



# Evaluación de la problemática de abastecimiento y saneamiento de agua en el área periurbana del poniente de la ciudad de San Luis Potosí

## Evaluation of the problem of water supply and sanitation in the peri-urban area of the west of the city of San Luis Potosí

Juan José Félix Carrillo, Cristóbal Aldama Aguilera\*<sup>ID</sup>, Rodolfo Cisneros Almazán<sup>ID</sup>, Hermann Rocha Escalante<sup>ID</sup>, Luis Armando Bernal Jácome<sup>ID</sup>

Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de San Luis Potosí. Dr. Manuel Nava No. 8, Zona Universitaria Poniente, C.P. 78290. San Luis Potosí, S.L.P.

### Historial

Manuscrito recibido: 2 de diciembre de 2023

Manuscrito aceptado: 22 de mayo de 2024

Manuscrito publicado: agosto 2024

### \*Autor para correspondencia

Cristóbal Aldama Aguilera

e-mail: cristobal.aldama@uaslp.mx

ORCID: 0000-0002-5174-0741

### Resumen

La zona periurbana poniente de la ciudad de San Luis Potosí tiene graves problemas de abastecimiento y saneamiento de agua, y pese a los esfuerzos aplicados en la construcción de infraestructura para resolverlos, el problema es que sus pobladores siguen sin el vital líquido y con problemas de contaminación por las aguas residuales generadas sin tratamiento. El artículo pretende evaluar las condiciones actuales de abastecimiento y saneamiento de agua, que permitan aplicar sistemas basados en la naturaleza y un modelo WEAP que generen escenarios de demanda, disponibilidad y calidad del agua. Esta evaluación muestra la deficiencia de la infraestructura, la inexistencia de tratamiento de agua residual y la contaminación de caudales ecológicos.

**Palabras clave:** Calidad de agua, Modelo WEAP, Agua potable, SUDS, SbN.

### Abstract

The periurban western area of the city of San Luis Potosí faces serious problems with water supply and sanitation. Despite efforts made to construct infrastructure to address these issues, the problem remains that their inhabitants continue to lack access to clean water and contamination from untreated wastewater. This article aims to evaluate the current conditions of water supply and sanitation to identify nature-based solutions and a WEAP model that can generate scenarios for water demand, availability, and quality. This evaluation reveals deficiencies in infrastructure, a lack of wastewater treatment, and contamination in ecological flows.

**Keywords:** Water quality, WEAP model, drinking water, SUDS, SbN.

### Introducción

Desde el año 2007, en la historia de toda la humanidad la población en zonas urbanas superó a la rural, por lo que las condiciones de urbanización necesitan ser reformadas con el fin de mantener las condiciones económicas y sociales estables (ONU-Habitat, 2018). El acceso al agua potable y al saneamiento adecuado es un derecho humano fundamental y un pilar para el desarrollo sostenible de las comunidades (OMS, 2022). El área periurbana del poniente de San Luis Potosí se enfrenta a un problema sig-

nificativo en el abastecimiento y saneamiento del agua, lo que impacta negativamente en la calidad de vida de sus habitantes.

Las comunidades periurbanas son áreas que se encuentran en los límites de las zonas urbanas, donde se produce una interacción entre lo rural y lo urbano. Estas áreas representan un fenómeno en constante crecimiento y transformación en muchos países, incluyendo México (González-Arellano *et al.*, 2021). A consecuencia de este movimiento, las ciudades tienden a tener movilidad limitada, sistema

de transporte público deficiente y servicios públicos de baja calidad, lo que conlleva a trabajadores y sociedad en general a establecerse en asentamientos informales, y a menudo en zonas periféricas (Banco Mundial, 2017).

Las comunidades del poniente de la ciudad de San Luis Potosí se encuentran en una transición dentro de lo rural y lo urbano, característica principal de las áreas periurbanas, haciendo que la dinámica de población, vivienda, servicios básicos y actividades económicas sean diferentes a las de la zona metropolitana (Guevara y Lara, 2015). La diversidad socioeconómica también es notable en las comunidades periurbanas. Algunas áreas presentan altos índices de pobreza y marginalidad, con población que se dedica principalmente a actividades agrícolas o informales (Castro y Rajadel, 2021), en el caso particular del sitio de estudio, es el tallado de cantera una de las principales actividades económicas. Así mismo, en la zona poniente de la ciudad de San Luis Potosí, en una zona de cerros y laderas, cuya principal vía de acceso es la carretera federal San Luis Potosí-Guadalajara, se asientan las principales comunidades llamadas Escalerillas, Col. Insurgentes, Mesa de Conejos y Pozuelos, las

cuales se han visto involucradas en un crecimiento no planeado, generando problemas de acceso a servicios públicos, que si bien, no todas comparten el mismo escenario, sí presentan como denominador común, la problemática de abastecimiento de agua y de su saneamiento.

Según el informe de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), la rápida urbanización y el crecimiento demográfico en esta zona han generado una presión considerable sobre los recursos hídricos disponible (CONAGUA, 2019). Esto ha resultado en desafíos sobre la disponibilidad, distribución y calidad del agua, y en la falta de infraestructuras adecuadas para el saneamiento. Escalerillas, es una localidad que se encuentra a 5 km al poniente de la zona metropolitana de San Luis Potosí, cuenta con 5,299 habitantes y un total de 1,313 viviendas, éstas albergan un promedio de 4 a 6 habitantes e incluye a la Col. Insurgentes y Mesa de Conejos. Por otra parte, Pozuelos tiene 1,339 habitantes y 357 viviendas, que albergan la misma cantidad de personas promedio por vivienda que Escalerillas (Figura 1).

El sistema de abastecimiento actual empleado por el ayuntamiento de San Luis Potosí incluye

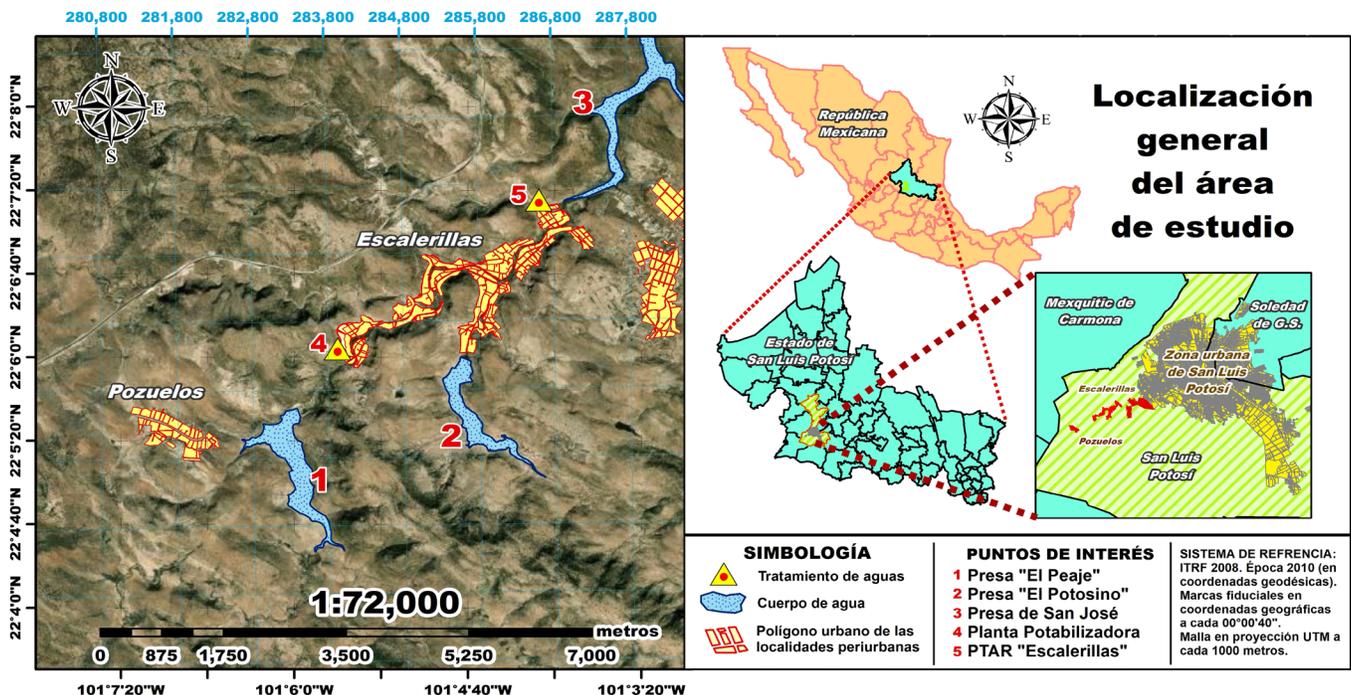


Figura 1. Ubicación de localidades.

el llenado de tinacos de diferentes capacidades, generalmente de 10,000 L, instalados a los lados de la carretera principal San Luis-Guadalajara, en diferentes puntos de las localidades, donde, desde la capital, se envían pipas con una frecuencia estimada según es el censo del ayuntamiento. Una vez efectuado el llenado de los tinacos, los habitantes llegan a tomar el agua de estos tinacos, de manera que, deben aprovecharse para las familias que estarán “beneficiadas” en el área del tinaco instalado. Cabe destacar que no se paga ningún precio por esta acción y lamentablemente no existe ningún proceso que permita regular la cantidad de agua suministrada y aprovechada para cada vivienda. A menos que los beneficiados busquen algún tipo de acuerdo común para que se puedan abastecer, no hay un control de la cantidad de líquido que debe suministrarse (Robledo, 2013). Este sistema se encuentra implementado para ambas comunidades, para Escalerillas y para la localidad de Pozuelos.

