



Universidad Autónoma de San Luis Potosí

Facultad de Ingeniería

Centro de Investigación y Estudios de Posgrado

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

Potosí

T E S I S

Que para obtener el grado de:

Maestro en Tecnología y Gestión del Agua

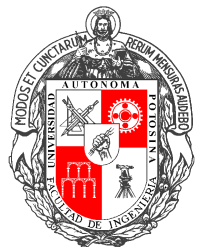
Presenta:

Ing. Juan José Félix Carrillo

Asesores:

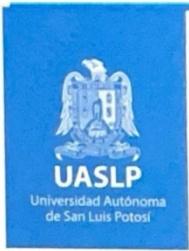
Dr. Cristóbal Aldama Aguilera

Dr. Rodolfo Cisneros Almazán



San Luis Potosí, S. L. P.

Enero de 2024



20 de julio de 2023

**ING. JUAN JOSÉ FÉLIX CARRILLO
P R E S E N T E.**

En atención a su solicitud de Temario, presentada por los **Dres. Cristóbal Aldama Aguilera y Rodolfo Cisneros Almazán**, *Asesor y Coasesor de la Tesis* que desarrollará Usted, con el objeto de obtener el Grado de **Maestro en Tecnología y Gestión del Agua**. Me es grato comunicarle que en la sesión del H. Consejo Técnico Consultivo celebrada el día 20 de julio del presente, fue aprobado el Temario propuesto:

TEMARIO:

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

Introducción.

1. Aspectos socioeconómicos de las comunidades periurbanas del poniente de la ciudad de San Luis Potosí.
 2. Diagnóstico de abastecimiento y del sistema de saneamiento de agua.
 3. Resultados y discusión del análisis espacial y modelado de escenarios de demanda, disponibilidad y calidad de agua y necesidades de saneamiento.
- Conclusiones.
Referencias.

"MODOS ET CUNCTARUM RERUM MENSURAS AUDEBO"

A T E N T A M E N T E

DR. EMILIO JORGE GONZÁLEZ GALVÁN
DIRECTOR.
 VICERRECTORÍA DE SAN LUIS POTOSÍ
 FACULTAD DE INGENIERÍA
 DIRECCIÓN



Copia. Archivo.
*etn.



www.uaslp.mx

Av. Manuel Nava B
Zona Universitaria • CP 78290
San Luis Potosí, S.L.P.
tel. (444) 826 2330 al39
fax (444) 826 2336

"UASLP, más de un siglo educando con autonomía"



UASLP
Universidad Autónoma
de San Luis Potosí



FACULTAD DE
INGENIERÍA



CENTRO DE
INVESTIGACIÓN
Y ESTUDIOS
DE POSGRADO

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ
FACULTAD DE INGENIERÍA

AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN

10 ENERO 2024
DÍA MES AÑO

Secretaría General de la Facultad de Ingeniería
PRESENTE.

Nos permitimos hacer de su conocimiento que el (la) Sr(ita):

FÉLIX

APELLIDO PATERNO

CARRILLO

APELLIDO MATERNO

JUAN JOSÉ

NOMBRE (S)

Ha efectuado a satisfacción las correcciones que se le indicaron durante la revisión conjunta a su trabajo de titulación, por lo cual estamos autorizando con esta forma la impresión del mismo.

Sin otro particular por el momento, protestamos las seguridades de nuestra atenta y distinguida consideración.

ATENTAMENTE

Dr. Cristóbal Aldama Aguilera

NOMBRE

Dr. Rodolfo Cisneros Almazán

NOMBRE

Dr. Hermann Rocha Escalante

NOMBRE

Dr. Luis Armando Bernal Jácome

NOMBRE

Maio Selene Berbe M

FIRMA

FIRMA

FIRMA

FIRMA

FIRMA

FIRMA

NOTA: El sustentante cuenta con **tres meses**, a partir de la fecha de aprobación del Examen Previo, para la presentación del Examen de Grado, ya que al vencimiento de este plazo, deberá solicitar Examen Previo de nueva cuenta, realizando nuevamente los trámites para tal propósito.

ENTREGAR:

- 3 EJEMPLARES IMPRESOS (4 EJEMPLARES SI HAY UN CO-ASESOR).
- UN EJEMPLAR ADICIONAL POR CADA SINODAL EN FORMATO IMPRESO O DIGITAL, SEGÚN HAYA SIDO INDICADO POR CADA SINODAL.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco de manera infinita a la **Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Centro de Investigación y Estudios de Posgrado y al Consejo Nacional Humanidades Ciencias y Tecnologías**, por darme la oportunidad de ser parte de la comunidad estudiantil en un posgrado de calidad y proporcionarme herramientas y conocimientos que permitieron desarrollar este tema de tesis.

A los pobladores **de Pozuelos**, en especial, a la señora Silvia, por su entrega, dedicación y tiempo para recibirme y permitirme ingresar a los domicilios particulares para realizar estudios de calidad de agua.

A mi estimado **M.Sc. Rodolfo Cisneros Pérez**, por apoyarme hasta en los últimos momentos en el diseño e implementación de los humedales y ser un guía para poder finalizar mi proyecto de tesis con una gran propuesta de solución dentro del área en cuestión.

A la **Dra. Silvia Chamizo de la Universidad Autónoma de Tlaxcala** y el **Dr. Gerardo Esqueda de la Universidad Autónoma de Tampico**, por su gran conocimiento compartido para llevar a cabo el desarrollo de la herramienta WEAP como parte importante del desarrollo de la tesis.

Al **Dr. Cristóbal Aldama Aguilera** por su tiempo, dedicación y confiar en mis conocimientos, habilidades y darme la mano hasta en el último momento.

A mis asesores **Dr. Rodolfo Cisneros Almazán, Dr. Hermann Rocha Escalante, Dr. Luis Bernal Jácome**, por ser parte clave de mi proyecto, apoyarme en cada una de mis dudas y siempre estar a su disposición cuando fue requerido.

A **Elideth Yuridia Velázquez Medina y Verónica Tayabas Contreras** secretarías del CIEP, quienes fueron parte fundamental durante el desarrollo de mi tesis, por ayudarme cuando lo necesité y por el cariño y afecto que otorgaron a mi persona.

“No es difícil tener éxito. Lo difícil es merecerlo”

Albert Camus

DEDICATORIA

A Jehová:

Por haberme dado salud y vida, por bendecirme en cada paso de mi camino, para alcanzar cada una de mis metas propuestas.

A mi Madre Josefina:

Por ser luz en mi camino, por acompañarme en cada uno de mis pasos y apoyarme en todo lo que me propongo, por seguir pausando sus sueños y ayudarme a continuar con los míos.

Al amor de mi vida Gerardo:

Por ser un gran humano, me ayudaste en cada paso de esta gran aventura y me hiciste feliz en los peores momentos, me apoyaste cuando más lo necesité y creíste en mí, cuando yo, no me imaginé capaz de hacerlo.

A mis hermanas Ziomara, Diana y Marazul:

Por sentirse orgulloso siempre de mí, apoyarme cuando más lo necesité y sobre todo su amor incondicional hacia mi persona.

A María José Verdías Carrillo:

Por ser una gran prima, por quererme como un hermano más, confiaste en mí como nadie en el mundo y tenías siempre la certeza de que siempre podía dar más de lo que era capaz, y que no me daba la oportunidad de ver por mí mismo.

A mis mejores amigas Beatriz, Estefanía y Ximena:

Por no dejarme caer, impulsarme, aunque el camino sea difícil, y siempre estar al tanto de mí en cualquier situación.

CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS.....	10
ÍNDICE DE FIGURAS.....	12
RESUMEN.....	15
INTRODUCCIÓN.....	16
Justificación.....	17
Hipótesis.....	17
Objetivos.....	17
Objetivo general.....	17
Objetivos Específicos.....	17
1. ASPECTOS SOCIOECONÓMICOS DE LAS COMUNIDADES	
PERIURBANAS DEL PONIENTE DE LA CIUDAD DE SAN LUIS POTOSÍ.....	19
1.1. Comunidades periurbanas.....	19
1.1.1. Comunidades periurbanas del poniente de la ciudad de San Luis Potosí.....	19
1.2. Crecimiento urbano y cambio de uso de suelo.....	20
1.2.1. Crecimiento urbano y cambio de suelo en San Luis Potosí.....	21
1.3. Población y estructura económica.....	22
1.3.1. Zona poniente de San Luis Potosí.....	23
1.4. Acceso a servicios básicos, sistemas de abastecimiento y saneamiento de	
agua y calidad de vida.....	24
1.4.1. Objetivos de Desarrollo Sostenible.....	25
1.4.2. Índice de Rezago Social.....	26
1.4.3. Infraestructura de servicios públicos.....	28
1.4.4. Sistemas de abastecimiento y saneamiento.....	28
1.4.4.1. Modelo WEAP (Water Evaluation and Planning).....	35
1.4.4.2. Sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS).....	36
1.4.4.3. Humedales.....	37
1.4.4.3.1. Humedales de Flujo Superficial.....	38
1.4.4.3.2. Humedales de Flujo Subsuperficial.....	39
1.4.4.3.2.1. Humedales de flujo subsuperficial horizontal.....	40

1.4.4.3.2.2.	Humedales de flujo subsuperficial vertical.....	41
1.4.5.	Acceso a agua potable y saneamiento.....	42
1.5.	Calidad del agua y riesgos para la salud	48
1.6.	Descripción del área de estudio	50
1.6.1.	Sistema de Información Geográfica.....	50
1.6.2.	Índice de Rezago Social	50
1.6.3.	Hidrología.....	51
1.6.4.	Clima.....	56
1.6.5.	Edafología.....	58
1.6.6.	Vegetación y uso de suelo	60
2.	<i>DIAGNÓSTICO DE ABASTECIMIENTO Y DEL SISTEMA DE</i>	
	<i>SANEAMIENTO DE AGUA</i>	62
2.1.	Caracterización de calidad de agua	62
2.1.1.	Planeación de puntos y muestreo.....	62
2.1.2.	Parámetros fisicoquímicos en campo.....	63
2.1.3.	Parámetros fisicoquímicos en laboratorio	64
2.1.3.1.	Sólidos Suspendidos Totales (SST)	65
2.1.3.2.	Turbidez.....	67
2.1.3.3.	Demanda química de oxígeno (DQO)	69
2.1.3.4.	Fósforo.....	69
2.1.3.5.	Nitrógeno.....	71
2.1.4.	Análisis estadístico, indicadores e índices de calidad de agua	72
2.1.4.1.	Índices de calidad de agua	73
2.2.	Metodología para la alimentación del software WEAP	77
2.2.1.	Water Evaluation and Planning (WEAP).....	77
2.2.2.	Antecedentes	77
2.2.3.	Enfoque	78
2.2.4.	Alimentación del modelo.....	79
2.2.4.1.	Identificación de estaciones climatológicas	80
2.2.4.2.	Etapa 1: Procesamiento y generación de información básica para modelación de abastecimiento de agua	81
2.2.4.3.	Etapa 2: Demandas históricas de agua.....	85
2.2.4.4.	Etapa 3: Descripción de la cuenca.....	86

2.2.4.5.	Etapa 4: Embalses.....	88
2.2.4.6.	Etapa 5: Modelación hidrológica.....	89
2.2.4.7.	Etapa 6: Construcción del esquema	89
2.2.4.8.	Etapa 7: Generación de escenarios.....	90
2.3.	Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS).....	91
2.3.1.	SCALL (Sistemas de Captación de Agua de Lluvia).....	91
2.3.1.1.	Identificación de localidades y recopilación de datos climáticos	91
2.3.1.2.	Elección de herramientas de simulación	91
2.3.1.3.	Diseño de SCALL con herramientas de simulación	91
2.3.1.4.	Evaluación de la Eficiencia de los SCALL.....	93
2.3.2.	Humedales.....	93
2.3.2.1.	Selección del Sitio.....	94
2.3.2.2.	Diseño Hidráulico.....	96
2.3.2.3.	Selección de vegetación.....	98
2.3.2.4.	Operación y mantenimiento.....	99
3.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN DEL ANÁLISIS ESPACIAL Y MODELADO DE ESCENARIOS DE DEMANDA, DISPONIBILIDAD Y CALIDAD DE AGUA Y NECESIDADES DE SANEAMIENTO.....	100
3.1.	Diagnóstico de abastecimiento de agua potable.....	100
3.1.1.	Infraestructura	100
3.1.1.1.	Antecedentes en Escalerillas con Infraestructura	100
3.1.1.2.	Actualidad dentro de la problemática para Escalerillas.....	102
3.1.1.3.	Mesa de Conejos	106
3.1.1.4.	Pozuelos.....	109
3.1.2.	Plan Estatal de Desarrollo “Recuperación hídrica con enfoque de cuencas”	110
3.1.3.	Calidad de agua en abastecimiento.....	112
3.1.3.1.	Indicadores de calidad de agua.....	112
3.1.3.2.	Índices de calidad de agua.....	131
3.2.	Diagnóstico del saneamiento de aguas residuales.....	134
3.2.1.	Infraestructura	134
3.2.1.1.	Escalerillas.....	135
3.2.1.2.	Pozuelos.....	136
3.3.	Calidad de agua.....	137

3.3.1. Saneamiento	137
3.4. Modelado WEAP	148
3.4.1. Escenarios de abastecimiento.....	148
3.4.2. Escenarios de saneamiento.....	156
3.5. Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS).....	160
3.5.1. SCALL	160
3.5.2. Humedal.....	166
CONCLUSIONES.....	174
REFERENCIAS	176
ANEXOS.....	192

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Indicadores del IRS (índice de Rezago Social), según dimensión. Fuente: (CONEVAL, 2021)	27
Tabla 2 Usos consuntivos, según el origen del tipo de fuente de extracción. Fuente: (CONAGUA, 2021b)	43
Tabla 3 Estrategias de conservación del agua en cuencas. Fuente: (Monroy, 2013)	45
Tabla 4 Consumo doméstico en el medio rural. Fuente: (CONAGUA, 2019b)	47
Tabla 5 Propiedades de la microcuenca RH37Gb. Fuente: (SIATL, s.f.).....	52
Tabla 6 Clasificación propuesta para las cuencas. Fuente: (Campos, 1992)	52
Tabla 7 Descripción del ICA y rango numérico. Fuente: (Wils & Irvine, 1996; Castro et al., 2014)	73
Tabla 8 Variables y ponderaciones para el caso de 6 variables. Fuente: (IDEAM, 2011)	75
Tabla 9 Parámetros necesarios para alimentación de modelo	79
Tabla 10 Datos de estaciones climatológicas dentro de la cuenca RH37Gb	80
Tabla 11 Pruebas de independencia y homogeneidad en las estaciones de la zona de estudio	82
Tabla 12 Coeficientes de cultivo para los diferentes usos de suelo de la cuenca de estudio. Fuente: (FAO, 2006).....	87
Tabla 13 Valores de Kc propuestos para diseño de SCALL CONAGUA.....	92
Tabla 14 Valores de Kc propuestos por SamSamWater para diseño de SCALL	92
Tabla 15 Dimensionamiento del humedal	96
Tabla 16 Ficha técnica del humedal de tratamiento	97
Tabla 17 Concentraciones de fondo (Kadlec & Knight, 1996)	97
Tabla 18 Resultados análisis de agua cuerpos de agua superficiales en laboratorio y campo	113
Tabla 19 Resultados análisis de agua norias en campo y en laboratorio.....	113
Tabla 20 Conductividades eléctricas por tipos de agua. Fuente: (Boyd, 2017)	128
Tabla 21 Promedio valor por parámetro del muestreo.....	131
Tabla 22 Cálculo de subíndices para ICA	131
Tabla 23 Ponderaciones, valores y descripción de los ICA	132
Tabla 24 Resultados análisis de aguas residuales en campo y laboratorio	138
Tabla 25 Datos históricos de población “Escalerillas”. Fuente: (INEGI, 2023).....	149
Tabla 26 Datos históricos de población “Pozuelos”. Fuente: (INEGI, 2023).....	149

Tabla 27 Cifras de atención en Escalerillas y Pozuelos, durante 2023. Fuente: (PNT, 2023)	153
Tabla 28 Datos básicos para diseño de humedal	169
Tabla 29 Parámetros de reducción	169
Tabla 30 Rangos de magnitud de la conductividad hidráulica k_s en función del tipo de material granular utilizado como substrato en un humedal de flujo subsuperficial. Fuente: (García & Corzo, 2008)	170

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1 Evolución de la población urbana y rural de México (1950-2015). Fuente: (INEGI, 2020)	21
Figura 1-2 Ubicación de localidades.....	24
Figura 1-3 Cobertura mundial de servicios de Agua Potable. Fuente: (ONU, 2020).....	29
Figura 1-4 Abastecimiento por gravedad con tratamiento. Fuente: (Rodríguez et al., 2018)	33
Figura 1-5 Abastecimiento por gravedad sin tratamiento. Fuente: (Rodríguez et al., 2018)	34
Figura 1-6 Abastecimiento por bombeo sin tratamiento. Fuente: (Rodríguez et al., 2018)	35
Figura 1-7 Humedal de flujo superficial. Fuente: (Tilley et al., 2022).....	38
Figura 1-8 Humedal de flujo subsuperficial. Fuente: (Tilley et al., 2022).....	39
Figura 1-9 Humedal de flujo subsuperficial horizontal. Fuente: (Gschaedler et al., 2015).....	40
Figura 1-10 Humedal de flujo subsuperficial vertical. Fuente: (WETWINE, 2018)	42
Figura 1-11 Estadística general de estrés hídrico en el mundo. Fuente: (ONU-Habitat, 2021)	46
Figura 1-12 Jerarquía de las necesidades del agua según la OMS. Fuente: (Torres-Navarro et al., 2019).....	47
Figura 1-13 AGEB's en el área de Escalerillas. Fuente: (CONEVAL, 2021)	51
Figura 1-14 Índice de Rezago Social por AGEB. Fuente: (CONEVAL, 2021).....	51
Figura 1-15 Perfil de elevaciones del cauce principal. Fuente: (SIATL, s.f.)	53
Figura 1-16 Hidrología superficial RH37Gb	54
Figura 1-17 Presa San José. Fuente: (Camacho, 2021)	55
Figura 1-18 Tipos de Clima	56
Figura 1-19 Precipitación media anual	57
Figura 1-20 Edafología	59
Figura 1-21 Vegetación y uso de suelos	61
Figura 2-1 Puntos de muestreo e hidrología superficial	63
Figura 2-2 Potenciómetro Multiparamétrico Hanna	64
Figura 2-3 Potenciómetro Oxígeno Disuelto Hanna	64
Figura 2-4 Esquema de preparación de Crisoles	66
Figura 2-5 Esquema determinación SST.....	67
Figura 2-6 Procedimiento de medición de turbidez. Fuente: (HACH, 2014).....	68

Figura 2-7 Esquema de procedimiento de DQO bajo y medio rango por fotometría	69
Figura 2-8 Esquema determinación de fósforo.....	70
Figura 2-9 Esquema de determinación de Nitrógeno	72
Figura 2-10 Gráfico de identificación de época de lluvia, estación - 24024 “El Peaje”	83
Figura 2-11 Valores de SPI y condiciones. Fuente: (CONAGUA, s.f.)	84
Figura 2-12 Índice Estandarizado de Precipitación (SPI) estación 24024	85
Figura 2-13 Ubicación y efluente PTAR	95
Figura 2-14 Posible ubicación del humedal, Escalerillas, S.L.P.....	95
Figura 2-15 Espadaña (<i>Typha angustifolia</i>). Fuente: (Vidal & Hormázabal, 2018)	98
Figura 2-16 Carrizo (<i>Phragmites spp</i>). Fuente: (Vidal & Hormázabal, 2018)	98
Figura 3-1 Acceso a red de agua potable en Escalerillas, 2010, 2018 y 2020. Fuente: (INEGI, 2010; Mballa & Hernández, 2018; INEGI, 2020)	103
Figura 3-2 Sistema de abastecimiento de agua actual en la localidad de Escalerillas, S.L.P.	103
Figura 3-3 Recipientes empleados para la captación de agua potable.....	104
Figura 3-4 Ubicación del pozo	108
Figura 3-5 Acceso a red de agua potable en Pozuelos, 2010 y 2020. Fuente: datos obtenidos de (INEGI, 2010; INEGI, 2020)	109
Figura 3-6 Resultados y promedios de Turbiedad, n=32, p=0.0240, $\alpha=0.05$	114
Figura 3-7 Resultados y promedios de pH, n=32, p=0.0001, $\alpha=0.05$	114
Figura 3-8 Resultados y promedios de SDT, n=32, p=0.0001, $\alpha=0.05$	115
Figura 3-9 Resultados y promedios de SST n=16, p=0.0421, $\alpha=0.05$	116
Figura 3-10 Escala de clasificación de calidad de agua tomando como criterio SST. Fuente: (CONAGUA, 2020)	117
Figura 3-11 Resultados promedio e indicadores de SST	118
Figura 3-12 Resultados coliformes fecales n=5.....	119
Figura 3-13 Resultados y promedios de DQO, n=16, p=0.3031, $\alpha=0.05$	120
Figura 3-14 Escala de clasificación de calidad de agua tomando como criterio DQO. Fuente: (CONAGUA, 2020)	121
Figura 3-15 Resultados promedio de puntos de muestreo e indicador DQO	122
Figura 3-16 Resultados y promedios de Oxígeno Disuelto, n=32, p=0.0001, $\alpha=0.05$	123
Figura 3-17 Escala de clasificación de calidad de agua tomando como criterio OD. Fuente: (CONAGUA, 2020)	124
Figura 3-18 Resultados promedio de puntos de muestreo e indicador OD.....	125

Figura 3-19 Resultados y promedios de ORP, n=32, p=0.0001, $\alpha=0.05$	126
Figura 3-20 Resultados conductividad eléctrica, n=32, p=0.0001, $\alpha=0.05$	127
Figura 3-21 Resultados y promedios de nitrógeno total (N_T) n=16, p=0.0080, $\alpha=0.05$...	129
Figura 3-22 Resultados y promedio de fósforo total (P_T) n=32, p=0.5151, $\alpha=0.05$	130
Figura 3-23 Acceso a red de drenaje. Fuente: (INEGI, 2010; INEGI, 2020).....	135
Figura 3-24 Estado actual de los pozos de visita	135
Figura 3-25 Drenaje colapsado en la localidad de Escalerillas	136
Figura 3-26 Acceso a red de drenaje en Pozuelos. Fuente: (INEGI, 2010; INEGI, 2020)	137
Figura 3-27 Resultados y promedio de pH fuentes con agua residual, n=32, p=0.0001, $\alpha=0.05$	139
Figura 3-28 Resultados y promedio de SST para aguas residuales, n=8, p=0.0336, $\alpha=0.05$	140
Figura 3-29 Resultados DQO para aguas residuales, n=8, p=0.0635, $\alpha=0.05$	142
Figura 3-30 Resultados OD para aguas residuales, n=16, p=0.0001, $\alpha=0.05$	143
Figura 3-31 Resultados temperatura para aguas residuales, n=32, p=0.0015, $\alpha=0.05$..	144
Figura 3-32 Resultados ORP agua residual, n=16, p=0.0001, $\alpha=0.05$	145
Figura 3-33 Resultados nitrógeno total para aguas residuales, n=8, p=0.0120, $\alpha=0.05$.147	
Figura 3-34 Resultados de fósforo total para aguas residuales, n=8, p=0.0071, $\alpha=0.05$	148
Figura 3-35 Demanda de agua para el periodo 2020-2040.....	150
Figura 3-36 Aumento poblacional localidades Escalerillas y Pozuelos 2020 - 2040.....	151
Figura 3-37 Carga contaminante de DBO_5	157
Figura 3-38 Carga contaminante de oxígeno disuelto	158
Figura 3-39 Carga de contaminante SST	159
Figura 3-40 Diseño de SCALL con tanque de almacenamiento de 1 m ³	162
Figura 3-41 Diseño de SCALL con tanque de almacenamiento de 25 m ³	163
Figura 3-42 Lluvia mensual para un año promedio. Fuente: (SamSamWater, 2023)	164
Figura 3-43 Disponibilidad y demanda de agua durante el año. Fuente: (SamSamWater, 2023)	164
Figura 3-44 Nivel de agua en el tanque durante el año. Fuente: (SamSamWater, 2023)	165

RESUMEN

Las localidades dentro del AGEB Escalerillas y Pozuelos son áreas periurbanas a la Zona Metropolitana de San Luis Potosí, con acceso muy limitado al agua potable y/o falta de sistemas de tratamiento de aguas residuales, por lo que no se cubren las necesidades básicas de cada uno de los habitantes. El objetivo de la presente investigación es evaluar las condiciones de acceso al agua de uso doméstico y saneamiento que permita generar propuestas técnicas de solución. Para obtener información hidrológica se procesó información cartográfica en un sistema de información geográfica, y se utilizó el software WEAP, que permite estimar demandas y ofertas hídricas de abastecimiento en Escalerillas y Pozuelos. Para la evaluación de la calidad del agua se midieron los parámetros fisicoquímicos con potenciómetros portátiles y por espectrofotometría. De acuerdo con los resultados, 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. Existe infraestructura suficiente para solucionar los problemas de abastecimiento y saneamiento. Se localizaron 3 presas para la captación de agua y 2 plantas de tratamiento de agua residual. Pozuelos es la localidad más alejada de la infraestructura disponible, por lo que un SCALL ayudaría a disminuir los problemas de acceso al agua potable. El cauce de algunos cuerpos de agua, presentan valores altos de contaminación (CE, DQO, SST, SDT, NT, PT), 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. 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 DBO5, 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.

INTRODUCCIÓN

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, 2022b). En el área periurbana del poniente de San Luis Potosí, se enfrenta un problema significativo en el abastecimiento y saneamiento del agua, lo que impacta negativamente en la calidad de vida de sus habitantes.

Según el informe de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), la rápida urbanización y el crecimiento demográfico en esta zona periurbana han generado una presión considerable sobre los recursos hídricos disponibles (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.

Se espera que los resultados obtenidos en esta investigación contribuyan a generar conciencia sobre la relevancia de abordar la problemática del abastecimiento y saneamiento del agua en el área periurbana del poniente de la Ciudad de San Luis Potosí. Además, se espera que esta investigación proporcione bases para el diseño e implementación de políticas públicas orientadas a garantizar un acceso equitativo y sostenible al agua potable para todos los habitantes de la zona.

Justificación

Los habitantes del área de Escalerillas, a pesar de su cercanía con la ciudad de San Luis Potosí y cerca de los embalses más importantes, no cuentan con un sistema de abastecimiento de agua que satisfaga sus necesidades básicas (Mballa y Hernández, 2018). De acuerdo con el Objetivo 6 de los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la ONU que establece, el acceso universal y equitativo al agua potable, así como la mejora de la calidad del agua y la implementación de sistemas de saneamiento (ONU, 2022).

Además, no existe un sistema de abastecimiento y saneamiento en el poniente de la ciudad, tampoco existen estudios relacionados y tampoco un diagnóstico ni propuestas de solución a la problemática.

Por lo que, la presente investigación busca describir la problemática involucrada en cuestión de abastecimiento y saneamiento del agua, que permita generar propuestas y soluciones para mejorar la calidad de vida y acceso a servicios básicos de las áreas periurbanas al poniente de la ciudad de San Luis Potosí.

Hipótesis

La generación del diagnóstico con referencia a los sistemas de abastecimiento y saneamiento de agua potable en la zona poniente de la ciudad permitirá diseñar propuestas para mitigar la problemática actual.

Objetivos

Objetivo general

Evaluar la problemática 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.

Objetivos 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.

2. Determinar la calidad de agua de cauces, embalses y otros cuerpos de agua mediante parámetros fisicoquímicos para generar indicadores e índices ecológicos y necesidades de saneamiento.
3. Modelar escenarios de demanda, disponibilidad y calidad de agua, mediante el uso del software WEAP.
4. Proponer metodologías y técnicas de solución para el abastecimiento de agua potable mediante SCALL y saneamiento con SUDS.

1. ASPECTOS SOCIOECONÓMICOS DE LAS COMUNIDADES PERIURBANAS DEL PONIENTE DE LA CIUDAD DE SAN LUIS POTOSÍ

1.1. Comunidades periurbanas

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).

El rápido crecimiento de las ciudades ha generado una expansión territorial que ha impulsado el desarrollo de comunidades periurbanas. Estas comunidades suelen enfrentar desafíos socioeconómicos y ambientales únicos debido a su ubicación en la interfaz entre lo rural y lo urbano (García-González et al., 2017).

En el contexto específico de las comunidades periurbanas del poniente de la ciudad de San Luis Potosí, se han identificado problemáticas relacionadas con el abastecimiento y saneamiento del agua. Estas problemáticas están asociadas a la falta de infraestructura adecuada, la disponibilidad limitada de agua potable y la falta de acceso a servicios de saneamiento adecuados (Robledo, 2013).

1.1.1. Comunidades periurbanas del poniente de la ciudad de San Luis Potosí

Desde el año 2007, en la historia de toda la humanidad la población en zonas urbanas supera 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).

A consecuencia de este movimiento, las ciudades tienden a tener movilidad limitada, sistema de transporte público deficiente y servicios públicos limitados, 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 que se encuentran al poniente de la ciudad se encuentran en una transición dentro de lo rural y lo urbano, que es la principal característica de las

áreas periurbanas, haciendo que la dinámica de población en términos de población, vivienda, servicios básicos y las actividades económicas sean totalmente diferentes a las que se desarrollan en 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, el tallado de cantería.

La zona poniente de la ciudad de San Luis Potosí, se ve involucrada en un crecimiento no planeado, generando problemas de acceso a servicios públicos, Escalerillas, Col. Insurgentes, Mesa de Conejos y Pozuelos. Qué si bien, no todas comparten el mismo escenario, si se presenta la problemática de abastecimiento de agua y saneamiento.

1.2. Crecimiento urbano y cambio de uso de suelo

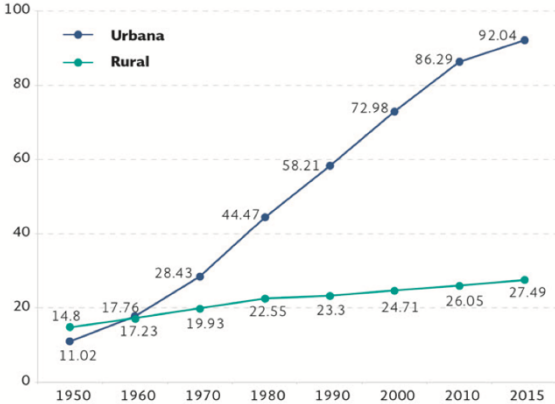
El crecimiento urbano y el cambio de suelo son fenómenos estrechamente relacionados que han experimentado un rápido incremento en las últimas décadas. El crecimiento de las ciudades conlleva la conversión de áreas naturales y rurales en áreas urbanizadas, lo que implica cambios significativos en el uso del suelo y en los sistemas ecológicos (Seto et al., 2012).

El crecimiento urbano acelerado ha llevado a una demanda cada vez mayor de tierras para viviendas, infraestructuras y servicios urbanos (Gómez-Baggethun et al., 2013). Este proceso conlleva la transformación del suelo agrícola, forestal o natural en áreas urbanas, lo que puede tener consecuencias negativas para el medio ambiente y la sostenibilidad de las ciudades (Foley et al., 2005).

La expansión urbana y el cambio de suelo pueden resultar en la pérdida de hábitats naturales, la fragmentación del paisaje, la degradación de la calidad del agua y la disminución de la biodiversidad (Seto et al., 2011). Estos cambios pueden tener impactos significativos en los ecosistemas locales, así como en la salud y el bienestar de la población (McDonald et al., 2008).

Además, el crecimiento urbano no planificado y la falta de una gestión adecuada del uso del suelo pueden llevar a problemas como la congestión del tráfico, la escasez

de recursos y la degradación de la calidad de vida en las ciudades (Nagendra et al., 2018). Por lo tanto, es crucial adoptar enfoques de planificación urbana sostenible que promuevan un desarrollo equilibrado y mitiguen los impactos negativos del crecimiento urbano descontrolado (Angel et al., 2011).



Año	Urbana	Rural	Total
1950	11.02	14.8	25.82
1960	17.23	17.76	35
1970	28.43	19.93	48.36
1980	44.47	22.55	67.02
1990	58.21	23.3	81.51
2000	72.98	24.71	97.69
2010	86.29	26.05	112.34
2015	92.04	27.49	119.53

Figura 1-1 Evolución de la población urbana y rural de México (1950-2015). **Fuente:** (INEGI, 2020)

México al último censo poblacional, tiene una población 126 millones de habitantes, y dentro de esto se tiene una evolución del sector urbano y rural bastante alto. Como se observa en la **Figura 1-1**, se tiene un aumento de zonas urbanas del 11.02 millones de habitantes hasta 92.04 millones, mientras que las zonas rurales van del 14.8 millones de habitantes a 27.49 millones, pero, se tiene desproporción de las zonas, y provee un problema de acceso de servicios básicos a la población, haciendo más difícil la tarea y, sobre todo, poblaciones más pobres se ven severamente afectadas.

1.2.1. Crecimiento urbano y cambio de suelo en San Luis Potosí

La consecuencia inmediata del crecimiento industrial de la ciudad de San Luis Potosí buscó crear nuevas áreas de vivienda para aquellas familias que migran. La

mancha urbana se extendió hacia suelos yermos y comienza un desplazamiento importante de los cultivos hacia la periferia de la ciudad, generando aguas residuales domésticas sin tratamiento e incluso para zonas agrícolas. En tanto que la industria genera aguas residuales industriales sin tratamiento (López Á. B., 2012).

De acuerdo con la carta de Uso de Suelos y Vegetación, el sitio de estudio presenta en su mayoría un suelo lleno de Matorral y Arbustivo, muy representativo de zonas con lluvias escasas y zonas frágiles que favorecen la desertificación (CNCUB, 2021). Aunado a esto, encontramos un suelo denominado “tepetate” que son capas endurecidas formadas por procesos geológicos, y este genera limitantes debido a su dureza y esto dificulta construcciones de cualquier índole (Velázquez-Rodríguez et al., 2022). Así como la presencia de chaparral y bosque de pino dentro de la zona. El chaparral es una asociación de encinos arbustivos, generalmente es densa, se presenta en altitudes arriba de los 1500m, su color y textura dependen del material que los originó sobre estratos ígneos, relacionado con el tipo de suelo Feozem háplico (INEGI, 2002). Se caracteriza por ser un matorral de 1 a 2 metros de altura. Estos suelos se caracterizan por ser una protección contra la erosión, permite que los suministros de agua subterránea se recarguen y proporciona un hábitat importante. Además de formar poblaciones poco penetrables, es decir, difícil acceso para animales y seres humanos (IPICYT & SEGAM, 2018).

1.3. Población y estructura económica

La relación entre la población y la estructura económica es un aspecto fundamental para comprender el desarrollo socioeconómico de una región.

La estructura económica, que abarca los sectores productivos y las actividades económicas predominantes, influye en las oportunidades de empleo, los niveles de ingreso y la calidad de vida de la población (Marcotullio et al., 2014).

En el ámbito de la planificación y el desarrollo, comprender la relación entre la población y la estructura económica es esencial para formular políticas y estrategias adecuadas. Por ejemplo, un análisis de la estructura económica puede revelar los sectores clave en los que se basa la economía de una región, lo que permite identificar fortalezas y debilidades y orientar los esfuerzos de diversificación económica (OECD, 2019).

Además, el estudio de la relación entre la población y la estructura económica también puede proporcionar información sobre desafíos y oportunidades. Por ejemplo, el crecimiento demográfico acelerado puede generar presiones en los recursos y la infraestructura, mientras que una estructura económica desequilibrada puede dar lugar a desigualdades y disparidades socioeconómicas (World Bank, 2019). Estos aspectos son cruciales para el diseño de políticas públicas que promuevan un desarrollo inclusivo y sostenible.

Hoy en día la comunidad científica e internacional busca desarrollar la seguridad hídrica, para poder mitigar el calentamiento global y mitigarlo. Debemos también considerar que el cambio climático es una variable que afecta de manera directa la carencia de agua, debido a los constantes cambios de la precipitación y no solo la precipitación, si no los aumentos considerables de la temperatura que aumentan las sequías y sobre todo aumentan la demanda de agua.

¿Cuál es el propósito de la seguridad hídrica? Básicamente, busca mejorar el aprovechamiento del recurso hídrico en actividades como agricultura, transporte y la generación de energía. Si no logramos cambiar el mundo, el ambiente seguirá más caliente y se tendrán más problemas, sobre todo un aumento de tasas de pobreza y carencia del recurso hídrico (López R. , 2021).

1.3.1. Zona poniente de San Luis Potosí

Escalerillas, es una localidad que se encuentra a 5km 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.

Por la otra parte, Pozuelos tiene 1,339 habitantes y 357 viviendas, que albergan la misma cantidad de personas promedio por vivienda que en Escalerillas.

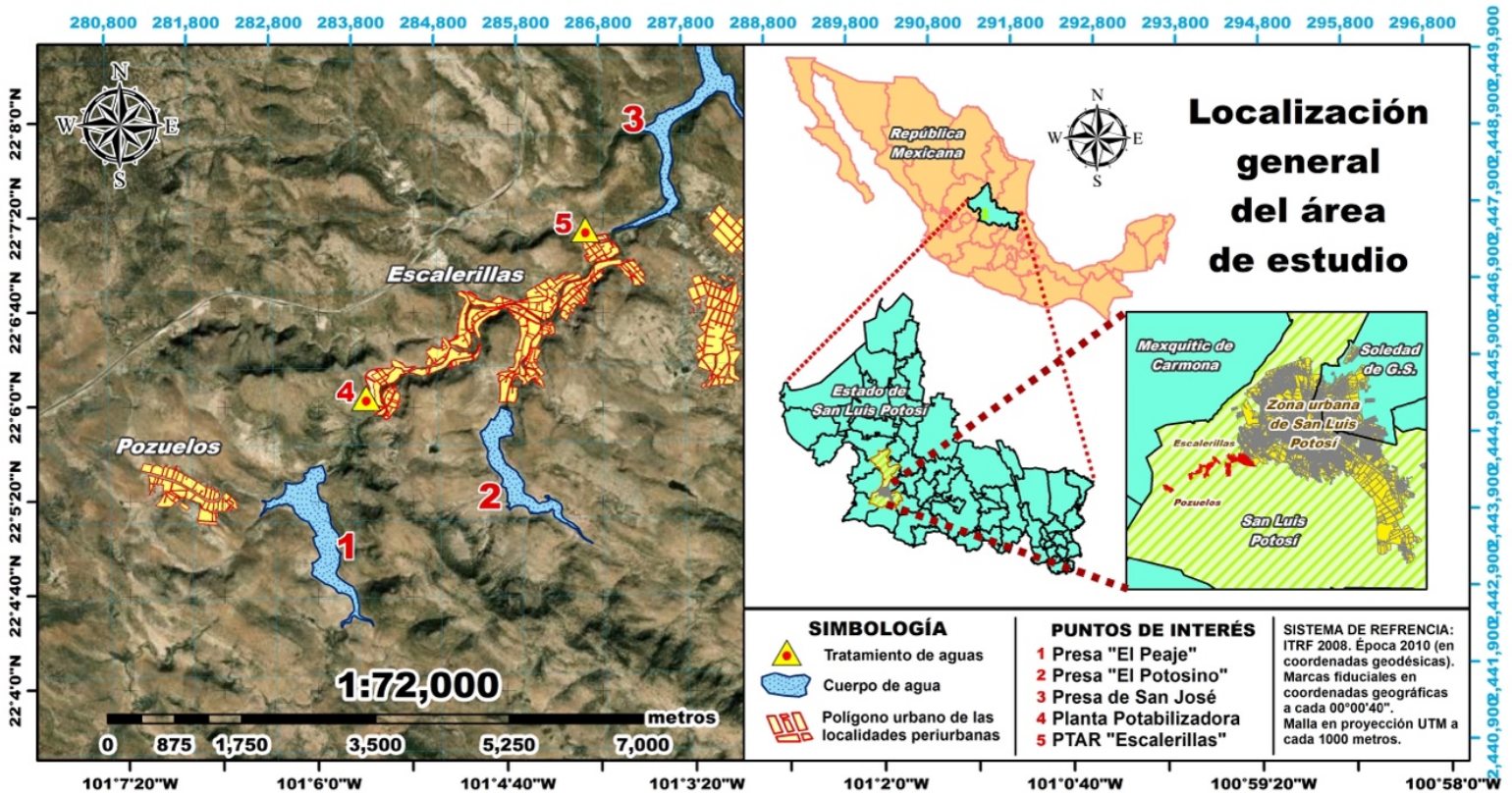


Figura 1-2 Ubicación de localidades.

Ambas localidades se denominan áreas periurbanas, debido a la cercanía con el área urbana, en este caso la Zona Metropolitana de San Luis Potosí (Figura 1-2).

