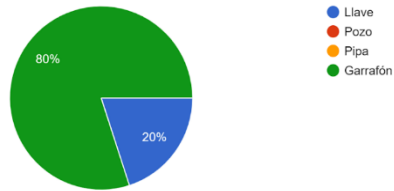


¿Qué tan justo considera que es el valor que paga por el servicio del agua?  
10 respuestas

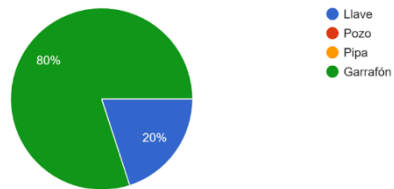


## Sección 2. Calidad y usos del agua

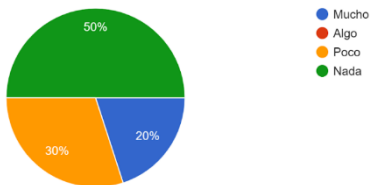
¿Qué agua utiliza para preparar sus alimentos?  
10 respuestas



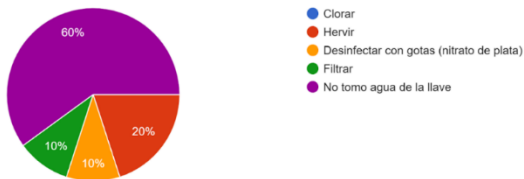
¿Qué agua utiliza para preparar agua fresca, de fruta o para beber?  
10 respuestas



¿Qué tan contaminada diría usted que está el agua que utiliza en su casa?  
10 respuestas

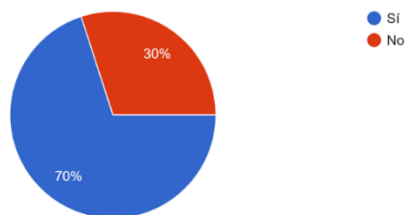


Si toma agua de la llave, ¿qué tratamiento le da para su consumo posterior?  
10 respuestas

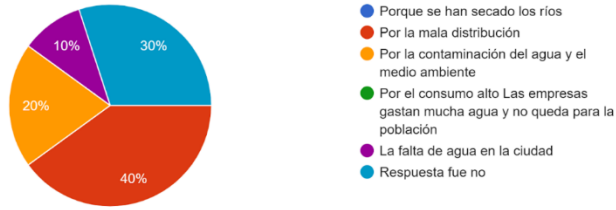


## Sección 3. Crisis del agua en la ciudad

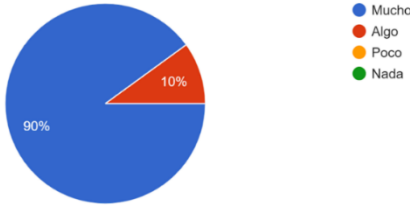
En su opinión, ¿considera que existe una crisis de agua en la ciudad?  
10 respuestas



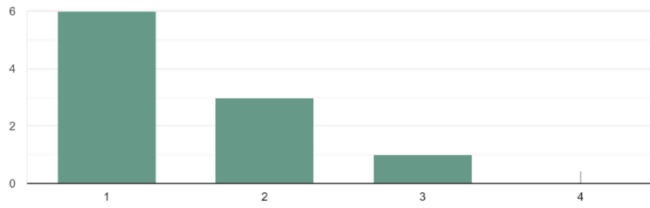
Si la respuesta de la pregunta anterior fue Sí, ¿Cuál es la principal razón por la que usted considera que hay crisis de agua en la ciudad?  
10 respuestas



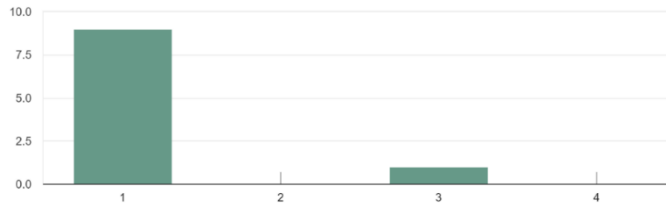
¿Qué tanto le preocupa que dentro de poco tiempo ya no exista suficiente agua para todos en la ciudad?  
10 respuestas



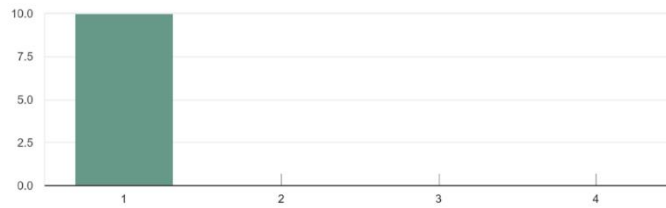
El reúso de agua tratada que cumpla con los estándares de calidad debería suministrarse para consumo en su hogar  
10 respuestas



Los sistemas de captación de agua de lluvia deberían de implementarse en los techos de las casas, incluida la suya.  
10 respuestas



El gobierno debería de construir más plantas de tratamiento de aguas residuales para tener más disponibilidad de agua en la ciudad  
10 respuestas



## **Anexo 4. Encuesta “Percepción del abastecimiento y escasez del agua en la ciudad de León, Guanajuato”**

---

El objetivo de esta encuesta es conocer la opinión de las personas respecto a diferentes aspectos del agua en la ciudad de León. Las preguntas fueron adaptadas de los trabajos de Monroy Torres et al., (2018) y el Instituto Universitario de Opinión Pública, (2020). Sus respuestas serán tratadas de forma confidencial y solo serán utilizadas para fines del proyecto de investigación “Propuesta de una alternativa sostenible que reduzca la sobreexplotación del acuífero Valle de León para evitar la escasez del agua en la ciudad de León, Guanajuato”, en el posgrado de Ciencias de la Sostenibilidad de la UNAM. Muchas gracias por su participación en la encuesta.