De acuerdo con el Inventario Nacional de Vivienda realizado en el año 2010, la localidad de Escalerillas solo contaba con un 23% de acceso a una red de agua potable dentro del ámbito de vivienda, pero, esta red no está conectada a una red de abastecimiento y en contraste con Pozuelos solo el 1% de las viviendas contaba con acceso a red de agua potable. Mballa y Hernández-Espericueta (2018) encontraron un 25% de acceso a la red de agua potable y para el inventario en 2020 de INEGI un 32% de acceso, y Pozuelos con un 19%. En general, en la actualidad, el problema de la deficiencia de la infraestructura hidráulica sigue existiendo (Mballa y Hernández, 2018).

Para el sistema de saneamiento de agua potable, según una entrevista con el subdirector de CONAGUA en el estado de San Luis Potosí, en 2018 la CONAGUA, con convenio con la CEA del estado de San Luis Potosí y con INTERAPAS, crearon una conexión de tubería desde la Presa El Peaje hasta una planta potabilizadora, pero por problemas de infiltración de la cortina y problemas con la tubería, la infraestructura de potabilización quedó inutilizable. Para la particularidad del sistema de saneamiento de aguas residuales, en ese mismo año se instaló una planta de tratamiento de agua

(PTAR) localizada en Escalerillas, con un caudal de 5 L/s, pero debido a la falta de pago de estas localidades, fue insostenible operar esta PTAR sin recursos por lo que el agua residual cae en crudo al caudal ecológico del Río Santiago, cuyo destino final es la Presa de San José, una de las principales para el abastecimiento de la ciudad de San Luis Potosí.

En cuanto al saneamiento, en 2010 en Escalerillas solo había 62% de acceso a una red de drenaje y en 2020 83% contaban con una red de drenaje, en Pozuelos el acceso al drenaje aumentó de manera considerable porque en 2010 se contaba con 22% de acceso y en 2020 se tiene 46%. Toda esta problemática con la deficiencia de la infraestructura y acceso a servicios públicos generan un alto índice de rezago social (Castañeda *et al.*, 2022), recordando que es ponderada y que resume indicadores de educación, acceso a servicios de salud, calidad y espacios de vivienda, servicios básicos y activos del hogar (**Tabla 1**). Todo esto, con base a los resultados obtenidos del Censo de Población y Vivienda 2020 del INEGI (CONEVAL, 2021).

Al analizar las variables, se determinó que las AGEB (área geoestadística básica) 2751, 2766, 2770, 3321, 3938 y 4870 pertenecientes a Escalerillas, presentan un índice de rezago social y vivienda alto, lo que significa que el acceso a servicios básicos como agua y drenaje, y características básicas de un hogar con excusado o electricidad son escasos (**Figura 2a y 2b**).

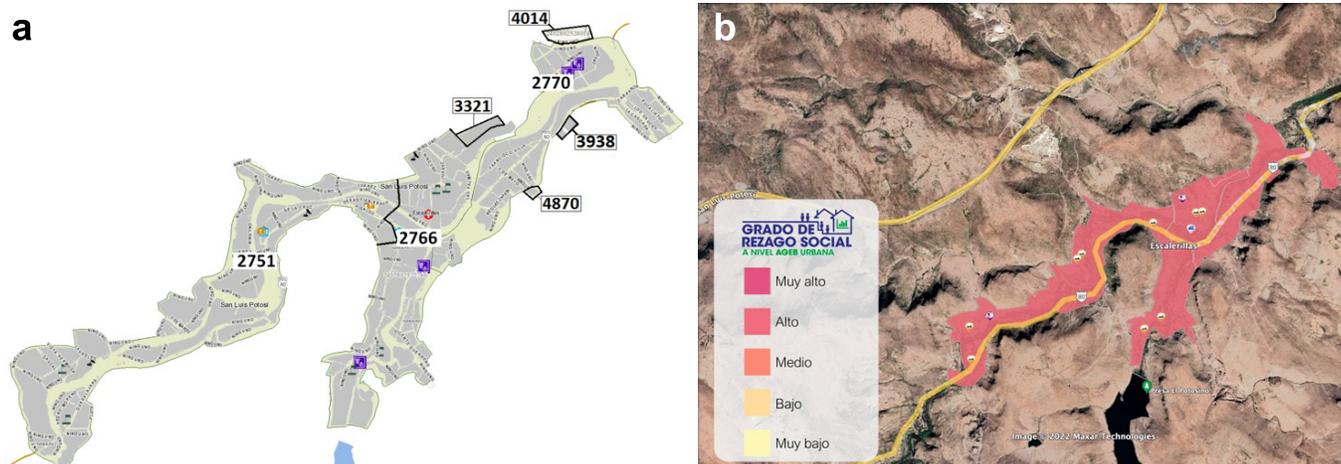
Para el caso de Pozuelos, el CONEVAL no tiene registro acerca de su índice de rezago social, pero de acuerdo con el Inventario Nacional de Vivienda el acceso a los servicios básicos, son bajos o casi nulos, haciendo una gran referencia lo que vive Escalerillas actualmente, de tal manera que, aunque esta no tenga un registro oficial dentro de la información de CONEVAL se puede concluir que tiene un índice muy alto.

El objetivo de este trabajo es evaluar el problema de abastecimiento del agua potable y del sistema de saneamiento en comunidades periurbanas al poniente de la ciudad de San Luis Potosí para proponer soluciones, y se incluyen los siguientes

**Tabla 1.** Indicadores del índice de rezago social (IRS) según dimensión. Fuente: CONEVAL, 2021.

Dimensión	Indicadores de rezago social
Rezago educativo	Población de 15 años o más analfabeta
	Población de 6 a 14 años que no asiste a la escuela
	Población de 15 años y más con educación básica incompleta
Acceso a los servicios de salud	Población sin derechohabiencia a servicios de salud
Calidad y espacios de la vivienda	Viviendas con piso de tierra
Servicios básicos en la vivienda	Viviendas que no disponen de excusado o sanitario
	Viviendas que no disponen de agua entubada de la red pública
	Viviendas que no disponen de drenaje
	Viviendas que no disponen de energía eléctrica
Bienes del hogar	Viviendas que no disponen de lavadora
	Viviendas que no disponen de refrigerador

Nota: el cálculo de los indicadores de rezago social referentes a las características de la vivienda considera el total de viviendas particulares habitadas con características, que incluye a las viviendas sin información de ocupantes.



**Figura 2.** Localidad de Escalerillas, S.L.P. **a)** AGEBS. **Fuente:** Secretaría de Desarrollo Social y Regional, 2021. **b)** Índice de rezago social. **Fuente:** CONEVAL, 2021.

específicos: 1) generar un diagnóstico de la situación actual del sistema de acceso al agua potable y saneamiento de Escalerillas y Pozuelos mediante análisis espacial y verificación en campo, y 2) determinar la calidad de agua de cauces, embalses y otros cuerpos con parámetros físicos para generar indicadores e índices ecológicos y necesidades de saneamiento.

### Materiales y métodos

Para la planeación de los puntos a muestrear, se hizo un recorrido para identificar las posibles fuentes de

agua residual y de diferentes cuerpos de agua, ya sean embalses y ríos dentro de la zona de estudio, además de apoyarse con la red hidrológica de la cuenca de la presa San José, con una escala 1:75,000 descargada del SIATL (Simulador de Flujos de Agua en Cuencas Hidrológicas) perteneciente al INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). Toda la información anterior fue adjuntada mediante archivos tipo shape (.shp) al programa ArcGIS para tener una mejor vista de los puntos de muestreo, y descargas a los caudales ecológicos de la Presa “El Potosino” y del Río Santiago (**Figura 3**).