Un área periurbana, son aquellas áreas localizadas en la periferia de grandes ciudades con rasgos de mezcla de sitios urbanos y rurales con una tendencia de ser parte del territorio urbano de la ciudad en cuestión. (Castro S. L., 2014).

Por lo que, esta definición permite abordar las comunidades como áreas periurbanas, las cuáles suelen presentar índices de marginación altos como dificultades de acceso de servicios básicos (Rojas-Ramírez, 2019).

1.4. Acceso a servicios básicos, sistemas de abastecimiento y saneamiento de agua y calidad de vida

El acceso a servicios básicos como agua potable, saneamiento, energía eléctrica y vivienda adecuada (ONU, 2010), permite la satisfacción de necesidades básicas y contribuye en forma decisiva al ser humano, teniendo un efecto sobre la educación, alimentación y salud (Rozas, 2011).

La falta de acceso a servicios básicos puede tener consecuencias negativas en la calidad de vida de la población. Por ejemplo, la falta de agua potable y saneamiento adecuado puede aumentar el riesgo de enfermedades y dificultar la realización de actividades diarias (Prüss-Ustün et al., 2018).

Es importante destacar que el acceso a servicios básicos no solo implica la disponibilidad física de dichos servicios si no accesibilidad, disponibilidad y calidad de estos servicios. Se estima que 1 de cada 10 personas todavía carecen de servicios básicos de calidad, mientras que existen 144 millones de personas que beben agua de superficies que no reciben tratamiento, 8 de cada 10 personas que viven en zonas rurales carecen de estos servicios, generando una brecha de accesibilidad entre zonas urbanas y rurales (UNICEF, 2023).

1.4.1. Objetivos de Desarrollo Sostenible

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) constituyen un ambicioso llamado a la acción global, promovido por la ONU, con la meta de erradicar la pobreza, proteger el medio ambiente y asegurar el bienestar y la prosperidad de todos. Estos objetivos establecen una hoja de ruta para el desarrollo sostenible en los próximos 15 años, uniendo a la sociedad, la gobernanza y los sectores privados en la consecución de metas específicas (ONU, 2022).

Entre los 17 ODS, varios son especialmente relevantes para el área de estudio y la problemática que estamos abordando, con especial énfasis en:

3. Salud y Bienestar Este objetivo tiene como finalidad reducir considerablemente la mortalidad y las enfermedades causadas por sustancias químicas peligrosas y la contaminación del aire, el agua y el suelo para 2030. Dada la constante presencia de aguas residuales sin tratamiento y el agua no potabilizada en el área de interés,

este objetivo adquiere un significado crucial para mejorar la calidad de vida de la población (Mballa & Hernández, 2018).

6. Agua Limpia y Saneamiento Este objetivo es altamente aplicable dentro del contexto, ya que abarca múltiples dimensiones de la problemática. Su enfoque es alcanzar un acceso universal y equitativo al agua potable, mejorando los servicios de saneamiento e higiene y promoviendo una gestión eficiente y sostenible de los recursos hídricos. Además, busca proteger y restaurar ecosistemas relacionados con el agua y fortalecer la participación comunitaria en la gestión del agua y el saneamiento (ONU, 2022).

11. Ciudades y Comunidades Sostenibles

Este objetivo se centra en asegurar el acceso a servicios básicos adecuados, seguros y asequibles, y en implementar prácticas que contribuyan a la sostenibilidad de los ecosistemas ya afectados. Dado que las comunidades periurbanas enfrentan desafíos socioeconómicos y ambientales únicos, este objetivo destaca la importancia de desarrollar soluciones que promuevan un crecimiento urbano sostenible y la mejora de la calidad de vida de los habitantes (ONU, 2022).

La integración de estos objetivos en la investigación no solo enriquece la comprensión de la problemática que estamos abordando, sino que también subraya la importancia de alinear las acciones con un marco global que busca promover un futuro sostenible y equitativo.

1.4.2. Índice de Rezago Social

El índice de rezago social y vivienda es una medida ponderada que condensa indicadores fundamentales, abarcando aspectos clave como la educación, el acceso a servicios de salud, la calidad y las condiciones de la vivienda, la disponibilidad de servicios básicos y los activos de dicho hogar. Esta composición holística permite obtener una visión integral de la situación, reflejando tanto las

carencias como las fortalezas en términos sociales y de vivienda en una determinada área.

Estos valores, que resultan de un análisis exhaustivo, se construyen con base en los datos proporcionados por el Censo de Población y Vivienda del año 2020, recopilados por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). Mediante este enfoque, se logra capturar la situación real de la población en términos educativos, de salud, habitacionales y de activos, brindando una herramienta fundamental para la identificación y evaluación de las necesidades y desafíos en materia social y de vivienda en una localidad o región determinada, resumidos en la **Tabla 1** (CONEVAL, 2021).

Tabla 1 Indicadores del IRS (índice de Rezago Social), 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
	Viviendas que no disponen de excusado o sanitario
Servicios básicos en la vivienda	Viviendas que no disponen de agua entubada de la red pública
	Viviendas que no disponen de drenaje
	Viviendas que no disponen de energía eléctrica
	Viviendas que no disponen de lavadora
Bienes del hogar	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.

El índice de rezago social y vivienda es relevante por varios factores cruciales relacionados con él. Uno de estos elementos es el nivel de ingreso económico que se registra en la región o área bajo estudio. Este índice no solo considera las condiciones de vivienda y servicios, sino que también toma en cuenta las capacidades económicas de los hogares (Castañeda et al., 2022). La estrecha interconexión entre el nivel de ingreso y el índice de rezago social y vivienda proporciona una comprensión profunda de cómo las dificultades económicas pueden impactar en la calidad de vida y en las oportunidades disponibles para la población.

Además, el índice de rezago social y vivienda está vinculado al grado de marginación y desarrollo de un área. Un índice más alto indica una mayor carencia de condiciones esenciales, lo que a menudo se asocia con niveles más altos de marginación. Por otro lado, áreas con índices más bajos generalmente tienden a tener mejores condiciones de vida y acceso a servicios básicos, lo que a su vez está relacionado con un mayor grado de desarrollo (CONEVAL, 2021).

1.4.3. Infraestructura de servicios públicos

La infraestructura de los servicios públicos es muy importante, debido a que ejerce un papel crucial en el desarrollo de las comunidades, ya que proporciona recursos necesarios para satisfacer las necesidades básicas y además promover un entorno seguro y funcional (Moreira-Villavicencio, 2022).

La infraestructura de servicios públicos abarca una amplia gama de sectores, como agua potable y saneamiento, energía eléctrica, transporte, telecomunicaciones y gestión de residuos (Duhau, 1991). Estos servicios son fundamentales para asegurar condiciones de vida dignas y promover el desarrollo económico y social de las comunidades.

El acceso a agua potable y saneamiento adecuado es esencial para la salud y el bienestar de las personas. La falta de acceso a agua limpia y saneamiento básico puede tener graves consecuencias para la salud, aumentando el riesgo de enfermedades transmitidas por el agua y la propagación de enfermedades infecciosas (OMS, 2022a).

1.4.4. Sistemas de abastecimiento y saneamiento

En México, la brecha del acceso al agua potable entre zonas urbanas y rurales es bastante alta. Esto se da debido por las condiciones que se tienen en cada una de las zonas, pero también factores socioeconómicos y de infraestructura, hacen más complicada la tarea del abastecimiento de agua en comunidades rurales.

Las comunidades rurales los usuarios suelen dar más importancia a la cantidad, antes de la calidad del agua. La existencia de una red de distribución de agua para uso doméstico es un elemento fundamental para los usuarios, lo que muestra una gran equidad hacia estas zonas (Gil Antonio et al., 2014).

De acuerdo con la Organización de las Naciones Unidas, dentro de sus objetivos de Desarrollo Sostenible número 6 “Agua Limpia y Saneamiento”, se busca alcanzar al máximo el acceso al recurso hídrico y su saneamiento.

La proporción de “servicios de agua potable gestionados de manera segura” se incrementó del 61% del año 2000 al 70% al año 2017 y al 74% este 2020. Pero, aun así 2,000 millones de personas carecen de servicios para ese año, y entre ellas 1,200 millones de personas no tienen acceso a una fuente mejorada de agua. Ocho de cada diez personas que carecen de un servicio básico de agua viven en zonas rurales (ONU, 2020).

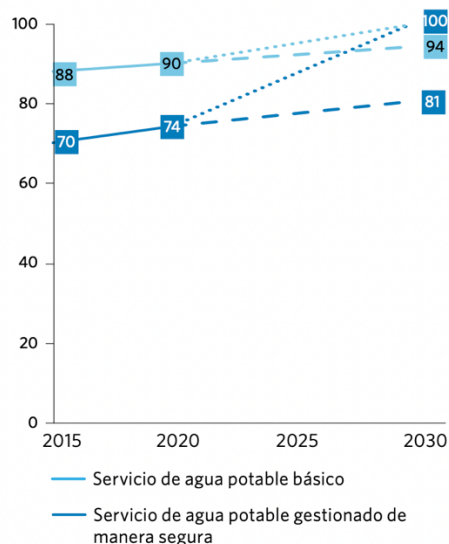


Figura 1-3 Cobertura mundial de servicios de Agua Potable. **Fuente:** (ONU, 2020)

Como podemos verificar en la **Figura 1-3**, el objetivo 6 es claro en cuestión del aumento en la cobertura del servicio de agua potable básico, esto con el fin de mejorar la calidad de vida y la salud.

En la situación de México, de acuerdo con el informe de 2020 de las ODS se muestra que se tienen un avance del indicador de acceso al agua potable de una fuente segura del 43% de la población (Alfaro de la Torre et al., 2021), notablemente inferior al 74% del promedio mundial. Pero, esto puede interpretarse sólo a la

población en zonas urbanas debido, que, en el medio rural, 2% de la población no cuenta con servicio de agua, lo que representa 2.5 millones de habitantes (ONU, 2020).

De acuerdo con el último censo realizado en 2020, realizado por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), se muestra que el 96.3% de las viviendas disponen de agua entubada en el ámbito de la vivienda, mientras que el 83.90% de las viviendas disponen de agua entubada dentro de ella misma y el 3.45% de población restante no cuenta con una red de agua entubada (INEGI, 2021), es decir, que muchas viviendas no tienen acceso a agua entubada que provenga de algún servicio público que asegure un proceso de potabilización previo a su distribución (Alfaro de la Torre et al., 2021).

En cuanto al saneamiento de agua, el país ha buscado alternativas para mejorar las condiciones ambientales, mejorar la calidad de vida de la población nacional, por eso la potabilización, desinfección y el tratamiento de aguas residuales son un objetivo primordial en los planes de desarrollo del país. Entre 1990 y 2015, 2,400 millones de personas en el mundo carecen de servicios básicos de saneamiento, tales como baños o letrinas, lo que ocasiona que el 80% de las aguas residuales de actividades humanas vayan hacia ríos y lagunas sin ningún tratamiento (Sánchez, 2017).

En 2020, el 54% de la población mundial (4200 millones de personas) utilizaba un servicio de saneamiento de manera segura, pero, más de 1700 millones de personas siguen sin tener acceso a servicios básicos de saneamiento y además 45% de todas las aguas residuales domésticas generadas se vertieron a ríos, lagos y lagunas sin un tratamiento previo (OMS, 2022).

De acuerdo con el inventario nacional de plantas municipales de potabilización y de tratamiento de aguas residuales en operación por la CONAGUA a su última actualización diciembre 2021, muestra un panorama de 984 plantas de tratamiento instaladas en todo el país, a un contraste con el año 2020 que tan solo contaba con 997, una disminución en el caudal de tratamiento de 152,623.6 L/s a 147,762.2 L/s y en el caudal potabilizado 117,617.9 L/s a 111,120.6 L/s. Esta disminución es a causa de problemas financieros que actualmente se acarrearán, y además problemas de infraestructura de acuerdo con el reporte mencionado (CONAGUA, 2021a).

Se han empleado diferentes esfuerzos para obtener gestiones para el financiamiento de plantas de tratamiento de aguas residuales, sin embargo, muchas

veces estas construcciones son abandonadas debido a la falta de presupuesto por sus altos costos de pago de personal, operación y mantenimiento. (de la Peña, et al., 2013, Sánchez, 2017).

Se consideran dos tipos de descargas de agua residual, domésticas y no domésticas, las domésticas son aquellas que provienen de edificios, edificios comerciales, instituciones y su principal contenido es materia orgánica, y las no domésticas provenientes de todo proceso industrial, productivo y de servicios que contienen concentraciones de metales pesados, nutrientes, materia orgánica, pH, que difieran de concentraciones municipales atípicas (SIAPA, 2014).

En algunos casos, las aguas residuales no tratadas terminan siendo como parte del uso agrícola, pero, termina siendo una afectación para la salud y problemas ambientales, en la afectación de los ecosistemas acuáticos y el propio suelo (Silva, et al., 2008, Sánchez, 2017).

En algunos estados de la república como Aguascalientes, Chiapas, Guanajuato, Guerrero Jalisco, Michoacán y San Luis Potosí, a pesar del aumento de la población en zonas rurales, los recursos para fortalecer la infraestructura hídrica son pésimos o nulos, o son destinados únicamente para zonas urbanas, un ejemplo de ellos es el acueducto II de Querétaro, el Realito en San Luis Potosí y el Zapotillo en Guanajuato y Jalisco (Gil Antonio et al., 2014).

Una buena alternativa para poder corregir este gran problema de abastecimiento sería la captación de agua pluvial, esto permite disminuir la contaminación del medio ambiente, no emite gases de efecto invernadero y puede instalarse en un punto estratégico donde la lluvia sea recurrente, mediante sistemas ya predefinidos que son afín a esta actividad (Mundo et al., 2022).

El abastecimiento de agua supone la captación del agua y su conducción hacia el lugar dónde se hará el consumo. Pero, para que esto suceda debe existir cierta calidad del agua para que sea apta para el consumo humano, o bien, para desarrollar las actividades para su fin requerido (Oxfam Intermón, 2020).

Las fuentes de agua pueden ser:

- Manantiales
- El agua de mar que se desaliniza
- Agua pluvial: agua de lluvia
- Agua superficial, proveniente de ríos, lagos, lagunas y embalses.

- El agua subterránea: manantiales, norias y pozos de extracción

Para escoger la fuente de abastecimiento de agua, se considerarán los requerimientos de la población, la disponibilidad y la calidad del agua durante todo el año y los costos involucrados en la distribución de tal líquido, incluyendo la inversión inicial, costos de operación y mantenimiento.

Debemos considerar que el tipo de fuente de abastecimiento influye directamente en las alternativas tecnológicas. De tal forma, que las únicas formas disponibles son agua superficial y agua subterránea (Lampoglia et al., 2008).

Pero, cuando no existe alguna otra alternativa de agua superficial o subterránea, se acude al agua pluvial, o de lluvia, la única desventaja ante las demás es que solo es aprovechable por épocas del año y requiere de instalación de sistemas de captación de agua de lluvia.

Un ejemplo de ellos es el SCALL, por sus siglas, Sistema de Captación de Agua de Lluvia, busca aprovechar y recolectar toda el agua de lluvia mediante un sistema de tuberías instalado en un domicilio particular o bien, en una ubicación clave para el llenado de recipientes que permitan la captación de agua de lluvia, para posteriormente generar un pequeño tratamiento de agua para alcanzar la calidad deseada por la norma para consumo humano (IMTA, 2019).

Existen algunos sistemas de abastecimiento de agua basados en criterios de ingeniería y diseño adaptados a las necesidades del área que se desea abastecer agua, algunos de ellos son:

- Abastecimiento comunal por gravedad con tratamiento

El sistema de abastecimiento de agua por gravedad con tratamiento permite conectar una red de conexiones, pasando por la captación de agua, el sistema de tratamiento, almacenaje para finalizar en la distribución en las tomas domiciliarias.

Para este tipo de sistemas se emplean fuentes superficiales, tales como ríos, lagos y embalses, pero, cuando se sabe que el agua subterránea pueda estar contaminada, pero, permita ser tratada también se puede emplear este sistema (Figura 1-4).

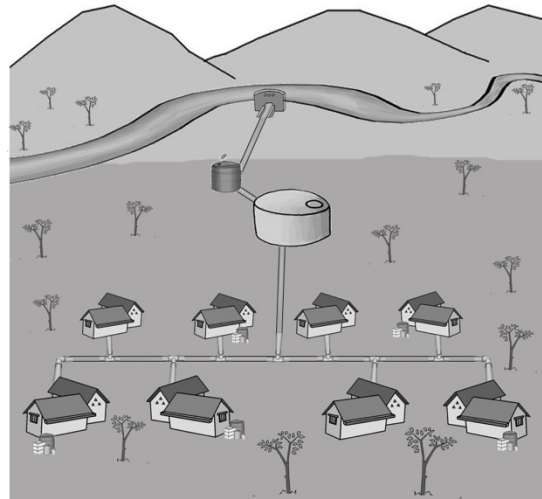


Figura 1-4 Abastecimiento por gravedad con tratamiento. **Fuente:** (Rodríguez et al., 2018)

Para tener éxito en este sistema de abastecimiento, el agua obtenida de las fuentes superficiales debe pasar por un sistema de tratamiento de agua, que permita eliminar carga orgánica alta, sedimentos, sólidos disueltos, otros minerales, que puedan afectar la calidad y haciéndola no apta para consumo humano.

Después, una vez tratada el agua, pasa a un tanque o reservorio, en la zona más elevada de la localidad, para después por acción de la gravedad, esta descienda hacia la red de distribución comunitaria instalada por tuberías. Es necesario, tomar en cuenta las necesidades de la población para poder calcular el volumen del tanque y asegurar la distribución del vital líquido (Rodríguez et al., 2018).

- Abastecimiento comunal por gravedad sin tratamiento

Para este sistema de abastecimiento el enfoque es similar al anterior, recalcar que el término “por gravedad” hace referencia, a la caída del agua por su propio peso mediante la pendiente que se genera entre la red de distribución instalada comunal, y el reservorio en la zona estratégica (**Figura 1-5**). Como su nombre lo menciona, esta agua no tiene tratamiento, ya que rocas porosas filtraron la misma agua para evitar el tratamiento de agua convencional. Se debe tomar en cuenta un estudio de calidad de agua, para verificar que no se requerirá el sistema anterior que si contiene tratamiento (Rodríguez et al., 2018).

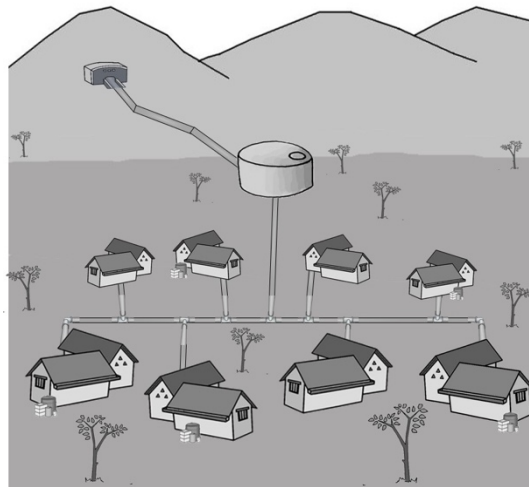


Figura 1-5 Abastecimiento por gravedad sin tratamiento. **Fuente:** (Rodríguez et al., 2018)

- Abastecimiento comunal por bombeo con tratamiento

El sistema de abastecimiento por bombeo se emplea cuando el suministro por gravedad no puede funcionar, debido a que el punto de captación está a un nivel inferior al de las viviendas. A veces se usa agua subterránea contaminada como fuente principal. Pero, su caso más común es el empleo de agua superficial, tal como agua de ríos, lagos y embalses. Se debe ajustar un buen tratamiento de agua, considerando el uso de procesos físicos para eliminar sedimentos de gran tamaño debido al uso de la bomba (**Figura 1-6**).

Cómo el anterior, se emplea el uso de un tanque reservorio, y como tal en cada diseño tomar en cuenta las necesidades de la población (Rodríguez et al., 2018).

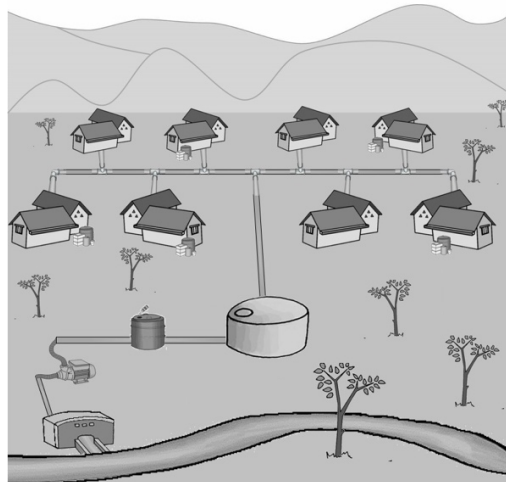


Figura 1-6 Abastecimiento por bombeo sin tratamiento. **Fuente:** (Rodríguez et al., 2018)

- **Abastecimiento comunal por bombeo sin tratamiento**

El funcionamiento del presente sistema tiene las mismas funcionalidades que el anterior, la diferencia contra el anterior es eliminar el tratamiento y mantener las mismas características anteriores. La eliminación del tratamiento se debe al uso de agua subterránea, considerado un agua de mejor calidad. Pero, debemos tomar en cuenta el tipo de subsuelo y la práctica de actividades inusuales, ya que podría presentar contaminación y ahí sería necesario incorporar el tratamiento para mejorar la calidad de agua que se extrae (Rodríguez et al., 2018).

Y dentro de los no convencionales podemos encontrar las bombas manuales, que son soluciones compuestas por pozos perforados o excavados manualmente, y dependiendo de los puntos de extracción debe ser tratada antes de ser llevada a consumo humano (de León, 2017).

1.4.4.1. Modelo WEAP (Water Evaluation and Planning)

El abastecimiento de agua se encuentra bajo distintos retos hoy en día, en especial bajo los efectos del cambio climático y además de un aumento de la población (Cosgrove y Loucks, 2015). De acuerdo con el Programa de Asistencia del Agua en el Mundo se prevé que el aumento de la demanda de agua esté por arriba del 55% para el año 2050 (WWAP, 2015), además del aumento energético para la producción de comida y actividades económicas-industriales. Muchas de las

localidades y ciudades se encuentran bajo la influencia de conflictos políticos, mala administración de los recursos hídricos e incluso con violencia (Hernández-Cruz et al., 2022).

WEAP (Water Evaluation and Planning) es una herramienta ampliamente utilizada en la gestión de los recursos hídricos para evaluar y planificar el uso sostenible del agua. WEAP proporciona un enfoque integrado y flexible para analizar la disponibilidad de agua, la demanda de diferentes usuarios y los impactos de la gestión del agua en el futuro (SEI, 2020).

WEAP se ha convertido en una herramienta valiosa para los planificadores y gestores del agua debido a su capacidad para integrar datos científicos y socioeconómicos, y para evaluar escenarios futuros. Su enfoque basado en la demanda permite tener en cuenta los cambios en las condiciones climáticas, la población y la economía para tomar decisiones informadas sobre la gestión del agua.

1.4.4.2. Sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS)

Los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS, por sus siglas en inglés) son enfoques innovadores y sostenibles para el manejo de las aguas pluviales en entornos urbanos. Estos sistemas buscan reducir el impacto negativo de la urbanización en el ciclo hidrológico y promover la gestión eficiente y sostenible del agua de lluvia (Fletcher et al., 2015).

Los SUDS se basan en principios y técnicas que imitan los procesos naturales de infiltración, retención y tratamiento del agua de lluvia. Estos sistemas incluyen elementos como techos verdes, pavimentos permeables, zonas de infiltración, humedales artificiales y estanques de retención (LIFE Integrated Projects, 2023) . Su objetivo es reducir el volumen y la velocidad del escurrimiento superficial, minimizar la carga de contaminantes y mejorar la calidad del agua que se descarga a los cuerpos receptores (Fletcher et al., 2015). Los SUDS buscan maximizar los beneficios visuales y ambientales, de forma que todas las áreas permeables

construidas en áreas urbanas no tienen un problema con las aguas superficiales en la zona, evitando posibles inundaciones.

Los SUDS contribuyen a contrarrestar algunos de los impactos en el ciclo de agua por la creciente urbanización, como la reducción de la infiltración, lo cual puede dar pie a la disminución de agua subterránea (Woods et al., 2015).

De acuerdo con el manual de SUDS por Woods, et al, 2015, existen 3 claves importantes a tomar en cuenta al implementar un SUDS:

1. Gestión del escurrimiento de aguas pluviales en el sitio
2. Reunir el equipo adecuado para mantener la planificación urbana, arquitectura del paisaje, diseño de drenaje y aspectos ambientales de manera conjunta.
3. Buscar la aprobación de la instalación y mantenimiento y delegación de responsabilidades de los SUDS, de tal forma que organismos reguladores ambientales y gobernanza se encuentren involucrados en el proceso.

Por lo que estas tecnologías emergentes deben ser consideradas dentro de la arquitectura de edificios y casas-habitación para su aprovechamiento y además nos permiten conectar con el objetivo de desarrollo número seis, el cual permite mejorar la calidad de agua de esorrentía en las ciudades y reducir los caudales que llegan a la red de saneamiento (Woods et al., 2015).

1.4.4.3. Humedales

Los humedales artificiales son construcciones diseñadas por el ser humano para simular o replicar las funciones y características de los humedales naturales. Estas estructuras se utilizan con fines de tratamiento de aguas residuales, restauración ambiental, control de inundaciones y mejora de la calidad del agua. Aunque diseñados por el hombre, los humedales artificiales siguen aprovechando los procesos biológicos naturales para llevar a cabo su función (Vymazal y Kröpfelová,

Wastewater Treatment in Constructed Wetlands with Horizontal Sub-Surface Flow , 2014).

Existen diferentes tipos de humedales artificiales, entre los que se incluyen:

Humedales de Flujo Subsuperficial: El agua fluye debajo de la superficie del humedal, pasando a través de capas de grava y sustrato que retienen y filtran los contaminantes.

Humedales de Flujo Superficial: El agua fluye sobre la superficie del humedal, permitiendo que las plantas y los microorganismos en la superficie ayuden en el proceso de purificación (Luna-Pabello y Aburto-Castañeda, 2014).

1.4.4.3.1. Humedales de Flujo Superficial

Los humedales de flujo superficial, también conocidos como humedales de flujo libre o humedales de tipo libre, son sistemas de tratamiento de aguas residuales que se asemejan a los humedales naturales. En estos sistemas, las aguas residuales fluyen lentamente a través de la vegetación y la superficie del agua, lo que permite la interacción con microorganismos y plantas que contribuyen a la eliminación de contaminantes (**Figura 1-7**).

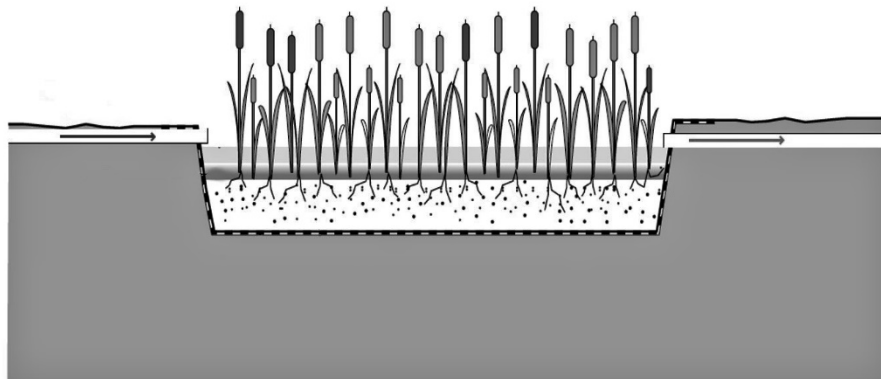


Figura 1-7 Humedal de flujo superficial. **Fuente:** (Tilley et al., 2022)

Los humedales de flujo superficial son particularmente eficientes en la eliminación de nutrientes, como nitrógeno y fósforo, así como en la reducción de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO). La vegetación presente en estos humedales desempeña un papel crucial al proporcionar hábitat para microorganismos beneficiosos y al promover la adsorción de contaminantes en sus raíces (Vymazal, *Constructed Wetlands for Wastewater Treatment: Five Decades of Experience*, 2011).

1.4.4.3.2. Humedales de Flujo Subsuperficial

Los humedales de flujo subsuperficial son sistemas de tratamiento de aguas residuales construidos que utilizan una capa de sustrato permeable en la que el agua fluye por debajo de la superficie. A medida que el agua se desplaza a través del sustrato, ocurren procesos biogeoquímicos en los cuales los microorganismos y la vegetación ayudan a eliminar los contaminantes del agua residual. Estos humedales son efectivos en la remoción de nutrientes, metales pesados y algunos contaminantes orgánicos (Asprilla et al., 2020).

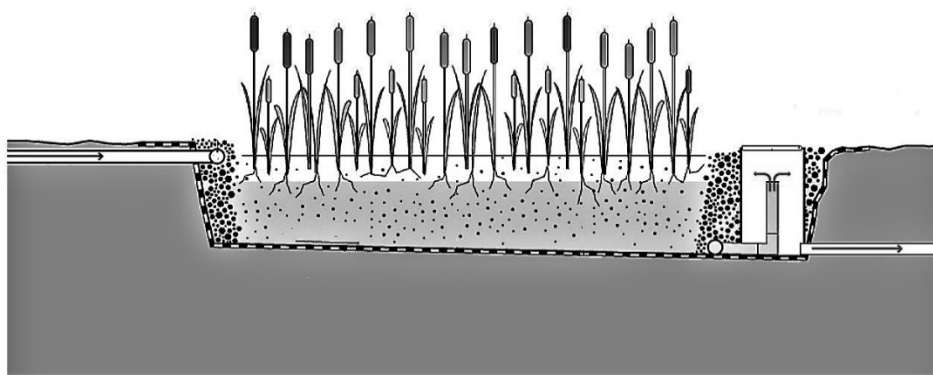


Figura 1-8 Humedal de flujo subsuperficial. **Fuente:** (Tilley et al., 2022)

La principal característica de los humedales de flujo subsuperficial es la interacción entre el agua residual y el sustrato cómo es posible observarlo en la **Figura 1-8**, lo que proporciona una mayor área para la actividad microbiana y los procesos de

adsorción y precipitación. El sustrato puede ser grava, arena y otros materiales permeables que permiten que el agua fluya a través de ellos (CONAGUA, 2015b).

1.4.4.3.2.1. Humedales de flujo subsuperficial horizontal

Los humedales de flujo subsuperficiales horizontales están compuestos por grava como medio de soporte (Figura 1-9) para el desarrollo de las especies macrófitas plantadas en su interior y la adherencia de microorganismos encargados de la degradación de la materia orgánica (Asprilla et al., 2020).

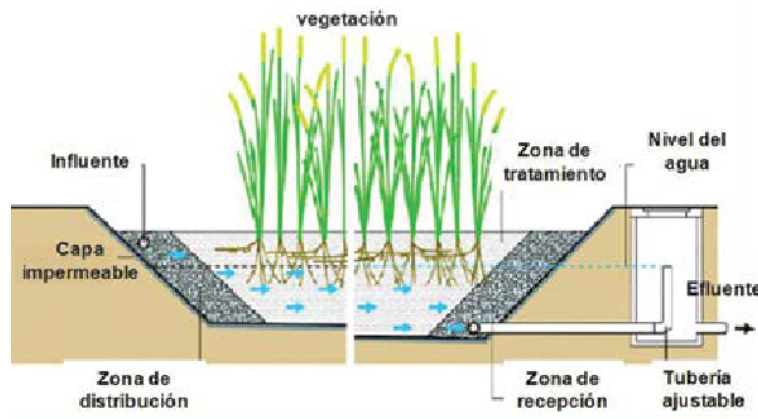


Figura 1-9 Humedal de flujo subsuperficial horizontal. **Fuente:** (Gschaedler et al., 2015)

Ofrecen varios beneficios entre los cuáles:

Eficiencia de tratamiento: Los humedales subsuperficiales horizontales son eficientes en la eliminación de contaminantes, como nutrientes (nitrógeno y fósforo), sólidos suspendidos, materia orgánica y patógenos. El diseño proporciona un mayor tiempo de residencia del agua, lo que permite que los procesos biológicos y fisicoquímicos tengan lugar y eliminen eficazmente estos contaminantes.

Bajo mantenimiento: Comparados con otros sistemas de tratamiento, los humedales subsuperficiales horizontales tienden a requerir menos mantenimiento. La combinación de procesos naturales y el diseño de flujo subsuperficial reduce la necesidad de intervención frecuente.

Integración en el paisaje: Estos humedales pueden integrarse en el paisaje circundante, proporcionando beneficios estéticos y de biodiversidad. Pueden ser diseñados para asemejarse a áreas naturales, lo que ayuda a mejorar la calidad visual y atraer a la fauna local.

Preservación de hábitats: Estos humedales pueden mejorar y crear hábitats acuáticos y terrestres para diversas especies. Además, pueden funcionar como refugio para aves acuáticas y otros animales silvestres.

Reducción de olores y mejora de estética: Algunos sistemas de tratamiento de aguas residuales pueden generar olores desagradables. Los humedales subsuperficiales horizontales pueden contribuir a reducir estos olores y mejorar la estética del área.

Bajo consumo de energía: En comparación con tecnologías más intensivas en energía, como las estaciones de bombeo y los sistemas de aireación, los humedales subsuperficiales horizontales tienden a tener un consumo de energía más bajo.

Mejora de la calidad del agua: Al tratarse de una solución de bajo impacto ambiental, estos humedales pueden mejorar la calidad del agua en arroyos, ríos o cuerpos de agua cercanos, ya que el agua tratada se reintroduce en el medio ambiente.

Costos operativos reducidos: Los costos operativos de los humedales subsuperficiales horizontales suelen ser más bajos en comparación con sistemas convencionales de tratamiento de aguas residuales.

Resiliencia ante fluctuaciones de caudal: Estos humedales pueden manejar variaciones en el caudal de entrada, lo que los hace útiles en áreas donde las condiciones hidrológicas pueden cambiar (Dotro, et al., 2017; Vidal & Hormázabal, 2018).

1.4.4.3.2.2. Humedales de flujo subsuperficial vertical

Los humedales de flujo subsuperficial vertical el agua fluye a través del sustrato, en general gravilla, que permite el contacto con los microorganismos que colonizan la superficie tanto de las raíces como de las plantas como del propio sustrato (Rodríguez-González et al., 2013).

En los humedales de flujo subsuperficial vertical, el agua residual fluye desde la parte superior de la columna hasta la base, donde se recoge y se puede descargar o recircular para un mayor tratamiento, esto se puede observar en la **Figura 1-10**, la entrada del afluente se encuentra representada por la línea naranja. A medida que el agua atraviesa el sustrato, se produce una serie de procesos de filtración, adsorción y descomposición bacteriana que contribuyen a la mejora de la calidad del agua.

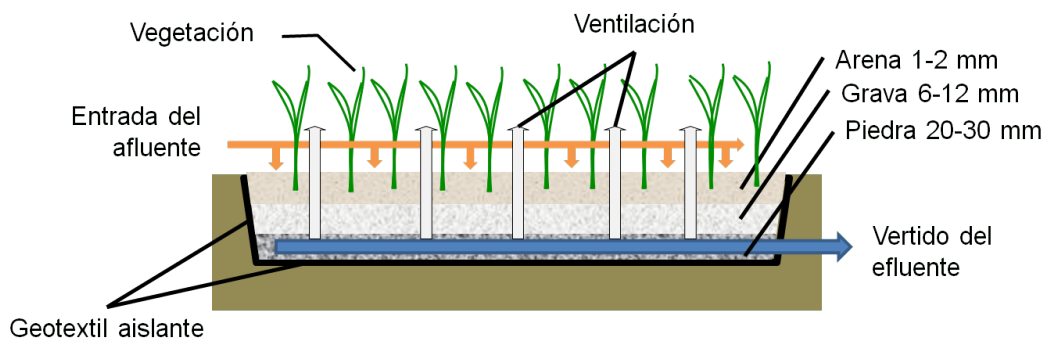


Figura 1-10 Humedal de flujo subsuperficial vertical. **Fuente:** (WETWINE, 2018)

Las ventajas de este tipo de humedales es que pueden recibir cargas de agua de corta duración, lo cual permite la dinámica de intercambio gaseoso con la atmósfera y al mismo tiempo oxigenar el agua contaminada (Segura, 2017).

1.4.5. Acceso a agua potable y saneamiento

El agua es empleada en diferentes actividades humanas, ya sea para subsistir o bien, para producir o intercambiar bienes.

En el Registro Público de Derechos de Agua (REPD) se tienen clasificados 12 rubros, sin embargo, por los propios procesos administrativos se han agrupado en

5 grupos, 4 de ellos se refieren a los usos consuntivos, agrícola, abastecimiento público, la industria y las termoeléctricas, y en 2014, se introduce como uso no consultivo, el de conservación ecológica (CONAGUA, 2019a).

Los usos consuntivos implican un consumo y que, una vez usada, no puede devolverse el medio donde se captó, ni de la misma forma que se extrajo. Se distinguen 3 tipos de usos:

Uso agrícola: Todo lo relacionado con la agricultura.

Uso doméstico/urbano: Se refiere a todas las necesidades de agua de hogares, comercio y servicios públicos.

Usos industriales: Usado en la gran mayoría de los procesos industriales para la generación de materia prima, refrigerante, agente de limpieza, depósito de vertidos, etc.

En el caso de los usos no consuntivos, suponen el uso del agua, pero no un consumo. Además, que en el caso contrario esta agua es devuelta al medio del cual ha sido extraído, pero no al mismo lugar. Se distinguen varios tipos de usos no consuntivos:

Usos energéticos: Agua empleada para la producción exclusiva producción de energía eléctrica.

Usos recreativos: Uso de los embalses, ríos, lagos y mares para ocios para actividades de recreación o deportivas.

Usos ambientales o ecológicos: Es referido a la cantidad mínima para mantener el equilibrio ecológico dentro de los ecosistemas (Zarza, 2015).

La distribución de mayor consumo consuntivo es del sector agropecuario, y el 60.8% del agua que se requiere para las actividades del sector, provienen de fuentes de abastecimiento superficial como lo son los ríos, bordos, presas, etc, observados en la **Tabla 2**.

Tabla 2 Usos consuntivos, según el origen del tipo de fuente de extracción. Fuente: (CONAGUA, 2021b)

Usos consuntivos, según origen del tipo de fuente de extracción (2020)

Uso	Origen superficial (miles de hm ³)	Origen subterráneo (miles de hm ³)	Volumen total (miles de hm ³)	Extracción (%)
Abastecimiento público	5.7	7.5	13.2	14.7
Agrícola	42.8	25.0	67.8	75.7
Energía eléctrica excluyendo hidroelectricidad	3.7	.5	4.1	4.6
Industria autoabastecida	2.1	2.4	4.5	5.0
Total	54.2	35.3	89.6	100.0

El principal uso del agua en México es para riego agrícola, que se refiere al agua empleada para el riego de cultivos. La superficie dedicada a las labores en México varía entre los 20 y 25 millones de hectáreas, con una superficie de cosecha de 18 a 22 millones de hectáreas por año.

Después, se tiene el uso del agua para abastecimiento público, que se emplea para todas las actividades del hogar, como previamente se describió en el texto anterior, y continuando con la lista el uso de la industria autoabastecida. Para finalizar se tiene el uso del agua para la generación de energía eléctrica.

Se busca siempre tener un uso razonable del recurso hídrico, ya que, a mayor demanda, podemos dañar el ciclo hidrológico teniendo menos disponibilidad por año, también considerando factores climatológicos.

La gestión del agua plantea retos para el desarrollo, estos retos pueden tener un impacto en las comunidades y muchas veces en economías nacionales. La manera en que muchos países enfrentan los retos para satisfacer las necesidades de agua de las personas, industria y ecosistemas depende de la situación y sobre todo de las prioridades de su desarrollo (Perdomo, 2021).

“El uso sustentable del agua se logra cuando: el agua genera bienestar social, propicia el desarrollo económico y se preserva” (CONAGUA, 2014).

El uso sustentable del agua es una rama más dentro del desarrollo sustentable, término que se refiere al desarrollo equitativo de nuestro presente, con las condiciones de no afectar a las generaciones futuras.

Por lo tanto, generar un uso sustentable del recurso hídrico, representa una tarea complicada por la gobernanza y la sociedad. Por lo tanto, la sustentabilidad debe buscar conservar sus fuentes, la lluvia, acuíferos, lagos y ríos, los bosques, la energía para manejarla, la agricultura, la ganadería y por tanto la alimentación y la urbanización y la industria. Se debe eliminar el estigma de seguir usando el agua como un recurso no renovable debido a su ciclo hidrológico actual, ¿Y esto por qué sucede? Por qué el agua no se renueva a la velocidad que se requiere.

¿Qué debe generar un país para tener el uso sustentable del agua?