- Edad:                      Escolaridad:                      Colonia:
- Ninguno                       Carrera Técnica                       Hacienda de Echeveste
  - Primaria                       Licenciatura                       Paseo de la Presa
  - Secundaria                       Maestría                       Gran Jardín
  - Preparatoria                       Doctorado                       Portones del Campestre
- Sexo:                      Ingreso mensual:                      Personas viviendo en su hogar:
- \$950 - \$1,499                       \$4,000 - \$6,499
  - \$1,500 - \$2,499                       \$6,500 - \$8,399
  - \$2,500 - \$3,999                       Más de \$8,400

### **Sección 1: Forma de abastecimiento y distribución de agua**

1. ¿Sabe de dónde viene el agua que llega a su hogar?  
a. Acuífero                      b. Planta potabilizadora                      c. No sé
2. ¿Cuántas veces a la semana tiene agua en su hogar?  
a. 1-2 veces                      b. 3-4 veces                      c. 5-6 veces                      d. Todos los días
3. ¿Qué tan justo considera que es el valor que paga por el servicio del agua?  
1. Nada justo                      2. Poco justo                      3. Justo                      4. Muy justo

### **Sección 2. Calidad y usos del agua**

4. ¿Qué agua utiliza para preparar sus alimentos?  
a. Llave                      b. Pozo                      c. Pipa                      d. Garrafón
5. ¿Qué agua utiliza para preparar agua fresca, de fruta o para beber?  
a. Llave                      b. Pozo                      c. Pipa                      d. Garrafón
6. Si toma agua de la llave, ¿qué tratamiento le da para su consumo posterior?  
a. Clorar                      b. Hervir                      c. Desinfectar con gotas (nitrato de plata)                      d. Filtrar                      e. No se le da tratamiento                      f. No tomo agua de la llave

### Sección 3. Crisis del agua en la ciudad

7. En su opinión, ¿considera que existe una crisis de agua en la ciudad?

- a. Sí                                      b. No

8. Si la respuesta de la pregunta anterior fue Sí, ¿Cuál es la principal razón por la que usted considera que hay crisis de agua en la ciudad?

- a. Porque se han secado los ríos      b. Por la mala distribución      c. Por la contaminación del agua y el medio ambiente      d. Por el consumo alto. Las empresas gastan mucha agua y no queda para la población      e. La falta de agua en la ciudad      f. Otra: Especifica

A continuación, se presentan dos propuestas con las que se podría combatir la presencia de la escasez del agua en la ciudad de León. Nos interesa mucho su opinión, por lo que le pedimos que sea lo más honesto posible.

9. ¿Debería de implementarse la reutilización de agua residual tratada y potabilizada en su hogar?

- a. Sí                                      b. No

¿Por qué?

10. ¿Debería de implementarse la reutilización de agua de lluvia en su hogar?

- a. Sí                                      b. No

¿Por qué?

## Anexo 5. Metodología Box-Jenkins.

---

La metodología Box-Jenkins para generar pronósticos se diferencia de la mayoría de los métodos debido a que no asume ningún patrón específico en los datos históricos de las series que se desean pronosticar. Esta metodología comprende un conjunto de procedimientos destinados a identificar, ajustar y validar modelos ARIMA utilizando los datos de una serie de tiempo. A través de esta metodología, se busca obtener pronósticos precisos que se derivan directamente de la estructura de un modelo ARIMA adecuadamente ajustado (Hanke & Wichern, 2010).

En primer lugar, se lleva a cabo el proceso de identificación, donde se examinan las autocorrelaciones y se ajusta un modelo ARIMA inicial que refleje el comportamiento de la serie temporal. A continuación, se realiza el ajuste del modelo mediante estimaciones de los parámetros, lo que permite lograr una mejor aproximación a los datos históricos. Una vez que el modelo ARIMA ha sido ajustado, se procede a su validación, verificando que los residuos sean aleatorios y sin información útil, lo que indica un buen ajuste. Finalmente, con el modelo validado, se utilizan sus características y estructura para generar pronósticos futuros basados en las tendencias y patrones identificados en la serie de tiempo (Hanke & Wichern, 2010).

En resumen, la metodología Box-Jenkins proporciona un enfoque iterativo y sistemático para la construcción de modelos ARIMA que son capaces de proporcionar pronósticos precisos y relevantes, basados en los datos históricos de la serie de tiempo analizada. La Figura A5 ilustra el proceso para la construcción de un modelo Box-Jenkins.

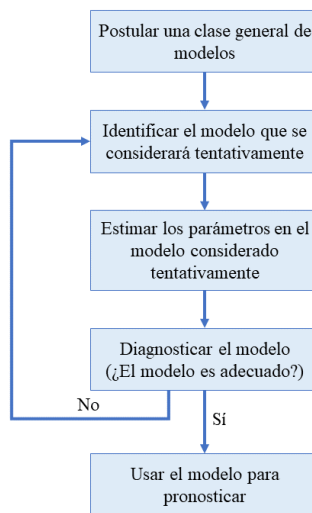


Figura A5. Diagrama de flujo del proceso para construcción de un modelo Box-Jenkins.  
Fuente: Elaboración con base en (Hanke & Wichern, 2010)