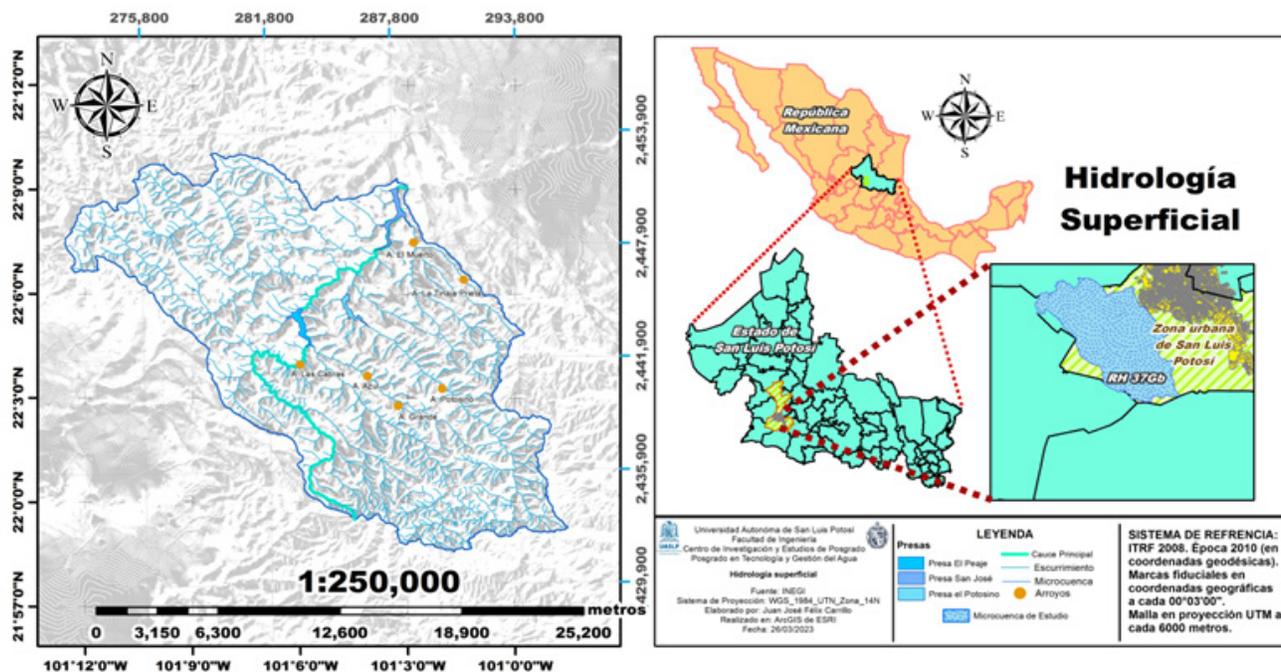


Figura 3. Hidrología superficial de la cuenca de la presa San José.

En campo, se realizó una medición empleando un potenciómetro Hanna® HI 98193 con sonda HI 764073 para oxígeno disuelto (OD) y otro potenciómetro Hanna® HI 98194 con sonda HI 7698194 para la medición de pH, ORP (potencial óxido-reducción), conductividad eléctrica, sólidos disueltos totales (TDS) y temperatura.

Para realizar la recolección de muestras se emplearon tubos Falcon® cónicos con capacidad de 50 mL, que fueron transportadas en una hielera con gels congelantes que permiten la conservación de las muestras, y evitan su degradación, y una vez llegando al laboratorio se preservaron a una temperatura de 4 °C para su análisis. Se evaluaron parámetros como demanda química de oxígeno (DQO), nitrógeno total ( $N_T$ ) y fósforo total ( $P_T$ ) empleando un kit correspondiente a cada parámetro y la metodología de reacción por la empresa Hanna®, también se utilizó un digestor (HI 839800-01) y un fotómetro multiparamétrico (HI 83224) con diferentes métodos de lectura que incluyen los parámetros de interés y este fotómetro posee una fuente de luz de tungsteno con un filtro de interferencias de banda estrecha, básicamente los métodos son con base en colorimetría.

Para las muestras de cuerpos de agua, embalses y ríos se emplearon viales de bajo rango comprendidos: 1) DQO de 0 a 150 mg/L, 2) nitrógeno 0.0 a 25 mg/L y 3) fósforo de 0 a 1.15 mg/L y para las muestras de aguas residuales viales de DQO medio rango que van desde 1) 0 a 1,500 mg/L, 2) nitrógeno 10 a 150 mg/L y 3) fósforo de 0 a 32.6 mg/L. Para la determinación de sólidos suspendidos totales, se necesitaron un total de 19 Crisoles Goch, y 19 filtros con una apertura de 5  $\mu$ m con referencia a la norma NMX-AA-034-SCFI-2015 Análisis de Agua – Medición de Sólidos y Sales Disueltas en Aguas Naturales, Residuales y Residuales Tratadas.

En el caso de la alimentación del modelo WEAP, se empleó la información acerca de la región hidrológica RH37Gb, que considera todas las capas de información disponibles, como lo es la topografía, carta de uso de suelos y vegetación, edafología, estaciones climatológicas cercanas, temperatura, tipo de clima y los AGEB's disponibles en el área, para poder referenciar nuestra área de estudio, pero, sobre todo, caracterizarlo de manera adecuada.

Por último, para la generación de nuestras propuestas de solución de acuerdo con la

caracterización de las cuencas y las condiciones actuales de la infraestructura, se considera la instalación de un Sistema de Captación de Agua de Lluvia (SCALL) y un humedal de tratamiento, uno nos ayudará en la cuestión del abastecimiento de agua y el otro con el tratamiento de agua residual dentro de la zona para intentar disminuir la cantidad orgánica en el cauce del Río Santiago.

## Resultados

Con la información obtenida del Inventario Nacional de Vivienda del 2020, así como los recorridos empleados de manera puntual en el área de estudio se encontró que los sistemas de abastecimiento dentro del área son insuficientes, el hecho de emplear y/o utilizar tinacos para el abastecimiento de agua en las localidades es insuficiente, de acuerdo

con CONAGUA en su Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento “Datos básicos para proyectos de agua potable y alcantarillado”, una localidad rural debe al menos contar de 30 L/hab/día (litros de agua por habitante por día). Con este sistema de abastecimiento actual con tinacos de 10,000 L cada uno (**Figura 4a, b**), se abastecen 10 familias de hasta 6 habitantes cada una, por lo que cada familia recibe 1,000 L. Esto sucede con un periodo de frecuencia de 3-5 días o hasta los 15 días mediante pipas (**Figura 4d**), por lo que, el abastecimiento actual de las personas ronda por los 21.5 L/hab/día en el mejor de los casos (CONAGUA, 2019).

Las personas deben captar la máxima cantidad de agua en diferentes recipientes (**Figura 4a**) y muchos de los habitantes no reciben la cantidad de agua



**Figura 4.** Estado de la infraestructura de distribución y captación de agua. **a)** Recipientes de captación de agua para uso. **b)** Tinaco otorgado por gobierno municipal. **c)** Estado actual de planta de tratamiento de agua potable. **d)** Uso de pipas para abastecimiento en la zona.

adecuada, es decir, no se tiene un control de cuánta agua debe tomar cada familia, por lo tanto, algunos no reciben los 1,000 L que se asignan por familia, generando un problema muy fuerte en la sociedad debido a la poca concientización de los demás. Este sistema no permite realizar las actividades del día a día, por lo que muchas personas optan por lavar a las orillas del río o incluso tomar agua del río, sin tomar en consideración si el agua se encuentra de buena calidad o no. Algunos de los pobladores, se abastecen de norias, de acuerdo con Mballa y Hernández (2018), un 15% de población lo hace para consumo humano directo sin conocer el estado actual de las mismas lo que abona un problema bastante fuerte de salud para la comunidad.

Este sistema de abastecimiento fue una solución temporal (**Figura 4a, b**), debido a los problemas de la cortina de Presa El Peaje, ya que no captaba la suficiente agua y se infiltraba, de tal forma que no era posible tomar agua captada y enviarla a la planta potabilizadora instalada en Escalerillas (**Figura 4c**), que desde el 2018 hasta la fecha no ha sido utilizada, de acuerdo con datos del subdirector de la oficina estatal de CONAGUA del estado.