1. Conservar y usar los recursos de la cuenca dentro de la cuenca.

Esto implica que todos los recursos de la cuenca se desarrollan de acuerdo con sus usos y capacidades, considerando que debe haber intercambio con otras cuencas

y no se limitará su desarrollo por extracción de sus recursos. En otras palabras, se debe aumentar el área de recarga, implementar tecnologías que permitan capturar agua de lluvia, reducir las pérdidas de agua potable verificando las conexiones actuales y reparando fugas, así como armonizar las demandas de agua para uso agrícola y doméstico y, sobre todo, reducir las demandas de agua industrial; sometiendo a las empresas a mejorar su tratamiento de agua y emplearla dentro de sus procesos.

2. El agua potable deberá ser para consumo humano directo o a través de alimentos procesados, y todas las otras actividades deberán basarse en el tratamiento y reúso de agua.

Tabla 3 Estrategias de conservación del agua en cuencas. **Fuente:** (Monroy, 2013)

	A. Aumentar la recarga	B. Disminuir la extracción
1	Natural (aumentar área de recarga)	Reducir pérdidas de la red de agua potable
2	Artificial (captura lluvia, tratamiento, inyección y almacenamiento)	Reducir las demandas doméstica e industrial
3	Artificial (tratamiento de aguas grises, inyección al acuífero)	Armonizar la demanda agrícola y urbana

Por lo tanto, la planeación nacional por cuencas debe ser orientada hacia el crecimiento de actividades económicas que permitan la disponibilidad del agua, e implementar estrategias tal y como se muestran algunas en la **Tabla 3**. Debe existir una armonía entre el uso sustentable del agua y la tecnología para mejorar las condiciones de acceso y tratamiento. (Monroy, 2013)

Se debe hacer conciencia en la sociedad que la falta de agua es un problema, y sobre todo acotar concesiones para evitar el agotamiento de los cuerpos de agua subterráneos, con acciones de este tipo podemos generar un alcance más alto y disminuir el problema de acceso al agua potable.

Sobre todo, tomar en cuenta que el sector agrícola es el sector que más desperdicia agua, debido a la infraestructura de riego ineficiente y en mal estado, o su tecnología es obsoleta. Las pérdidas por infiltración y evaporación son de más de 60% del agua que se almacena para uso agrícola (Maguey, 2018).

Y aunque la industria paradójicamente tenga menor consumo de agua, hoy en día puede consumir 3 veces la cantidad de agua que una ciudad consume en un año, y es el sector que más contamina y esto afecta al ciclo hidrológico.



Figura 1-11 Estadística general de estrés hídrico en el mundo. **Fuente:** (ONU-Habitat, 2021)

Es importante conservar el agua potable, pero sobre todo generar planes y acciones que permitan usar de manera sustentable el agua. Tener acceso al recurso hídrico permite mantener una calidad de vida alta, pero, sobre todo ayuda a mantener el crecimiento económico de cada una de las ciudades en este mundo, como se puede apreciar en la **Figura 1-11** tenemos una situación de alerta por estrés hídrico.

La Organización Mundial de la Salud (OMS) considera que la cantidad adecuada para consumo humano (actividades como beber, cocinar, higiene personal, limpieza del hogar) es de 50 litros al día por habitante. Pero, es importante incorporar la industria, agricultura y sobre todo la conservación de ecosistemas acuáticos y fluviales, por lo que, esta cantidad asciende a 100 L/día por habitante mínimos (Padilla, 2022).



Figura 1-12 Jerarquía de las necesidades del agua según la OMS. **Fuente:** (Torres-Navarro et al., 2019)

Estamos hablando de manera ideal, no real. El consumo varía mucho de región del planeta, pero, sobre todo, del poder adquisitivo de la región (**Figura 1-12**). Por regla general, un país rico duplica el consumo urbano con relación al consumo rural y sobre todo con algunos países con menor poder adquisitivo (CNDH, 2014).

El agua de acuerdo con la OMS debe ser suficiente, para realizar todas las actividades personales así como de higiene, saludable dónde se pueda cumplir con la calidad expresada en normas por país o bajo las guías de calidad de agua potable por la misma OMS, aceptable, presentar características de olor, sabor y color aceptables para uso personal y doméstico, asequible, quiere decir que su costo sea accesible y no exceder el 3% de los ingresos del hogar y por último físicamente accesible, lo cual el acceso no debe exceder los 1,000m de distancia del hogar y su recorrido de recogida no debe superar los 30min (OMS, 2014).

De acuerdo con CONAGUA el consumo de agua en zonas rurales varía con respecto a la región, debido a las condiciones climatológicas que se presentan y la actividad de los habitantes, como se aprecia en la **Tabla 4**.

Tabla 4 Consumo doméstico en el medio rural. **Fuente:** (CONAGUA, 2019b)

Uso	Consumo diario l/hab
Bebida, cocina y limpieza	30
Eliminación de excretas	40
Aseo personal	30

Las cantidades representadas por la OMS difieren bastante por las recomendadas por la CONAGUA, sin embargo, representa un reto que cada habitante que

independientemente de la zona en la que se encuentra, puede tener acceso al recurso hídrico en cantidad y calidad.

1.5. Calidad del agua y riesgos para la salud

Como se ha abordado en las temáticas anteriores, la población crece y por lo tanto la demanda por los recursos naturales debe aumentar, lo cual el agua juega un papel, debido a que decrece en cantidad y calidad.

La disponibilidad de agua, también la podemos asociar a diferentes eventos extremos, como sequías, inundaciones o incluso ciclones tropicales y sin dejar de lado la desmedida contaminación que existe en cualquier zona del mundo.

A pesar de existir bastantes avances tecnológicos estos ni siquiera buscan una mirada desde la sustentabilidad, todo se ha enfocado a en la industria y transporte, y algunos puntos de vista hacia la agricultura, unos generan más contaminación que otros, pero el enfoque hacia la sustentabilidad sigue siendo nulo (Castro & Rajadel, 2021).

Por otra parte, la extracción del agua subterránea sin medida genera grandes consecuencias, entre ellas la sobreexplotación de los pozos, haciendo que estos tengan menos y menos agua disponible conforme pasa el tiempo.

Se debe entender que muchas veces las estadísticas relacionadas con el acceso al agua potable no dimensionan todas las situaciones que están en el momento, aspectos como la calidad del agua y la cantidad de agua que se recibe, nunca son consideradas o tomadas en cuenta (de León, 2017).

De acuerdo con la Organización Panamericana de la Salud, existen algunas zonas rurales y pequeñas localidades con mayor densidad poblacional, el problema del abastecimiento de agua es complejo, debido a varias dificultades las cuáles son:

- Bajo nivel socioeconómico
- Viviendas aisladas o núcleos familiares no definidos (cantidad de personas por vivienda)
- Limitado a nuevas tecnologías
- Carencia de supervisión, control y apoyo técnico de instituciones públicas

La complejidad de toda la infraestructura en zonas rurales está influenciada por factores locales, como las fuentes de abastecimiento disponibles, la oferta de agua, la dispersión de las viviendas, factores climáticos, topografía, etc. En algunos casos no existen muchas soluciones y solo se adoptan alternativas simples.

Debido a los problemas de agua que se presentan en las localidades urbanas, deben buscarse soluciones técnicas y sociales. Esto se debe que al tener una solución esta debe beneficiar a la sociedad en general y generar conciencia por el sistema implementado (Lampoglia et al., 2008).

Pero, también debemos de enfocarnos en algo importante, “calidad de agua” es decir, podemos abastecer de agua a las zonas rurales, pero, no debemos dejar de lado la forma en que debe ser recibido el recurso hídrico.

Actualmente, el abastecimiento de agua debe de cumplir ciertos estándares de calidad por normas generadas por el país. Y es importante generar conciencia de este rubro, por qué no solo se trata de abastecer agua, si no de cumplir con la calidad de agua recomendada por las normas que se rigen en cada país.

Agua potable se define como agua para uso y consumo humano que no contiene contaminantes y no puede causar daños a la salud (Secretaría de Salud, 2022).

El agua contaminada está relacionada con bastantes índices de mortalidad, ya que puede conducir enfermedades como el cólera, hepatitis A, fiebre tifoidea y la poliomielitis. Se tiene un cálculo de 485 000 muertes por diarrea cada año. Aunque los riesgos químicos más importantes para este tipo de agua provienen del arsénico, el fluoruro o el nitrato, nuevos contaminantes, como productos farmacéuticos, pesticidas, sustancias perfluoroalquiladas y polifluoroalquiladas (PFAS) y los microplásticos son motivo de preocupación pública (OMS, 2022).

Por lo tanto, es un tema de relevancia el tener en cuenta la problemática actual que genera el poco alcance al recurso hídrico en zonas rurales, y sobre todo la gran cantidad de enfermedades que se ocasionan cuando existe un abastecimiento sin calidad de agua adecuada para este tipo de situaciones.

Se requiere de concientizar, pero, sobre todo de generar acciones a largo plazo que eliminen esta brecha tan grande entre abastecimientos de las zonas rurales y urbanas, y beneficiar aún más a la población. Sobre todo, al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible, podemos abastecer de agua a todos y cada uno,

pero, también buscando concientizar a las personas sobre la cantidad y uso del agua en general.

1.6. Descripción del área de estudio

1.6.1. Sistema de Información Geográfica

Se entiende por un sistema de información geográfica (SIG) al software específico que permite a los usuarios crear, integrar, analizar y representar de forma eficiente cualquier tipo de información geográfica referenciada a un territorio, el cual, conecta mapas con bases de datos, facilitando la visualización de datos en un mapa (SGM, 2017).

En el mercado, existen varios softwares para el manejo de información geográfica, en este caso aplicaremos el uso de ArcGIS, un sistema capaz de recopilar, administrar, analizar, compartir y distribuir información geográfica, permite que la información sea comprensible y además que sea accesible para cualquier usuario (ArcGIS Resource Center, s.f.).

Es crucial subrayar que todo el conjunto de datos utilizado en el software ArcGIS se origina en los sistemas de consulta proporcionados por instituciones como el INEGI y CONABIO. Estos sistemas brindan una amplia gama de información que se adapta a las necesidades específicas de los investigadores. Entre estos datos se incluyen las Áreas Geoestadísticas Básicas (AGEB) Urbanas, un variado repertorio de información proveniente del inventario nacional de vivienda, registros climáticos, datos sobre edafología, mapas de uso de suelos y vegetación, detalles topográficos, características hidrológicas, información geológica e hidrográfica.

Es importante destacar que esta información se maneja en una escala cartográfica de 1:50,000 y se ajusta al sistema de referencia global WGS 84. Además, se emplea un sistema de proyección cartográfica UTM (Universal Transversal de Mercator), específicamente en la zona 14 Norte, que abarca precisamente la región de este estudio.

1.6.2. Índice de Rezago Social

El índice de rezago social para las localidades mediante el análisis de las variables se determinó que los AGEB (Área Geoestadística Básica) 2751, 2766, 2770, 3321,

3938 y 4870 (**Figura 1-13**) pertenecientes a la localidad de Escalerillas, presentan un índice de rezago social y vivienda alto, esto significa que el acceso a servicios básicos como agua y drenaje, así como características básicas de un hogar como excusado o algún electrónico son muy escasos.

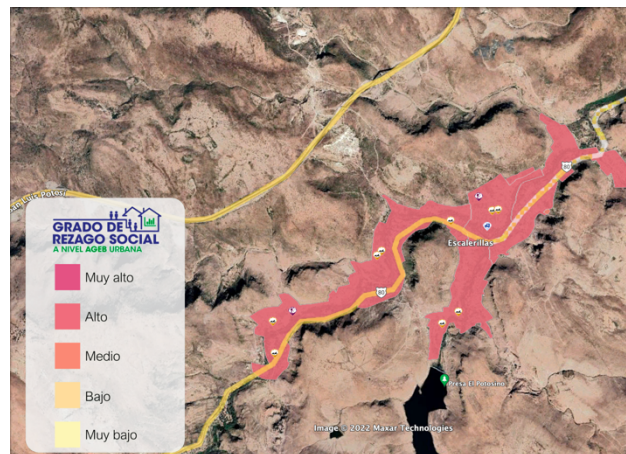
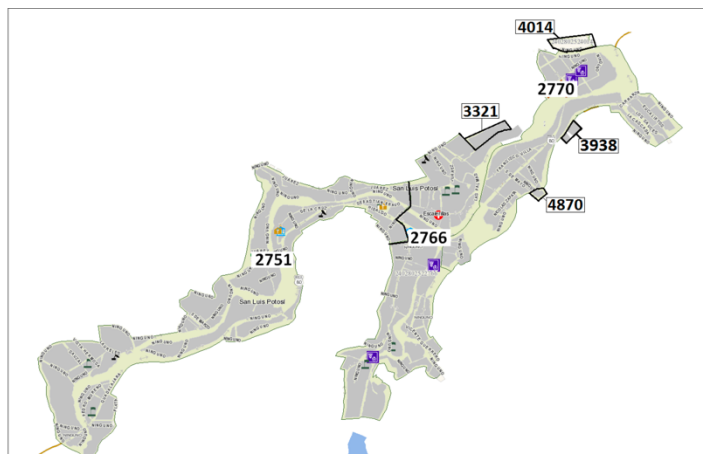


Figura 1-13 AGEB's en el área de Escalerillas. Fuente: **Figura 1-14** Índice de Rezago Social por AGEB. Fuente: (CONEVAL, 2021)

Para el caso de Pozuelos, CONEVAL no tiene registro acerca de su índice de rezago social, así como la asignación correspondiente de algún indicador de AGEB, por lo que, viendo la situación actual de la localidad, presenta las mismas condiciones de Escalerillas (**Figura 1-14**), permitiendo obtener su índice en muy alto.

La importancia de este índice radica en varios aspectos importantes, entre ellos el nivel de ingreso económico que se percibe en el área y además la relación fuerte con el grado de marginación y desarrollo.

Una de las actividades económicas más representativas del área es el tallado de Cantera, además de algunos pequeños comercios que existen en el área, pero, esas actividades no cubren las necesidades de los pobladores, por lo cual, tienen que viajar de manera continua a la ciudad para trabajar e incluso estudiar debido al poco nivel de estudio que está disponible en Escalerillas y Pozuelos (Robledo, 2013).

1.6.3. Hidrología

La microcuenca que alberga la Presa San José se encuentra dentro de la región hidrológica número 37 "El Salado", delimitada por los paralelos 21°48' y 25°23' de latitud norte, así como por los meridianos 99°21' y 103°00' de longitud oeste, abarcando una extensión territorial aproximada de 87,801 km² (Mariles, 2017). Esta región se caracteriza por presentar una topografía monótona en la que las elevaciones son escasas y la presencia de grandes corrientes superficiales es limitada. La microcuenca comprende siete subcuencas, a saber: Matehuala, Sierra de Rodríguez, Camacho-Gruñidora, Fresnillo-Yesca, San Pablo y Otras, Presa San José-Los Pilares y Sierra Madre. El promedio mensual de precipitación en esta área es de 400 mm, generando un volumen anual de lluvia de 15,144 Mm³. Sin embargo, debido a las condiciones climáticas predominantes, aproximadamente el 97% de este escurrimiento se pierde debido a la evaporación (INEGI, 2002).

El área de estudio se encuentra dentro de la microcuenca Presa San José, con clave RH37Gb de acuerdo con SIATL (Simulador de Flujos de Agua de Cuencas Hidrográficas) y cuyas características se muestran en la tabla.

Tabla 5 Propiedades de la microcuenca RH37Gb. **Fuente:** (SIATL, s.f.)

Propiedades	Valor
Área de la cuenca	244.8176 km ²
Elevación máxima	2796 m
Elevación media	2352 m
Elevación mínima	1908 m
Longitud del cauce principal	32.125 km
Pendiente media	2.7633%

De acuerdo con (Campos, 1992), existe una clasificación propuesta para definir el tamaño de las cuencas, que va a de acuerdo con los datos contenidos en la **Tabla 6**.

Tabla 6 Clasificación propuesta para las cuencas. **Fuente:** (Campos, 1992)

Tamaño de la cuenca (km ²)	Descripción
<25	Muy pequeña
25 a 250	Pequeña
250 a 500	Intermedia-pequeña
500 a 2,500	Intermedia-grande
2,500 a 5,000	Grande
> 5,000	Muy grande

Por lo que, de acuerdo con la clasificación esta es una cuenca pequeña.

Además, el SIATL permite generar un perfil de elevaciones del cauce principal, el cual nos permite conocer de manera gráfica el flujo desde su nacimiento hasta la parte más baja de la cuenca que es la Presa San José, representado en **Figura 1-15**.

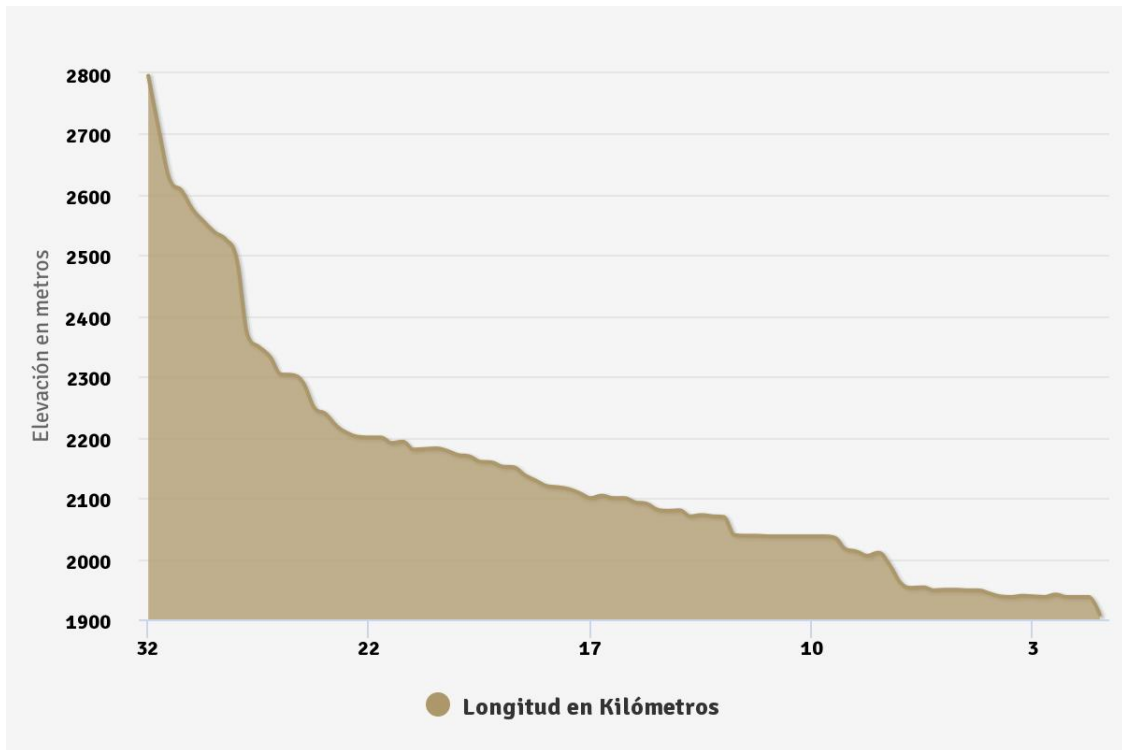


Figura 1-15 Perfil de elevaciones del cauce principal. Fuente: (SIATL, s.f.)

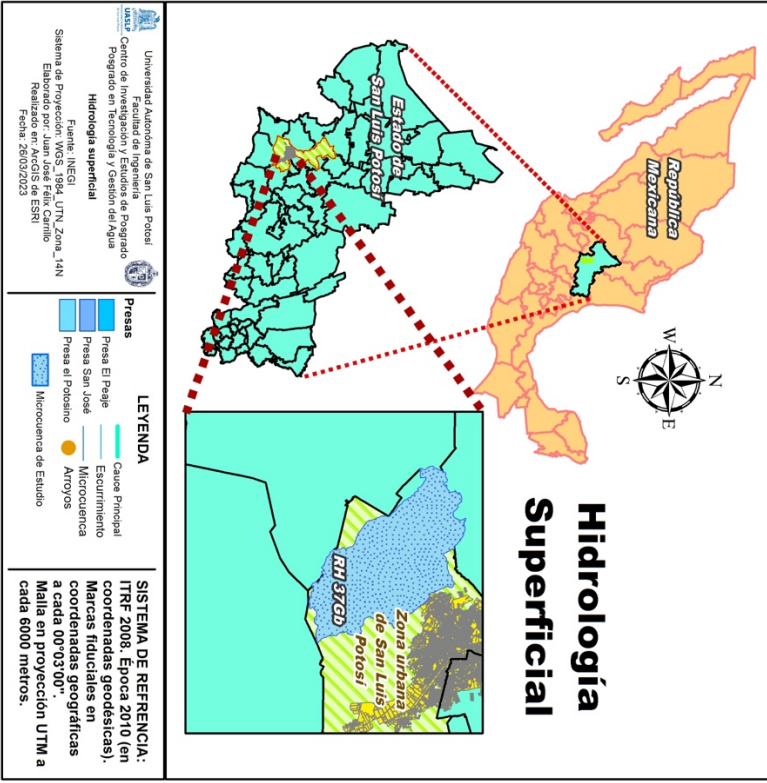
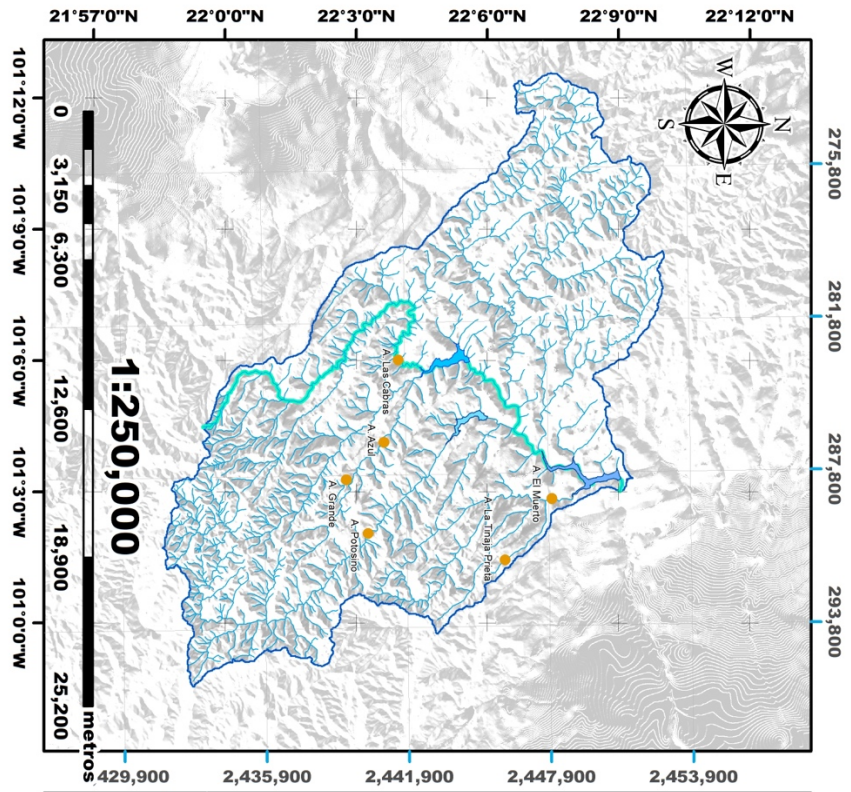


Figura 1-16 Hidrología superficial RH37Gb

La cuenca Presa San José-Los Pilares se subdivide en dos cuencas intermedias, Presa Los Pilares y Presa San José (**Figura 1-16**), que abarcan el 17.95% de la extensión total de la ciudad. Esta área se destaca por su presencia significativa de corrientes superficiales de carácter intermitente (SEMARNAT, 2019; Ávalos, 2022).

Esta área tiene 3 presas que actualmente alimentan a la zona metropolitana de San Luis Potosí, las cuáles son Presa San José, Presa El Potosino y Presa el Peaje, teniendo un aporte de 929 L/s, y siendo tratadas en las plantas potabilizadoras de Los Filtros e Himalaya (INTERAPAS, 2023).

La Presa San José (**Figura 1-17**), situada a 10 km al oeste de la ciudad, es la fuente principal de almacenamiento de agua para la ciudad. Hace 100 años, esta presa tenía una capacidad de almacenamiento de 10 millones de metros cúbicos. Sin embargo, debido a la acumulación de sedimentos a lo largo del tiempo, su capacidad se ha reducido a 5.5 millones de metros cúbicos (INTERAPAS, 2013).



Figura 1-17 Presa San José. **Fuente:** (Camacho, 2021)

1.6.4. Clima

Debido a la ubicación de estas localidades, las lluvias se presentan durante el verano en los meses de junio a septiembre, la precipitación media es de alrededor de 450 mm anuales (**Figura 1-19**). Sus veranos son cortos y calurosos, e inviernos frescos y secos. La temperatura varía desde los 5°C hasta los 29°C (INEGI, 2020).

De acuerdo con la clasificación de Köppen modificada por García, se presentan 2 tipos de Clima, uno de tipo BS1kw, el cual hace referencia a un tipo de clima semiseco templado, con veranos cálidos y temperaturas que oscilan entre los 12° y 18°C con un régimen de lluvia en verano y otro tipo BSokw que corresponde a un clima árido templado con un clima mucho más frío de -3° y 18°C (**Figura 1-18**), y con el mismo régimen de lluvia (García E. , 2004).

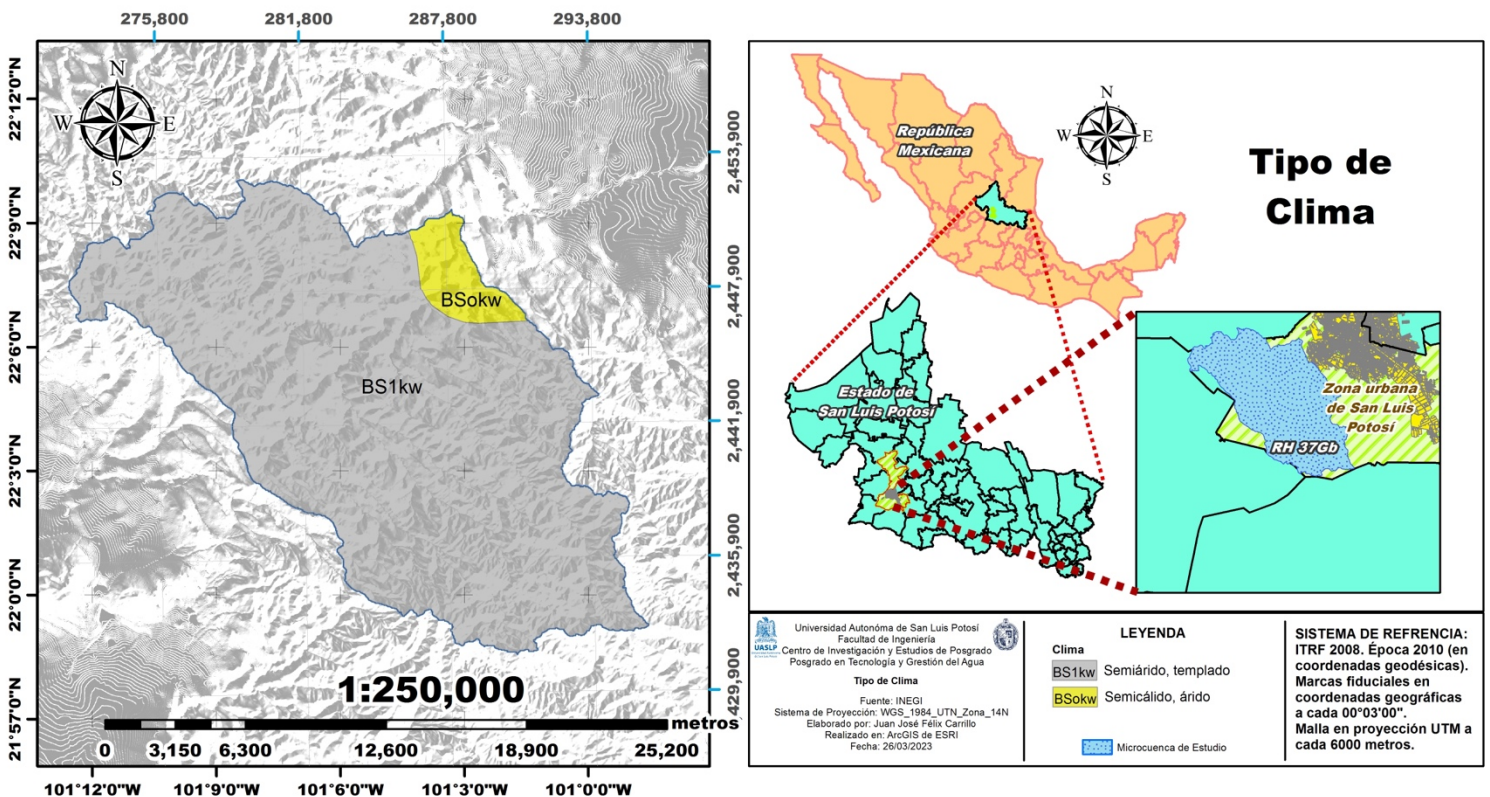


Figura 1-18 Tipos de Clima

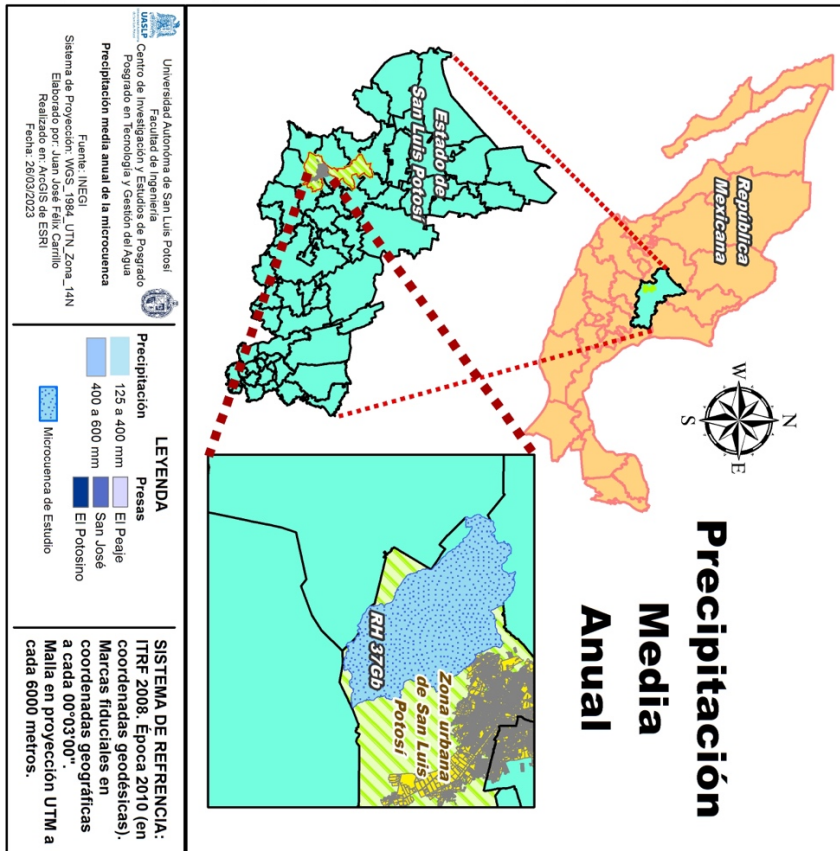
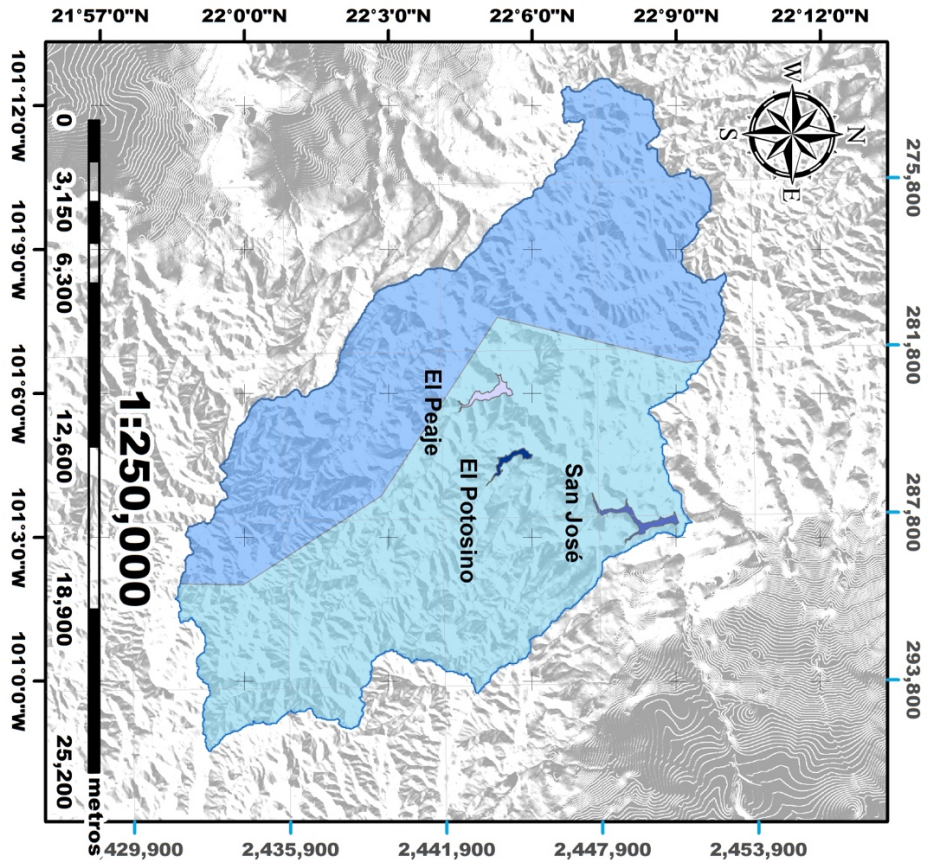


Figura 1-19 Precipitación media anual

1.6.5. Edafología

El tipo de suelo que se encuentra dentro de la zona está compuesto por: Regosol Calcárico, Feozem Háplico y Xerosol Háplico (**Figura 1-20**), teniendo en cuenta de mayor predominancia el Regosol Calcárico en más del 50% de la superficie del sitio de estudio.

Los regosoles son de origen residual a partir de material materno constituido por rocas riolita, caliza, lutita, y en menor proporción aluvión, además presentan un pH un tanto alcalino con un color amarillento (INEGI, 2002). Suelen ser suelos pocos profundos que permiten fertilidad variable y esto se relaciona de manera directa a la profundidad y pedregosidad de este. Son suelos claros y además presentan poca materia orgánica (SEGAM, 2020).

En el caso del Feozem, están presentes en cualquier ambiente, con excepción de algunas regiones con climas tropicales muy lluviosas o demasiado áridas. Se les conoce como tierras pardas, debido a su capa superficial suave y de color oscuro, rico en nutrientes y materia orgánica. Son derivados de rocas como la riolita, toba ácida, caliza y lutita lo cual permite que sean ideales para agricultura y riego, con altos rendimientos (SEGAM, 2020).

Para los xerosoles, se localizan en zonas áridas y semiáridas, son de profundidad moderada, aunque existen algunas áreas pequeñas donde son profundos (INEGI, 2002). Estos suelos, presentan un pH que varía de neutro a alcalino, permitiendo que en época de lluvia sean fértiles y productivos en áreas de agricultura (CONANP, 2021).

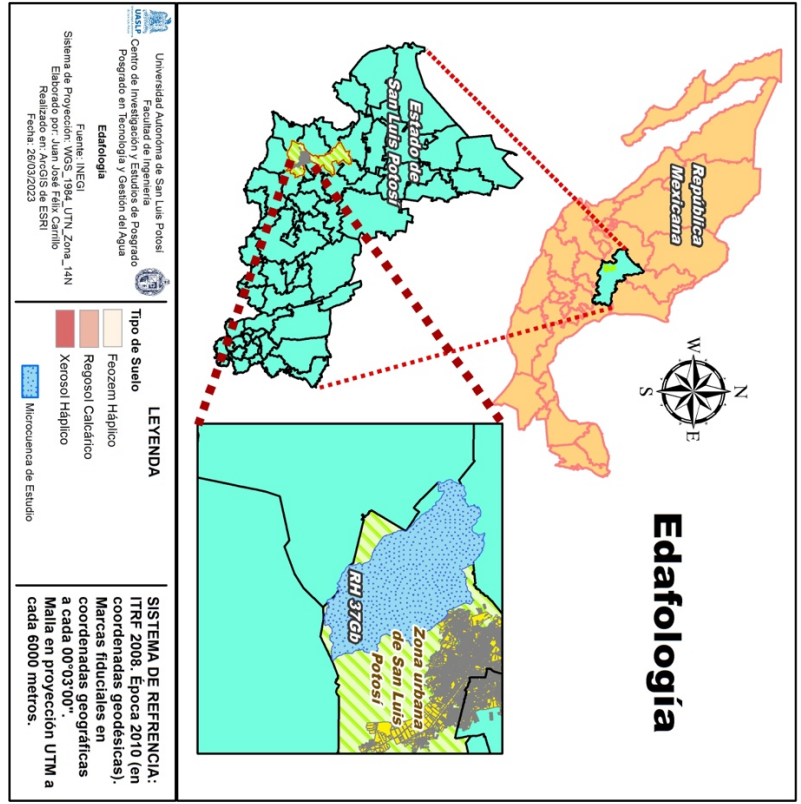
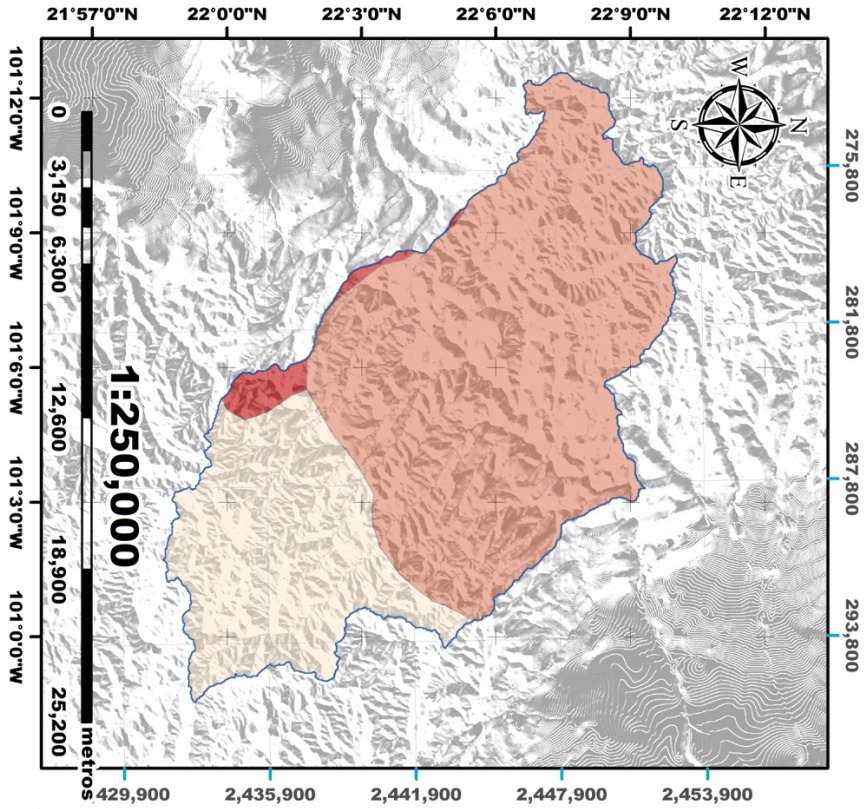


Figura 1-20 Edafología

1.6.6. Vegetación y uso de suelo

De acuerdo con la carta de Uso de Suelos y Vegetación (**Figura 1-21**), el sitio de estudio presenta en su mayoría un suelo lleno de Matorral y Arbustivo, muy representativo de zonas con lluvias escasas y zonas frágiles que favorecen la desertificación (CNCUB, 2021). Aunado a esto, encontramos un suelo denominado “tepetate” que son capas endurecidas formadas por procesos geológicos, y este genera limitantes debido a su dureza y esto dificulta construcciones de cualquier índole (Velázquez-Rodríguez et al., 2022). Así como la presencia de chaparral y bosque de pino dentro de la zona.

El chaparral es una asociación de encinos arbustivos, generalmente es densa, se presenta en altitudes arriba de los 1500m, su color y textura dependen del material que los originó sobre estratos ígneos, relacionado con el tipo de suelo Feozem háplico (INEGI, 2002). Se caracteriza por ser un matorral de 1 a 2 metros de altura. Estos suelos se caracterizan por ser una protección contra la erosión, permite que los suministros de agua subterránea se recarguen y proporciona un hábitat importante. Además de formar poblaciones poco penetrables, es decir, difícil acceso para animales y seres humanos. (IPICYT & SEGAM, 2018).