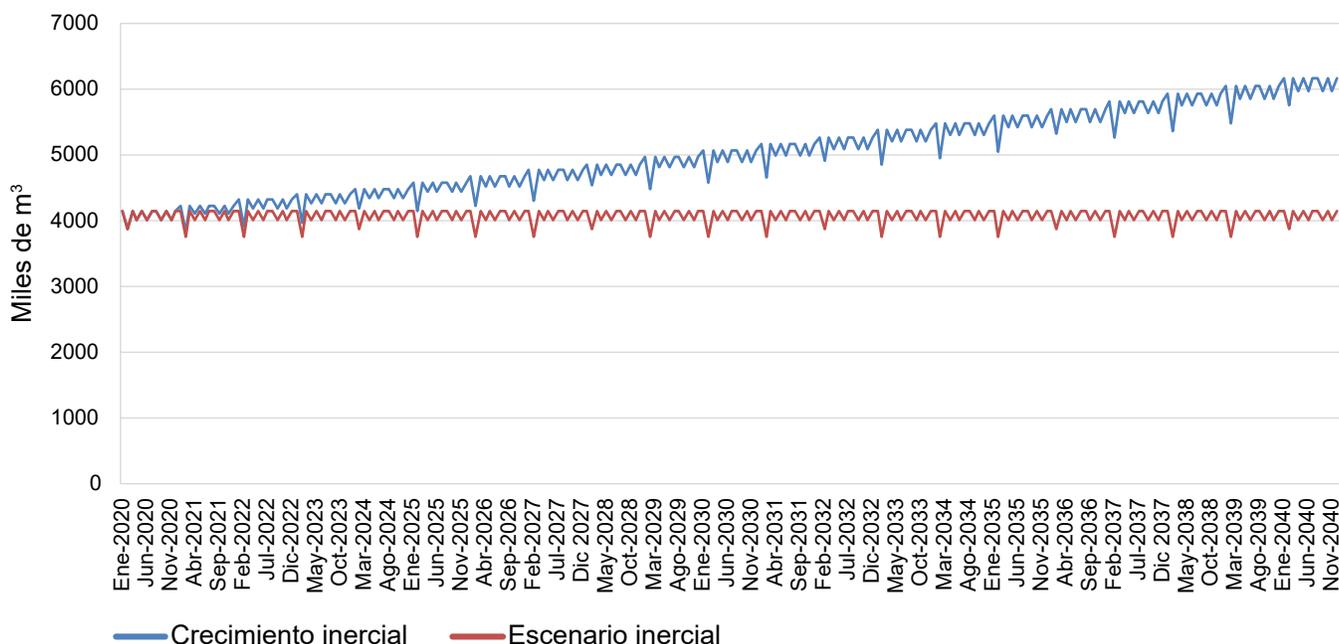
Para entender un poco más la dinámica de distribución, se introducen los resultados de dotación

existentes al software WEAP, para intentar modelar la situación, empleando 2 escenarios, uno donde no existen cambios aparentes y otro considerando el aumento de la población y el cambio climático (**Figura 5**).

Con el paso de los años, el aumento de la demanda de agua es bastante alto, comenzando en el año 2020, donde el consumo era de 4,138.05 m<sup>3</sup> por ambas comunidades. De acuerdo con el aumento anual del 1% de población y del Informe de Cambio Climático por el IPCC, la temperatura media anual del planeta ha incrementado 1.1 °C, haciendo que algunas regiones del mundo experimenten condiciones climatológicas extremas (IPCC, 2023).

Al introducir estos datos de consumo dentro del software WEAP, se desarrollan dos tipos de escenarios, uno de ellos donde no hay cambios significativos, es decir, no existe aumento de población ni cambio climático que afecte a las variables, conocido como escenario inercial, que podemos verificar en la **Figura 5** de color rojo, y el otro escenario, si tenemos variables que afectan el consumo, se incluye aumento de la población y el cambio climático, este escenario lo denominamos crecimiento inercial y se observa en color azul.

De acuerdo con el modelo WEAP, se pronostica



**Figura 5.** Demanda de agua por modelado WEAP 2020 – 2040.

un aumento de la demanda de agua de 4,000 a 5,000 m<sup>3</sup>/año para el año 2040. Si no existe un plan de gobernanza entre las comunidades, el uso de pipas será insostenible, además de que cada día se requerirá más agua para la población y se tendrán que instalar más tinacos alrededor de la carretera. Como se observa en la **Figura 5**, es notorio el cambio de la demanda de agua durante el paso de los años, obligando a replantear todas las decisiones que se tienen hasta ahora y también verificar la conveniencia del sistema de abastecimiento de agua que actualmente se emplea, ya que no tienen ninguna retribución y genera un gasto fuerte en cuestión de mantenimiento y combustible a las pipas del municipio, así como el gasto de rentas de pipas extras cuando las del gobierno no son suficientes. Para el panorama de saneamiento de aguas residuales, las condiciones son iguales o peores, y esto porque la infraestructura que existe actualmente tampoco permite que las aguas residuales sean tratadas.

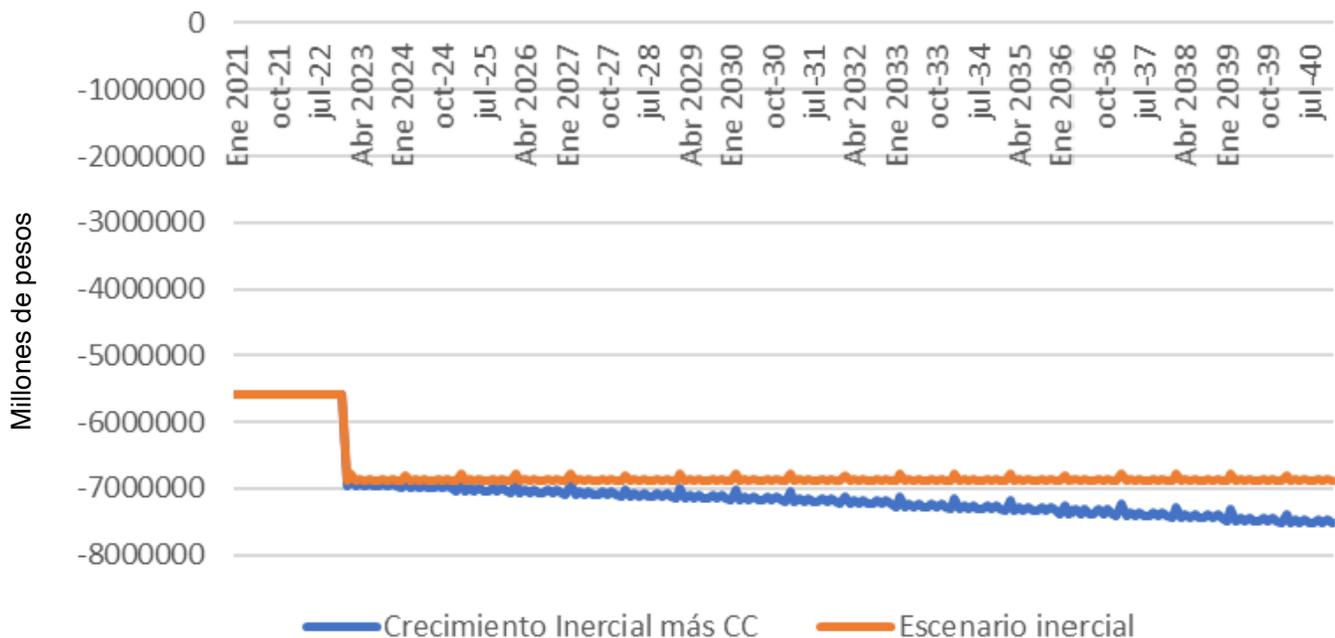
Por su parte, el modelo WEAP también arrojó que una PTAR que funciona sin ningún presupuesto para operar tampoco es rentable. Los costos de operación y mantenimiento de una PTAR como la que se tiene instalada, son altos por los gastos energéticos y por el personal calificado que se

requiere para la operación. Se puede observar en la **Figura 6**, que de continuar el crecimiento poblacional, los gastos se elevarían a más de 7 millones de pesos (actuales), cantidad que tendría que absorber la autoridad.

Los resultados en la **Tabla 2** muestran las posibles fuentes de abastecimiento de agua potable como los puntos dónde se descargan aguas residuales. Mientras que en la **Tabla 3** se muestran resultados de pozos superficiales o norias que se analizaron bajo las mismas condiciones.

Cada uno de los parámetros que se consideran dentro de los análisis de calidad de agua, se encuentran referenciados en la NOM-001-SEMARNAT-2021, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedades de la nación, NOM-127-SSA1-2021 agua para uso y consumo humano, límites permisibles para calidad de agua. Las barras azules representan todos los valores de las **Tablas 2 y 3**, con sus respectivas medias y puntos más altos y puntos mínimos, incluyendo su desviación estándar. Las **Figuras 7a, 7b, 7c y 7d** evalúan las necesidades de potabilización en la zona de estudio, bajo la NOM-127-SSA1-2021.

Para las **Figuras 8a, 8b, 8c, 8d, 8e y 8f** se



**Figura 6.** Beneficio neto de abastecimiento de agua, el crecimiento inercial representa los cambios en la población y cambio climático mientras que el escenario inercial no considera ninguna de las variables anteriores.

**Tabla 2.** Resultados del análisis de agua en cuerpos de agua superficiales y aguas residuales.

	pH	ORP mV	CE μS/cm	TDS mg/L	N <sub>T</sub> mg/L	P <sub>T</sub> mg/L	DQO mg/L	SST mg/L	T °C	OD	
										%	mg/L
Presa “El Potosino” (AAPp)	6.85	378.12	121.00	60.50	2.90	0.15	25.50	159.35	22.91	81.70	7.38
Caudal Ecológico Presa “El Potosino” (CEPp)	8.42	412.05	142.25	71.00	2.70	0.11	25.00	73.35	19.91	123.90	11.56
Efluente PTAR (EPTAR)	7.22	106.07	751.75	375.50	150.00	5.20	285.50	94.00	20.30	0.00	0.00
Combinación Efluente y Caudal E. (CEyPTAR)	7.27	285.80	234.75	117.00	41.00	1.05	33.50	10.00	21.97	41.52	3.798
Efluente A. “El Muerto” (EAM)	7.54	164.95	827.25	413.25	114.00	3.15	138.50	94.00	21.70	3.28	0.28
Efluente A. “La Tinaja Prieta” (EAI)	8.01	271.95	848.00	423.75	66.00	1.70	62.00	90.00	20.04	17.12	1.91
Presa “San José” (PSJ)	6.44	233.55	265.25	132.75	1.80	0.17	40.00	53.35	16.04	21.25	1.97

**Tabla 3.** Resultados del análisis de agua en norias.

	pH	ORP mV	CE μS/cm	TDS mg/L	N <sub>T</sub> mg/L	P <sub>T</sub> mg/L	DQO mg/L	SST mg/L	T °C	OD	
										%	mg/L
Noria 1	6.06	419.25	206.00	103.25	5.80	0.15	10.00	10.00	22.25	70.52	6.27
Noria 2	8.06	377.16	299.25	151.25	7.95	0.12	23.00	23.35	20.43	118.45	10.74
Noria 3	6.72	172.30	305.00	152.50	7.25	0.29	11.50	30.00	19.82	23.40	2.13
Noria 4	6.25	269.75	223.00	112.00	2.05	0.18	7.00	23.35	17.35	16.10	1.67
Noria 5	7.06	304.90	274.75	137.50	8.95	0.11	4.50	16.65	18.69	71.43	6.70

colocan los límites mínimos y máximos de acuerdo con la norma NOM-001-SEMARNAT-2021 para las necesidades de saneamiento de aguas residuales.

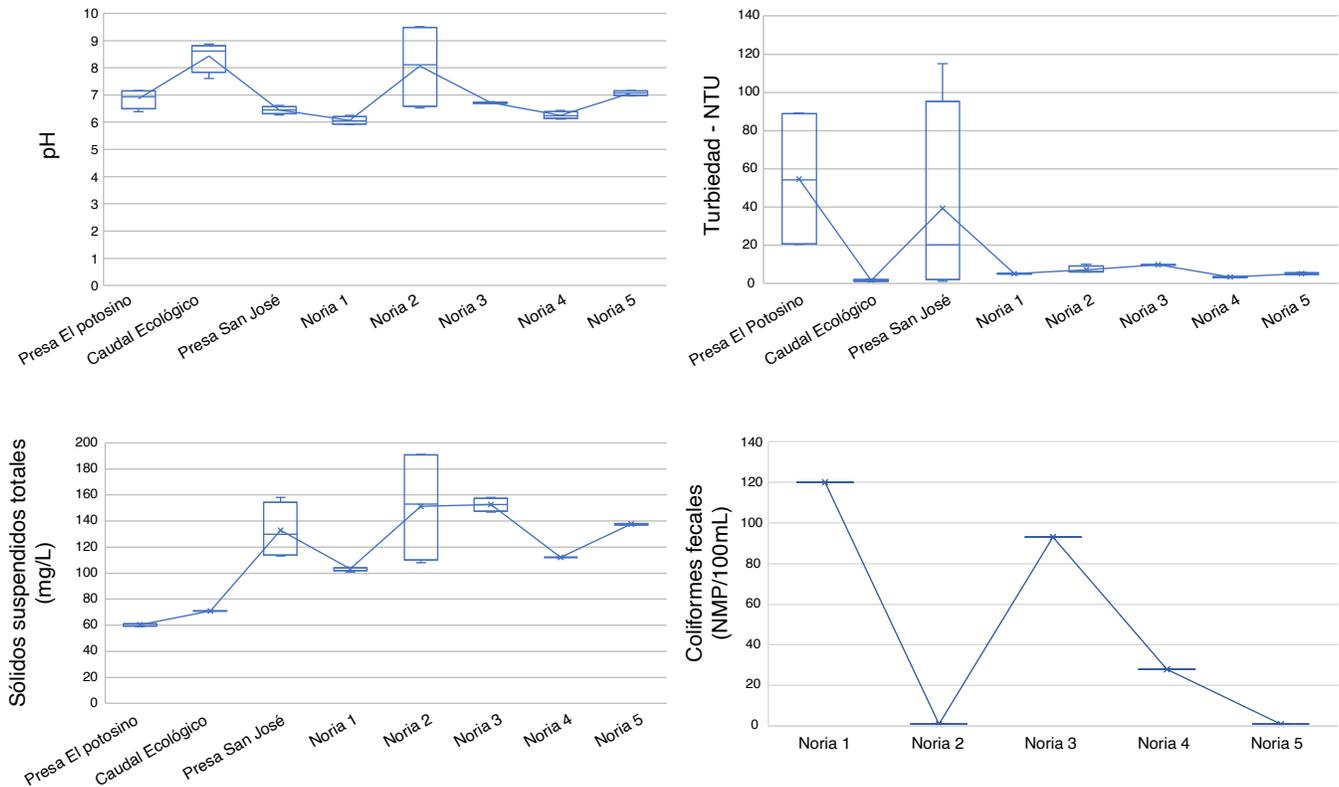
Se observó que, en los parámetros para las necesidades de potabilización, la mayoría de los parámetros analizados se encuentran dentro de los límites máximos permisibles, en el caso del elemento de los coliformes fecales, se analizó solo en los pozos debido a motivos económicos y por su importancia en el abastecimiento de agua. Los resultados indican que 3 de los 5 pozos analizados tienen presencia de coliformes fecales (**Figura 7d**), por lo que las heces contaminan las aguas residuales dentro de la zona, ya que estos pozos se encuentran al aire libre los animales que se encuentran en el área pueden contribuir a este problema.

## Discusión

Los resultados obtenidos ofrecen un panorama para llegar a las posibles soluciones dentro de nuestra área

de estudio. De acuerdo con el análisis hidrológico, se tienen 400 mm de precipitación anual siendo el periodo más lluvioso de Junio a Septiembre, por lo que es posible instalar sistemas de captación de agua de lluvia (SCALL) en localidades como Escalerillas y Pozuelos, que son 2 de las localidades que presentan el problema del agua.

El gobierno municipal inició un programa “Con Mi Cisterna Sí” que consiste en la entrega de kits de sistemas de captación de agua de lluvia para estas comunidades mediante un estudio socioeconómico en el que de manera aleatoria se pretenden beneficiar a más de 1,000 familias y después ampliarse aún más. El kit contiene un separador de aguas de capacidad de 40 L, una bomba de agua, tubería de diferentes tamaños para llevar a cabo la instalación, y algunas otras herramientas, dentro de lo que destaca un tinaco de 1,000 litros, el cual no es suficiente para capturar una gran cantidad de agua de lluvia y sobre todo que no podría almacenarse



**Figura 7.** Resultados de posibles fuentes de abastecimiento con base a la NOM-127-SSA1-2021. **a)** pH, n=32,  $\alpha=0.05$ , p=0.01, **b)** Turbiedad, n=32,  $\alpha=0.05$ , p=0.024, **c)** Sólidos suspendidos totales, n=32,  $\alpha=0.05$ , p=0.019, **d)** Coliformes fecales, n=5

para un uso futuro y en especial para la época de estiaje en la ciudad.