El bosque de Pino es un tipo de bosque abierto con una altitud de 3 a 15 metros, localizado en montañas altas y laderas (CONANP, 2021). Este tipo de vegetación es de provecho para fines ganaderos y la colecta de semillas comestibles recaudadas con gran intensidad de manera irregular (IPICYT & SEGAM, 2018). Estas áreas son propensas a erosión progresiva a consecuencia de la tala de árboles para uso doméstico (leña), y el sobrepastoreo de la ganadería (INEGI, 2002).

Los pastizales se caracterizan por su vegetación extensa en pastos y zacates, muy abundantes en zonas semiáridas y de clima seco. Es uno de los ecosistemas con más provecho debido a la posibilidad de alimentar el ganado y otros animales herbívoros. Crecen sobre suelos someros de origen volcánico o sobre suelos aluviales pobres en materia orgánica (IPICYT & SEGAM, 2018).

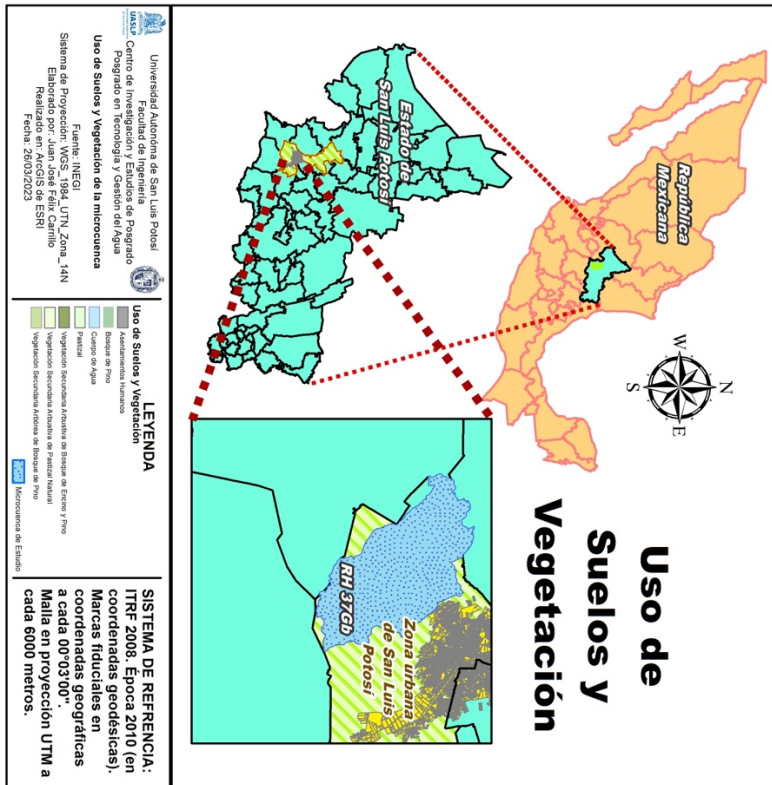
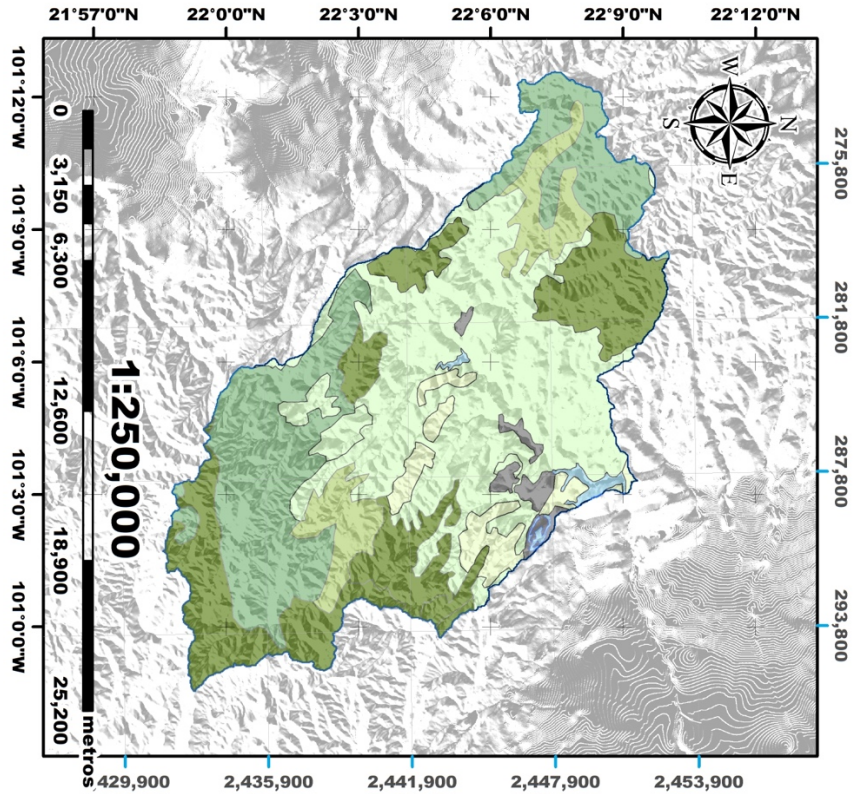


Figura 1-21 Vegetación y uso de suelos

2. DIAGNÓSTICO DE ABASTECIMIENTO Y DEL SISTEMA DE SANEAMIENTO DE AGUA

2.1. Caracterización de calidad de agua

2.1.1. Planeación de puntos y muestreo

Para la meticulosa planificación de los puntos a muestrear, se siguió un enfoque basado en recorridos estratégicos. Estos recorridos permitieron identificar las posibles fuentes de agua residual y diversos cuerpos de agua en la zona de estudio, incluyendo embalses y ríos (Figura 2-1). Para asegurar una base sólida en esta planificación, se utilizó la red hidrológica de la región hidrológica 37b, específicamente correspondiente a la Presa San José. Esta red hidrológica, disponible en una escala de 1:75,000, fue descargada del Sistema de Información y Análisis de Tendencias en Agua y Suelo (SIATL), una herramienta proporcionada por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI).

La información recopilada a través de estos recorridos estratégicos y la red hidrológica se integró y visualizó en el software ArcGIS. Los datos se adjuntaron en formato shape (.shp) para facilitar su manipulación y visualización en un contexto geoespacial. Esta representación geográfica permitió obtener una perspectiva clara y precisa de los puntos de muestreo planificados, además de ofrecer una visión amplia de las interconexiones entre cuerpos de agua y fuentes de agua residual dentro de la zona de estudio.

Además, esta metodología también permitió acceder a datos específicos, como los caudales ecológicos de la Presa "El Potosino" y del Río Santiago. Estos datos son esenciales para comprender el flujo de agua y su interacción con el entorno natural en la región.

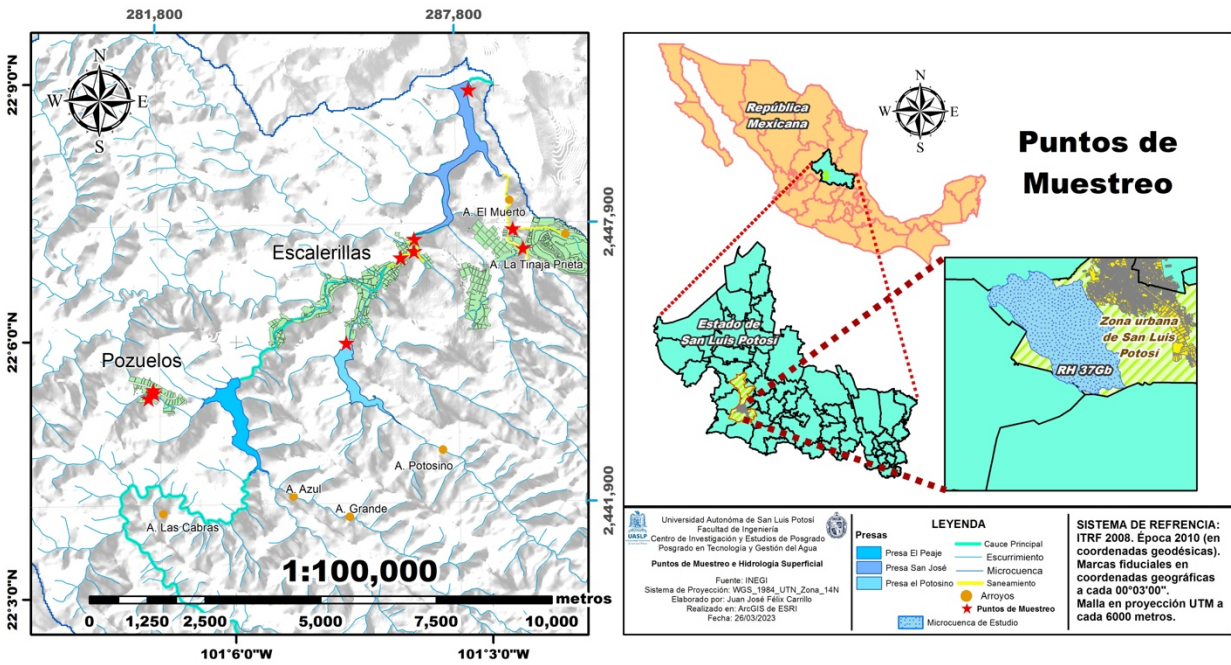


Figura 2-1 Puntos de muestreo e hidrología superficial

Este enfoque de planificación de puntos de muestreo, respaldado por herramientas avanzadas de análisis geoespacial, asegura una base sólida para la recopilación de datos y la comprensión profunda de la dinámica del agua en la zona de estudio.

2.1.2. Parámetros fisicoquímicos en campo

Durante el mes de mayo de 2023, se realizó una medición directamente sobre el sitio de interés cuidando que las sondas estuvieran completamente cubiertas empleando un potenciómetro Hanna® HI 98193 con sonda HI 764073 para el OD (Figura 2-3) y 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 (Figura 2-2).



Figura 2-3 Potenciómetro Oxígeno Disuelto Hanna



Figura 2-2 Potenciómetro Multiparamétrico Hanna

2.1.3. Parámetros fisicoquímicos en laboratorio

Para llevar a cabo la medición de los parámetros fisicoquímicos, se adoptaron cuidadosas prácticas de recolección y preservación de las muestras. Se utilizaron tubos cónicos Falcon con capacidad de 50 mL, los cuales fueron acondicionados en una hielera junto con geles congelantes. Esta estrategia garantizó la conservación adecuada de las muestras, evitando su degradación durante el transporte. Al llegar al laboratorio, las muestras fueron almacenadas a una temperatura de 4°C para mantener su integridad hasta el momento del análisis.

El análisis de elementos como la Demanda Química de Oxígeno (DQO), Nitrógeno Total (N) y Fósforo Total (P) se realizó utilizando kits específicos para cada parámetro. La metodología de reacción correspondiente a cada uno de estos parámetros fue proporcionada por la empresa Hanna®. En el proceso de análisis, se empleó un digestor (modelo HI 839800-01) para facilitar la descomposición de las muestras y un fotómetro multiparamétrico (modelo HI 83224) para realizar las lecturas. Este fotómetro multiparamétrico, dotado de una fuente de luz de tungsteno y un filtro de interferencias de banda estrecha, se configura para abordar diversos métodos de lectura que incluyen los parámetros de interés. Los métodos de análisis basados en colorimetría, fundamentales en este proceso, permitieron determinar con precisión los niveles de los parámetros fisicoquímicos en las muestras recolectadas.

2.1.3.1. Sólidos Suspendidos Totales (SST)

Para llevar a cabo la determinación de Sólidos Suspendidos Totales (SST), se siguió un proceso meticuloso y preciso. Se utilizaron un total de 19 crisoles Gooch y 19 filtros con una apertura de 5 micrómetros, conforme a la norma NMX-AA-034-SCFI-2015 de Análisis de Agua. El procedimiento se realizó en varias etapas para obtener mediciones confiables y consistentes. Inicialmente, se procedió a preparar los crisoles Gooch, que son recipientes utilizados en análisis gravimétricos. Para eliminar cualquier humedad, los crisoles se lavaron, secaron y luego se sometieron a una mufla precalentada a 550°C durante una hora. Posteriormente, se trasladaron a una estufa también precalentada a 105°C durante 20 minutos y, finalmente, se colocaron en un desecador hasta alcanzar la temperatura ambiente, repitiendo este proceso hasta obtener un peso constante (**Figura 2-4**).

Después de este procedimiento de preparación de los crisoles, se utilizó un filtro que fue humedecido ligeramente con agua desionizada. Este filtro se sometió a un proceso similar, siendo expuesto primero a la mufla a 550°C durante 30 minutos y luego a la estufa a 105°C durante 30 minutos, antes de ser colocado en un desecador para alcanzar la temperatura ambiente. Los filtros preparados de esta manera se utilizaron en combinación con los crisoles para la determinación de los SST (**Figura 2-5**).

La obtención de los SST involucró la filtración de las muestras utilizando una bomba de vacío. Una alícuota de 15 mL se utilizó para muestras de presas, embalses y ríos, mientras que una alícuota de 25 mL se empleó para muestras de aguas residuales, con el objetivo de capturar la mayor cantidad posible de sólidos suspendidos. El proceso se realizó mediante una configuración donde el crisol Gooch con el filtro se conectó a un matraz Erlenmeyer tapado, y las muestras se filtraron al vacío en el crisol.

Una vez que se completó el proceso de filtración al vacío para todas las muestras, los crisoles con los filtros se colocaron en una estufa a 105°C durante una hora, seguido por un tiempo en un desecador para alcanzar la temperatura ambiente. Luego, se realizaron mediciones de peso con los sólidos secos, y estos datos se utilizaron en la fórmula de cálculo correspondiente para obtener los valores de SST.

$$SST = \frac{PFMS - PFCSF}{\text{Volumen de alicuota (l)}} [=] \frac{mg}{l}$$

PFMS = Peso Final Muestra Seca

PFCS = Peso Final Crisol Seco con Filtro

Con esto, ya podemos tener la cantidad de SST en las muestras.

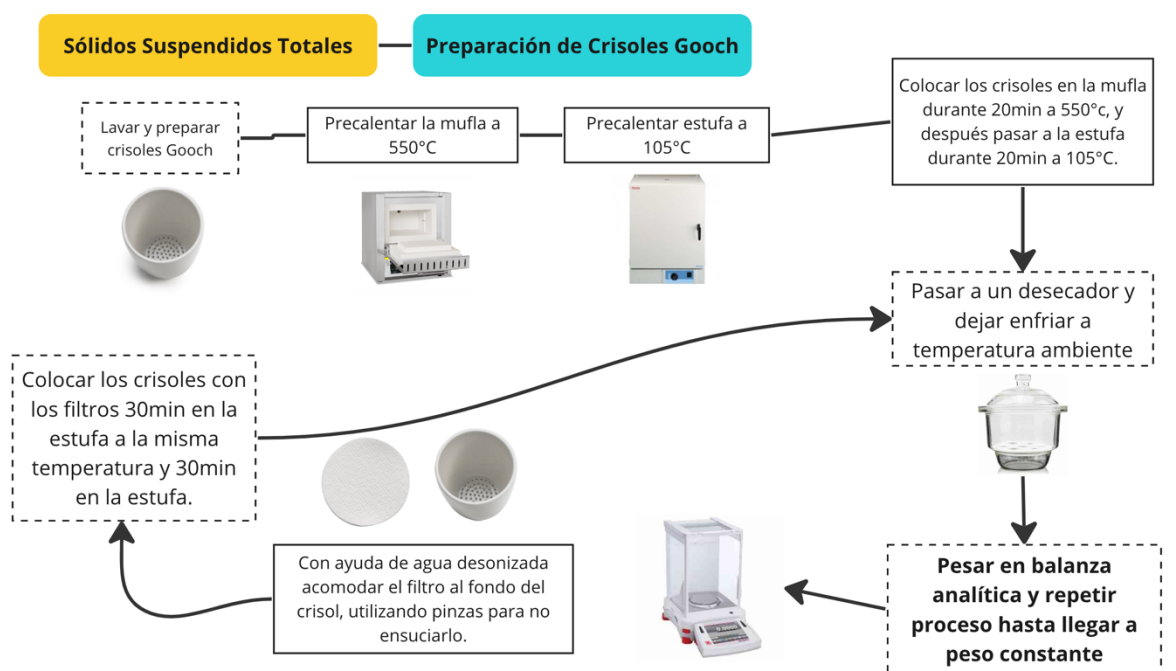


Figura 2-4 Esquema de preparación de Crisoles

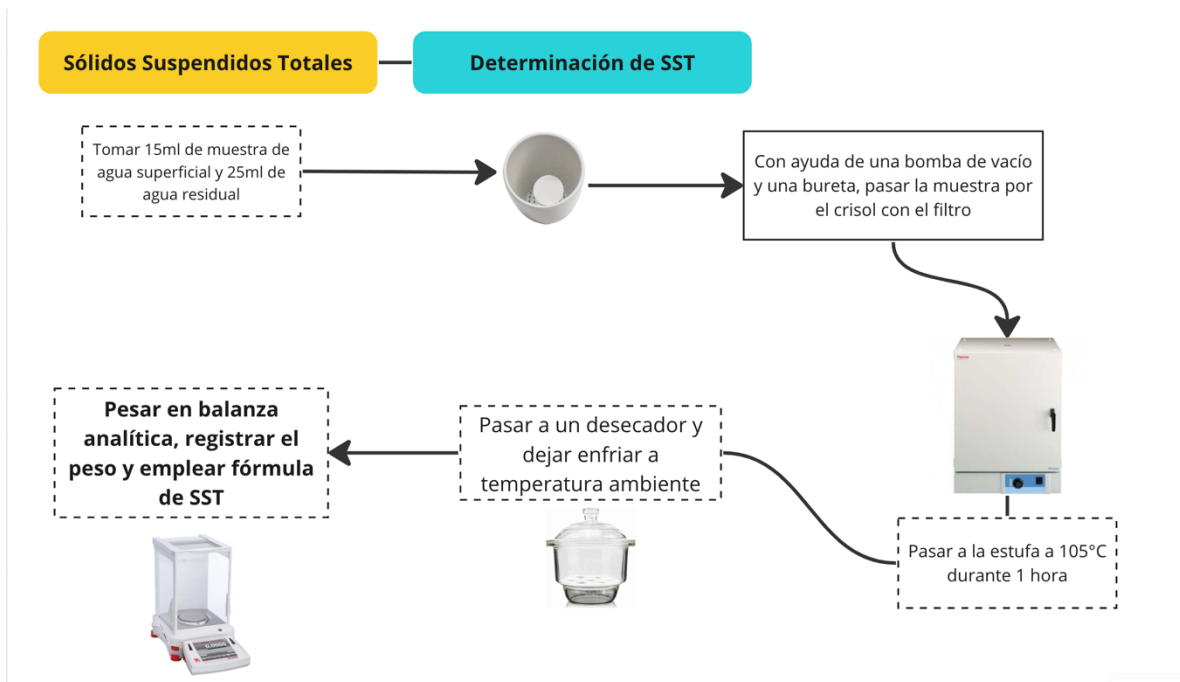


Figura 2-5 Esquema determinación SST

2.1.3.2. Turbidez

En el proceso de medición de la turbidez se utilizó un turbidímetro HAC 2100 N de la marca HACH®. Para asegurar la precisión y confiabilidad de las lecturas del equipo, fue esencial llevar a cabo una calibración adecuada. El procedimiento de calibración se realizó de manera cuidadosa para asegurar la consistencia y exactitud de las mediciones de turbidez.

El proceso de calibración se desarrolló de la siguiente manera:

Se encendió el turbidímetro y se permitió que se estabilizara durante 60 minutos para asegurar que el equipo alcance condiciones óptimas de funcionamiento. Posteriormente, se presionó la tecla CAL (calibración) en el equipo. Se colocaron los estándares StablCal® de calibración uno por uno en la celda de medición del equipo, siguiendo un orden específico, que va desde el estándar de menor turbidez al de mayor turbidez. Se tuvo el cuidado de limpiar los estándares con un paño para evitar manchas que puedan afectar la calibración. Una vez que se colocó cada estándar en la celda de medición, se presionó la tecla ENTER para iniciar un conteo de 60 segundos durante los cuales se realizó la lectura del estándar, después de

realizar todas las lecturas de los estándares, se presionó nuevamente la tecla CAL para que el equipo registrara los nuevos datos de calibración y regresara al modo de medición normal (Figura 2-6).

Para asegurar la confiabilidad de la calibración, se utilizaron estándares de turbidez Gelex con valores NTU (Unidades Nefelométricas de Turbidez) de 0-2 y 200-400. Al realizar las mediciones en el equipo y comparar los resultados con los valores conocidos dentro de este rango, se pudo verificar que las lecturas estuvieran dentro de los rangos de aceptación. Este proceso de calibración exitoso garantizó que las mediciones de turbidez realizadas con el turbidímetro HACH® fueran confiables y precisas, lo que contribuyó a una evaluación precisa de la calidad del agua en el área de estudio.

Procedimiento de medición de la turbidez

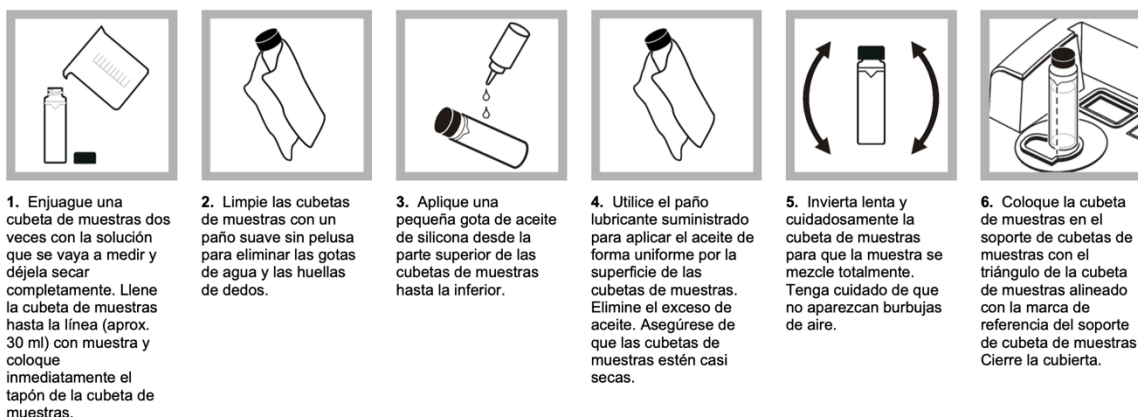


Figura 2-6 Procedimiento de medición de turbidez. Fuente: (HACH, 2014)

Para medir la turbidez, se utilizaron cubetas de muestra de 95 x 25 mm. Cada cubeta se llenaba con unos 30 mL de la muestra de agua a analizar. Después, se tapó la cubeta con precaución y se realizó una limpieza cuidadosa con un paño para que no hubiera gotas de agua ni huellas de dedos en la superficie de la cubeta. Luego se colocó la cubeta de muestra, preparada y limpia, en la celda de medición del turbidímetro. Se cuidó alinear la cubeta con la marca de referencia en el soporte de la cubeta. Una vez que la cubeta estaba correctamente posicionada, se cerró la cubierta del turbidímetro para leer turbidez. La lectura de turbidez se expresó en unidades nefelométricas de turbidez (NTU), que es una medida estándar de la cantidad de partículas suspendidas en el agua que causan la dispersión y absorción de la luz. Una vez que la cubeta estaba en su lugar y la cubierta del equipo estaba cerrada, se esperó a que el turbidímetro realizara la medición y presentara el resultado en NTU. (HACH, 2014).

2.1.3.3. Demanda química de oxígeno (DQO)

Para la obtención del parámetro DQO, con base a la metodología de la empresa Hanna®, se deben tomar 2 mL de alícuota para ser colectada en un vial reactivo y 2 mL de agua destilada para preparar un blanco, que permitirá calibrar a cero el fotómetro, se taparon, se invirtieron 2 veces, y se pasaron al digestor a 150°C durante 2 horas. Las metodologías para determinación de DQO de bajo, medio y alto rango, son las mismas, no hay diferencia entre las diferentes reacciones (**Figura 2-7**).

Para las muestras de cuerpos de agua, embalses y ríos se emplearon viales de bajo rango el cual comprende de 0 a 150 mg/L, y para las muestras de aguas residuales viales de medio rango que van desde los 0 a 1,500 mg/L.

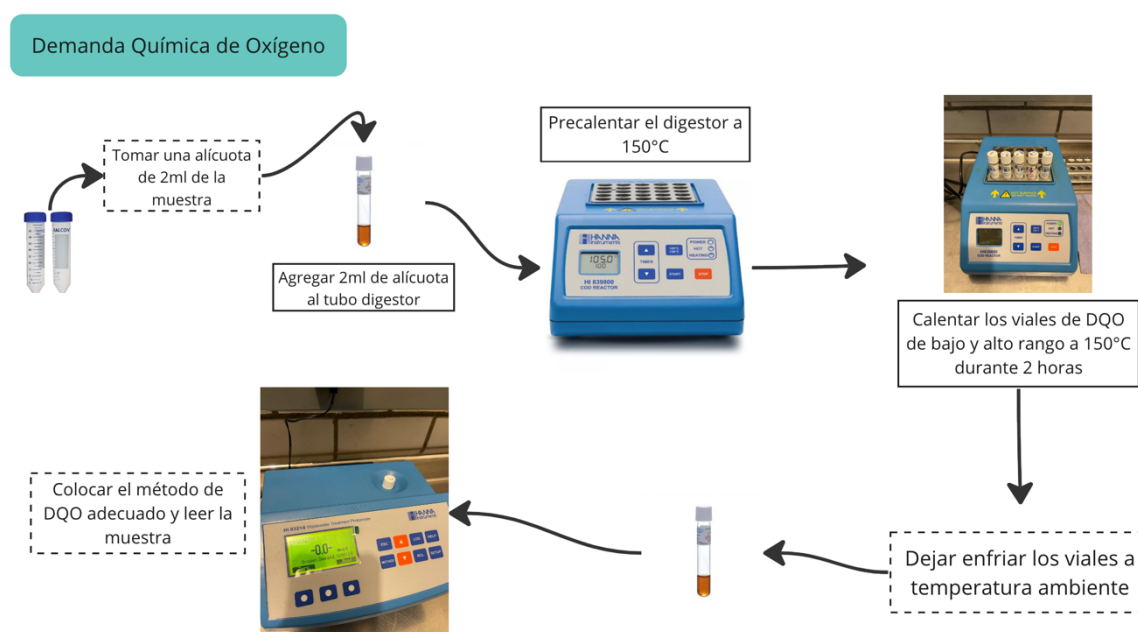


Figura 2-7 Esquema de procedimiento de DQO bajo y medio rango por fotometría

2.1.3.4. Fósforo

Con la misma metodología de reacción, se usaron viales reactivos de bajo rango (0.0 – 1.15 mg/L) y alto rango (0.0 – 32.6 mg/L), a los que se les añadieron 5 mL de

muestra y un sobre de persulfato de potasio, se taparon los viales y se mezclaron dos veces hasta que el persulfato se diluyera. Después, se pasa al digestor a una temperatura de 150°C por 30 minutos.

Finalizada la digestión, para los viales de bajo rango, se deben dejar en la gradilla de enfriamiento hasta alcanzar una temperatura ambiente, y se agrega a cada vial la cantidad de 2 mL de NaOH (Hidróxido de Sodio) 1.54 N, con lo cual se neutraliza el medio, se tapó y se mezcla por inversión un par de veces. En esta parte del proceso, el vial funcionará como un blanco, entonces, se introduce en el fotómetro y se lee como “zero”, finalizando, agregamos un sobre de fósforo reactivo y se agita de manera suave durante 2 minutos, para dejarlo reaccionar durante otros 3 minutos más, y leer la concentración final de fósforo. Con este método es posible obtener la concentración de fósforo total como fosfato (PO_4^{-3}) y óxido fosfórico (P_2O_5).

Para los viales de alto rango, se deben dejar en la gradilla de enfriamiento y emplear NaOH con la misma concentración que se empleó para la determinación de fósforo, y una vez que se invierte un par de veces, debemos agregar 0.5 mL de reactante de molibdeno que permita realizar la reacción de fósforo total, dejar un total de 7 min en reacción, y procedemos a colocar el vial blanco para leer a zero, una vez con esa lectura procedemos a leer blanco y luego muestra para asegurar la concentración final de fósforo para alto rango (Figura 2-8).

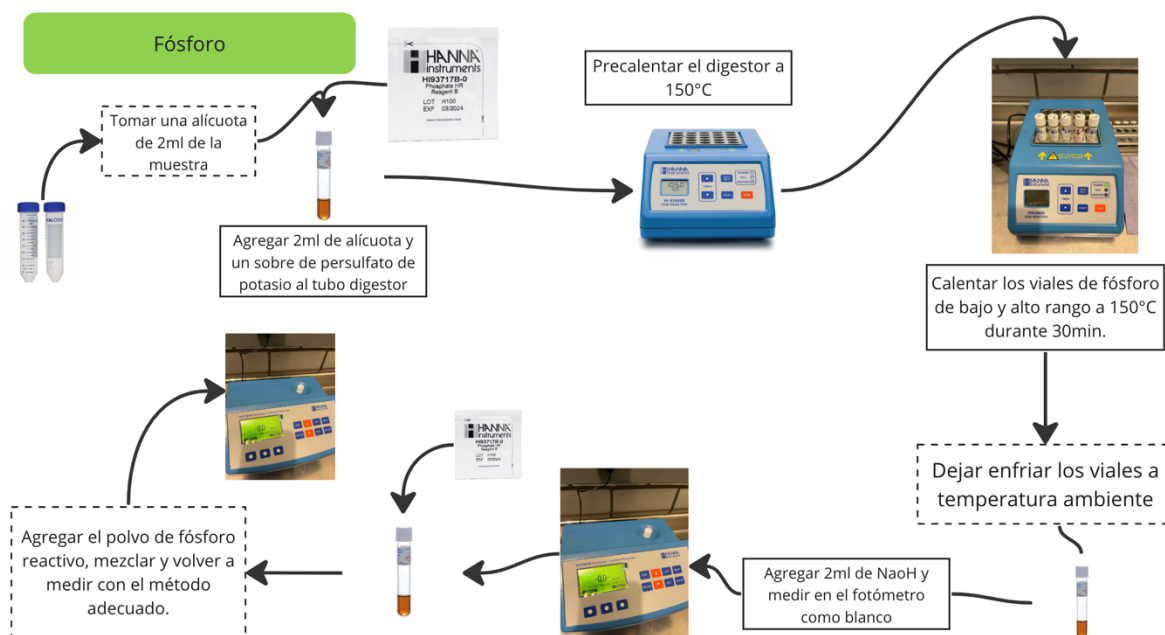


Figura 2-8 Esquema determinación de fósforo

2.1.3.5. Nitrógeno

En el caso de Nitrógeno, se emplean 2 tipos de viales, digestores y reactivos, y de la misma forma, 2 tipos de rangos, bajo rango (0.0 – 25 mg/L) y alto rango (10 – 150 mg/L).

Para los viales de bajo rango y digestores, se agregan 2 mL de muestra recolectada y el contenido de un sobre de persulfato de potasio (este permite convertir todas las formas de nitrógeno a nitrato), y se realizó el mismo paso para realizar el blanco solo que se emplearon 2 mL de agua destilada.

Se taparon, y se agitan durante 30seg para después llevarse al digestor, a una temperatura de 105°C durante 30min. Se pasan a la gradilla de enfriamiento hasta llegar a temperatura ambiente. Al llegar a la temperatura ambiente, se agrega el contenido de un sobre de metabisulfito de sodio a cada vial, se agita un par de veces y se deja reaccionar durante 3min sin mover el vial. Después se agrega el contenido del sobre reactivo de nitrógeno total, moviendo de manera vigorosa, pero, no fuerte durante algunos segundos y después se deja durante 2min para esperar la reacción. Una vez finalizada la reacción del tubo digestor, se pasan 2 mL de ese tubo (digestor), al tubo reactivo, y se mezclan por inversión 10 veces y se espera por 7min más antes de pasar al leer la muestra (**Figura 2-9**).

En el fotómetro se selecciona el método de nitrógeno de bajo rango, y se procedió a medir el blanco, presionando la tecla “zero”, y una vez con la lectura en cero, se procedía a meter el vial reactivo para leer la cantidad de nitrógeno total. Con este método fue posible obtener la concentración de nitrógeno total en forma de amoniacó (NH_3) y nitrato ($-\text{NO}_3$).

Para nitrógeno de alto rango, se lleva a cabo la misma metodología, solo que los colores de los viales cambian, es decir, los viales verdes ahora son los digestores y los viales rojos son los reactivos, de tal forma, que la metodología se mantiene de manera igual, empleando los mismos reactivos y tiempos de reacción.

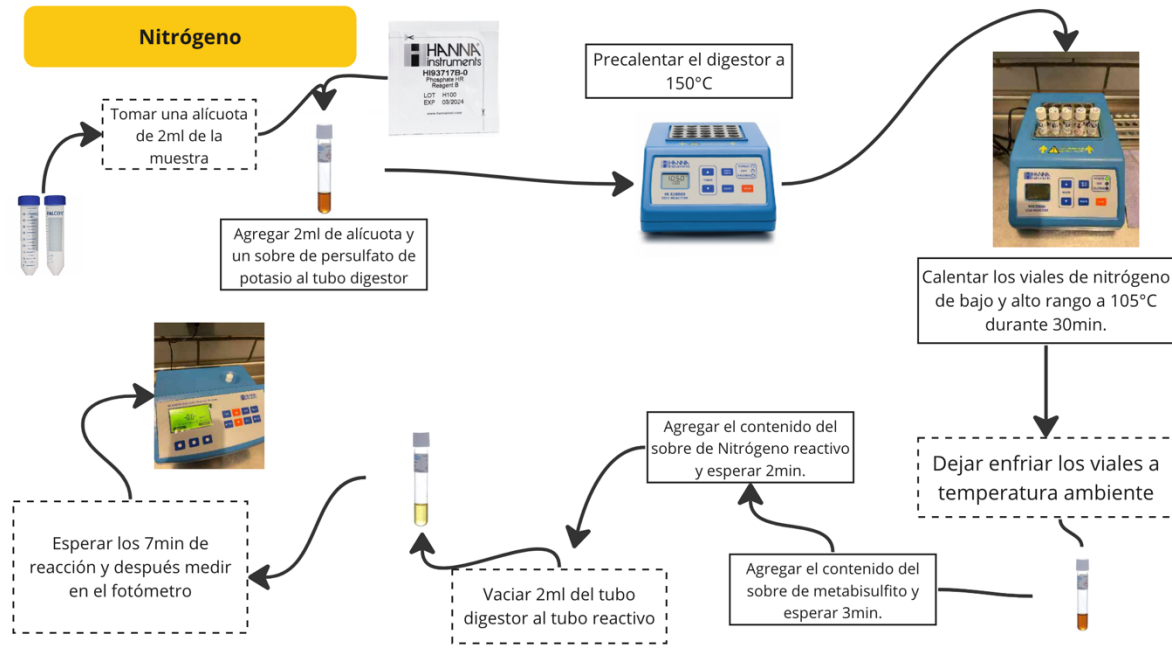


Figura 2-9 Esquema de determinación de Nitrógeno

2.1.4. Análisis estadístico, indicadores e índices de calidad de agua

Para determinar si existen diferencias significativas entre los datos obtenidos en el terreno y los valores recabados in situ, es esencial realizar un análisis de varianza, conocido como ANOVA. Esta metodología no solo nos permitirá efectuar cálculos de medidas centrales y dispersión, como promedios, medianas, desviación estándar, valores máximos y mínimos, sino que también nos facilitará la realización de pruebas de normalidad.

Este proceso de análisis y evaluación se llevará a cabo mediante la utilización de la plataforma Minitab, un software especializado en la realización de análisis estadísticos. A través de la aplicación de estas técnicas, se podrá determinar si las diferencias entre los datos obtenidos in situ y aquellos recopilados en campo son estadísticamente significativas, brindando así un marco sólido para la toma de decisiones en función de la precisión y confiabilidad de los resultados.

Para los indicadores se emplearán los propuestos por CONAGUA ya elaborados para los diferentes parámetros de calidad de agua.

2.1.4.1. Índices de calidad de agua

Los índices de calidad de agua son herramientas utilizadas para analizar y reportar tendencias en la calidad del agua en diferentes fuentes y regiones. Estos índices pueden variar según los parámetros considerados y los métodos de cálculo utilizados.

Existen diferentes autores para la asignación de los índices de calidad de agua (ICA), tal como Horton que emplea los ICA para estimar patrones o condiciones de contaminación acuática (Ott, 1978) y emplea 10 variables, incluyendo las que comúnmente monitoreamos, tales como oxígeno disuelto (OD), coliformes, pH, conductividad eléctrica, alcalinidad, contenido de cloruro y temperatura (Castro et al., 2014).

Para continuar con el trabajo de Horton la Fundación Nacional de Saneamiento (NSF, por sus siglas en inglés), desarrolló otro ICA, o mejor conocido como el método de Brown. En 1970, Brown reúne a 142 panelistas expertos en calidad de agua, y se desarrollaron nueve variables a considerar, asignando pesos para determinar el ICA de acuerdo con la concentración, considerando oxígeno disuelto, coliformes fecales, pH, DBO₅, nitratos, fosfatos totales, cambio en la temperatura, turbiedad y sólidos disueltos totales.

Además, Brown y su equipo de panelistas desarrollaron la escala de palabras descriptoras y rangos de valor del ICA (Wills & Irvine, 1996).

Tabla 7 Descripción del ICA y rango numérico. **Fuente:** (Wils & Irvine, 1996; Castro et al., 2014)

Descripción ICA	Rango numérico (0-100)	Rango numérico (0-1.00)
Muy mala	0-25	0-0.25
Mala	26-50	0.26-0.50
Media	51-70	0.51-0.70
Buena	71-90	0.71-0.90
Excelente	91-100	0.91-1.00

Entre varios índices utilizados para evaluar la calidad del agua, se destaca el Índice de Calidad de Agua de Oregon (OWQI), aplicado en la región de Oregon, Canadá. Este índice desempeña un papel crucial al informar sobre el estado de la calidad del agua y en la formulación de políticas relacionadas con los recursos hídricos. Entre

las variables que aborda el OWQI se encuentran la temperatura, el oxígeno disuelto (medido en porcentaje de saturación y concentración), la demanda bioquímica de oxígeno (DBO), el pH, los sólidos totales, el amonio, los nitratos, el fósforo total y los coliformes fecales.

Además, se ha desarrollado el Índice de Calidad de Agua según DINIUS, fruto de la colaboración entre los trabajos de Horton y Brown. Este índice asigna subíndices específicos según la escala de contaminación, proporcionando una evaluación detallada de diversos aspectos de la calidad del agua.

Asimismo, el Índice de Calidad de Agua de la Universidad (UWQI) es reconocido como una herramienta valiosa. Este índice, más conocido como el Índice de Calidad de Agua Universal, se ha consolidado como una referencia importante en la evaluación integral de la calidad del agua integra más de 23 variables de calidad de agua y es ampliamente usado (Castro et al., 2014).

Debido a los datos obtenidos durante las mediciones de calidad de agua, alguno de estos índices no es posible aplicarlo, en el caso del ICA-NSF nos faltarían los datos de cambios de temperatura, y puesto que no tenemos esa información, no es posible aplicarlo. El Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios (IDEAM) diseño un ICA con la posibilidad de aplicarlo de 5 a 6 variables, las cuáles se incluyen OD, SST, DQO, C.E., relación NT/PT y pH, la ventaja de emplear este ICA es la relación de la calificación de la calidad de agua de acuerdo con los valores de ICA propuestos por Brown en 1970.

$$ICA_{njt} = \sum_{i=1}^n W_i * I_{ikjt}$$

Dónde:

ICA_{njt} Es el índice de calidad de agua para una determinada corriente de agua

W_i Es el ponderado o peso relativo asignativo a la variable de calidad i .

I_{ikjt} Es el valor calculado de la variable i

n Número de variables de calidad de agua involucradas en el cálculo del indicador

Tabla 8 Variables y ponderaciones para el caso de 6 variables. **Fuente:** (IDEAM, 2011)

Variable	Unidad de Medida	Ponderación
Oxígeno disuelto, OD	% Saturación	0.17
Sólidos suspendidos totales, SST	mg/L	0.17
Demanda química de oxígeno, DQO	mg/L	0.17
NT/PT	-	0.17
Conductividad eléctrica, C.E.	μS/cm	0.17
pH	Unidades de pH	0.15

Cálculo de cada variable:

- Oxígeno disuelto

$$PS_{OD} = \frac{O_x * 100}{C_p}$$

O_x Es el oxígeno disuelto medido en campo (mg/l) asociado a la elevación, caudal y capacidad de reoxigenación.

C_p Es la concentración de equilibrio de oxígeno (mg/l), a la presión no estándar, es decir, oxígeno de saturación.