Empleando una hoja de cálculo elaborada por CONAGUA con respecto al diseño de SCALL y tomando en cuenta la capacidad de agua del tinaco, se obtiene la información de la **Tabla 4**.

Se toma en cuenta un coeficiente de escurrimiento de 0.90 debido al material de construcción de las casas (techo cubierto con material) el cual no facilita la permeabilidad, una dotación propuesta de 35 L/h/día de acuerdo con CONAGUA y 4 habitantes por casa hogar, además de un área de captación de 140 m<sup>2</sup> por el tamaño de las casas de las localidades que suelen ser muy grandes.

Al tener un tanque de almacenamiento con ese tamaño, podemos captar agua durante los meses más lluviosos, pero, este no permitirá en ningún momento poder almacenarla para el futuro, porque todo el volumen excedente estará perdido. Si bien, el sistema es una solución temporal y permanente del área, los cálculos deben emplearse de manera adecuada.

En la **Tabla 4**, podemos observar los resultados en rojo, que es aquella cantidad de agua que quedará en el tanque, al ser valores negativos significa que no habrá suficiente agua que captar, por lo que se sugiere una reconfiguración del sistema en cuanto a la capacidad del tanque de almacenamiento. De acuerdo con el manual técnico de los SCALL, Anaya *et al.* (2018), recomienda el cálculo del volumen de captación de agua de lluvia con los siguientes parámetros:

$$V_{cisterna} = D_j \cdot M_{sequia+2} \quad (1)$$

Dónde  $D_j$ , es la demanda mensual en m<sup>3</sup> por mes y  $M_{sequia+2}$  los meses con menos de 30 mm de precipitación, esto con el fin de garantizar agua todo el año. Si tomamos en cuenta una demanda mensual de 3,600 litros con el mínimo de 35 L/h/día por 30 días, y tomando en cuenta 7 meses con menos de 30 mm de precipitación mensual, tendremos un resultado de un volumen aproximado de 25.2 m<sup>3</sup>,

**Tabla 4.** Diseño SCALL empleando tanque de almacenamiento de 1 m<sup>3</sup> y coeficiente de escurrimiento de 0.90

		Precipitación mensual (mm)												
		Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
Año	Volúmenes	29	6	8.6	28.1	47.1	65.4	96.2	56.8	81.3	9.6	15.6	2.8	446.50
1	Captación (m <sup>3</sup> )	3.65	0.76	1.08	3.54	5.93	8.24	12.12	7.16	10.24	1.21	1.97	0.35	56.25
	Demanda (m <sup>3</sup> )	4.34	3.92	4.34	4.20	4.34	4.20	4.34	4.34	4.20	4.34	4.20	4.34	51.10
	En tanque (m <sup>3</sup> )	-0.69	-3.16	-3.26	-0.66	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	-2.13	-2.23	-3.99	-0.93
	Excedente (m <sup>3</sup> )	0.00	0.00	0.00	0.00	0.59	4.04	7.78	2.82	6.04	0.00	0.00	0.00	21.27
2	Captación (m <sup>3</sup> )	3.65	0.76	1.08	3.54	5.93	8.24	12.12	7.16	10.24	1.21	1.97	0.35	56.25
	Demanda (m <sup>3</sup> )	4.34	3.92	4.34	4.20	4.34	4.20	4.34	4.34	4.20	4.34	4.20	4.34	51.10
	En tanque (m <sup>3</sup> )	-4.68	-3.16	-3.26	-0.66	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	-2.13	-2.23	-3.99	-1.26
	Excedente (m <sup>3</sup> )	0.00	0.00	0.00	0.00	0.59	4.04	7.78	2.82	6.04	0.00	0.00	0.00	21.27

pero, un tanque de esa capacidad para una familia suele ser un poco más costoso. Intentemos disminuir la capacidad a un tanque de 10 m<sup>3</sup> y volver a correr la simulación del SCALL con el cambio del volumen del tanque.

Con el cambio del volumen del tanque, el volumen de excedente cambia, dando a entender que un tanque de almacenamiento de 1,000 L al menos se ofrece una solución temporal que ayude a solucionar los frecuentes eventos de falta de agua potable, en tanto que un tanque de 10,000 L, permite una mejor captación, además de mantener más agua disponible durante el resto del año (Tabla 5).

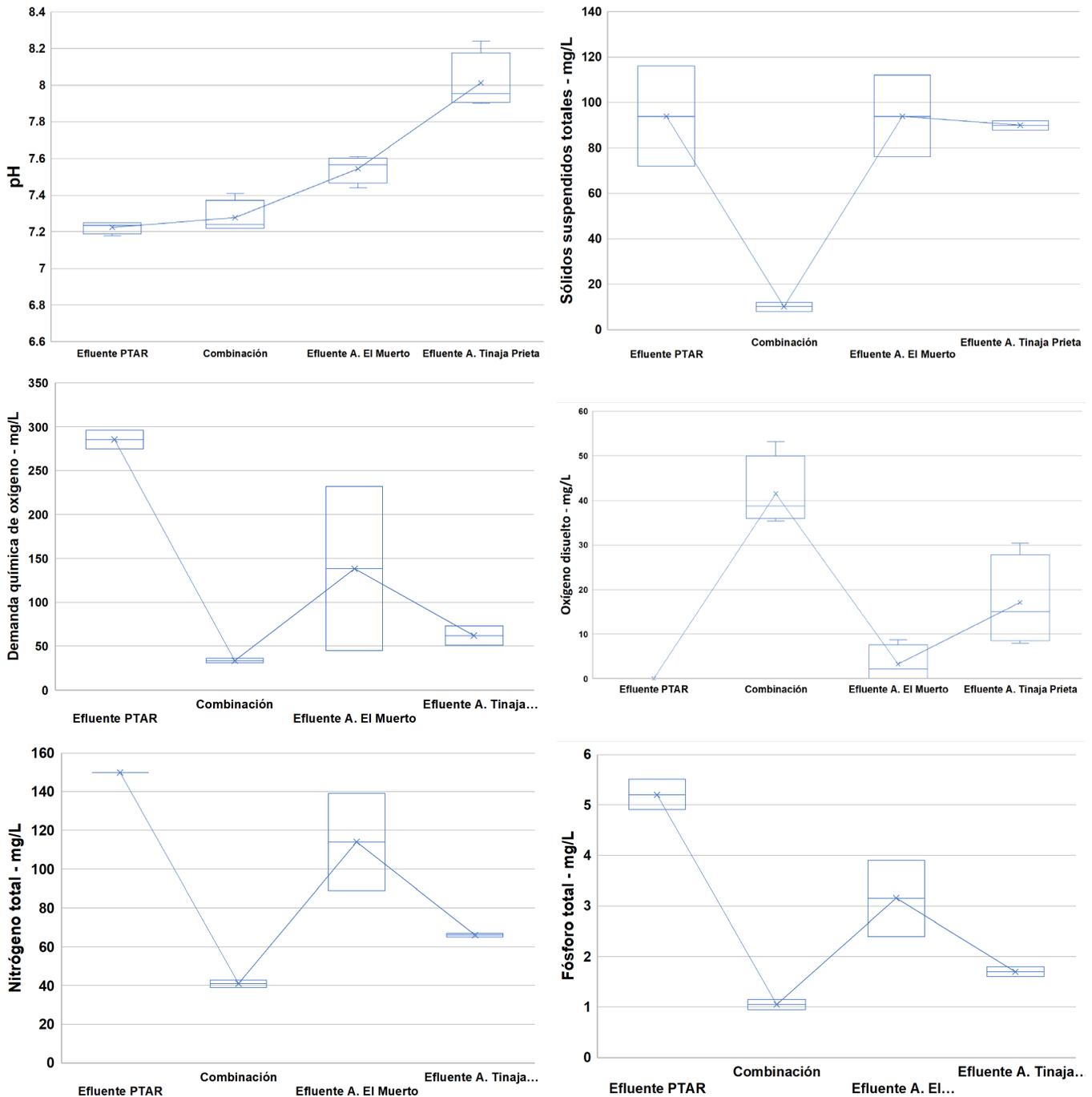
Los sistemas de captación de agua de lluvia

(SCALL) son un componente fundamental dentro de los sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS), ya que ofrecen múltiples beneficios ambientales y sociales que contribuyen a la gestión sostenible del agua en las ciudades, en este caso a la captación de agua de lluvia. Ahora, abordando el tema particular de las aguas residuales, se propone la instalación de un humedal dentro del área donde se encuentra la descarga de aguas grises dentro del caudal del Río Santiago, el cual, siendo un área completamente natural, permite sobre todo modificaciones de manera más fácil, pero, sin dejar de tomar en cuenta los beneficios de un humedal.