Una vez obtenido el valor del porcentaje de saturación de oxígeno disuelto, se procede a calcular el valor del subíndice:

$$I_{OD} = 1 - (1 - 0.01 * PS_{OD})$$

Sí el porcentaje de saturación de oxígeno disuelto es mayor al 100%:

$$I_{OD} = 1 - (0.01 * PS_{OD} - 1)$$

- Sólidos Suspendidos Totales (SST)

El subíndice de calidad para sólidos suspendidos se calcula como sigue:

$$I_{SST} = 1 - (-0.02 + 0.003 * SST)$$

Sí $SST \leq 4.5$, entonces $I_{SST}=1$

Sí $SST \geq 320$, entonces $I_{SST}=0$

- Demanda Química de Oxígeno (DQO)

Para DQO se emplean los siguientes rangos de cálculo:

Sí $DQO \leq 20$, entonces $I_{DQO} = 0.91$

Sí $20 < DQO \leq 25$, entonces $I_{DQO} = 0.71$

Sí $25 < DQO \leq 40$, entonces $I_{DQO} = 0.51$

Sí $40 < DQO \leq 80$, entonces $I_{DQO} = 0.26$

Sí $DQO > 80$, entonces $I_{DQO} = 0.125$

- Conductividad eléctrica

$$I_{CE} = 1 - 10^{-3.26 + 1.34 * \text{Log}_{10} C.E.}$$

Cuando $I_{CE} < 0$, entonces $I_{CE} = 0$

- pH

Sí $pH < 4$, entonces $I_{pH} = 0.1$

Sí $4 \leq pH \leq 7$, entonces $I_{pH} = 0.02628419 * e^{pH * 0.520025}$

Sí $7 < pH \leq 8$, entonces $I_{pH} = 1$

Sí $8 < \text{pH} \leq 11$, entonces $I_{\text{pH}} = 1 * e^{(\text{pH}-8)-0.5187742}$

Sí $\text{pH} > 11$, entonces $I_{\text{pH}} = 0.1$

- Relación NT/PT

Sí $15 \leq \text{NT/PT} \leq 20$, entonces $I_{\text{NT/PT}} = 0.8$

Sí $10 < \text{NT/PT} < 15$, entonces $I_{\text{NT/PT}} = 0.6$

Sí $5 < \text{NT/PT} \leq 10$, entonces $I_{\text{NT/PT}} = 0.35$

Sí $\text{NT/PT} \leq 5$, ó $\text{NT/PT} > 20$, entonces $I_{\text{NT/PT}} = 0.15$

Con las presentes fórmulas propuestas por el documento técnico del IDEAM, se podrán calcular los índices de calidad de agua.

Y se podrán interpretar de acuerdo a la **Tabla 7**.

2.2. Metodología para la alimentación del software WEAP

2.2.1. Water Evaluation and Planning (WEAP)

WEAP por sus iniciales en inglés (Water Evaluation and Planning) o bien, Planificación y Evaluación del Agua, es un software de modelación que permite la asignación de recursos hídricos limitados para uso agrícola, municipal y ambiental, y requiere de la integración de la demanda, el suministro, calidad del agua y consideraciones ecológicas de la zona. El Sistema de Evaluación y Planificación del Agua, apunta a incorporar estos asuntos en un instrumento práctico y robusto para la planificación integrada de los recursos hídricos (WEAP, 2022).

2.2.2. Antecedentes

En diversas regiones del mundo, enfrentamos desafíos significativos relacionados con el acceso y la gestión de los recursos hídricos. La disponibilidad de agua dulce es sumamente limitada y se ve afectada por múltiples variables, entre las que se incluyen la calidad ambiental, la planificación en el contexto de la variabilidad climática e incertidumbre, así como la necesidad apremiante de desarrollar estrategias que permitan una política de uso del agua sostenible.

En esta última década, ha surgido un enfoque holístico hacia el desarrollo del agua, que sitúa los proyectos de abastecimiento hídrico en el contexto de los lugares donde se demanda el recurso, en armonía con la conservación y protección de la calidad del agua y los ecosistemas (WEAP, 2022).

Este paradigma de enfoque se materializa a través de WEAP, el cual posiciona estas consideraciones en el lado de la demanda de agua. Entre estas consideraciones se incluyen patrones de consumo de agua, eficiencia operativa de equipos, estrategias de reutilización, evaluación de costos y sistemas de asignación de agua. Además, WEAP se encarga de la integración de componentes naturales como evapotranspiración y escorrentía, junto con elementos estructurales tales como plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) y embalses. Este enfoque integral se traduce en un marco de gestión hídrica que aborda tanto los aspectos técnicos como ambientales, con el objetivo de garantizar la disponibilidad y el uso sostenible del recurso hídrico.

2.2.3. Enfoque

WEAP funciona mediante el principio del balance hídrico, permitiendo simular una amplia gama de componentes naturales, y todo aquello que interviene en estos sistemas, tal como la escorrentía por precipitación, flujos bases y la recarga de agua subterránea por precipitación; conservación de agua, derechos de agua y prioridades de asignación, seguimiento de la contaminación y calidad de agua y un módulo financiero para la evaluación de alternativas dentro de los campos de estudio (WEAP, 2022).

Las aplicaciones de WEAP incluyen los siguientes pasos:

Definición del Estudio: Permite establecer el horizonte del tiempo, límites espaciales, componentes del sistema y la configuración del problema.

Cuentas corrientes: Se elabora un panorama de la demanda de agua, las cargas contaminantes, y los recursos y suministros reales para el sistema. Esto puede ser visto como la etapa de calibración en el desarrollo de una aplicación.

Escenarios: Se puede explorar una serie de alternativas de acuerdo con los impactos en el futuro de políticas de abastecimiento, costos, y clima, por ejemplo, en la demanda, suministro, hidrología y posibles fuentes de contaminación de agua.

Evaluación: Los escenarios se evalúan con respecto a la disponibilidad de agua, costos y beneficios, la compatibilidad con los objetivos ambientales y algunos supuestos claves que el usuario pueda colocar.

2.2.4. Alimentación del modelo

Los datos requeridos para la alimentación del modelo son los siguientes, y se abordarán de manera específica en cada una de las siguientes etapas, descritas en la **Tabla 9**.

Tabla 9 Parámetros necesarios para alimentación de modelo

Datos de entrada requeridos para alimentar el modelo	Prioridad	Formato preferido
Demanda		
Uso de Suelo	1	GIS
DEM (Modelo Digital de Elevaciones)	1	GIS
Cobertura de vegetación	1	GIS
Población	2	Excel, texto o CSV
Tipo de Suelo	2	GIS
Geología	2	GIS
Clima		
Precipitación (Series de datos históricas, i.e. promedio mensual en cada año del periodo de modelación)	1	Excel, texto o CSV
Temperatura (Serie de datos históricas, i.e. promedio mensual en cada año del periodo de modelación)	1	Excel, texto o CSV
Radiación solar (Serie de datos históricas, i.e. promedio mensual en cada año del periodo de modelación)		
Viento (Promedio mensual del periodo de modelación)	1	Excel, texto o CSV

Latitud	1	Excel, texto, CSV o capa GIS
Suministro y Recursos		
Reservorios/Represas	1	No hay formato preferido. Los datos son diversos y pueden venir en diferentes formatos.
Datos físicos:		
Capacidad de almacenamiento		
Volumen inicial		
Curva de volumen/elevación		
Evaporación		
Pérdida a agua subterránea		
Datos de operación:		
Máximo nivel de conservación		
Máximo nivel de seguridad		
Máximo nivel inactivo		
Datos para Calibración del Modelo		
Ríos		
Series de tiempo de caudales	1	Excel, texto o CSV

2.2.4.1. Identificación de estaciones climatológicas

El país está dotado de una red de estaciones climatológicas operada por CONAGUA, la cual proporciona información detallada sobre todas las estaciones ubicadas en las proximidades del área de estudio.

Cada estación tiene un pluviómetro que registra diariamente la precipitación pluvial. Cada estación conserva un histórico de datos que abarca un período que oscila entre 30 y 60 años. Estos registros son una valiosa fuente de información que permite un análisis exhaustivo de las pautas de lluvia en el tiempo en la región de estudio, la **Tabla 10** muestra las estaciones cercanas al área de estudio.

Tabla 10 Datos de estaciones climatológicas dentro de la cuenca RH37Gb

ID	Estación	Área (km ²)	Año Inicio	Año Fin	Operando/Inactiva
24024	El Peaje		1963	2018	Operando
24153	Col. Benito Juárez		1993	2016	Operando

24070	OBS	1981	2015	Operando
24111	SMN	1966	2017	Operando
24081	Soledad de Graciano Sánchez	1945	2017	Operando
24069	DGE	1949	2017	Operando
24042	Mexquitic	1942	2011	Operando

2.2.4.2. Etapa 1: Procesamiento y generación de información básica para modelación de abastecimiento de agua

Para abordar esta fase, es imperativo considerar una serie de variables hidrológicas clave. Esto incluye no solo la identificación de las personas actualmente beneficiadas y sus respectivos niveles de consumo, sino también la meticulosa evaluación de la infraestructura existente. Esto abarca tanto los embalses como los sistemas de tratamiento de agua potable y aguas residuales.

Un paso crucial implica la aplicación de pruebas de homogeneidad e independencia a cada una de las estaciones. Este proceso estadístico busca verificar la uniformidad y la independencia de los datos recolectados. Para obtener una comprensión más precisa de las pautas de precipitación, se requiere un análisis estadístico que identifique los meses caracterizados por las precipitaciones más intensas. Esto, a su vez, permitirá la implementación de los métodos de promedio y deducción racional, que serán esenciales para llenar los vacíos presentes en los datos de las estaciones.

La prueba de homogeneidad por secuencias, también conocida como prueba de Helmer, juega un papel crucial en este proceso. Esta evaluación estadística tiene como objetivo determinar si una serie de registros es homogénea, es decir, si no muestra persistencia o tendencia, y si las oscilaciones no son excesivas (Campos-Aranda, 2015). Esta evaluación se expresa mediante la siguiente fórmula:

$$S - C = \pm \sqrt{n - 1} \dots\dots\dots (1)$$

Dónde:

S = Secuencias, C = Cambios y n = total de datos

Esta fórmula proporciona una base sólida para comprender la homogeneidad de las series de datos y contribuye a garantizar la integridad de los resultados obtenidos.

Sí el valor de la diferencia de las secuencias y cambios es menor a la raíz cuadrada del total de los datos, quiere decir que los datos son homogéneos, en cambio sí sucede lo contrario los datos no son homogéneos.

Para el caso de la prueba de independencia, aplicando la prueba de Anderson nos permite comprobar si las variables son independientes entre sí, esto quiere decir que una variable no provee información a la otra y viceversa.

$$r_{xy} = \frac{[\sum_{i=1}^n (xi-\bar{x})(yi-\bar{y})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (xi-\bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (yi-\bar{y})^2}} = \frac{Covarianza}{\sqrt{Sx^2 * Sy^2}} \dots \dots \dots (2)$$

$$Lc = \frac{-1.00 \pm 1.964 \sqrt{n-2}}{(n-1)} \dots \dots \dots (3)$$

No todas las estaciones pueden ser independientes y homogéneas, existirá el caso dónde las estaciones sean no homogéneas, pero, mientras que los datos sean 100% independientes después de aplicar la prueba de Anderson, estos pueden ser empleados sin problema.

Aplicando ambas pruebas para las estaciones obtenemos la siguiente **Tabla 11**.

Tabla 11 Pruebas de independencia y homogeneidad en las estaciones de la zona de estudio

ID	Estación	Prueba de Independencia	de Prueba de Homogeneidad
24024	El Peaje	Independiente	Homogéneo
24153	Col. Benito Juárez	Independiente	No homogéneo
24070	OBS	Independiente	Homogéneo
24111	SMN	Independiente	Homogéneo
24081	Soledad de Graciano Sánchez	Independiente	Homogéneo
24069	DGE	Independiente	Homogéneo
24042	Mexquitic	Independiente	Homogéneo

En el caso de la estación 24153 sus datos no fueron homogéneos, pero, al ser independientes, pueden ser empleados para realizar los estudios hidrológicos correspondientes de la zona.

Para establecer la independencia y homogeneidad mediante las pruebas pertinentes, el siguiente paso implica el proceso de completar los datos faltantes en cada estación. Este procedimiento se llevará a cabo empleando dos enfoques: el método de promedios y el método racional deductivo.

La implementación del método de promedios requiere una fase de análisis detallado. Esto incluye la representación gráfica de los promedios mensuales a lo largo de los años de registro en cada estación. Esta visualización permitirá la identificación precisa de los meses caracterizados por mayores niveles de precipitación. A partir de esta identificación, se podrá proceder al proceso de completar los datos faltantes.

Simultáneamente, el enfoque racional deductivo se empleará en el proceso de llenar los datos ausentes. Este método, respaldado por datos y razonamiento lógico, contribuirá a asegurar la integridad y coherencia de los resultados obtenidos. Estas técnicas en conjunto garantizarán la integridad y solidez de los datos que son fundamentales para un análisis preciso y confiable en el contexto de tu investigación.

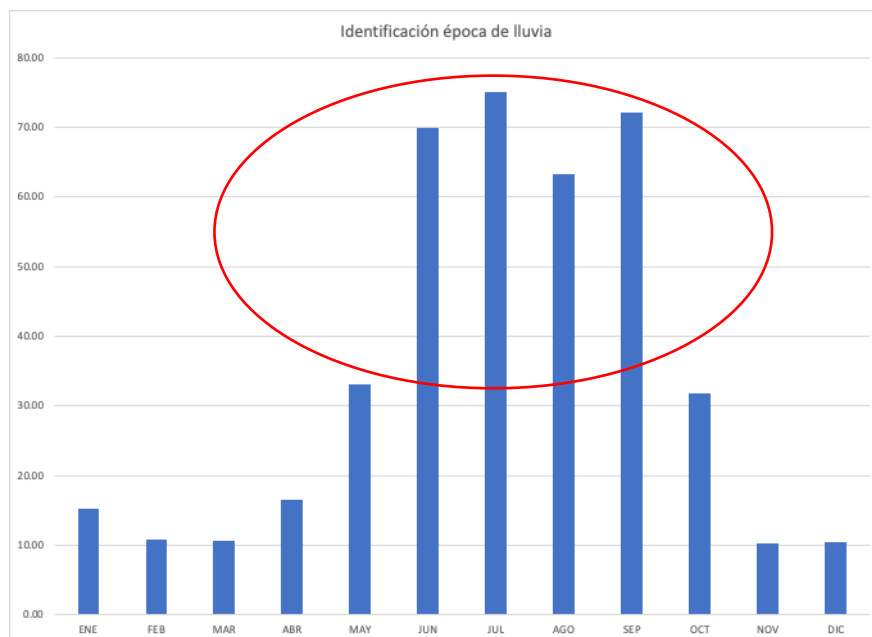


Figura 2-10 Gráfico de identificación de época de lluvia, estación - 24024 "El Peaje"

La **Figura 2-10** exhibe claramente que los meses con mayor cantidad de lluvia son junio, julio, agosto y septiembre. Estos meses se presentan como idóneos para la aplicación del método de promedio, con el propósito de completar los datos faltantes en otras estaciones.

Para los meses restantes, se adoptará el enfoque racional deductivo, una técnica que, como lo plantea Campos-Aranda (2015), permite estimar los valores faltantes mediante un promedio aritmético basado en los registros de ese mismo mes, cuando se cuenta con un mínimo de 10 datos (años) o 20 años en situaciones con dos datos mensuales ausentes. Este enfoque es particularmente útil en casos donde los registros de lluvia mensual presentan años incompletos en una estación determinada.

Con la información íntegra proveniente de las estaciones, se procederá al cálculo de la precipitación media mensual de la cuenca. En este proceso, se aplicará el método de las isoyetas, tal como se establece en el libro "Procesos del Ciclo Hidrológico" de (Campos, 1992). Este método, reconocido por su precisión, tiene en cuenta efectos orográficos y el relieve particular del área, el cual se caracteriza por varias fracturas debido a la presencia de cadenas montañosas.

La culminación del proceso de completar los datos de las estaciones permitirá la aplicación del Índice Estandarizado de Precipitación (SPI). Este índice, desarrollado por McKee en 1933, proporciona una relación entre los déficits de precipitación y diversos impactos, como los niveles de agua subterránea, el almacenamiento de agua en reservorios, la humedad del suelo, la acumulación de nieve y los caudales de los ríos. El cálculo del SPI se ajusta a una distribución de probabilidades, con límites superiores e inferiores, de forma que los valores positivos/negativos del SPI indican que la precipitación es mayor/menor que la mediana (OMM, 2012).

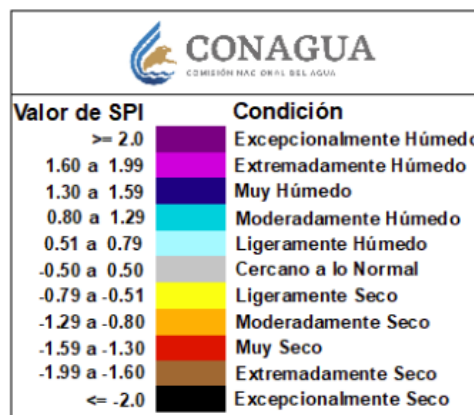


Figura 2-11 Valores de SPI y condiciones. **Fuente:** (CONAGUA, s.f.)

En el contexto de la cuenca de estudio, se empleará la información de la estación 24024, que abarca una gran parte de la cuenca. A partir de sus resultados, será posible aplicar el SPI, lo que a su vez proporcionará la generación de la gráfica representada en la **Figura 2-12**.

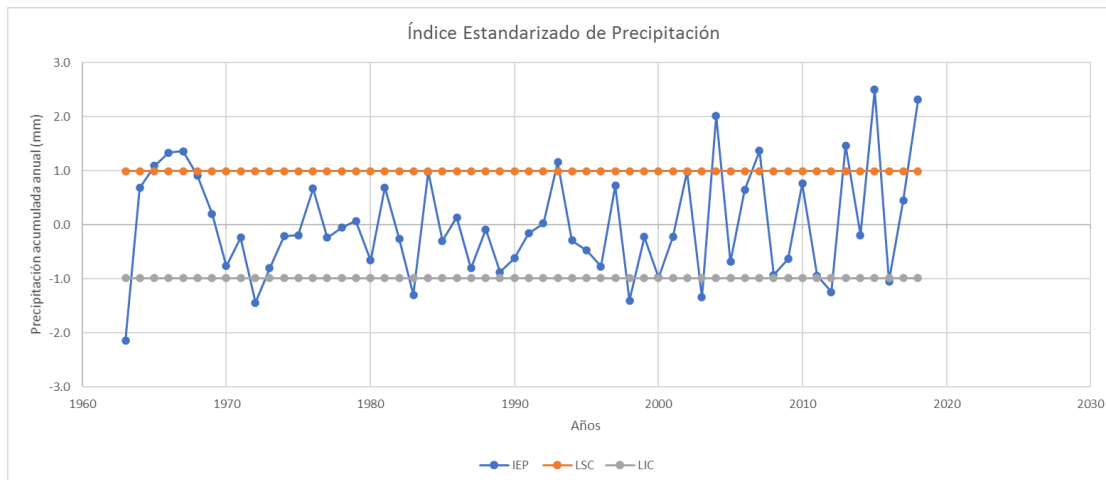


Figura 2-12 Índice Estandarizado de Precipitación (SPI) estación 24024

Al examinar detenidamente la figura, se aprecia claramente que el Índice Estandarizado de Precipitación (SPI), siguiendo la clasificación establecida por CONAGUA, se mantiene mayoritariamente en un rango que va desde "normal" hasta "muy seco". Sin embargo, vale la pena mencionar que existen algunas excepciones a lo largo de los años, donde se presentan condiciones fuera de este rango. En particular, para el año de inicio de la simulación, se observa una marcada tendencia hacia la categoría "muy seco".

Utilizando la capacidad de proyección que brinda la herramienta de Excel, se han generado valores de SPI correspondientes a años posteriores. Estos valores reflejan un patrón que se extiende desde condiciones "secas" hasta "muy secas". Estas proyecciones han sido obtenidas empleando las opciones disponibles en el software, lo cual proporciona una visión más clara de cómo se espera que evolucionen las condiciones de precipitación en los años venideros, de acuerdo con los datos y las tendencias presentes en la serie temporal analizada.

2.2.4.3. Etapa 2: Demandas históricas de agua

En la segunda fase del proceso, es necesario obtener las demandas históricas de agua, conforme al periodo definido en el software WEAP. Para lograr esta tarea, se

toma como punto de partida el último censo de población y vivienda realizado por INEGI en el año 2020. Además, se considera la cantidad de usuarios por localidad, así como las fuentes de abastecimiento y sus respectivas ubicaciones geográficas.

En particular, para calcular la dotación actual de agua destinada a los habitantes de Escalerillas y Pozuelos, resulta esencial tomar en cuenta tanto la frecuencia de llenado de los tinacos de 10,000 litros como la cantidad de personas que se benefician de este almacenamiento. A través de la recopilación precisa de estos datos, se puede determinar la dotación actual en litros por habitante por día y, a partir de este valor, realizar una estimación anual.

Este enfoque permite una representación más fiel de las demandas de agua de estas localidades, lo que, a su vez, es crucial para la creación de modelos y análisis más precisos en el software WEAP. Esta metodología basada en datos sólidos y en análisis cuidadosos es fundamental para garantizar que las estimaciones y proyecciones sean lo más cercanas posible a la realidad, permitiendo así una toma de decisiones informada y fundamentada en la gestión de recursos hídricos.

2.2.4.4. Etapa 3: Descripción de la cuenca

En la tercera etapa del proceso, se emprende una descripción integral de la cuenca, abarcando elementos esenciales como el uso del suelo y la vegetación, los coeficientes de cultivo, la precipitación efectiva, la precipitación y la evapotranspiración de referencia. Este enfoque se fundamenta en el método de modelación seleccionado en el software WEAP, que emplea el Método del Coeficiente Simplificado para la estimación de escurrimientos de lluvia. Este método, reconocido por su simplicidad y utilidad, calcula la esorrentía como la diferencia entre la precipitación y la evapotranspiración de las plantas (SEI, 2017).

Para abordar el aspecto específico del uso de suelos y vegetación, se hará uso de la carta proporcionada por INEGI. La carta detalla minuciosamente los elementos de la cuenca. Para calcular las áreas respectivas, se recurrirá a herramientas de proyección de capas en ArcGIS. Tras completar esta tarea, se podrá acceder a la tabla de atributos para conocer más detalladamente las características de la cuenca en cuanto al uso del suelo y vegetación.

La obtención de los coeficientes de cultivo se llevará a cabo empleando las tablas proporcionadas por la FAO en sus guías para la determinación de los requerimientos hídricos en los cultivos (FAO, 2006). Estos coeficientes son esenciales para estimar las necesidades hídricas de los diferentes cultivos presentes en la cuenca y, en última instancia, contribuyen a una modelación hidrológica más precisa en el software WEAP.

Este enfoque holístico de la descripción de la cuenca, apoyado por fuentes confiables y técnicas de análisis avanzadas, es fundamental para garantizar que el modelo hidrológico creado sea representativo y preciso, sentando así las bases para una gestión informada y efectiva de los recursos hídricos en la zona de estudio.

Tabla 12 Coeficientes de cultivo para los diferentes usos de suelo de la cuenca de estudio.

Fuente: (FAO, 2006)

Uso de suelo	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Pastizal, chaparral y pradera	0	0	0	0	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0	0	0
Bosque	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95
Agrícola	0	0	0	0	0	1.2	1.2	0.6	0	0	0	0
Erosionado	0	0	0	0	0	0.1	0.1	0.1	0	0	0	0

Se ha asignado un valor específico de precipitación efectiva a diferentes tipos de suelo y cobertura vegetal en la cuenca. Este valor se establece en un 5% para suelos erosionados, un 15% para áreas agrícolas, un 25% para pastizales, chaparrales y praderas, y un 30% para zonas boscosas (Díaz, 2005; Suárez, et al., 2009). Esta variación refleja las diferentes tasas de absorción y escorrentía de cada tipo de terreno y vegetación.

En cuanto a la evapotranspiración de referencia, esta se calculó mediante el método de Penman-Monteith. Este método es reconocido por la FAO como una representación precisa y coherente de los factores físicos y fisiológicos que influyen en el proceso de evapotranspiración. Los datos requeridos para este cálculo incluyen la temperatura, la humedad, la radiación solar y la velocidad del viento. Estos datos fueron obtenidos del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) para

garantizar que las variables involucradas en el cálculo estuvieran completas y fiables.

Estos enfoques, respaldados por métodos bien establecidos y datos confiables, contribuyen en gran medida a la precisión y solidez del modelo hidrológico que se está desarrollando en el software WEAP. Este nivel de detalle en la consideración de factores como la precipitación efectiva y la evapotranspiración es crucial para garantizar que las simulaciones realizadas reflejen de manera precisa las condiciones y los procesos que ocurren en la cuenca de estudio.

2.2.4.5. Etapa 4: Embalses

Dentro de los confines de la cuenca de estudio, residen tres embalses de suma importancia. Estos embalses, además de ser vitales para el suministro de agua a la zona metropolitana de la ciudad de San Luis Potosí, desempeñan un papel central en el enfoque de desarrollo sostenible. Por tanto, su consideración exhaustiva es esencial para una comprensión completa de la dinámica de la cuenca.

Estos embalses, como elementos claves de la estrategia de desarrollo, merecen un examen minucioso de su calidad de agua. Este análisis se extiende tanto a las áreas aguas arriba como a las áreas aguas abajo. Un enfoque integral debe incluir la descripción de su capacidad de almacenamiento, así como su temperatura, concentración de Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) y Oxígeno Disuelto (OD).

Los parámetros mencionados, los cuales desempeñan un papel esencial en la determinación de la salud y la calidad del agua, serán obtenidos a partir del Sistema de Información Nacional del Agua (SINA). Esta fuente de datos oficial proporciona información confiable y actualizada sobre estos parámetros cruciales. Una vez recopilados, estos datos serán integrados al modelo hidrológico. Esto permitirá no solo una evaluación precisa del estado actual de estos embalses, sino también su integración efectiva en el marco general de la gestión hídrica de la cuenca.

Esta meticulosa consideración de los embalses y su calidad de agua refleja el compromiso con la sostenibilidad y la gestión informada de los recursos hídricos en la región.

2.2.4.6. Etapa 5: Modelación hidrológica

En esta etapa, se enfocará en la implementación del Método de la Curva del SCS, el cual posibilita la obtención de un valor numérico conocido como Número de Curva (CN). Este valor CN es esencial para el cálculo de la precipitación efectiva generada por una tormenta en el área designada. Esta metodología establece una relación directa entre el uso de suelos, la vegetación y el tipo de suelo específico en la zona de estudio.

Además, esta técnica nos brindará la capacidad de calcular una serie de escurrimientos promedios a lo largo de los meses. Estos resultados son de especial importancia, ya que permiten ajustar y calibrar el modelo. En última instancia, esto nos posibilita obtener una representación de los caudales que se asemeje lo más fielmente posible a los datos históricos disponibles.

2.2.4.7. Etapa 6: Construcción del esquema

En la configuración del esquema dentro del modelo WEAP, se ha seguido un enfoque técnico riguroso. Para esta tarea, todas las capas vectoriales en formato .shp se han empleado utilizando el software ArcGIS. Con la capacidad del Sistema de Información Geográfica (SIG) a la disposición, se ha procedido a realizar un recorte preciso del área de interés correspondiente a la cuenca de estudio. Este proceso de delimitación ha sido llevado a cabo empleando la función de flujos de red aguas arriba. Esta herramienta ha permitido definir con gran precisión la extensión de la microcuenca en relación con la Región Hidrológica 37b, identificada como "Presa San José". La integración de información pertinente relacionada con ríos y embalses ha sido fundamental en este proceso de delimitación.

Esta metodología de delimitación respaldada por herramientas de SIG y software especializado es esencial para garantizar que el modelo WEAP refleje con precisión la dinámica hidrológica de la cuenca de estudio. La integración de datos geoespaciales, junto con un análisis técnico minucioso, contribuye a la creación de un esquema robusto y confiable en el software WEAP, lo que sentará las bases para una evaluación precisa de la problemática de abastecimiento y saneamiento del agua en el área periurbana del poniente de la Ciudad de San Luis Potosí.

Cada uno de los elementos dentro de la cuenca de estudio, se encuentran definidos de acuerdo con la simbología del software, dónde, (●) indica la unidad hidrológica, (●) sitio de demanda estos asignados con prioridad número 1, debido a la importancia del vital líquido en las localidades, (●) PTAR, (▲) embalses, () flujos de conducción como ríos y arroyos y (→) el agua que no es empleada por actividades humanas o requiere tratamiento y necesita ser conducida a una PTAR se representa con flujos de retorno.

2.2.4.8. Etapa 7: Generación de escenarios

La etapa 7 se enfoca en la creación de escenarios que posibiliten la formulación de propuestas más efectivas para abordar la problemática actual en las localidades afectadas. En esta fase, hemos considerado diversos escenarios, entre los que destacan:

- **Crecimiento poblacional y cambio climático**
- **Demandas de agua insatisfechas**
- **Confiabilidad del sistema de derechos de agua e infraestructura hidráulica**
- **Calidad del agua superficial y subterránea**
- **Eficiencia de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR)**

En el contexto del primer escenario, es fundamental calcular los posibles escurrimientos y las precipitaciones futuras, considerando los efectos del cambio climático. Para abordar esta tarea, nos basamos en los informes proporcionados por el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC), una fuente ampliamente reconocida y confiable en este ámbito. Estos informes proporcionan proyecciones basadas en datos científicos sólidos y análisis rigurosos sobre cómo el cambio climático podría impactar los patrones de precipitación y escurrimiento en la región.

Integrar estos datos en el modelo WEAP nos permitirá obtener una visión más completa de cómo podría evolucionar el suministro de agua en el futuro, considerando tanto las demandas crecientes como las condiciones climáticas

cambiantes. Esta comprensión es esencial para informar las decisiones de planificación y desarrollo que se requieren para abordar los desafíos de abastecimiento y saneamiento del agua en el área periurbana del poniente de la Ciudad de San Luis Potosí.

2.3. Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS)

2.3.1. SCALL (Sistemas de Captación de Agua de Lluvia)

2.3.1.1. Identificación de localidades y recopilación de datos climáticos

Seleccionar las localidades rurales del poniente de la ciudad de San Luis Potosí donde se llevará a cabo la implementación de los Sistemas de Captación de Agua de Lluvia (SCALL). En este caso, son las localidades afectadas por el problema de abastecimiento las cuáles son Escalerillas y Pozuelos.

Recopilar datos climáticos históricos de las estaciones climatológicas locales para comprender las variaciones en los patrones de lluvia a lo largo del tiempo.

La selección de la estación fue la mencionada estación 24024 “El Peaje” ya que abarca la gran mayoría de la cuenca de estudio y además ya fue estudiada durante el subcapítulo para la alimentación del modelo WEAP.

2.3.1.2. Elección de herramientas de simulación

Seleccionar entre las herramientas proporcionadas por CONAGUA y SamSamWater Rainwater Harvesting Tool, teniendo en cuenta sus funcionalidades y capacidades para adaptarse a las condiciones locales.

2.3.1.3. Diseño de SCALL con herramientas de simulación

Utilizar las herramientas de simulación seleccionadas para diseñar los SCALL en cada localidad. Esto incluirá la selección del material o tipo de construcción del techo, la estimación de la dotación necesaria y el área de captación.

La selección del material es importante, dado que en esto se basa en el coeficiente de escurrimiento. El coeficiente de escurrimiento de acuerdo con Zegarra-Tarqui et al., 2015, es la razón entre volúmenes escurridos y precipitados, es decir, la cantidad de precipitación aprovechable que no será absorbida por los materiales, por su porosidad y naturaleza (Zegarra-Tarqui et al., 2015).

En el caso particular de los habitantes de Escalerillas y Pozuelos, la mayoría de sus casas están hechas de concreto hidráulico, lo cual permite asignar un Kc de 0.9.

Tabla 13 Valores de Kc propuestos para diseño de SCALL CONAGUA

Material o tipo de construcción	KC
Cubiertas metálicas o plásticas	0.95
Techo imperm. o cubiert c/mat. duro (p.ej. Tejas)	0.9
Concreto hidráulico	0.9
Calles asfaltadas	0.85
Lámina corrugada	0.8
Adoquinado o empedrado con cemento	0.75
Terrazas	0.6
Adoquín sin juntear	0.6
Terracerías	0.4

Los valores expresados en la tabla anterior funcionan con la herramienta de CONAGUA, mientras que para SamSamWater, se asignan en la siguiente tabla, obteniendo los siguientes Kc.

Tabla 14 Valores de Kc propuestos por SamSamWater para diseño de SCALL

Material o tipo de construcción	KC
---------------------------------	----

Cubiertas metálicas	0.9
Tejas	0.8
Concreto hidráulico	0.7
Techo de paja	0.2

Para esta comparación, usaremos el $K_c = 0.7$ que provee la herramienta de SamSamWater, y se procederá a generar una comparación de resultados.

Debemos aprovechar la flexibilidad proporcionada por la herramienta de CONAGUA para ajustar la cantidad de lluvia mensual según las condiciones climáticas específicas y las fluctuaciones en los patrones de lluvia. Debido a la herramienta SamSamWater Rainwater Harvesting Tool que acceder a datos climáticos precisos de la base de datos CRU CL 2.0 y garantizar que el diseño del SCALL esté en concordancia con las condiciones climáticas vigentes.

2.3.1.4. Evaluación de la Eficiencia de los SCALL

La incorporación de estas herramientas de simulación resultará fundamental para evaluar con precisión la eficiencia y funcionamiento de los Sistemas de Captación de Agua de Lluvia (SCALL) en las distintas localidades. La capacidad de considerar la cantidad de lluvia generada en la zona, en combinación con los datos recopilados de las estaciones climatológicas, simplificará y agilizará el proceso de trabajo con la información.

Mediante estas herramientas, podremos realizar análisis exhaustivos de cómo los SCALL responderán a variaciones en los patrones de lluvia. Dado que la eficacia de estos sistemas está directamente relacionada con la cantidad de agua de lluvia disponible para la captación, la capacidad de ajustar la simulación según los datos climáticos reales aumentará la precisión de los resultados.

2.3.2. Humedales

La elección del manual "Humedales Construidos" de Vidal & Hormazábal (2018) y "Humedales para tratamiento" de Dotro, et al. (2017) para el diseño y selección de los humedales es una decisión acertada y respaldada por la experiencia y el conocimiento acumulado en el campo del tratamiento de aguas residuales.

Estos manuales brindan una valiosa guía para la planificación, diseño y construcción de humedales construidos, enfocados en el tratamiento de aguas residuales. Al elegir estas fuentes, nos beneficiamos de enfoques probados y técnicas establecidas que han demostrado su eficacia en la mejora de la calidad del agua.

El manual "Humedales Construidos" proporciona una base sólida para comprender los principios detrás del diseño de humedales construidos, incluyendo aspectos como la selección de plantas adecuadas, la optimización del flujo de agua y la integración de procesos biológicos para el tratamiento de aguas residuales.

Por su parte, "Humedales para tratamiento" ofrece una perspectiva detallada sobre cómo los humedales pueden ser utilizados específicamente para el tratamiento de aguas residuales, abordando aspectos técnicos y prácticos relacionados con la implementación exitosa de este tipo de sistemas.

Estos manuales no solo proporcionarán orientación en el diseño de los humedales, sino que también contribuirán a la eficacia y sostenibilidad a largo plazo de las soluciones propuestas.

2.3.2.1. Selección del Sitio

Se realiza un análisis exhaustivo de los posibles sitios para la ubicación del humedal. Se consideran factores como la topografía, el acceso a aguas residuales, la disponibilidad de terreno y la cercanía a las fuentes de agua a tratar.

En esta sección, se ha procedido a la cuidadosa selección de la ubicación en la que se halla la descarga del efluente no tratado proveniente de la PTAR (**Figura 2-13**). La elección de esta ubicación no solo garantiza el acceso conveniente a las aguas a ser tratadas, sino que también se ha tenido en cuenta la naturaleza adaptable del terreno que acogerá el humedal artificial. Esta elección se fundamenta en la facilidad inherente de modificar el terreno, permitiendo ajustes eficientes a medida que el proceso de implementación avanza. La flexibilidad de esta selección es respaldada por la habilidad de adaptación del humedal, una característica intrínseca que posibilita mejoras continuas y, al mismo tiempo, contribuye a la mejora del ecosistema preexistente.



Figura 2-13 Ubicación y efluente PTAR



Figura 2-14 Posible ubicación del humedal, Escalerillas, S.L.P.

La **Figura 2-14** ilustra las posibles ubicaciones del diseño y construcción de los humedales artificiales de tratamiento de agua residual.

2.3.2.2. Diseño Hidráulico

Se determina la configuración hidráulica del humedal, incluyendo el flujo del agua a través del sistema de humedales. Se establece el tiempo de residencia adecuado para el tratamiento de las aguas residuales (**Tabla 15**).

Tabla 15 Dimensionamiento del humedal

Parámetro	Valor	Unidades	Referencia
Consideraciones hidráulicas			
Flujo de entrada, Q	86.4	m ³ /día	
Tiempo de retención hidráulico TRH	$TRH = \frac{S * h * n}{Q}$	días	Ley de Darcy
Tamaño porosidad efectiva D ₁₀	10	mm	(García & Corzo, 2008)
Porosidad media	35-38	%	(García & Corzo, 2008)
Conductividad eléctrica, K _s	1,000-10,000	$\frac{m^2}{m^3 * d}$	(García & Corzo, 2008)
Consideraciones biológicas y fisicoquímicas			
Área requerida	$S = \frac{Q}{K_A} \ln \left[\frac{C_0 - C^*}{C_1 - C^*} \right]$	m ²	(Kadlec & Knight, 1996)
K _{DBO5}	0.493	Adimensional	(Kadlec & Knight, 1996)
K _{SST}	8.22	Adimensional	(Kadlec & Knight, 1996)
N Total	0.074	Adimensional	(Kadlec & Knight, 1996)
P Total	0.033	Adimensional	(Kadlec & Knight, 1996)

De acuerdo con los manuales ya mencionados, y los autores en cuestión de cada uno de los elementos del diseño hidráulico, podemos verificar que la carga máxima de un humedal subsuperficial de DBO₅ es de 3-7.5g DBO₅/m²*d, de carga orgánica de trabajo (Tabla 16,Tabla 17), con estos datos se permitirá adaptar la superficie del humedal para reducir al 95% la carga de contaminantes presentes en el agua residual.

Tabla 16 Ficha técnica del humedal de tratamiento

Parámetro	Valor	Unidades
Flujo promedio	86.4	m ³ /día
DBO ₅ influente, C ₀	150	mg/L
SST influente, C ₀	116	mg/L
N _{total} influente, C ₀	150	mg/L
N _{total} efluente, C _f	15	mg/L
DBO ₅ efluente, C _f	30	mg/L
SST efluente, C _f	20	mg/L
Conductividad hidráulica, K _s	4,000	$\frac{m^3}{m^2 * d}$
Pendiente, s	0.01	m/m
Porosidad	35	%
K _{DBO5}	0.493	Adimensional
K _{SST}	8.22	Adimensional
N Total	0.074	Adimensional

Tabla 17 Concentraciones de fondo (Kadlec & Knight, 1996)

Parámetro	DBO	SST	NT	PT
C* (mg/L)	3.5+0.053*C ₀	7.8+0.063*C ₀	1.50	0.02

Por lo tanto:

$$C^*_{DBO_5} = 11.45 \text{ mg/L} \quad C^*_{SST} = 15.108 \text{ mg/L} \quad C^*_{NT} = 1.5 \text{ mg/L}$$

2.3.2.3. Selección de vegetación

Se eligen las especies de plantas acuáticas que mejor se adapten al tipo de aguas residuales y las condiciones del sitio. Estas plantas juegan un papel crucial en la remoción de nutrientes y contaminantes.

Para la selección de la vegetación, se encuentran 2 plantas principales que se desarrollan de manera fácil dentro del ecosistema y las condiciones climatológicas que presenta la zona, particularmente la Espadaña (*Typha angustifolia*) y el Carrizo (*Phragmites spp*).

La espadaña, tiene capacidad de absorber nutrientes, en particular el nitrógeno y fósforo en el agua, y ayudan con el proceso de remoción de contaminantes, puede albergar comunidades microbianas beneficiosas para el proceso de depuración biológica del agua, y permite la oxigenación del agua y absorción de metales pesados, lo que contribuye de manera general a la calidad del agua (Song, 2021; Andagua, et al., 2022). Además, resiste temperaturas entre 10-30°C que es lo deseable para el proceso de remoción de contaminantes y un rango efectivo de 4.0-10.0 de pH (Vidal & Hormázabal, 2018).