Un humedal es una tecnología de tratamiento

**Tabla 5.** Diseño SCALL empleando un tanque de almacenamiento de 10 m<sup>3</sup> y coeficiente de escurrimiento de 0.90.

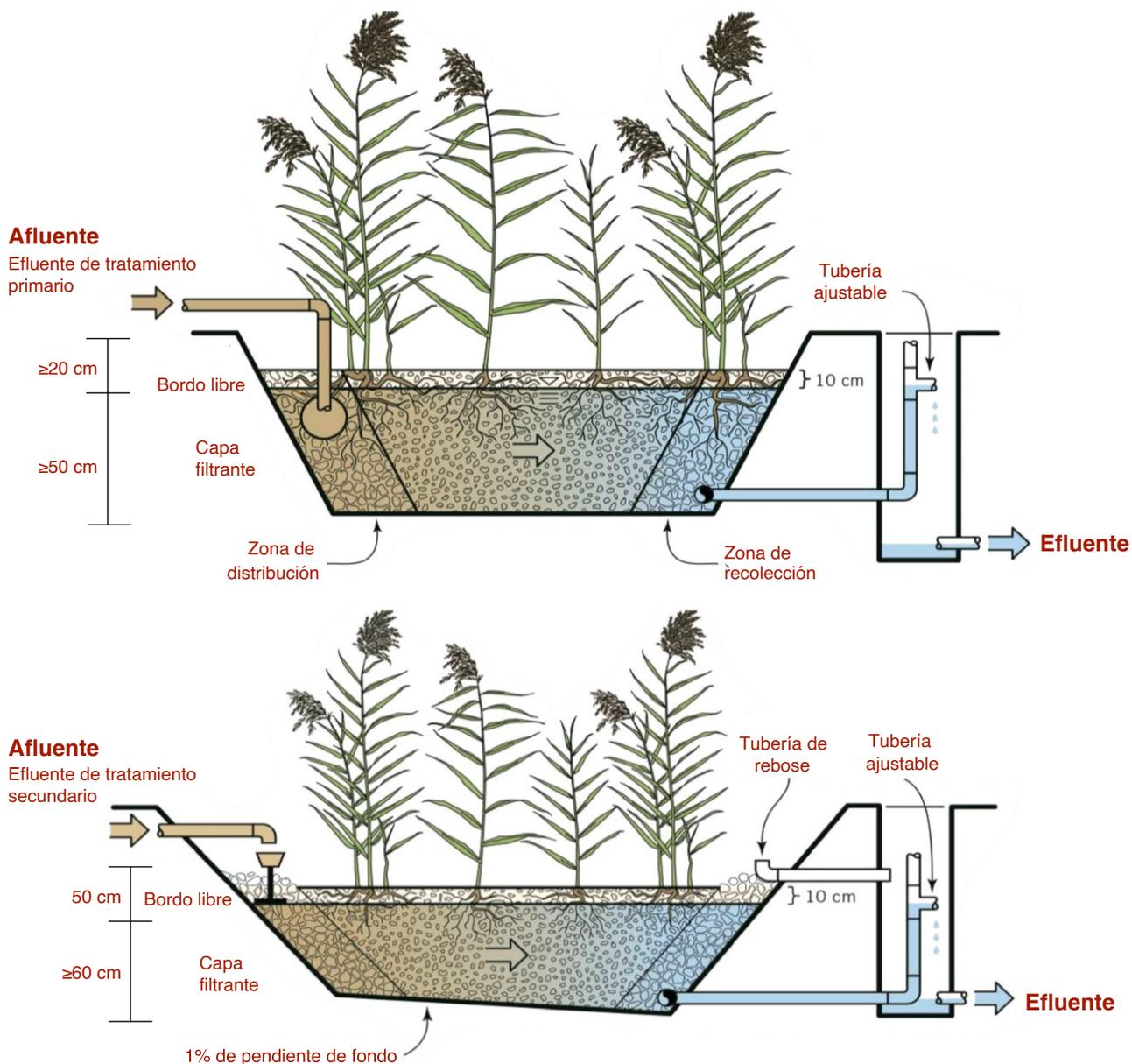
		Precipitación mensual (mm)												
		Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
Año	Volúmenes	29	6	8.6	28.1	47.1	65.4	96.2	56.8	81.3	9.6	15.6	2.8	446.50
1	Captación (m <sup>3</sup> )	3.65	0.76	1.08	3.54	5.93	8.24	12.12	7.16	10.24	1.21	1.97	0.35	56.25
	Demanda (m <sup>3</sup> )	4.34	3.92	4.34	4.20	4.34	4.20	4.34	4.34	4.20	4.34	4.20	4.34	51.10
	En tanque (m <sup>3</sup> )	-0.69	-3.16	-3.26	-0.66	1.59	5.63	10.00	10.00	10.00	6.87	4.64	0.65	3.47
	Excedente (m <sup>3</sup> )	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3.41	2.82	6.04	0.00	0.00	0.00	12.27
2	Captación (m <sup>3</sup> )	3.65	0.76	1.08	3.54	5.93	8.24	12.12	7.16	10.24	1.21	1.97	0.35	56.25
	Demanda (m <sup>3</sup> )	4.34	3.92	4.34	4.20	4.34	4.20	4.34	4.34	4.20	4.34	4.20	4.34	51.10
	En tanque (m <sup>3</sup> )	-0.04	-3.16	-3.26	-0.66	1.59	5.63	10.00	10.00	10.00	6.87	4.64	0.65	3.52
	Excedente (m <sup>3</sup> )	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3.41	2.82	6.04	0.00	0.00	0.00	12.27



**Figura 8.** Resultados con base a la NOM-001-SEMARNAT-2021 para los puntos con presencia de agua residual **a)** pH,  $n=32$ ,  $\alpha=0.05$ ,  $p=0.03$ , **b)** SST,  $n=8$ ,  $\alpha=0.05$ ,  $p=0.034$ , **c)** DQO,  $n=8$ ,  $\alpha=0.05$ ,  $p=0.063$ , **d)** O.D.  $n=16$ ,  $\alpha=0.05$ ,  $p=0.006$ , **e)**  $N_T$   $n=8$ ,  $\alpha=0.05$ ,  $p=0.012$ , **f)**  $P_T$   $n=8$ ,  $\alpha=0.05$ ,  $p=0.007$ .

de agua de manera natural y está potenciado como soluciones basadas en la naturaleza (SbN), que permiten optimizar y ayudar a los procesos naturales ya existentes en el área, por lo que se consideran una opción amigable con el ambiente y una opción sustentable para el tratamiento de aguas residuales (Dotro *et al.*, 2017). Existen varios tipos de humeda-

les, algunos que dependen del tipo de flujo de agua ya sea flujo horizontal superficial, flujo horizontal subsuperficial, flujo vertical subsuperficial, y cada uno de ellos presenta características de acuerdo al tipo de agua residual, pero, con la literatura actualmente revisada (Dotro *et al.* 2017; Vidal y Hormazábal, 2018), se nos permite llegar a la conclusión



**Figura 9.** Esquemas típicos de un humedal de flujo horizontal; parte superior: tratamiento secundario, parte inferior: tratamiento terciario de aguas residuales domésticas. **Fuente:** Dotro *et al.* (2017).

de que un humedal de tipo subsuperficial horizontal es el adecuado para nuestra área de estudio (Figura 9), debido a las condiciones de las aguas residuales, permitiendo de manera adecuada eliminar una gran cantidad de materia orgánica de las aguas residuales no tratadas, además de soportar 1.6 gramos de  $DBO_5$  por  $m^2$ , esto debido a que todo el tiempo se encuentra inundado y no hay mayor transferencia de oxígeno, CONAGUA los recomienda debido que no requieren de energía eléctrica (CONAGUA, 2019), haciéndolos viables en comunidades rurales.