Figura 2-16 Carrizo (*Phragmites spp*). Fuente: (Vidal & Hormázabal, 2018)



Figura 2-15 Espadaña (*Typha angustifolia*). Fuente: (Vidal & Hormázabal, 2018)

En el caso del carrizo, posee muchas capacidades entre ellas, eliminación de demanda bioquímica de oxígeno entre 50 y 60, mientras que para la demanda química de oxígeno tiene valores de eliminación de entre 60 y 70%, la eliminación de nitrógeno total y fósforo total entre el 30 y 60% del agua y reporta eficiencias de eliminación de SST por arriba del 75%, además de resistir a valores bajos de pH y estabiliza el suelo en las áreas de humedales (Rojas et al., 2013).

2.3.2.4. Operación y mantenimiento

Se desarrolla un plan detallado para la operación y el mantenimiento del humedal. Esto incluye la poda y manejo de la vegetación, la monitorización de los parámetros de calidad del agua y la realización periódica de labores de limpieza.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN DEL ANÁLISIS ESPACIAL Y MODELADO DE ESCENARIOS DE DEMANDA, DISPONIBILIDAD Y CALIDAD DE AGUA Y NECESIDADES DE SANEAMIENTO

3.1. Diagnóstico de abastecimiento de agua potable

3.1.1. Infraestructura

La investigación se enmarca en el poniente de la ciudad de San Luis Potosí, donde nos sumergimos en las preocupaciones fundamentales de abastecimiento y saneamiento del vital recurso, el agua.

Es importante subrayar que no todas las comunidades en la lista enfrentan desafíos en el suministro, pero sí en lo que respecta al saneamiento. En particular, Col. Insurgentes y Mesa de Conejos se encuentran en esta categoría.

Por otro lado, en Escalerillas, Casa Blanca, Las Pilitas, La Maroma y Pozuelos, la lucha por garantizar un suministro adecuado y la adecuada gestión de aguas residuales es una realidad palpable. Mención aparte merece el hecho de que las localidades de Casa Blanca, Las Pilitas y La Maroma son parte de la comunidad de Escalerillas. De acuerdo con la trayectoria investigativa y las últimas contribuciones al campo, Escalerillas emerge como un epicentro de análisis más profundo con relación a estos desafíos.

3.1.1.1. Antecedentes en Escalerillas con Infraestructura

Según el análisis realizado por José Robledo en 2013, se revela que la situación en Escalerillas está marcada por conflictos políticos que han dejado al descubierto una deficiencia en el manejo de recursos hídricos.

INTERAPAS, la entidad encargada de proveer agua potable en el municipio de San Luis Potosí se ha desentendido de Escalerillas, desencadenando una serie de efectos adversos. La ausencia de pozos profundos para abastecer a la población agrava la situación, dejando a la localidad dependiendo de estrategias alternativas para acceder al vital recurso. En este contexto, la Ley de Aguas del Estado de San Luis Potosí, en su artículo 71, establece claramente que los servicios públicos en asentamientos humanos regulares son responsabilidad de los municipios. Este deber implica proporcionar abastecimiento y saneamiento en condiciones óptimas

que satisfagan las necesidades de la población y resguarden el entorno, tal como lo indica el artículo 76 de la misma ley (Ley de Aguas para el Estado de San Luis Potosí, 2022, p.36).

No obstante, la realidad difiere significativamente. El ayuntamiento ha adoptado un enfoque poco convencional, colocando tinacos a lo largo de la carretera para afrontar la urgencia del suministro de agua. El agua llega en pipas desde la capital y se almacena en estos recipientes, para luego estar a disposición de los habitantes de manera informal. La falta de regulación se traduce en un uso descontrolado del recurso, donde los vecinos consumen agua sin límites definidos. Además, esta institución coordina el suministro de agua de manera programada, operando de lunes a viernes, y distribuyendo en puntos estratégicos dentro de la localidad, siguiendo un plan predefinido por la institución. Para asegurar esta provisión, se emplean ocho pipas con capacidades de 8 y 20 metros cúbicos respectivamente. No obstante, es relevante subrayar que estas pipas no solo abastecen a Escalerillas, sino que también proveen agua a otras áreas rurales en las proximidades de la capital.

El Ayuntamiento desempeña un papel esencial en el funcionamiento de este sistema, ya que se encarga tanto del mantenimiento preventivo como correctivo de las pipas. Esta responsabilidad implica asumir los costos asociados a la reparación y el cuidado de estas unidades. A través de este esfuerzo, se procura asegurar que el suministro de agua sea lo más confiable y efectivo posible para todas las comunidades involucradas.

A pesar de estos esfuerzos, esta modalidad de abastecimiento también revela la carencia de un sistema de distribución de agua eficaz y equitativo en la localidad. La dependencia de pipas para la distribución de agua plantea desafíos logísticos y de coordinación que pueden afectar la regularidad y disponibilidad del recurso para los habitantes.

Esta modalidad de abastecimiento, aunque beneficiosa para algunos, tiene sus inconvenientes. La distribución de agua se basa en un acuerdo tácito, donde un vecino asignado firma un rol que da paso al llenado del tanque comunitario. Este proceso también requiere del mantenimiento y limpieza del tinaco, tareas que recaen en los habitantes. Para obtener un nuevo tinaco, es necesario presentar una solicitud al ayuntamiento, la cual debe pasar por un proceso de verificación técnica y evaluación del terreno. Esta solicitud, en ocasiones, puede incluir el apoyo financiero del ayuntamiento para construir la base y adquirir el material necesario.

La fuente de abastecimiento de agua en Escalerillas proviene de los pozos "Salk" y "Los Magueyes". El Ayuntamiento asegura que la calidad del agua cumple con los estándares establecidos, equiparándola a la que se suministra en toda la Zona Metropolitana de San Luis Potosí.

Es importante destacar que esta compleja realidad ha dado lugar a un mercado de vendedores particulares de agua, cuyos precios no están regulados debido a la falta de legislación al respecto. Esta situación plantea un desafío adicional en la gestión equitativa y sostenible del recurso hídrico en Escalerillas (Robledo, 2013).

3.1.1.2. Actualidad dentro de la problemática para Escalerillas

En la actualidad, el sistema de abastecimiento de agua en San Luis Potosí se mantiene sin cambios significativos. El sistema implementado por el Ayuntamiento, con el uso de tinacos y pipas, sigue siendo la principal fuente de agua para la población.

Según un estudio realizado en 2018 por Mballa y Hernández, el sistema de abastecimiento de agua potable en la localidad de Escalerillas, San Luis Potosí, se caracteriza por una alta desigualdad en el acceso al servicio. El 25% de las viviendas cuentan con una red de agua entubada, mientras que el 75% restante se abastece a partir de pipas o por acarreo de agua almacenada en tinacos ubicados en la vía pública (Mballa & Hernández, 2018).

Al examinar los datos del Inventario Nacional de Viviendas de 2010, se registró un acceso al suministro de agua potable del 23%. Contrastando con el estudio de Mballa y Hernández en 2018, donde se informó de un acceso del 25% a la red de agua potable, y posteriormente, con los resultados del inventario más reciente de 2020, que revela un aumento al 33% de cobertura en la red de agua potable en la región (**Figura 3-1**). Esta evolución denota un incremento en el acceso a la red de

agua potable, aunque es importante señalar que aún persisten problemas relacionados con la utilidad de esta red.

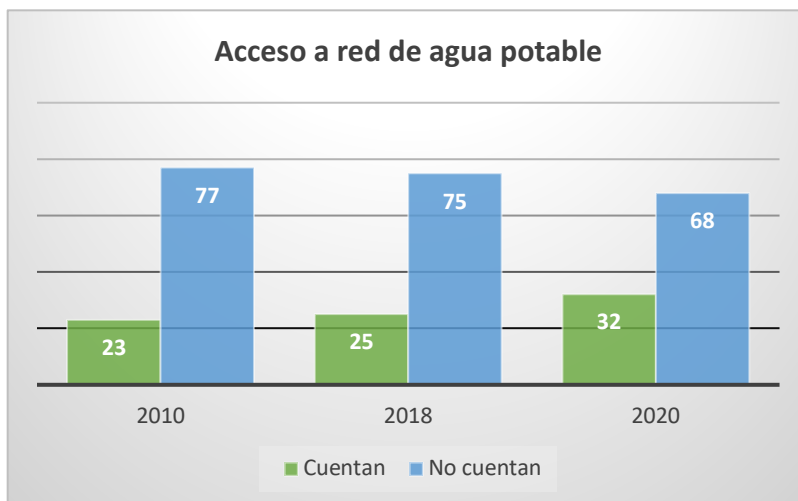


Figura 3-1 Acceso a red de agua potable en Escalerillas, 2010, 2018 y 2020. **Fuente:** (INEGI, 2010; Mballa & Hernández, 2018; INEGI, 2020)

En la localidad de Escalerillas, el abastecimiento de agua potable se basa en el uso de 55 tinacos públicos, con una capacidad de 10,000 litros cada uno (Figura 3-2). Los tinacos son llenados una vez por semana con agua transportada en pipas desde el pozo del Parque Morales, en la ciudad de San Luis Potosí. Cada tinaco sirve a un promedio de 10 familias de cuatro a seis integrantes.

Sin embargo, el sistema de abastecimiento enfrenta algunos desafíos. En primer lugar, no existe un control sobre el consumo de agua. Esto ha llevado a que algunas familias extraigan más agua de la que les corresponde, lo que deja a otras familias con menos agua disponible.

El mercado de venta de agua en la localidad es muy competitivo, con precios que alcanzan los \$1,200 por 10,000 litros de agua, familias que cuentan con aljibe en sus casas, contratan pipas particulares para llenarlos.



Figura 3-2 Sistema de abastecimiento de agua actual en la localidad de Escalerillas, S.L.P.

El sistema de abastecimiento implementado obliga a los habitantes a recolectar el agua disponible en cualquier recipiente que tengan a su alcance (**Figura 3-3**), maximizando su eficiencia. Sin embargo, no todos tienen acceso a una bomba de agua para llenar los recipientes o los tinacos, en caso de tener alguno.



Figura 3-3 Recipientes empleados para la captación de agua potable

Y esto ocasiona qué, cuando la población no tiene la suficiente cantidad de agua necesaria para sus actividades del día a día, está en peligro de contraer más enfermedades y su calidad de vida no es buena. Cuando sucede lo contrario, las condiciones son mejores y la salud mejora (Díaz de León, 2017).

“El arroyo la Maroma”, denominado así por los habitantes, atraviesa por la localidad de Escalerillas y algunos de sus habitantes utilizan el agua para lavar la ropa, el aseo de las casas, entre otros.

De acuerdo con los datos anteriores, en Escalerillas, el consumo por persona varía aproximadamente de los 17 litros a los 20 L/día; lo cual es sustancialmente menor a los 100 litros/persona/día que sugiere la OMS y los objetivos del Desarrollo Sostenible, para que una persona satisfaga sus necesidades básicas de consumo y de higiene (CONANP, 2019).

Y dentro de la normativa federal, de acuerdo con la biblioteca digital MAPAS (Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento) en su libro 4 “datos básicos para proyectos de agua potable y alcantarillado” elaborado por CONAGUA, menciona que la cantidad mínima a abastecer en las comunidades de tipo rural es de 35 litros/persona/día para actividades básicas (CONAGUA, 2019b; CONAGUA, 2021a; CONAGUA, 2021b).

Es relevante señalar que la presa del Peaje, crucial para el almacenamiento de agua pluvial, enfrenta problemas de infiltración en su estructura, lo que dificulta su función y acentúa las complicaciones en el abastecimiento de agua en la localidad.

Además, se erigió una planta potabilizadora en Escalerillas que, lamentablemente, aún no está operativa debido a limitaciones de infraestructura, un desafío agravado por los problemas persistentes en la presa del Peaje, a la cual está conectada.

En el año 2019, CONAGUA se reunió con INTERAPAS y CEA para abordar las deficiencias en las instalaciones de suministro de agua potable. En este contexto, se estableció una colaboración tripartita, en la que se compartía el presupuesto asignado para obras relacionadas con agua potable, el funcionamiento de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales en la localidad, una red de atarjeas para la captación de agua residual y una red de drenaje. Este presupuesto se dividía equitativamente entre las instituciones (CEA, INTERAPAS y CONAGUA).

Para el año 2020, gracias a esta cooperación interinstitucional, se logró implementar la primera fase de la red de abastecimiento de agua potable. Asimismo, se planeaba continuar con la ampliación del sistema en una segunda etapa para lograr una cobertura total del suministro de agua en la zona. Sin embargo, debido a un cambio en el gobierno estatal, el acuerdo tripartito se interrumpió y los \$45,000,000 de pesos asignados para esta obra no fueron destinados como se había planeado. Esta situación ha llevado a una pausa en la evolución de la infraestructura de abastecimiento de agua potable en la localidad de Escalerillas (Baltazar, 2022).

Por lo tanto, el estado actual de la infraestructura de suministro de agua potable está en un punto muerto, a la espera de retomar la segunda fase de la red de abastecimiento en Escalerillas.

Es lamentable observar que hasta el momento no se ha desarrollado ningún plan o estrategia concreta para determinar el uso funcional de este pozo. No se ha definido si se destinará para apoyar el abastecimiento de agua en la localidad de Escalerillas durante las épocas de estiaje, o si su función será dirigida a alguna comunidad ubicada más al poniente de la localidad.

Además de todas estas infraestructuras, también debemos mencionar la presencia de una planta potabilizadora de agua con una capacidad de tratamiento de 10 L/s. Sin embargo, lamentablemente, esta planta no ha podido operar debido a los problemas actuales que enfrenta la Presa "El Peaje", a la cual está conectada. La presa presenta fugas en su cortina, lo que ha llevado al gobierno estatal a emprender trabajos de reparación. Se están instalando barrenos y sellando las

fugas con un polímero reforzador para fortalecer la estructura de la cortina de la presa.

A pesar de que el ayuntamiento ha asumido la responsabilidad del abastecimiento de agua en Escalerillas, se ha intentado en repetidas ocasiones que INTERAPAS se haga cargo de toda la infraestructura y la operación de lo instalado. Sin embargo, lamentablemente, estas gestiones han sido respondidas de manera negativa por parte de INTERAPAS, a pesar de su proximidad a la zona metropolitana. Para abordar esta situación, también se ha explorado la posibilidad de crear una junta de agua y saneamiento dedicada exclusivamente a esta zona. El objetivo sería lograr, en un futuro, una cobertura integral de agua potable y operar todos los sistemas ya mencionados de manera efectiva.

Además, como parte de la estrategia para resolver esta problemática, se está considerando la implementación de un pago representativo por el abastecimiento de agua en pipas. Este pago ayudaría a cubrir los gastos actuales relacionados con el abastecimiento de agua y permitiría asumir que el problema está en proceso de solución. Esta medida también se alinea con las normativas legales y las pautas establecidas por la Organización Mundial de la Salud (OMS) para garantizar el acceso adecuado al agua potable. En última instancia, se espera que estas acciones conjuntas puedan proporcionar una solución sostenible a la problemática del abastecimiento de agua en Escalerillas, brindando a sus habitantes la cobertura y calidad de agua que merecen.

3.1.1.3. Mesa de Conejos

La localidad cercana de Mesa de Conejos ha logrado establecer una red de abastecimiento de agua independiente. Esta red fue construida en el año 2010 por el Ayuntamiento de San Luis Potosí en colaboración con el comisariado ejidal de la misma población. El proceso implicó un estudio geofísico exhaustivo y la perforación de un pozo, con una inversión total de 3.5 millones de pesos. Estas iniciativas culminaron en la creación de una red de distribución de agua de 8,400 metros, la instalación de 310 conexiones domiciliarias y la construcción de un tanque elevado con una capacidad de almacenamiento de 30 metros cúbicos. La responsabilidad de administrar esta infraestructura recae en el Comité Rural del Agua de Mesa de Conejos.

No obstante, el Comité enfrenta varios desafíos en la operación de esta red de distribución. Entre estos desafíos se encuentran los daños ocasionados por el tránsito de vehículos, que afectan la integridad de la infraestructura. Además, se ha observado un uso inapropiado del agua, lo que ha llevado a la necesidad de incrementar la tarifa a \$10 por metro cúbico. Los fondos recaudados mediante esta tarifa se destinan al mantenimiento continuo de la red y al pago de salarios para los miembros del Comité de Aguas que operan y gestionan el sistema. Algunos residentes han expresado su opinión de que Escalerillas no ha podido establecer una red de abastecimiento similar debido a problemas políticos y sociales presentes en la comunidad. Estos problemas se relacionan con cuestiones de propiedad de terrenos y, en algunos casos, con el interés de ubicarse en parcelas que son propiedad de ejidatarios para simplificar los procedimientos involucrados en la construcción de la infraestructura. (Robledo, 2013).

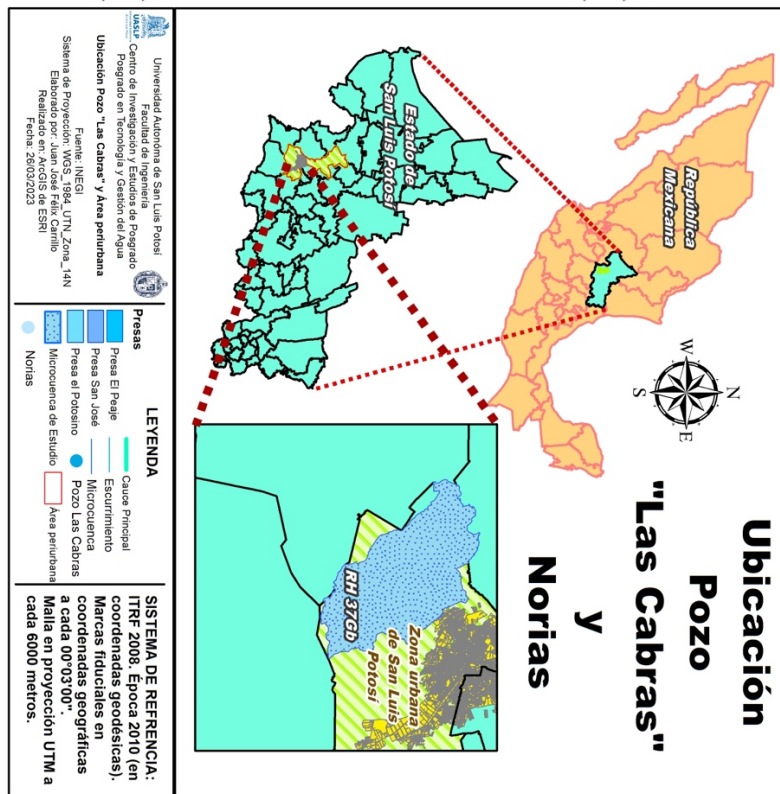
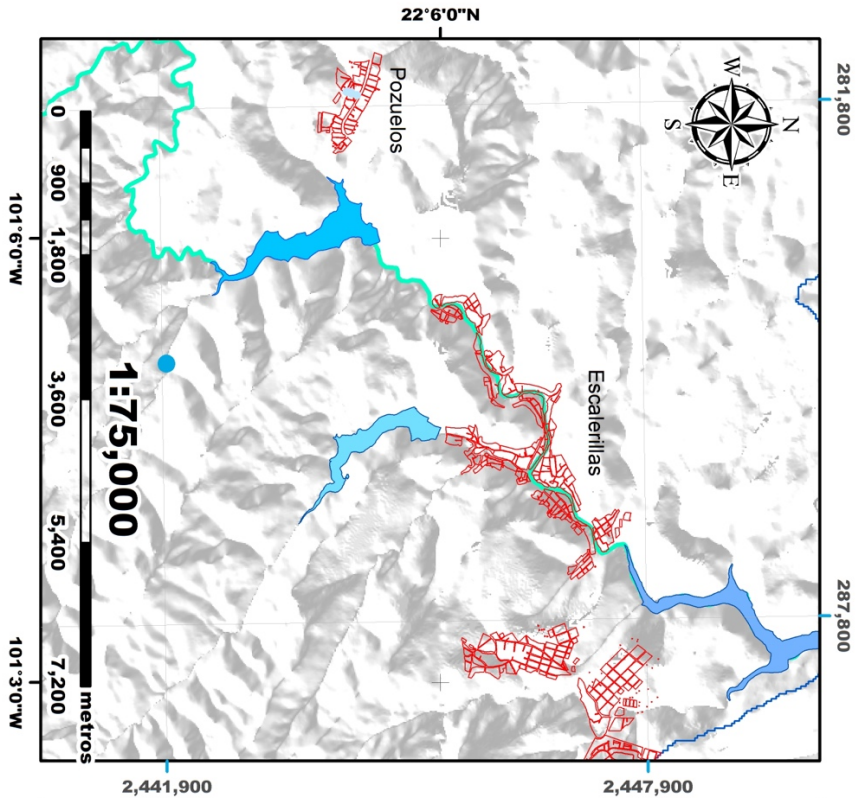


Figura 3-4 Ubicación del pozo

3.1.1.4. Pozuelos

La situación en la localidad de Pozuelos es altamente preocupante debido a la escasez de infraestructura para la distribución de agua potable. Esta problemática se vuelve aún más evidente cuando se contrastan los datos del Censo de Población y Vivienda entre los años 2010 y 2020, lo que resalta los cambios significativos que han tenido lugar en esta comunidad.

En el año 2010, según los resultados del Inventario de Población y Vivienda, apenas se registró un 1% de acceso a una red de agua potable. En ese momento, solamente tres hogares reportaron tener acceso a una red de agua potable en el ámbito de la vivienda. Para el año 2020, hubo un incremento más notable, con un aumento al 19% de acceso a la red de agua potable (*Figura 3-5*). Sin embargo, es crucial mencionar que esta localidad en particular aún carece de una conexión efectiva a una red que pueda proveer suministro de agua.

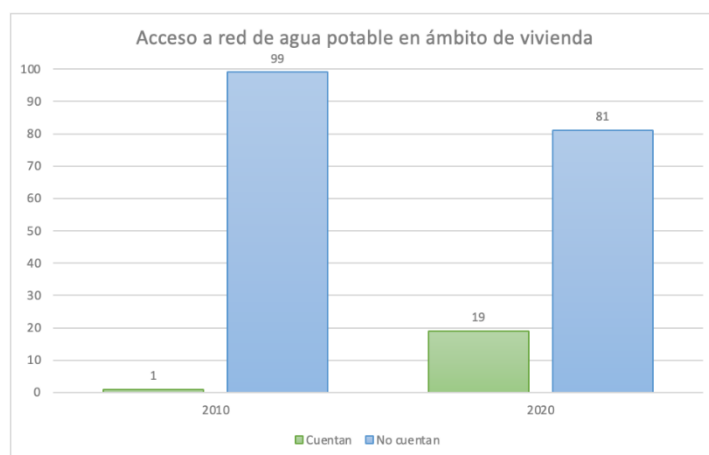


Figura 3-5 Acceso a red de agua potable en Pozuelos, 2010 y 2020. **Fuente:** datos obtenidos de (INEGI, 2010; INEGI, 2020)

Según datos proporcionados por CONAGUA y CEA en conjunto, Pozuelos se encuentra aguas arriba de la Presa El Peaje. El proyecto del Pozo "Las Cabras" tenía la intención de abastecer a esta población. Con relación al pozo "Las Cabras", perforado aguas arriba de la Presa "El Peaje", es importante destacar que su rendimiento no ha cumplido con las expectativas iniciales (*Figura 3-4*). Se había proyectado un caudal inicial de 15 L/s, pero en las pruebas de aforo realizadas posteriormente, el pozo solo alcanzó entre 7 y 8 L/s. En el año 2020, se llevó a cabo

otra prueba de aforo, en la cual el pozo registró un caudal aún menor, oscilando entre 3 y 4 L/s (Mballa & Hernández, 2018).

Sin embargo, el proyecto no ha resultado ser viable económicamente y además enfrenta obstáculos considerables para su adecuación con suministro eléctrico.

Por lo tanto, la comunidad sigue siendo abastecida por el sistema que también Escalerillas emplea, tinacos al lado de la carretera siendo llenados por pipas que viajan desde la zona metropolitana de la ciudad, para abastecer a los 1,339 habitantes que posee esta zona, de acuerdo con el Censo de Población y Vivienda realizado en el 2020.

Al último recorrido generado, se encontró un total de 28 tanques de almacenamiento de agua, de 5,000 y 10,000 litros, permitiendo una dotación de 26.04 L/hab/día, con una frecuencia de llenado de hasta 1 vez por semana, generando problemas debido a la poca cantidad de vital líquido que se abastece en esta zona.

También para Pozuelos, existen algunas norias que abastecen a cierta cantidad de viviendas y personas, pero, estas tienen un abastecimiento bastante limitado y no para el acceso a todas las personas, generando una desigualdad y molestias con el acceso del agua para las demás personas, pero, estas norias se encuentran al aire libre y la superficie, lo que las hace susceptible a contaminación.

3.1.2. Plan Estatal de Desarrollo “Recuperación hídrica con enfoque de cuencas”

El plan Estatal de Desarrollo del estado de San Luis Potosí, es la hoja de ruta que permite conocer las actividades del Gobierno Estatal durante los siguientes 6 años, y permite proponer soluciones y alternativas a los problemas que actualmente presente la población del estado de San Luis Potosí, en su eje rector número tres “Economía sustentable para San Luis Potosí” muestra la estrategia 3.5 “Recuperación hídrica con enfoque en cuencas” y es una estrategia integral que busca gestionar de manera eficiente los recursos hídricos en el estado. Este plan aborda diversos aspectos relacionados con el agua, como el abastecimiento, tratamiento, distribución y conservación de este recurso vital. Su objetivo es asegurar la disponibilidad y calidad del agua para las necesidades actuales y futuras

de la población, así como para el desarrollo sustentable de las actividades económicas y la preservación del medio ambiente (COPLADE, 2021).

Esta estrategia considera múltiples factores y desafíos:

Gestión Integral del Agua: El plan busca una gestión integral y participativa del agua, involucrando a diversos actores como gobiernos, comunidades, instituciones y el sector privado. Esto asegura un enfoque multidisciplinario y colaborativo en la toma de decisiones.

Abastecimiento: Uno de los aspectos centrales del plan es asegurar un suministro adecuado de agua potable para la población. Esto puede incluir la construcción de infraestructura de captación, tratamiento y distribución de agua, así como la optimización de los sistemas existentes.

Tratamiento de Aguas Residuales: La gestión de las aguas residuales es una parte fundamental del plan. Esto incluye la construcción y mantenimiento de plantas de tratamiento de aguas residuales para minimizar la contaminación del recurso hídrico.

Conservación y Uso Eficiente del Agua: El plan promueve la conservación del agua a través de prácticas eficientes en el uso del recurso. Esto puede incluir la implementación de tecnologías más limpias y el fomento de la conciencia ciudadana sobre la importancia de ahorrar agua.

Infraestructura Hidráulica: El plan puede contemplar la construcción y mejora de infraestructura hidráulica, como presas, represas, canales y sistemas de riego, para optimizar la gestión de los recursos hídricos.

Monitoreo y Evaluación: Un aspecto crítico es el monitoreo constante de la calidad y cantidad del agua, así como la evaluación de la efectividad de las medidas implementadas en el plan.

Sostenibilidad: El enfoque principal del plan es asegurar la sostenibilidad a largo plazo de los recursos hídricos del estado, garantizando su disponibilidad para las futuras generaciones.

Al evaluar el progreso dentro del marco estratégico mencionado, es evidente que, a pesar de haber transcurrido dos años desde su implementación, la región en cuestión ha experimentado una falta notable de avances significativos por parte del gobierno local.

No se han registrado mejoras en la gestión del recurso hídrico, en el suministro de agua, ni en la expansión o actualización de la infraestructura hídrica que permitiría abordar de manera eficiente y, lo que es aún más importante, oportuna, los problemas relacionados con el suministro de agua.

Incluso ante los recientes desafíos que enfrenta la ciudad en 2023, debido a problemas con la Presa "El Realito", la distribución del agua ha sido redirigida, y sus prioridades han cambiado. Esta presa solía abastecer a dos tercios de la zona metropolitana de la ciudad, lo que ha llevado a un ajuste en la distribución. Como resultado, las pipas ahora están suministrando agua a la zona metropolitana y se ve afectada la frecuencia de llenado en Escalerillas, lo que provoca una limitación en el llenado de los tanques locales a una vez cada 15 días. Esto representa una disminución significativa en el suministro de agua, que está por debajo de los estándares recomendados por la biblioteca digital de MAPAS y se sitúa incluso por debajo de lo que la Organización Mundial de la Salud considera óptimo.

Además, que los pobladores tienen que invertir de sus bolsillos contratando pipas particulares para tener acceso al agua potable de manera continua.

3.1.3. Calidad de agua en abastecimiento

3.1.3.1. Indicadores de calidad de agua

Entre los puntos de muestreo identificados, algunos de ellos sirven como fuentes principales de suministro de agua. Es crucial determinar la calidad de esta agua para comprender las necesidades de saneamiento requeridas para garantizar que se cumplan los estándares de calidad y, en última instancia, la seguridad del suministro.

Este proceso de evaluación se lleva a cabo mediante análisis de calidad de agua según la NOM-127-SSA1-2021, titulada 'Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad de agua'. El propósito fundamental de esta norma es asegurar la calidad del agua para prevenir la transmisión de enfermedades relacionadas con el agua. Para lograr esto, establece límites máximos permitidos en cuanto a las características físicas, químicas y microbiológicas del agua suministrada por sistemas públicos y privados de abastecimiento de agua (Secretaría de Salud, 2022).

Los resultados obtenidos son los siguientes:

Tabla 18
Resultados análisis de agua cuerpos de agua superficiales en laboratorio y campo

	pH	ORP (mV)	CE (μ S/cm)	TDS (mg/L)	N _T (mg/L)	P _T (mg/L)	DQO (mg/L)	SST (mg/L)	Turbiedad (NTU)	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	54.6	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	6.28	19.91	123.90	11.56
Presa "San José" (PSJ)	6.44	233.55	265.25	132.75	1.80	0.17	40.00	53.35	39.25	16.04	21.25	1.97

Tabla 19
Resultados análisis de agua norias en campo y en laboratorio

	pH	ORP (mV)	CE (μ S/cm)	TDS (mg/L)	N _T (mg/L)	P _T (mg/L)	DQO (mg/L)	SST (mg/L)	Turbiedad (NTU)	T (°C)	OD (%) (mg/L)	
Pozo 1	6.06	419.25	206.00	103.25	5.80	0.15	10.00	10.00	5.16	22.25	70.52	6.27
Pozo 2	8.06	377.16	299.25	151.25	7.95	0.12	23.00	23.35	7.23	20.43	118.45	10.74
Pozo 3	6.72	172.30	305.00	152.50	7.25	0.29	11.50	30.00	9.76	19.82	23.40	2.13
Pozo 4	6.25	269.75	223.00	112.00	2.05	0.18	7.00	23.35	3.32	17.35	16.10	1.67
Pozo 5	7.06	304.90	274.75	137.50	8.95	0.11	4.50	16.65	5.21	18.69	71.43	6.70

Las tablas anteriores muestran los resultados de las posibles fuentes de abastecimiento de agua potable, indicando la necesidad de potabilización de estas fuentes para cumplir con la norma, pero sin dejar de lado la calidad de agua.

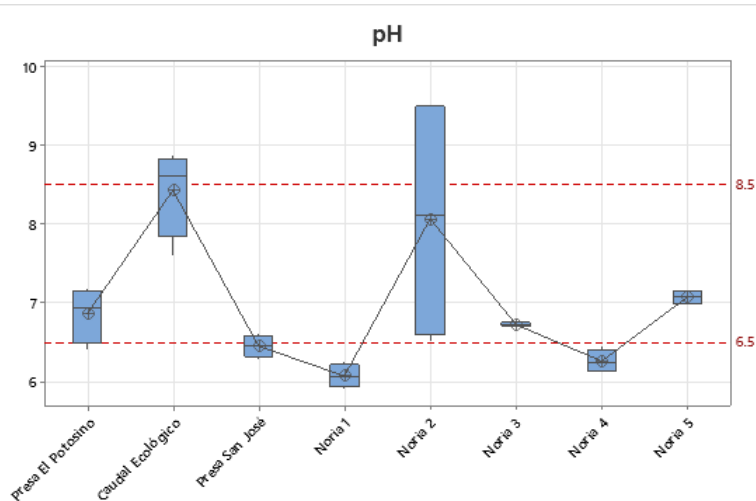


Figura 3-7 Resultados y promedios de pH, n=32, p=0.0001, $\alpha=0.05$

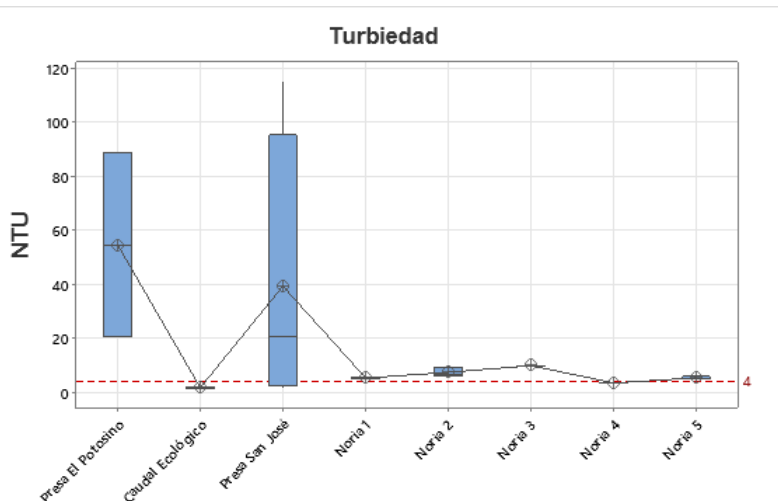


Figura 3-6 Resultados y promedios de Turbiedad, n=32, p=0.0240, $\alpha=0.05$

De manera puntual la **Figura 3-7** y **Figura 3-6** muestran los límites máximos permisibles para el caso particular del pH y turbiedad.

El pH es un parámetro esencial en el análisis de calidad del agua, ya que nos indica si una sustancia es ácida o alcalina. Cuando el agua es demasiado ácida, puede disolver metales, como plomo, cobre y zinc. La ingestión de agua que ha estado en contacto con estos metales puede ser perjudicial para la salud. La normativa establece un rango de valores aceptables para el pH del agua, que va desde 6.5 hasta 8.5 (Pérez-López, 2016).

Es importante monitorear y mantener el pH dentro de este rango, ya que valores fuera de estos límites pueden indicar problemas en la calidad del agua y potencialmente representar riesgos para la salud pública. Por lo que, si podemos observar todos los valores se encuentran dentro de los óptimos, arrancando solo con el pH, podemos denotar la necesidad de potabilización antes de su posterior abastecimiento.

En el caso del parámetro de turbiedad, se mide con los NTU que es la abreviación de Nephelometric Turbidity Unit, o en español, Unidad Nefelométrica de Turbiedad y se define como la presencia de partículas suspendidas y disueltas en el agua, que puede ser arcilla, cieno o materia orgánica e inorgánica finamente dividida, y esta determinación es importante debido que permite formular un control de procesos para conocer cómo tratar el agua (SCFI, 2001).

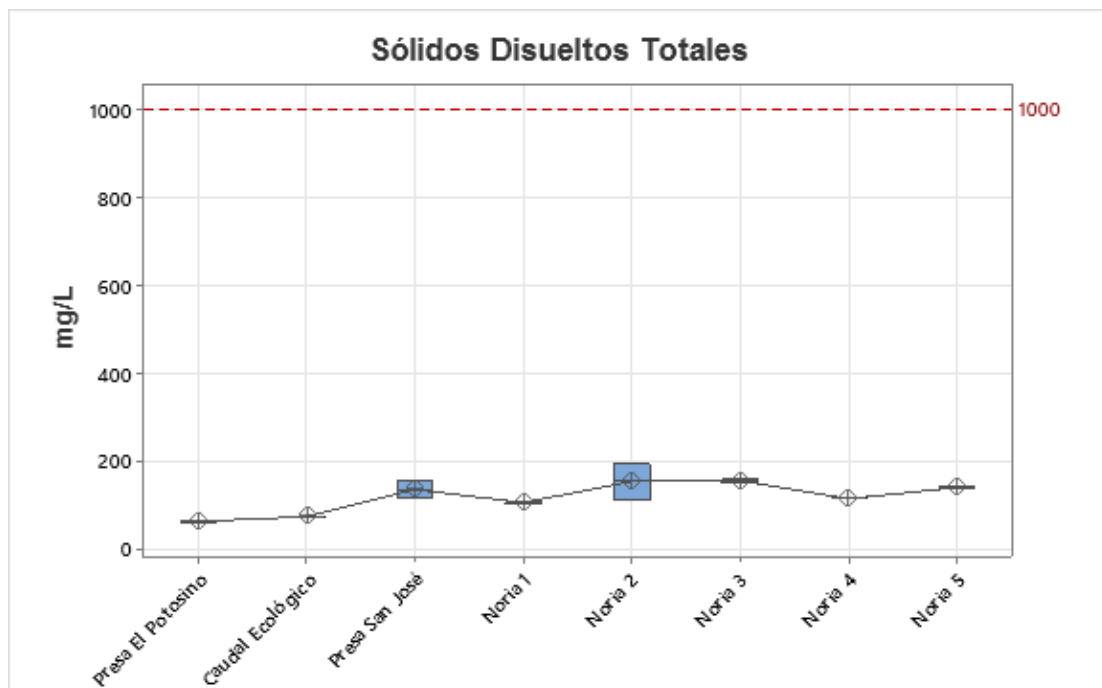


Figura 3-8 Resultados y promedios de SDT, $n=32$, $p=0.0001$, $\alpha=0.05$

En los casos en particular de los resultados de las posibles fuentes de abastecimiento de agua, todos los puntos están fuera de los límites, excediendo 4.0 NTU que marca la norma oficial. Medir turbidez es necesario, debido que, al presentar niveles altos, los microorganismos presentes pueden protegerse de los efectos de la desinfección, lo que puede estimular la proliferación de bacterias y aumentar la demanda de cloro utilizado (Marín-Velásquez & Arriojas-Tocuyo, 2020).

Los sólidos disueltos totales consisten en el material soluble compuesto por una combinación de materia orgánica e inorgánica. Estos sólidos suspendidos totales pueden incluir sales, minerales y metales en diversas concentraciones (SCFI, 2015). La norma establece un límite máximo permisible de 1,000 mg/L para los sólidos suspendidos totales en el agua. Y como se observan los resultados de la **Figura 3-8** todas las muestras se consideran aceptables si no exceden este límite, lo que indica

que no se ha superado la concentración máxima permitida de sólidos suspendidos totales en el agua.

También se realizaron mediciones de sólidos suspendidos totales (SST), que, a diferencia de los sólidos disueltos, no pueden pasar a través de un filtro de vidrio. Aunque la normativa oficial no establece límites específicos para los SST, es importante señalar que la SEMARNAT, en colaboración con CONAGUA, evalúa este parámetro como parte de los estándares de calidad de agua en el Sistema de Información Nacional del Agua (SINA).

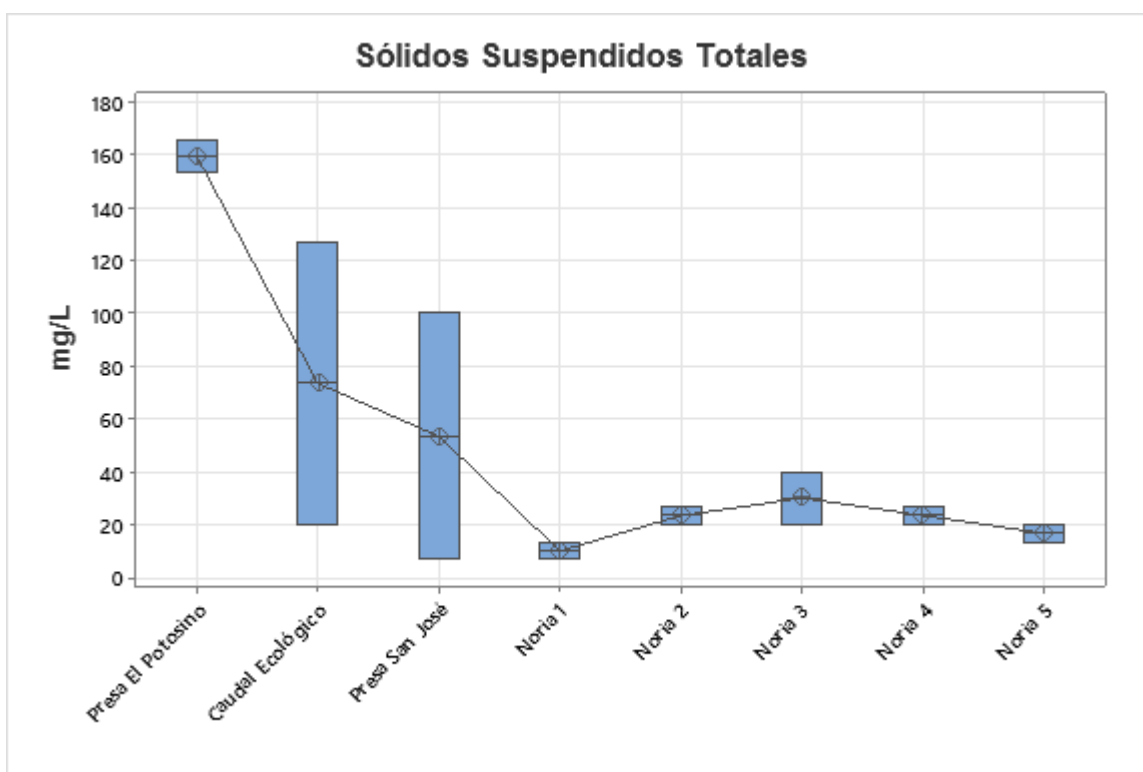


Figura 3-9 Resultados y promedios de SST n=16, p=0.0421, $\alpha=0.05$

El aumento en la concentración de SST puede tener graves consecuencias, ya que puede llevar a la pérdida de la capacidad de un cuerpo de agua para sostener la vida acuática. Por lo tanto, monitorear y controlar los niveles de SST es esencial para preservar la salud de los ecosistemas acuáticos (SEMARNAT, 2021).

La **Figura 3-9** muestra los resultados obtenidos en cada uno de los puntos de muestreo, teniendo valores que van desde los 20mg/L hasta los 160 mg/L. Pero, para entender mejor estos resultados, la Gerencia de Calidad de Agua, un departamento adscrito a la CONAGUA, ha desarrollado indicadores de calidad de

agua que se presentan mediante códigos de colores y descripciones breves, lo que facilita su comprensión por parte de la población.

Criterio (mg/L)	Clasificación
SST ≤ 25	EXCELENTE Clase de excepción, muy buena calidad
25 < SST ≤ 75	BUENA CALIDAD Aguas superficiales con bajo contenido de solidos suspendidos, generalmente en condiciones naturales. Favorece la conservación de comunidades acuáticas y el riego agrícola irrestricto.
75 < SST ≤ 150	ACEPTABLE Con indicio de contaminación. Con descargas de aguas residuales tratadas biológicamente condición regular para peces. Riesgo agrícola restringido
150 < SST ≤ 400	CONTAMINADA Aguas superficiales de mala calidad con descargas de aguas residuales crudas. Agua con alto contenido de material suspendido
400 < SST	FUERTEMENTE CONTAMINADA Aguas superficiales con fuerte impacto de descargas de aguas residuales crudas municipales y no municipales con alta carga contaminante. Mala condición para los peces

Figura 3-10 Escala de clasificación de calidad de agua tomando como criterio SST. **Fuente:** (CONAGUA, 2020)

La presente **Figura 3-10**, muestra uno de los tantos indicadores disponibles de calidad de agua, empleando límites por cada uno de los indicadores, que van desde excelente a fuertemente contaminada.

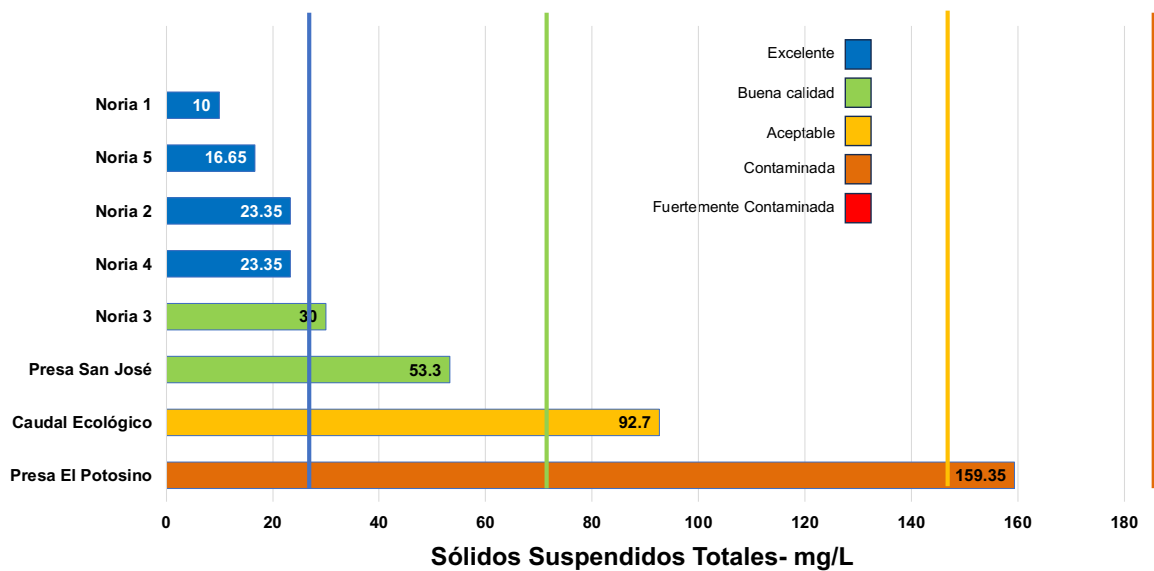


Figura 3-11 Resultados promedio e indicadores de SST

La **Figura 3-11** muestra los resultados de los análisis de Sólidos Suspendidos Totales (SST) para cada uno de los puntos de muestreo. La mayoría de los puntos se encuentran en excelente condición o son aceptables, lo que indica una buena calidad del agua. Sin embargo, se debe prestar atención al caso de la Presa El Potosino, que muestra niveles de SST más elevados y se considera contaminada.

Es importante destacar que el día de monitoreo, el nivel de la Presa El Potosino era más bajo y el agua estaba más turbia. Esto sugiere que estaba en contacto con el sedimento, lo que pudo haber influido en los resultados. Sin embargo, estos resultados subrayan la necesidad de someter a esta fuente de agua a procesos de potabilización antes de su abastecimiento, especialmente en condiciones en las que el sedimento puede ser un factor de contaminación.

Abordando la parte de los coliformes fecales, este parámetro se considera uno de los más delicados, es un subgrupo de los coliformes totales, y este grupo tiene la capacidad de fermentar la lactosa con producción de ácido y gas entre 44 y 45°C. La especie que más predomina es *Escherichia coli*, y su estudio radica en la presencia de contaminación por heces fecales en el agua (OMS, 2011).

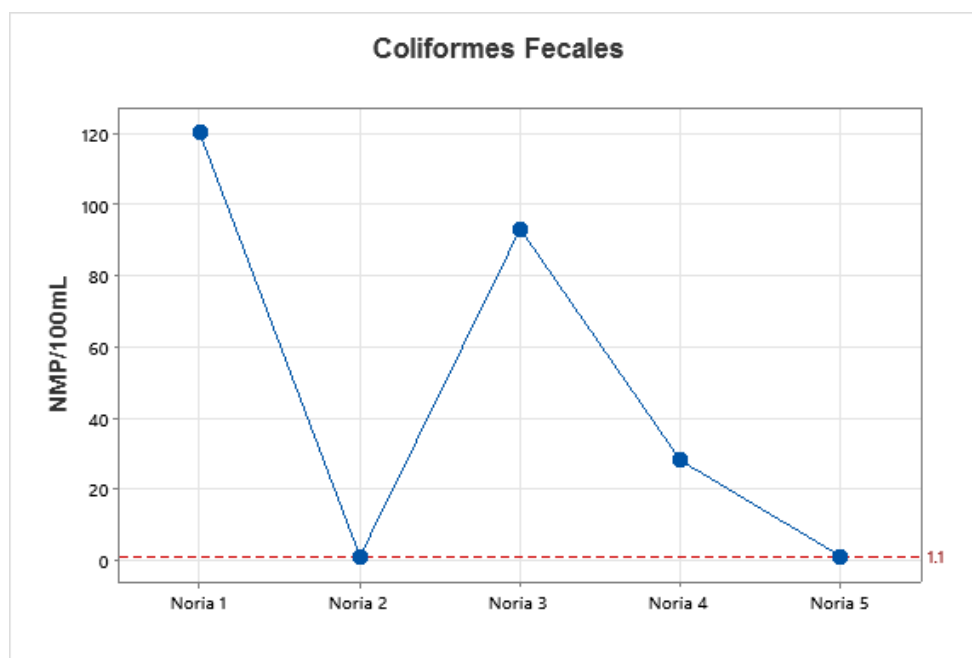


Figura 3-12 Resultados coliformes fecales n=5

En cuanto a los resultados de este parámetro publicados en la **Figura 3-12**, se llevó a cabo un análisis específico de los pozos en cuestión (Norias). Este enfoque se debió a su importancia crítica en el suministro de agua para consumo humano en actividades diarias. Además, este interés se intensificó debido al aumento de los casos de enfermedades gastrointestinales en la comunidad, dado que uno de estos pozos se utiliza directamente para el consumo humano. Por lo tanto, era fundamental evaluar coliformes fecales en cada uno de estos pozos.

De los tres pozos analizados, se encontró que superaban el umbral con una carga de más de 1.10 NMP/100mL. Esta contaminación puede atribuirse a diversos factores. Uno de los principales es que estos pozos son de aguas superficiales, lo que significa que están completamente expuestos, su configuración y construcción no es la más adecuada. Esto los hace susceptibles a la contaminación por parte de animales y, en algunos casos, incluso de los propios habitantes que podrían estar vertiendo residuos sépticos en las inmediaciones de estas norias. Además, se

observó la presencia de múltiples fosas sépticas aguas arriba de algunos de estos pozos, lo que plantea la posibilidad de que estas fuentes de agua estén siendo contaminadas por estas construcciones. Para estos casos tan particulares, se requiere hervir el agua antes de usarse o una cloración con cloro comercial acatando las instrucciones en su envase.

Con este análisis, es claro la necesidad fuerte de abastecimiento que actualmente requiere esta zona, haciendo que muchos de los pobladores generen sus propios pozos sin tomar en cuenta el estado de calidad de agua o incluso configuraciones adecuadas para lo mismo.

También se incluyó la Demanda Química de Oxígeno (DQO), que es un indicador crucial para medir la cantidad de materia orgánica que puede ser oxidada mediante procesos químicos en el agua. Valores que superen los 40 mg/L en esta medición sugieren la presencia de aguas residuales sin tratamiento. Este aumento en el contenido de oxígeno disuelto en el agua puede tener un impacto significativo en los organismos y los ecosistemas acuáticos, ya que compromete la calidad del agua y su capacidad para mantener la vida acuática de manera saludable (CONAGUA, 2017c; SEMARNAT, 2018).

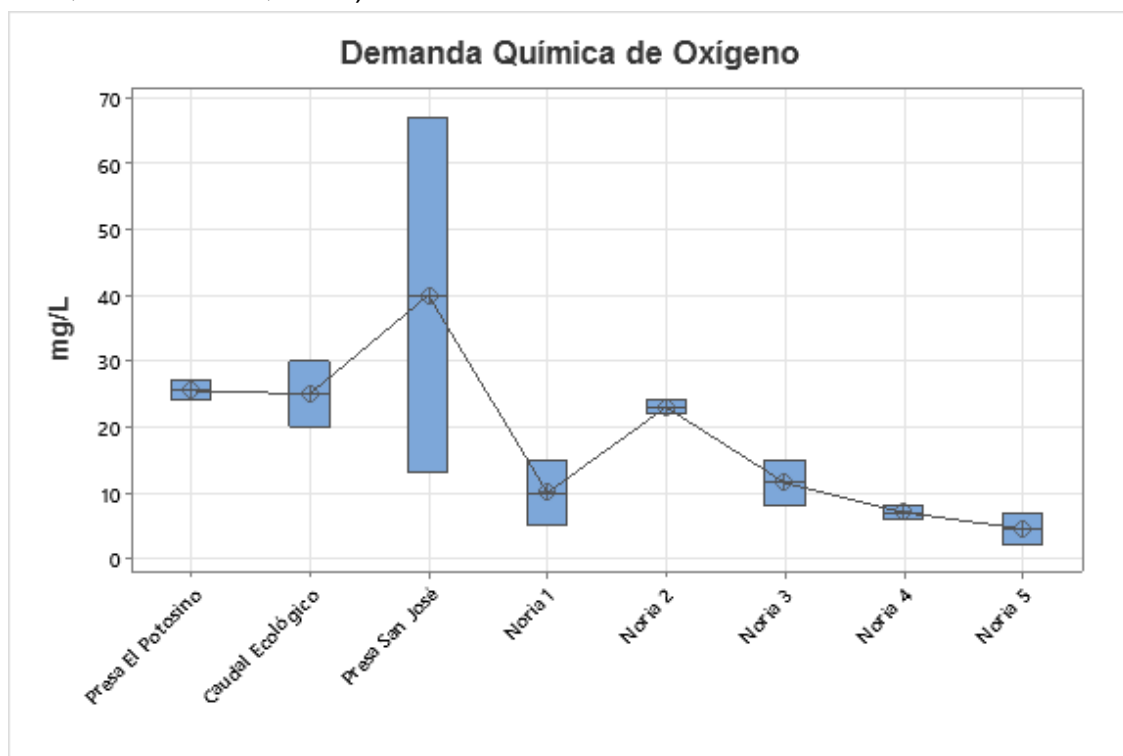


Figura 3-13 Resultados y promedios de DQO, n=16, p=0.3031, $\alpha=0.05$

Aunque este parámetro no se encuentra evaluado en la NOM-127-SSA1-2021, hemos generado un indicador para medir la Demanda Química de Oxígeno (DQO). Los resultados de DQO se encuentran en un rango que va desde los 10 hasta los 70 mg/L (Figura 3-13). En el caso de las norias evaluadas, el agua muestra una excelente calidad, con valores que oscilan entre 10 y 25 mg/L de DQO.

Según los indicadores de DQO (Figura 3-14), el agua proveniente de las norias 1, 4 y 5 se considera de excelente calidad en términos químicos, lo que sugiere que requiere procesos de potabilización estrictos, especialmente en lo que respecta a la parte microbiológica.

En el caso de la Presa El Potosino, su caudal ecológico y la noria 2, los valores de DQO son aceptables, indicando una ligera contaminación. Sin embargo, las aguas superficiales de esta fuente tienen la capacidad de autodepuración.

Criterio (mg/L)	Clasificación
DQO ≤ 10	EXCELENTE No contaminante
10 < DQO ≤ 20	BUENA CALIDAD Aguas superficiales con bajo contenido de materia orgánica biodegradable y no biodegradable
20 < DQO ≤ 40	ACEPTABLE Con indicio de contaminación. Aguas superficiales con capacidad de autodepuración o con descargas de aguas residuales tratadas biológicamente
40 < DQO ≤ 200	CONTAMINADA Aguas superficiales con descargas de aguas residuales crudas principalmente de origen municipal
DQO > 200	FUERTEMENTE CONTAMINADA Aguas superficiales con fuerte impacto de descargas de aguas residuales crudas municipales y no municipales

Figura 3-14 Escala de clasificación de calidad de agua tomando como criterio DQO. Fuente: (CONAGUA, 2020)

En la zona de estudio, no se identificaron fuentes de tratamiento biológico de agua, pero sí se encontraron indicios de contaminación de origen antropogénico, posiblemente aguas residuales municipales que, al carecer de un tratamiento adecuado o infraestructura suficiente, pueden estar contaminando las fuentes de

abastecimiento de agua. Esto subraya la necesidad urgente de implementar un tratamiento adecuado para garantizar un suministro seguro de agua.

Y finalmente se encuentran los valores de la Presa San José, que si bien, su promedio arroja un total de DQO de 40 mg/L, su valor más alto presentado durante la medición es de 67 mg/L, esto lo posiciona como un agua contaminada con descargas de aguas residuales crudas de origen municipal, de acuerdo con el indicador, y este es un problema que se hablará en el siguiente subtema. Pero, es posible observar estos resultados con mayor detenimiento en la **Figura 3-15**.

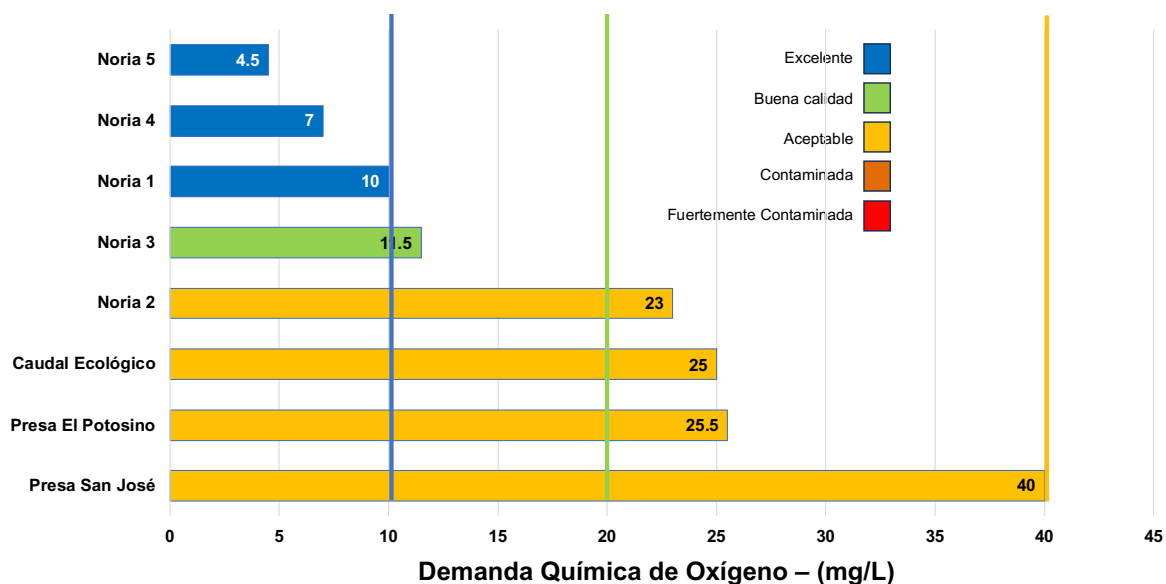


Figura 3-15 Resultados promedio de puntos de muestreo e indicador DQO

El parámetro de oxígeno disuelto es un indicador importante dentro de los términos de calidad de agua, debido a la importancia para la supervivencia de organismos acuáticos aerobios, lo cual, al tener ausencia de este mismo, se debe a un aumento a la temperatura, exceso de materia orgánica o exceso de plantas acuáticas (Blanco-Zuñiga et al., 2022). Se encontró que existe una relación entre el oxígeno disuelto en agua y su grado de contaminación, de tal forma que, a mayor cantidad de materia orgánica contenida en una muestra de agua, más cantidad de oxígeno necesitan los microorganismos para oxidarla o degradarla (Raffo & Ruiz, 2014).

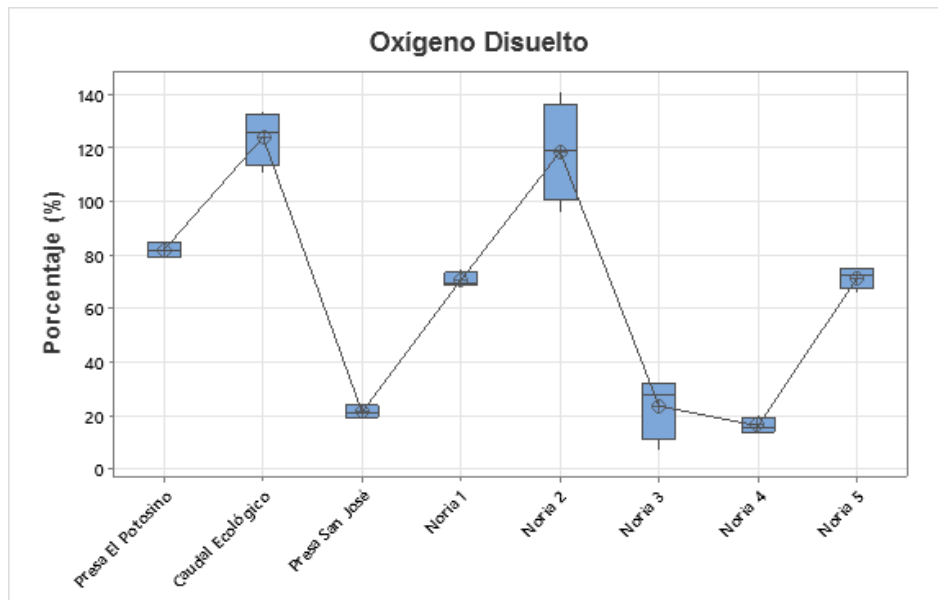


Figura 3-16 Resultados y promedios de Oxígeno Disuelto, n=32, p=0.0001, $\alpha=0.05$

Es importante tomar en cuenta que los niveles de oxígeno disuelto encontrados mayores a 5 mg/L o su equivalente al 50% de saturación, permiten a los organismos mantener sus actividades metabólicas (Ibana-Lopez et al., 2021).

Criterio (%)	Clasificación
70 < OD ≤ 110	EXCELENTE Clase de excepción, muy buena calidad.
25 < OD ≤ 75 110 < OD ≤ 120	BUENA CALIDAD Aguas superficiales con buena o moderada cantidad de oxígeno.
30 < OD ≤ 50 120 < OD ≤ 130	ACEPTABLE Con indicio de contaminación. Moderada deficiencia de oxígeno.
10 < OD ≤ 30 130 < OD ≤ 150	CONTAMINADA Aguas superficiales de mala calidad con descargas de aguas residuales crudas. Deficiencia de oxígeno.
10 ≤ OD 150 > OD	FUERTEMENTE CONTAMINADA Aguas superficiales con fuerte impacto de descargas de aguas residuales crudas municipales y no municipales con alta carga contaminante. Con ausencia de oxígeno o anóxica.

Figura 3-17 Escala de clasificación de calidad de agua tomando como criterio OD. **Fuente:** (CONAGUA, 2020)

Además, el análisis del oxígeno disuelto afecta a un vasto número de indicadores, no solo bioquímicos, también detalles estéticos como olor, claridad del agua y sabor (Corporativo Ambiental, 2019).

Existe una relación entre el oxígeno disuelto (OD) y la Demanda Química de Oxígeno (DQO) en el agua. Cuando la DQO es alta, suele indicar la presencia de contaminantes orgánicos, como aguas residuales municipales o fuentes orgánicas. Estos contaminantes, al descomponerse, consumen oxígeno disuelto, lo que puede llevar a una disminución en los niveles de OD.

Además, un alto contenido de oxígeno disuelto en el agua puede facilitar la precipitación de minerales presentes en el agua. Por lo tanto, en los indicadores establecidos por CONAGUA, si los niveles de saturación de oxígeno superan el 130%, esto ya representa un riesgo para la calidad del agua y la vida acuática en los ecosistemas.

Este texto aclara la relación entre la DQO y el OD, así como el impacto de niveles elevados de oxígeno disuelto en la calidad del agua y los ecosistemas acuáticos.

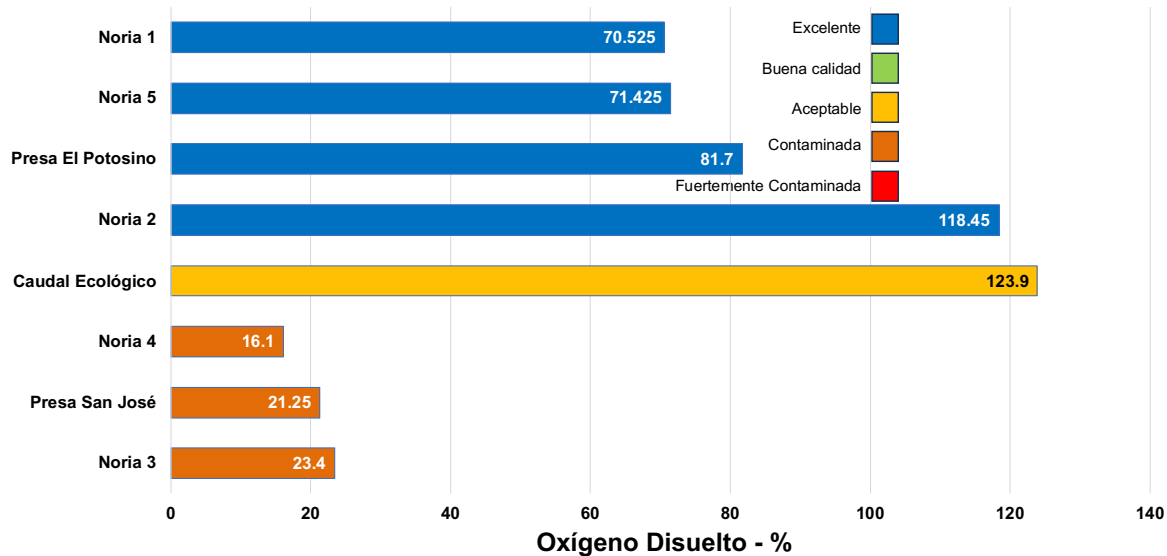


Figura 3-18 Resultados promedio de puntos de muestreo e indicador OD

Los resultados de oxígeno disuelto, representados en la **Figura 3-18**, reflejan en su mayoría concentraciones de oxígeno disuelto excepcionalmente altas, lo que se considera excelente según los indicadores de calidad. Únicamente el caudal ecológico se ubica en la categoría de 'aceptable', lo que sugiere una ligera presencia de contaminantes en esta área.

Por otro lado, las Norias 3 y 4, así como la Presa San José, muestran niveles de oxígeno disuelto bajos. Estos niveles reducidos indican una alta concentración de contaminantes en estas ubicaciones, lo que requiere una atención inmediata para mejorar la calidad del agua en estos puntos.

El análisis de calidad del agua también nos lleva a considerar dos parámetros esenciales: el Potencial Óxido-Reducción (ORP) y la Conductividad Eléctrica (CE).

El ORP se refiere a la capacidad de una solución para oxidar o reducir una sustancia química y se mide en milivoltios (mV). Cuando arroja valores negativos, indica una tendencia a perder electrones, lo que sugiere niveles de oxígeno bajos. Esto puede estar relacionado con la presencia de sedimentos en ríos o lagos, así como con otras sustancias que contienen oxígeno, como nitratos y fosfatos. Por otro lado, valores positivos de ORP señalan ambientes con altas concentraciones de oxígeno, ya que el oxígeno actúa como un agente oxidante en esta situación (EPA, 2013).

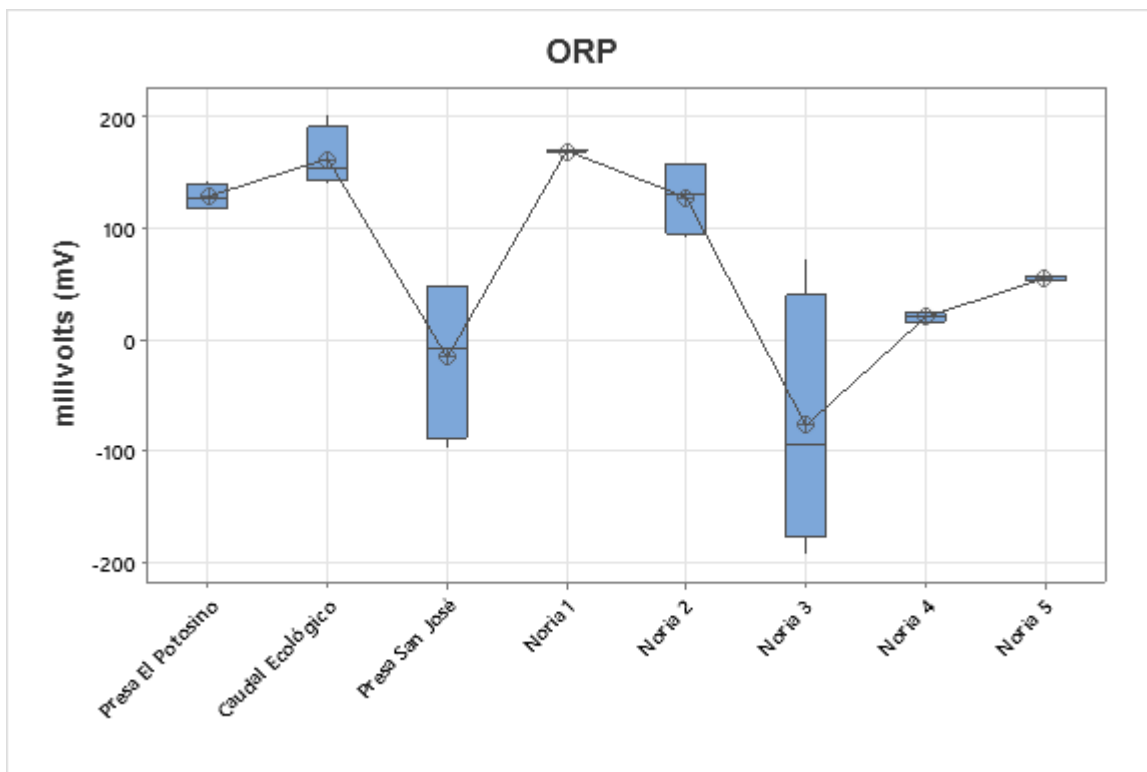


Figura 3-19 Resultados y promedios de ORP, $n=32$, $p=0.0001$, $\alpha=0.05$

Además, en el año de 1971 la Organización Mundial de la Salud a través de los Estándares Internacional para Agua Potable en su 3era edición, marca que se requieren 650mV de potencial redox como un valor adecuado para el agua potable, y esto significa que el agua se encuentra debidamente desinfectada (OMS, 1971).

Es importante notar que, aunque la CONAGUA no establece indicadores específicos para el Potencial Óxido-Reducción (ORP), los resultados obtenidos en las mediciones, tal como se muestran en la **Figura 3-19**, reflejan valores tanto negativos como positivos. Estos valores ofrecen información valiosa.

Los valores negativos indican niveles bajos de oxígeno disuelto, y coincide con lo observado en puntos como la noria 3 y 4, así como en la Presa San José. En estos lugares, los bajos niveles de oxígeno disuelto pueden tener implicaciones en la calidad del agua y la salud de los ecosistemas acuáticos.

Por otro lado, los valores positivos representan una calidad de agua superior. Aunque no alcanzan los estándares establecidos por la Organización Mundial de la Salud (OMS), estos valores indican una cantidad superior de oxígeno disuelto, lo que se traduce en una mejor calidad del agua.

Por el lado de la conductividad eléctrica, es un parámetro que permite el paso de la corriente eléctrica. Debido a que las sales disueltas y otros productos químicos inorgánicos conducen corriente eléctrica, la conductividad aumenta a medida que aumenta la salinidad. La conductividad también se ve afectada por la temperatura: cuanto más cálida es el agua, mayor es la conductividad (EPA, 2023).

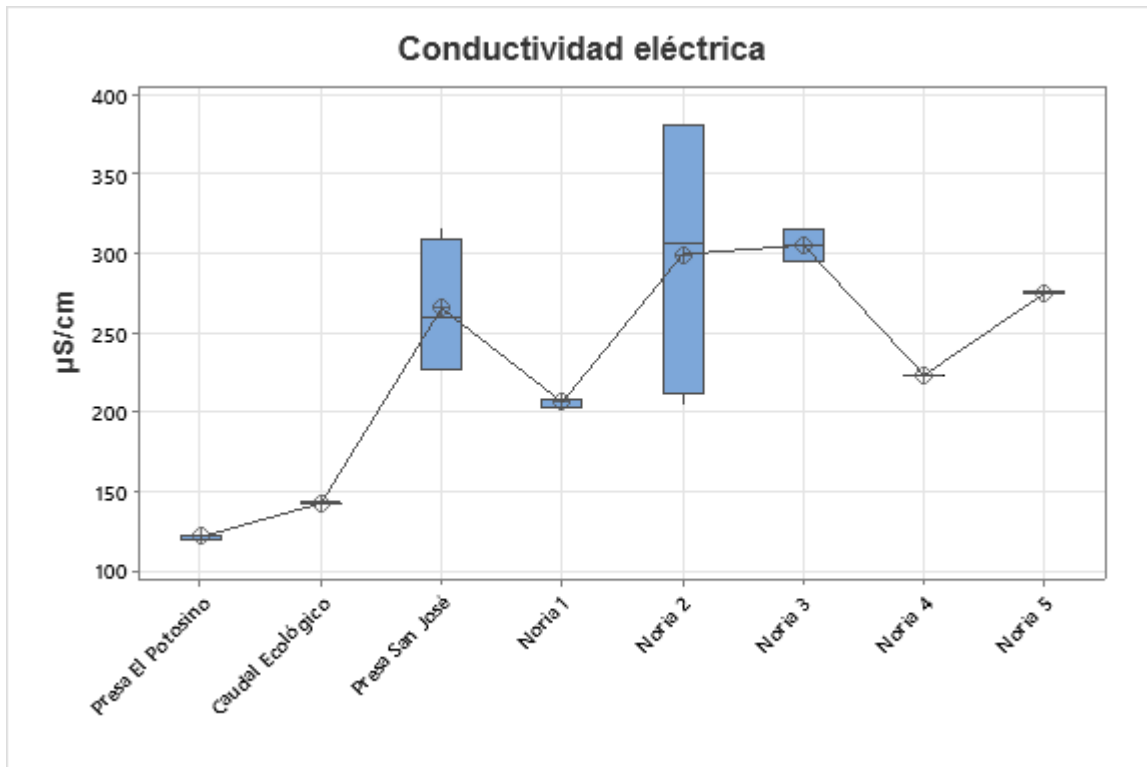


Figura 3-20 Resultados conductividad eléctrica, n=32, p=0.0001, $\alpha=0.05$

La conductividad puede ser un indicador útil de la contaminación del agua. Un aumento significativo en la conductividad puede señalar la presencia de contaminantes, como sales, nutrientes o sustancias químicas que afectan la calidad del agua. Por ejemplo, vertidos industriales o agrícolas pueden aumentar la conductividad debido a la liberación de productos químicos y sales en el agua. Pero, se puede estimar si tenemos mediciones constantes a los cuerpos de agua de importancia.

De acuerdo con un estudio realizado por (Meride & Ayenew, 2016), se ha observado que el agua pura, en su estado más limpio, no conduce bien la electricidad, lo que se traduce en una baja conductividad eléctrica. En su investigación, mencionan que la Organización Mundial de la Salud (OMS) establece un límite óptimo de 400 micro siemens por centímetro ($\mu\text{S}/\text{cm}$) para la conductividad eléctrica del agua.

Sus parámetros reportados dentro de la investigación rondan entre los 179.3 y 201 $\mu\text{S}/\text{cm}$, y comparándolos con los límites que reporta la OMS como óptimos, estos no se encuentran fuera de ningún límite.

Tabla 20 Conductividades eléctricas por tipos de agua. **Fuente:** (Boyd, 2017)

Tipo de agua	Conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$)
Agua destilada	<2
Agua de lluvia	<50
Aguas interiores en regiones húmedas	<500
Aguas interiores en regiones áridas	500 a 5,000
Agua de mar	50,000
Estuarios	1,500 a 5,000

Algunos otros autores, tal como (Boyd, 2017), reportan diferentes conductividades eléctricas para diferentes tipos de agua, tal como se reportan en la **Tabla 20**.

Y además reporta que las aguas potables de mejor calidad tienen una conductividad de 50 – 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Es importante destacar que, aunque la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021 no establece límites específicos para la conductividad eléctrica, los valores obtenidos están en línea con los estándares internacionales de calidad del agua. Esto sugiere que la calidad del agua en la zona de estudio es adecuada en términos de conductividad eléctrica y no excede los límites considerados seguros por la OMS.

Los parámetros de nitrógeno total y fósforo total son particularmente relevantes en el estudio de aguas residuales debido a su capacidad para reducir el oxígeno disuelto y contribuir al fenómeno de eutrofización del agua.

Es fundamental tener en cuenta que el nitrógeno en cualquiera de sus formas puede tener graves implicaciones para la salud humana. Puede estar relacionado con enfermedades coronarias, infecciones del tracto digestivo e incluso con nacimientos prematuros y retraso en el crecimiento intrauterino, según lo señalado por (Cárdenas & Sánchez, 2013).

El nitrógeno total es una medida que abarca todas las formas de nitrógeno presentes en una muestra de agua, como nitratos, nitritos y nitrato en forma de amoníaco. Las concentraciones de nitrógeno pueden variar en función de las condiciones geoquímicas, el tipo de agua (subterránea o superficial) y los procesos a los que esté expuesta, como la influencia de desechos humanos y animales o una intensa fertilización del suelo.

La presencia de nitrógeno en el agua afecta de manera directa a los procesos de desinfección dentro de los sistemas de distribución, deteriorando los filtros y creando problemas de mal sabor y olor (Martínez et al., 2014).

La Organización Mundial de la Salud (OMS) recomienda mantener los niveles de nitratos en el agua por debajo de 50 mg/L para reducir los riesgos para la salud de la población en general (Brenes et al., 2011).

En los resultados se observa la concentración de nitrógeno total (ver **Figura 3-21**). Es importante mencionar que la NOM-127-SSA1-2021 no establece límites específicos para el nitrógeno total, sino que se enfoca en sus diversas formas, como nitratos, nitritos y amoníaco.

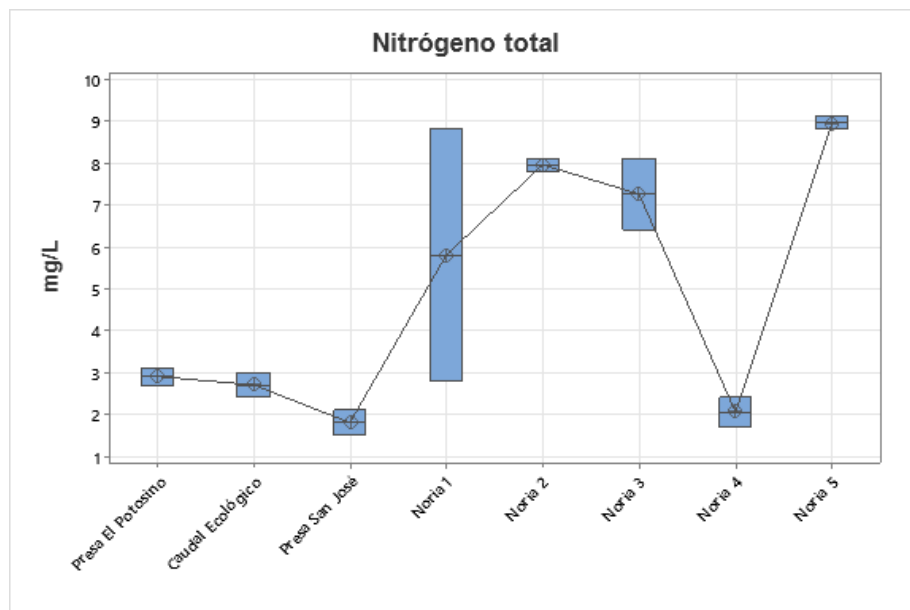


Figura 3-21 Resultados y promedios de nitrógeno total (N_T) $n=16$, $p=0.0080$, $\alpha=0.05$

El fósforo, a diferencia del nitrógeno, no se considera dañino para la salud humana, pero desempeña un papel crítico en la generación de la eutrofización en cuerpos de agua dulce, especialmente en regiones agrícolas de países desarrollados y en naciones en vías de desarrollo, como México (Flores et al., 2020).

El fósforo puede tener efectos negativos en la calidad del agua al acelerar el proceso de eutrofización. La eutrofización se refiere al enriquecimiento de cuerpos de agua con nutrientes, como fósforo y nitrógeno, que estimulan el crecimiento excesivo de algas y plantas acuáticas. Esto puede resultar en la disminución del oxígeno disuelto en el agua y la alteración de los ecosistemas acuáticos, lo que afecta la vida acuática.

Según estudios realizados por la Universidad de Pensilvania, las aguas superficiales con concentraciones de fósforo total inferiores a 1 mg/L generalmente se consideran no contaminadas y poseen niveles bajos de fósforo. Sin embargo, niveles de fósforo total superiores a 5 mg/L pueden causar problemas, como la disminución del oxígeno disuelto en el agua, lo que afecta negativamente la calidad del agua y la vida acuática (Swistock, 2021).