Se requiere el uso de plantas macrófitas dentro del mismo humedal, y para esto se proponen las 2 más viables, el carrizo (*Phragmites australis*) y espadañas (*Typha angustifolia*), por ser de rápida propagación, y por su capacidad de tratar efluentes con aguas provenientes de procesos industriales, cloacales y derivaciones domiciliarias (Vidal y Hormazábal, 2018). La espadaña se caracteriza por su resistencia a cambios de pH, tener una altura de hasta 5 metros y la viabilidad de encontrar sus semillas, mientras que el carrizo tolera grandes

cantidades de sal y tiene rápido crecimiento.

Las ventajas de un humedal son estéticamente agradables, permite reducir la cantidad de materia orgánica que se descarga dentro del caudal ecológico del Río Santiago, su construcción es barata y además su tasa de retorno de inversión es más rentable en comparación con la de una PTAR, es por esta razón que un humedal es rentable dentro de nuestro sitio de interés, se prevé que este pueda medir alrededor de 1,125 m<sup>2</sup> y pueda respetar los límites máximos permisibles de la NOM-001-SEMARNAT-2021. Quizá el tamaño pueda parecer demasiado grande, pero, este diseño considera un pre-tratamiento en el cual solo se retiren materia orgánica que pueda tapar la tubería, para poder bajar el área de este humedal, se debe considerar un tratamiento primario.

El esquema presentado de la **Figura 9**, permite notar diferentes configuraciones para los sistemas de distribución del humedal horizontal de flujo subsuperficial, que permitan aprovechar al máximo las plantas macrófitas y generar el tratamiento de agua residual de manera más eficiente, maximizando así la conductividad hidráulica.

## Conclusiones

Se localizaron tres presas para la captación de agua, un pozo profundo, cinco pozos superficiales (norias), una potabilizadora y dos plantas de tratamiento de agua residual, por lo que existe infraestructura suficiente para solucionar los problemas de abastecimiento y saneamiento. El uso de tinacos y pipas para la población de Escalerillas y Pozuelos para el suministro de agua potable, evidencia que no existe una red de abastecimiento funcionando adecuadamente. La rehabilitación de La Presa El Peaje y la Planta Potabilizadora en la Maroma permitirá tener abastecimiento de agua potable para la localidad de Escalerillas. Aunque existe un pozo profundo llamado “Las Cabras” este se encuentra alejado de la comunidad, no hay acceso a la electricidad y no cuenta con una red de distribución de agua. El índice de la calidad del agua de las fuentes potenciales de abastecimiento (presas y norias) presentan valores de calidad de media a buena, y requieren de potabilización, ya que los valores de pH, turbidez y coliformes fecales

se encuentran fuera de rango de la normatividad. El cauce de algunos cuerpos de agua, presentan una mala calidad de agua, y existen valores altos de contaminación (CE, DQO, SST, TDS, N<sub>T</sub>, P<sub>T</sub>), por lo que se asume que existen descargas de aguas residuales aguas arriba de la Presa San José, el Arroyo la Tinaja Prieta y el Arroyo El Muerto. El funcionamiento adecuado de las PTAR permitiría disminuir la carga de contaminantes hacia los cuerpos receptores.

Los escenarios de demanda y disponibilidad de agua muestran un crecimiento de la población de un promedio anual de 1%. Por lo tanto, se obtiene un aumento en la demanda de agua de 4000 a 5000 m<sup>3</sup>/año para el año 2040 y un aumento en la generación de aguas residuales. Pozuelos es la localidad más alejada de la infraestructura disponible para abastecimiento de agua. De acuerdo con las simulaciones y la cantidad de precipitación media mensual encontrada, la instalación de sistemas de captación de agua de lluvia (SCALL) permitirá aumentar la disponibilidad de agua por hogar, aumentando la dotación por día y mejorando el desarrollo de la calidad de vida de los residentes. La operación de la PTAR que forma parte de la infraestructura detectada tiene un alto costo de operación y mantenimiento. De acuerdo con los parámetros de diseño y las simulaciones de DBO<sub>5</sub>, OD y SST, la implementación de un humedal es una solución viable, de bajo costo y mínimo mantenimiento, para el tratamiento de aguas residuales en la zona de Escalerillas y Pozuelos, aprovechando el terreno y las conexiones existentes de tubería. No existe acceso al abastecimiento por agua entubada ni saneamiento de agua dentro de la zona de estudio, por lo que se tiene que recurrir al abastecimiento por pipas, excepto mesa de conejos y Col. Insurgentes. Sí existe la infraestructura hidráulica ya instalada, aunque no operante, para solucionar los problemas de abastecimiento y saneamiento.

## Referencias

Anaya GM, Pérez HA, López HNA, Martínez PIR (2018). *Sistemas de Captación del Agua de Lluvia*. Ciudad de México: Colegio de Postgraduados.

- Banco Mundial (2017). *Informe sobre el desarrollo mundial 2017: La gobernanza y las leyes*, Washington: Banco Mundial.
- Castañeda OJD, Jiménez VTZ y Ramírez RR (2022). Índice de percepción local de mejora del combate al rezago social: análisis de las centrales eólicas en el Istmo de Tehuantepec, Oaxaca. *LiminaR. Estudios sociales y humanísticos*, XX(1), pp. 1-18.
- Castro PNA y Rajadel AON (2021). Otra cara de la problemática del agua y el cambio climático; dos realidades sinérgicas yuxtapuestas. *Revista Universidad y Sociedad*, 13(4), pp. 351-360.
- Castro SLO (2014). Urbanización periférica y agricultura periurbana: Localización espacial y caracterización de los sistemas agropecuarios del municipio de Tarímbaro, Michoacán, Ciudad de México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) (2019). *Estadísticas del Agua*, México: CONAGUA.
- CONAGUA (2019). Datos básicos para proyectos de agua potable y alcantarillado. En: CONAGUA, ed. *Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento*. Ciudad de México: Subdirección General de Agua Potable, Drenaje y Saneamiento, p. 92.
- CONAGUA (2019). *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento*. En: CONAGUA, ed. *Diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales: Humedales artificiales*. Ciudad de México: CONAGUA, p. 119.
- CONEVAL (2021). *Índice de Rezago Social 2020*, Ciudad de México: CONEVAL.
- Anaya GM, Pérez HA, López HNA y Martínez PIR (2018). *Sistemas de Captación del Agua de Lluvia*. Ciudad de México: Colegio de Postgraduados.
- Banco Mundial (2017). *Informe sobre el desarrollo mundial 2017: La gobernanza y las leyes*, Washington: Banco Mundial.
- Dotro G y otros (2017). *Humedales para Tratamiento*. 1a edición ed. Londres: Red panamericana de sistemas de humedales.
- González-Arellano S, Larralde-Corona AH y Cruz-Bello GM (2021). El periurbano en México: identificación y caracterización sociodemográfica y territorial. *Papeles de Población*, 27(108), pp. 129-145.
- Guevara SA y Lara PJA (2015). Agua, pobreza y uso del tiempo en México: Análisis cuantitativo como sustento del diseño de una política pública de doble dividendo. *Nova Scientia*, 7(15), pp. 462-481.
- IPCC (2023). *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Geneva: Core Writing Team H Lee and J. Romero.
- Mballa LV y Hernández EF (2018). Las políticas públicas de abastecimiento de agua potable y saneamiento para la localidad de Escalerillas, San Luis Potosí– México: escenarios y percepción ciudadana. *Agua y Territorio*, Junio, I(11), pp. 137-152.
- ONU-Habitat (2018). *Índice básico de las ciudades prósperas*, Ciudad de México: ONU-Habitat.
- Organización Mundial de la Salud (OMS) (2022). *Centro de Prensa*. [En línea] Available at: <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/drinking-water>
- Robledo CJR (2013). El acceso al agua de uso doméstico en las áreas periurbanas del municipio de San Luis Potosí: El caso de Escalerillas. San Luis Potosí(San Luis Potosí): El Colegio de San Luis AC.
- Secretaría de Desarrollo Social y Regional (2021). *Mapeo de las Zonas de Atención Prioritaria 2021*, San Luis Potosí: Secretaría de Desarrollo Social y Regional.
- SEMARNAT (2022). NOM-001-SEMARNAT-2021, Que establece los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación. Ciudad de México: Diario Oficial de la Federación.
- SSA(2022). NOM-127-SSA1-2021, Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua. Ciudad de México: Diario Oficial de la Federación.
- Vidal G y Hormazábal S (2018). *Humedales construidos*. 1a edición ed. Concepción: Universidad de Concepción.