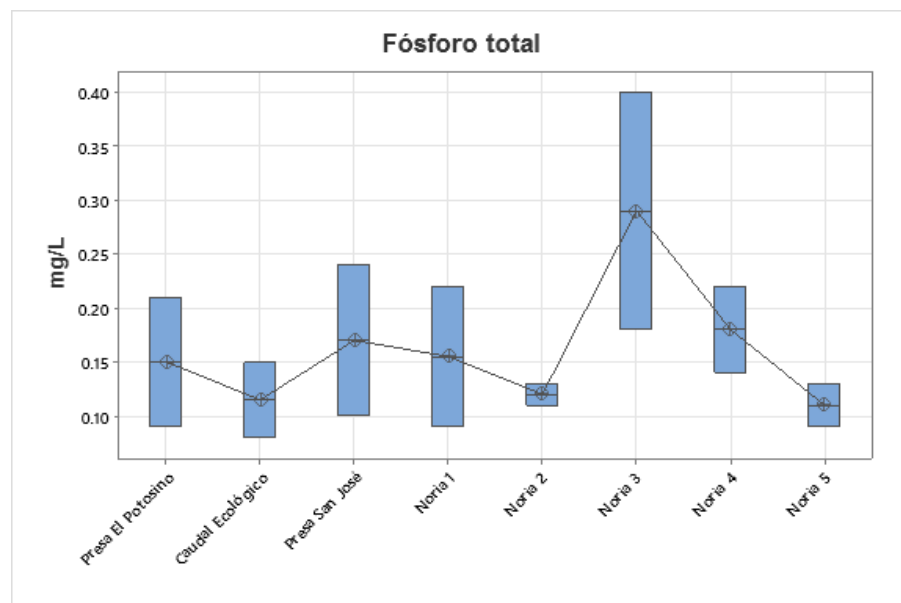


Figura 3-22 Resultados y promedio de fósforo total (P_T) $n=32$, $p=0.5151$, $\alpha=0.05$

Al comparar los resultados con los datos de la Universidad de Pensilvania, podemos concluir que las concentraciones de fósforo total en las muestras de agua son inferiores a 1 mg/L. Esto sugiere que el agua no está contaminada con niveles significativos de fósforo, lo que es una señal positiva para la calidad del agua en la zona de estudio.

Mantener bajos niveles de fósforo total en el agua es fundamental para prevenir la eutrofización y garantizar la salud de los ecosistemas acuáticos. En este sentido, los resultados respaldan la idea de que la presencia de fósforo total en las muestras

de agua no representa un problema significativo en términos de contaminación y calidad del agua.

3.1.3.2. Índices de calidad de agua

Con las fórmulas propuestas, en la metodología, se procedió a calcular los índices de calidad de agua por cada uno de los muestreos.

Se tomó en cuenta el valor promedio de cada uno de los puntos para facilitar el cálculo y tener un índice por cada uno de los puntos de muestreo evaluados.

Tabla 21 Promedio valor por parámetro del muestreo

Punto de Muestreo	Promedio Valor					
	OD (mg/L)	SST (mg/L)	DQO (mg/L)	C.E. (µS/cm)	pH	NT/PT
AAPp	7.29	159.35	25.50	121.00	6.86	19.33
CEPp	11.56	73.35	25.00	142.25	8.42	23.48
EPTAR	0.00	94.00	285.50	751.75	7.23	28.85
CeyPTAR	3.80	10.00	33.50	234.75	7.28	39.05
EAM	0.28	94.00	138.50	827.25	7.55	36.19
EATP	1.90	90.00	62.00	848.00	8.01	38.82
PSJ	1.98	53.35	40.00	265.25	6.45	10.59
PT1	6.27	10.00	10.00	206.00	6.07	37.42
PT2	10.74	23.35	23.00	299.25	8.06	66.25
PT3	2.13	30.00	11.50	305.00	6.72	25.00
PT4	1.66	23.35	7.00	223.00	6.26	11.39
PT5	6.70	16.65	4.50	274.75	7.07	81.36

Con los valores promedio calculados que se muestran en la **Tabla 21**, se procedió a calcular los subíndices para los índices de calidad de agua propuestos por el IDEAM, con las fórmulas que se encuentran en la metodología.

Tabla 22 Cálculo de subíndices para ICA

Punto de Muestreo	Subíndice						
	PSOD - IOD	SST	DQO	C.E.	pH	NT/PT	
AAPp	104.1	0.96	0	0.51	0.66	0.93	0.6
CEPp	165.1	0.34	0	0.51	0.58	0.75	0.15
EPTAR	0	0	0	0.125	2.92	1	0.15
CeyPTAR	54.25	0.46	0	0.51	0.17	1	0.15
EAM	4.036	0.96	0	0.125	3.46	1	0.15
EATP	27.18	0.73	0	0.26	3.61	0.6	0.15
PSJ	28.21	0.72	0	0.51	0.62	0.75	0.6
PT1	89.57	0.11	0	0.91	0.31	0.62	0.15
PT2	153.4	0.46	0	0.71	0.14	0.63	0.15
PT3	30.43	0.71	0	0.91	0.54	0.86	0.15
PT4	23.75	0.76	0	0.91	0.7	0.68	0.6
PT5	95.68	0.05	0	0.91	0.6	1	0.15

Por último, los cálculos de los subíndices se multiplican por la ponderación de cada uno de los parámetros seleccionados y se suman para obtener el ICA por cada uno de los puntos.

Tabla 23 Ponderaciones, valores y descripción de los ICA

Punto de Muestreo	Ponderación ICA							Descripción
	OD	SST	DQO	C.E.	pH	NT/PT	ICA	
AAPp	0.16	0.09	0.09	0.11	0.14	0.10	0.70	Media
CEPp	0.06	0.14	0.09	0.10	0.11	0.03	0.52	Media
EPTAR	0.00	0.13	0.02	0.01	0.15	0.03	0.33	Mala
CeyPTAR	0.08	0.17	0.09	0.03	0.15	0.03	0.54	Media
EAM	0.16	0.13	0.02	0.01	0.15	0.03	0.50	Mala
EATP	0.12	0.13	0.04	0.01	0.09	0.03	0.42	Mala
PSJ	0.12	0.15	0.09	0.11	0.11	0.10	0.68	Media
PT1	0.02	0.17	0.15	0.05	0.09	0.03	0.51	Media
PT2	0.08	0.16	0.12	0.02	0.09	0.03	0.50	Media
PT3	0.12	0.16	0.15	0.09	0.13	0.03	0.68	Media
PT4	0.13	0.16	0.15	0.12	0.10	0.10	0.77	Buena
PT5	0.01	0.16	0.15	0.10	0.15	0.03	0.61	Media

Como es posible observar en la **Tabla 23** la metodología propuesta por el IDEAM resultó ser una gran herramienta para adaptar y contextualizar los parámetros recopilados. Esta adaptación fue esencial para obtener una descripción más precisa y representativa de la calidad del agua, considerando la ponderación final del Índice de Calidad del Agua (ICA) para cada uno de los puntos evaluados, además de considerar variables que se tenían resultados.

Las aguas que exhiben una clasificación del ICA como "mala" indican una calidad de agua deficiente con niveles de contaminación elevados. Por lo general, esta clasificación se atribuye a la presencia de agua residual sin tratamiento, representando un riesgo significativo para la salud si no se aborda de manera adecuada.

Este hallazgo subraya la urgencia de implementar medidas efectivas de saneamiento del agua en estos puntos, donde la presencia evidente de aguas residuales es notoria.

Un índice de calidad de agua "regular" indica que la calidad del agua en una cierta fuente o zona no es considerada excelente ni malo, sino que se encuentra en un rango intermedio entre la calidad excelente y malo. Este rango puede incluir problemas menores o moderados, con la presencia de ciertos contaminantes y que debe ser tratada y potabilizada para que su consumo sea seguro.

Un índice de calidad de agua "bueno" generalmente implica que la calidad del agua en una fuente específica es alta y adecuada para su uso previsto, como el consumo humano o el soporte de ecosistemas saludables. Por ejemplo, en el contexto del Índice de Calidad del Agua (ICA) utilizado en fuentes superficiales, valores entre 90 y 100 implican que el agua solo requiere tratamientos menores, como desinfección, para ser segura para el consumo humano (Torres et al., 2009).

En conjunto, estos hallazgos subrayan la importancia de adoptar acciones inmediatas para mejorar la calidad del agua, especialmente en los puntos donde se identificaron problemas críticos en cuestión de presencia de agua residual sin tratamiento, garantizando así la protección del medio ambiente y la salud pública.

3.2. Diagnóstico del saneamiento de aguas residuales

3.2.1. Infraestructura

En el aspecto del tratamiento de agua, los habitantes de la comunidad no tienen acceso a drenaje.

El servicio es pésimo y a pesar de generar esfuerzos por instalar estaciones de rebombeo y cárcamos para trasladar el agua hacia la planta de tratamiento, esta es finalmente descargada al cauce del río.

Existe un caso particular la primaria ubicada en la localidad, que, mediante programas de gobierno, pudieron instalar sanitarios, pero, ahora la fosa séptica está saturada y colapsada, y se requiere ayuda para desazolvar (Mballa & Hernández, 2018).

Se construyó una planta de tratamiento de aguas residuales que se inauguró en el año 2006, con una capacidad de 10 litros por segundo, suficiente para poder tratar el agua residual generada por la zona poniente. De manera lamentable, la planta ha sufrido saqueos y nunca funcionó, solo se generó una pequeña prueba. Dentro de los robos se encuentran la bomba, el sistema eléctrico y las conexiones, haciendo que todas las aguas residuales vayan a parar al arroyo de la Maroma, y éstas, posteriormente, al vaso de la Presa de San José.

La construcción de esta planta de tratamiento de aguas residuales fue considerada como un “Elefante Blanco”, debido a que fue construida con una gran inversión, fue dejada inconclusa y sigue sin funcionar (Mballa & Hernández, 2018).

Es importante, destacar que, debido a la falta del sistema de drenaje, así como el tratamiento de las aguas residuales, genera todo tipo de desechos, ya sean sólidos y líquidos y se convierte en un foco de contaminación permanente para la localidad.

El aumento considerable de la población provoca un aumento de las aguas residuales, pero debido al no funcionamiento de la planta tratadora de aguas residuales, esta agua se descarga en el río.

Y debido a la falta de un sistema de drenaje, algunos habitantes han construido fosas sépticas para la descarga del agua residual proveniente de los sanitarios que han instalado en sus hogares, los demás, usan letrina.

3.2.1.1. Escalerillas

El tema de saneamiento durante el paso de los años nunca había tomado relevancia dentro la zona, a pesar de tener problemas con eutrofización dentro del flujo de los embalses no es un tópico con gran importancia.

Con el paso de los años, Escalerillas ha crecido con el aspecto de acceso a red de drenaje. De acuerdo con los censos de población y vivienda realizados por INEGI, en el 2010 la población contaba con un acceso al 62% de una red de drenaje, pero, para el 2020, esta cuenta con un porcentaje de acceso del 83% (**Figura 3-23**).

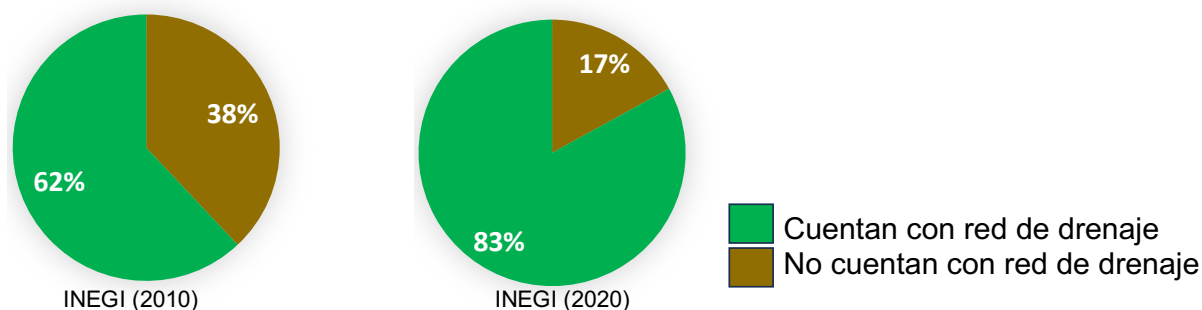


Figura 3-23 Acceso a red de drenaje. **Fuente:** (INEGI, 2010; INEGI, 2020)

A pesar de una expansión en la red de drenaje, esta infraestructura se encuentra en un estado de deterioro preocupante. Algunos residentes, con la intención de evitar la descarga directa de aguas residuales generadas en sus hogares al río, han realizado conexiones a los pozos de visita, los cuales, lamentablemente, no reciben mantenimiento adecuado y se obstruyen con facilidad debido a la entrada de aguas residuales sin tratamiento.

En la **Figura 3-24**, es posible notar el estado actual del drenaje y las conexiones que actualmente se realizan.



Figura 3-24 Estado actual de los pozos de visita

Durante la temporada de lluvias, se producen inundaciones como consecuencia del aumento del caudal del río provocado por el escurrimiento de los arroyos. Estos caudales exceden la capacidad de los sistemas de alcantarillado y saturan los pozos de visita en la localidad. Como resultado, las aguas pluviales se mezclan con las aguas residuales (Figura 3-25) agravando los problemas anteriormente mencionados. Este flujo combinado de aguas con destino final en la Presa San José se ha convertido en un motivo de gran preocupación (Hernández, 2016).



Figura 3-25 Drenaje colapsado en la localidad de Escalerillas

3.2.1.2. Pozuelos

En el caso de la localidad de Pozuelos, la cuestión del saneamiento es sumamente crítica, dada la total falta de acceso que experimentan los residentes. Según el Censo de Población y Vivienda de 2010 realizado por INEGI, solo el 22% de la población tiene acceso a la red de drenaje. Sin embargo, para el año 2020, este porcentaje aumenta significativamente al 46%, representando un duplicado del

acceso en un lapso de 10 años. A pesar de este incremento, los cambios no son tan evidentes como podría parecer.

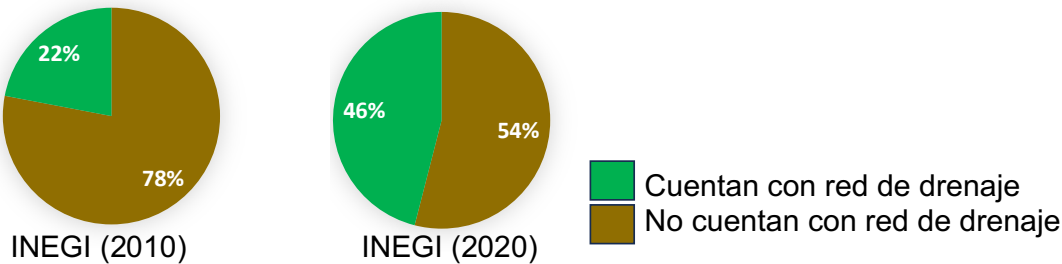


Figura 3-26 Acceso a red de drenaje en Pozuelos. **Fuente:** (INEGI, 2010; INEGI, 2020)

Algunas de las entrevistas revelaron que algunos residentes carecen de acceso a instalaciones sanitarias, y siguen utilizando letrinas para satisfacer sus necesidades. Aquellos que disponen de un sistema de baño no están conectados a una red de drenaje; algunos utilizan fosas sépticas, mientras que otros descargan directamente al cauce del río que se genera durante las lluvias, contribuyendo al problema en el Río Santiago.

3.3. Calidad de agua

El deterioro de la calidad de agua superficial se atribuye a dos procesos: los naturales y los antropogénicos; los naturales son a través de los contenidos mineralógicos de las rocas durante su escurrimiento y los antropogénicos ocasionados por el hombre debido a sus diferentes actividades (Camacho-Ballesteros et al., 2020).

Durante mucho tiempo, el manejo de aguas residuales no es bien atendido, las aguas se vierten crudas en los cuerpos de agua y algunas veces se emplean para riego. México, es el segundo país en el mundo, después de China que emplea aguas residuales para riego, pero, las aguas residuales contienen patógenos no controlados, residuos de productos de aseo personal y algunos otros contaminantes (Merino & Velázquez, 2018).

3.3.1. Saneamiento

La ciudad de San Luis Potosí enfrenta desafíos significativos en cuanto al tratamiento de aguas residuales, siendo la zona poniente la más afectada con prácticamente nulo tratamiento. La NOM-001-SEMARNAT-2021 establece los límites permisibles de contaminantes en aguas residuales para proteger, conservar y mejorar la calidad de los recursos hídricos nacionales.

Los parámetros dentro de la norma se rigen mediante diferentes escalas de medición, ya sea promedio diario (PD), promedio mensual (PM) y valor instantáneo (VI), siendo este último el valor de referencia.

En la **Tabla 24**, se analizaron diversos parámetros contemplados en la normativa, los cuales son fundamentales en el proceso de tratamiento de aguas residuales. Se examinaron puntos específicos donde se detectó la presencia de aguas residuales, y mediante de los potenciómetros, se pudo evaluar el grado de contaminación en estos cuerpos de agua superficiales.

Tabla 24
Resultados análisis de aguas residuales en campo y laboratorio

	pH	ORP (mV)	CE (μ S/cm)	TDS (mg/L)	N _T (mg/L)	P _T (mg/L)	DQO (mg/L)	SST (mg/L)	T (°C)	OD	
										(%)	(mg/L)
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

De acuerdo con la NOM-001-SEMARNAT-2021, el pH debe estar comprendido en una escala de 6-9.

El papel del pH dentro del tratamiento de aguas residuales es muy importante, ya que define un sinfín de reacciones químicas y microbianas importantes que permiten mantener que el proceso de tratamiento se mantenga funcionando de manera óptima. Tal es el caso de las plantas de tratamiento más comunes, que son por lodos activados. Al tener un pH bajo, las colonias predominantes pueden ser hongos, dando como resultado una eficiencia baja y por el contrario al ser alto, el nitrógeno podría precipitar, perdiendo nutrientes para los microorganismos (Torrescano, 2009).

Los valores de pH en los puntos se encuentran dentro de lo indicado por la norma, y están expresados en la figura **Figura 3-27**.

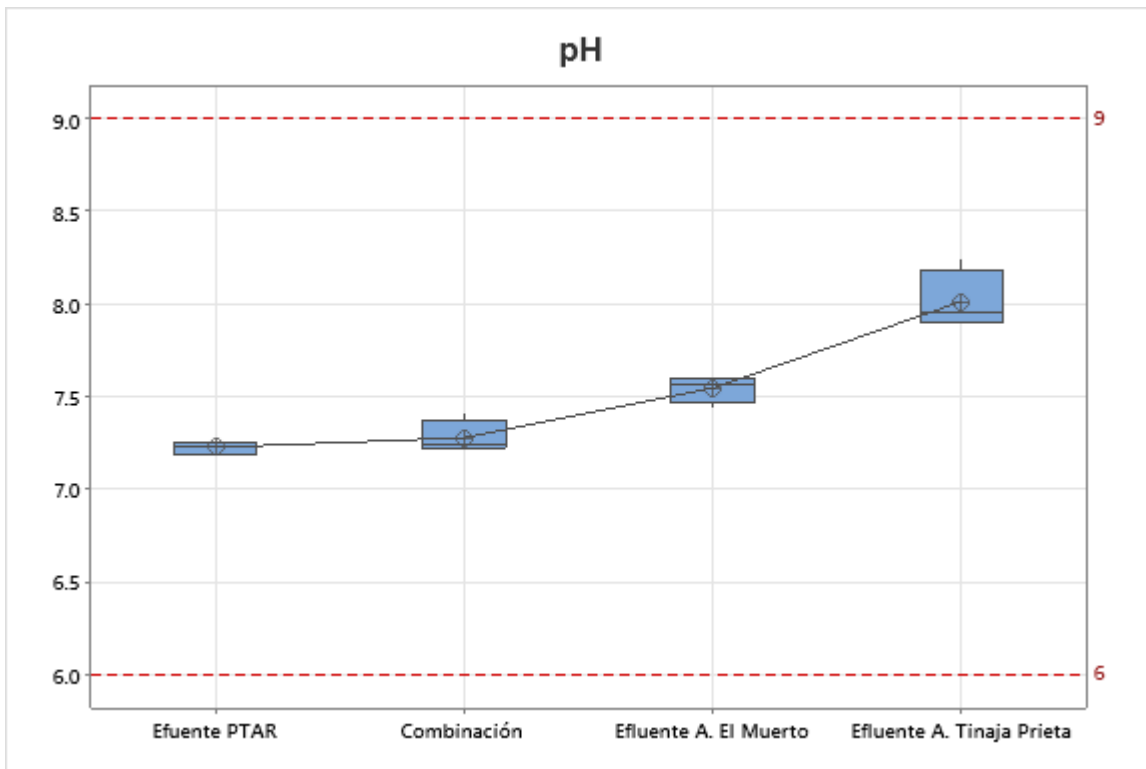


Figura 3-27 Resultados y promedio de pH fuentes con agua residual, $n=32$, $p=0.0001$, $\alpha=0.05$

Al igual que en los resultados previos, se presentan gráficas de cajas y bigotes que proporcionan información sobre los valores mínimos, máximos y promedios. Esta

representación visual facilita la identificación rápida de las diferencias entre los puntos analizados.

Se destacan los sólidos suspendidos totales (SST), que desempeñan un papel crucial en la calidad del agua al influir en la capacidad de los cuerpos de agua superficiales para sostener la vida acuática. Según la NOM-001-SEMARNAT-2021, el límite permitido para los SST es de 84 mg/L, con un promedio mensual de 60 y diario de 72.

Es importante recordar que los indicadores de CONAGUA, ilustrados en la **Figura 3-10**, ofrecen pautas para evaluar el nivel de contaminación del agua. A pesar de que los resultados oscilan entre 53 y 94 mg/L, la mayoría se sitúa en la categoría de calidad aceptable esto significa que aunque hay presencia de aguas residuales, el agua podría ser utilizada para riego.



Figura 3-28 Resultados y promedio de SST para aguas residuales, $n=8$, $p=0.0336$, $\alpha=0.05$

Como se mencionó en el párrafo anterior, tenemos varios puntos con presencia de SST altos (**Figura 3-28**), como tal es el efluente de la PTAR, este punto de muestreo

se consideró debido a que se descargan las aguas residuales captadas en Escalerillas, y dado que la planta no funciona, esta descarga las aguas domésticas directamente al Río Santiago, por lo que esta agua es considerada 100% agua residual, es decir, no tiene ninguna otra combinación u otro aporte que ayuda a minimizar las condiciones de la misma.

La situación descrita resalta una preocupación significativa. Aunque el valor instantáneo de la norma se supere, lo más inquietante es que la planta de tratamiento de agua no funcione adecuadamente y estas descargas contaminadas se dirijan al vaso de la presa San José.

Este problema también afecta a los efluentes del Arroyo El Muerto y la Tinaja Prieta, los cuales llevan aguas residuales de las colonias aguas arriba, como Club de Golf La Loma y Lomas del Pedregal, debido a las conexiones existentes y las características físicoquímicas de estas aguas.

En el punto llamado "combinación", la conexión con el caudal ecológico de la Presa El Potosino, que no tiene descargas de agua residual, se mezcla con las aguas grises provenientes de la PTAR no funcional. Aunque esta combinación ayuda a reducir la carga contaminante, no es la solución ideal. La dilución de 1:10, que disminuye el valor de 94 mg/L a 10 mg/L, ilustra la necesidad urgente de abordar y resolver este problema.

Pasando a la Demanda Química de Oxígeno (DQO), observamos que, según la norma, este valor debe cumplir con los límites de 210 mg/L en valor instantáneo, 150 en promedio mensual y 180 en promedio diario.

La DQO proporciona información esencial sobre la contaminación del agua, indicando que a menor DQO, mayor es el grado de contaminación en los cuerpos de agua. Estos resultados resaltan la necesidad crítica de abordar y mitigar la contaminación para promover la autolimpieza de los cuerpos de agua superficiales.

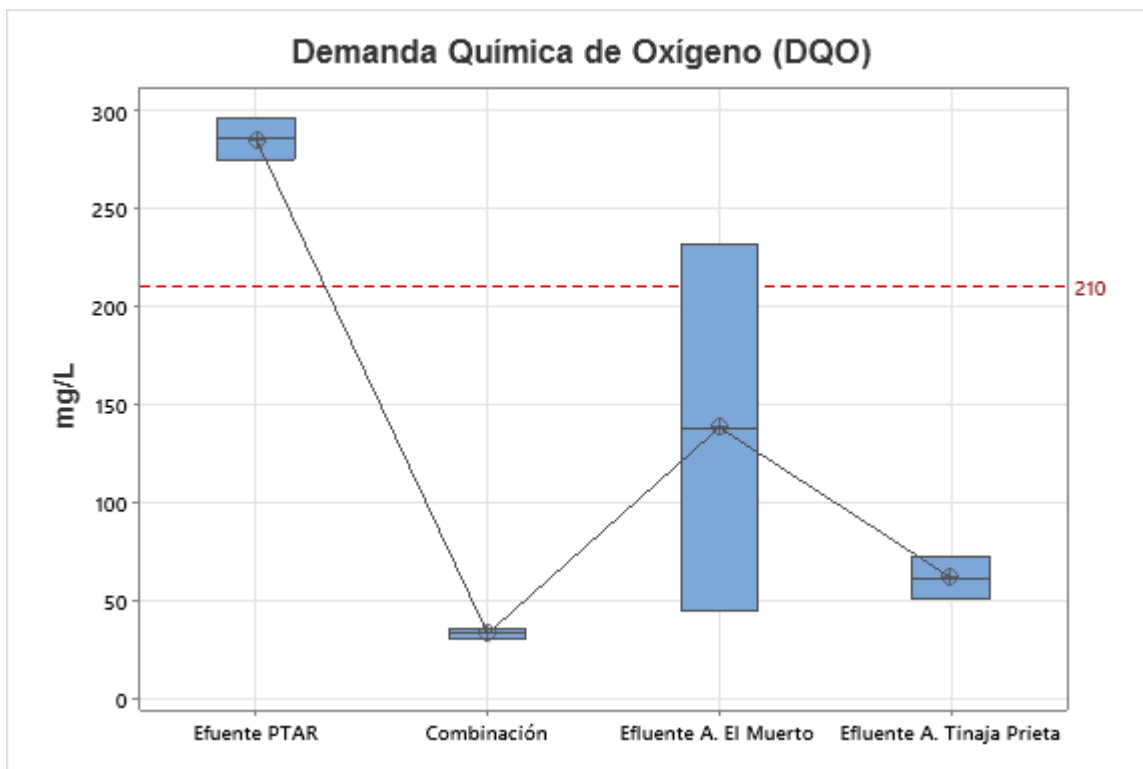


Figura 3-29 Resultados DQO para aguas residuales, $n=8$, $p=0.0635$, $\alpha=0.05$

Como se evidencia en la **Figura 3-29**, es notable que únicamente el efluente de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) supera los límites normativos en cualquiera de los parámetros promedio establecidos. Esto refuerza la conclusión de que se trata de agua residual sin tratamiento, en contraste con los demás puntos que logran cumplir con los parámetros. Cabe destacar que se registran distintos resultados en el efluente del Arroyo el Muerto, donde también se detecta la presencia de agua residual.

El parámetro de oxígeno disuelto, aunque no contemplado en la normativa actual, destaca como un factor crítico en la evaluación de la calidad del agua, especialmente en presencia de descargas de aguas residuales. Según Muñoz et al. (2015), en su investigación sobre el Río Zahuapan en Tlaxcala, la saturación de oxígeno disuelto en ríos debe alcanzar al menos el 80%. Sin embargo, diversos factores, como la temperatura, la profundidad del río, la turbidez, la disponibilidad de luz, los niveles de materia orgánica, la turbulencia y los escurrimientos inducidos

por las lluvias, también pueden influir en el nivel de oxígeno disuelto (Muñoz et al., 2015).

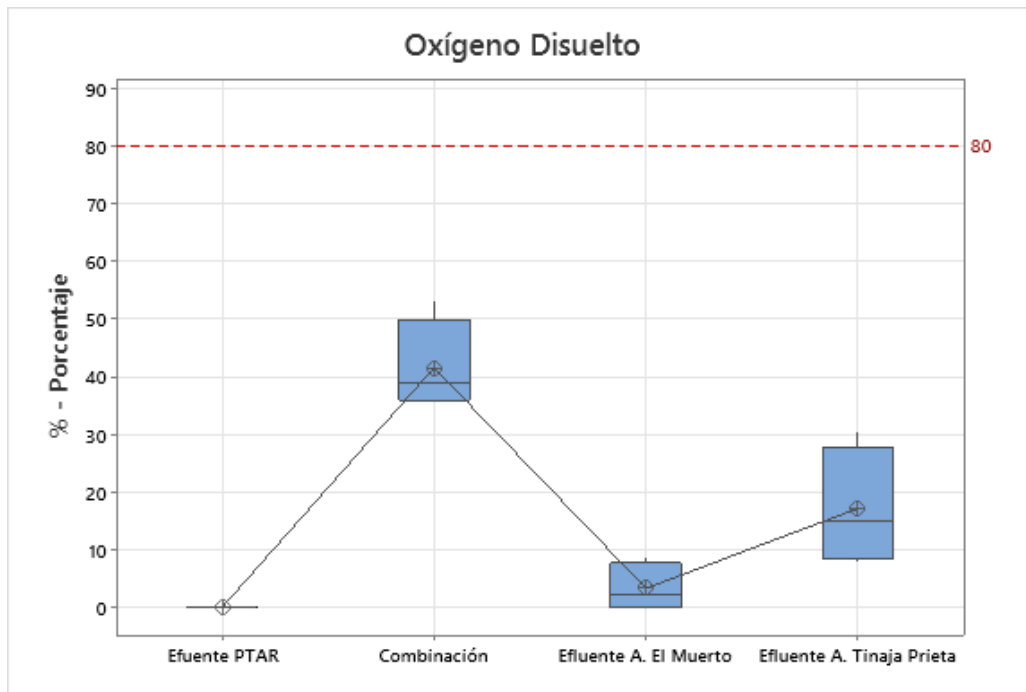


Figura 3-30 Resultados OD para aguas residuales, $n=16$, $p=0.0001$, $\alpha=0.05$

Los resultados (**Figura 3-30**) exhiben un porcentaje por debajo del 80%, incumpliendo la recomendación del autor. Esto refuerza la conexión entre los resultados de la Demanda Química de Oxígeno (DQO) y consolida las conclusiones previas. Se confirma que, si bien el parámetro es influenciado por condiciones naturales, también se ve afectado por descargas de aguas residuales no tratadas en los diversos afluentes identificados y documentados.

La temperatura desempeña un papel fundamental tanto en los procesos de tratamiento de aguas residuales como en la calidad del agua, siendo un factor crítico que incide significativamente en diversas características. Su capacidad para modelar las propiedades del agua, influir en la ecología acuática, modular la concentración de oxígeno disuelto y regular la velocidad de reacciones químicas, incluyendo la actividad bacteriana, lo convierte en un parámetro de vital importancia.

El rango de temperatura óptimo para estos procesos oscila entre 20°C y 35°C. Superando este límite superior, se interrumpe la digestión aeróbica y la nitrificación,

procesos cruciales para la eliminación de contaminantes. Por otro lado, en temperaturas por debajo de este rango, la digestión metanogénica experimenta una desaceleración notable, y las bacterias autotróficas nitrificantes cesan sus actividades (Ramírez, 2021).

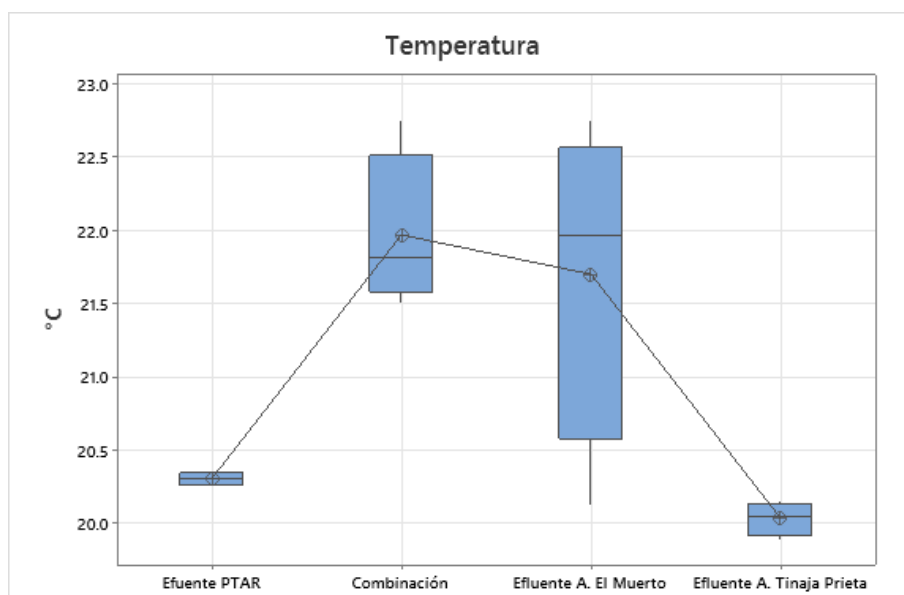


Figura 3-31 Resultados temperatura para aguas residuales, $n=32$, $p=0.0015$, $\alpha=0.05$

Los resultados plasmados en la **Figura 3-31** muestran que los puntos se encuentran dentro de estos intervalos y es esencial para mantener la eficiencia de los procesos biológicos y garantizar un tratamiento adecuado de las aguas residuales, asegurando la conformidad con estándares ambientales y la salud de los ecosistemas acuáticos.

En cuanto al Potencial Óxido-Reducción (ORP), este parámetro se centra en evaluar la calidad del agua destinada al consumo humano, así como la contaminación del agua subterránea y los suelos. Un estudio llevado a cabo en la cuenca del río Callacame ilustra este enfoque, donde se examinaron las concentraciones de arsénico en aguas subterráneas y suelos. Los resultados revelaron concentraciones de arsénico en aguas subterráneas que oscilan entre 3 y 446 $\mu\text{g/L}$, mientras que en los suelos se encuentran en el rango de 10 a 42.7 mg/Kg . Estas concentraciones de arsénico se correlacionaron con el potencial resultante, indicando que contenidos de ORP positivos están asociados con

arsénico ligado a óxidos e hidróxidos de hierro en un entorno oxidante. (Calcina-Benique et al., 2022).

Esto no significa que podemos descartar al 100% los resultados de ORP, se presenta como una oportunidad para verificar si es posible relacionarlos con resultados anteriores.

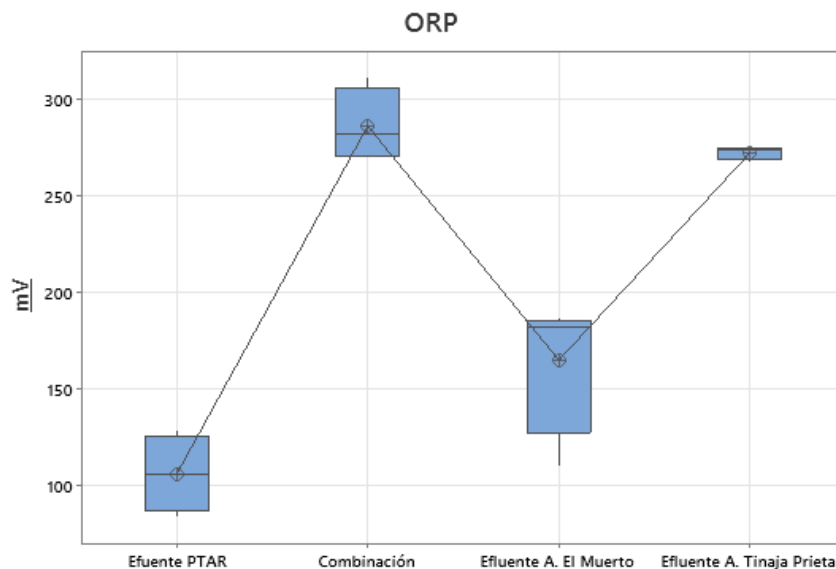


Figura 3-32 Resultados ORP agua residual, n=16, p=0.0001, $\alpha=0.05$

Los resultados de Potencial Óxido-Reducción (ORP), como se ilustra en la **Figura 3-32**, guardan relación con los hallazgos previos, permitiendo inferir que a menores niveles de Demanda Química de Oxígeno (DQO), se observan lecturas más bajas de ORP. Este fenómeno se atribuye a la presencia de aguas residuales en los cuerpos de agua. Por otro lado, mayores lecturas de ORP indican una mejor calidad del agua, sugiriendo una eficacia superior en los procesos microbiológicos y una autodepuración más efectiva de los contaminantes presentes en el agua.

Ahora en el caso de la conductividad eléctrica, recordar, que es una medida de la capacidad del agua para conducir electricidad y está relacionada con la cantidad de sales disueltas en el agua. En estudios de calidad de agua residual, se ha utilizado la conductividad eléctrica como un indicador de la presencia de sales y otros contaminantes en el agua. Por ejemplo, en un estudio realizado en el Valle del Mezquital, Hidalgo, se determinó la concentración de iones y la conductividad eléctrica en el agua residual para evaluar la calidad del agua y estimar el riesgo de

salinización y sodificación de los suelos irrigados (Pérez-Díaz et al., 2019). En otro estudio, se evaluó la calidad agronómica del agua residual tratada y se determinó que la conductividad eléctrica y la relación de adsorción de sodio son indicadores de salinidad que muestran que el agua no es adecuada para la irrigación (Pérez et al., 2016). Por lo que, la conductividad eléctrica es un parámetro importante para evaluar la calidad del agua residual y su idoneidad para diferentes usos, como el riego.

Los parámetros de Potencial Óxido-Reducción (ORP) y Conductividad Eléctrica (CE) no son contemplados en la normativa actual para aguas residuales. Sin embargo, su análisis proporciona información valiosa que respalda la presencia de aguas residuales en los puntos examinados, generando así discusiones y conclusiones relevantes.

Por último, tenemos los valores de Nitrógeno y fósforo total, dos nutrientes esenciales en los análisis de calidad de agua, debido a su facilidad para generar eutrofización en el agua que produce la hiperproducción de algas y la disminución de la biodiversidad (Muñoz et al., 2017).

Para el caso del nitrógeno total, el valor instantáneo de medición es de 35 mg/L, mientras que para el fósforo total es de 21 mg/L.

La presencia de nitrógeno en exceso en las aguas residuales puede resultar perjudicial, y más cuando éstas se emplean para riego. Además de contaminar los suelos por un exceso de nutrientes, este puede llegar a infiltrarse en agua subterránea generando contaminación de los cuerpos de agua subterráneos, por lo que es requerido tener niveles adecuados de este nutriente en el agua (Muñoz et al., 2017).

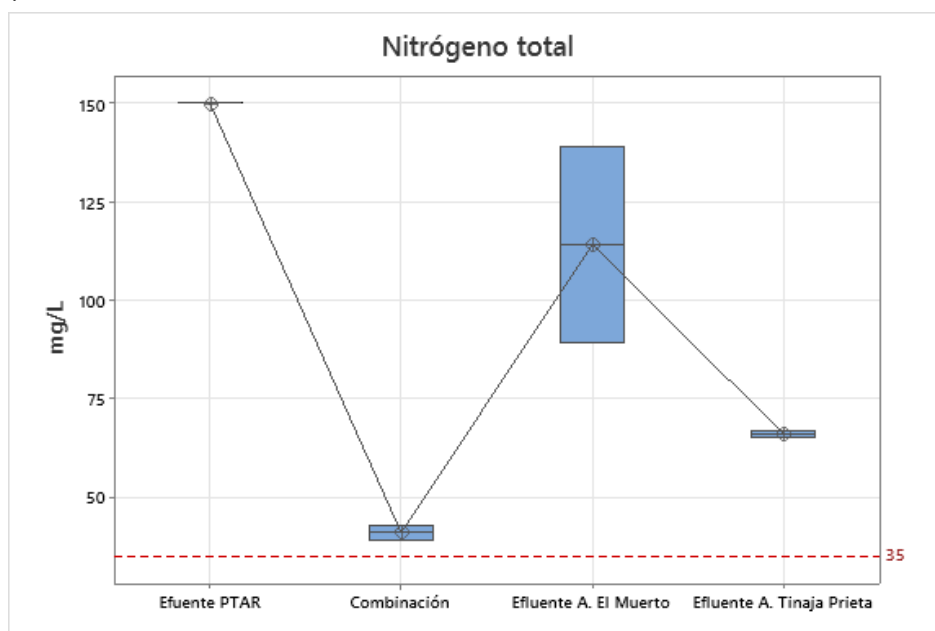


Figura 3-33 Resultados nitrógeno total para aguas residuales, $n=8$, $p=0.0120$, $\alpha=0.05$

Los resultados presentados en la **Figura 3-33** están por encima de los límites establecidos por la normativa, que, como se mencionó anteriormente, es de 35 mg/L. Ninguno de los valores obtenidos se encuentra dentro de este límite. El punto más cercano para cumplir con la normativa es el de la combinación del efluente de la PTAR y el caudal ecológico de la Presa El Potosino, indicando una dilución de los contaminantes. Al comparar los resultados del efluente de la PTAR y el punto de combinación, se observa una disminución significativa en la presencia de nitrógeno total.

Adicionalmente, se identifica la presencia de nitrógeno en el efluente de los arroyos El Muerto y La Tinaja Prieta, lo cual se vincula con aguas residuales no tratadas que se descargan en el Río Santiago. Este fenómeno contribuye al problema de eutrofización en el río. Dado que no hay un control efectivo sobre las descargas de

aguas residuales en el Río Santiago, la cuestión de la eutrofización persistirá en la cortina de la Presa San José.

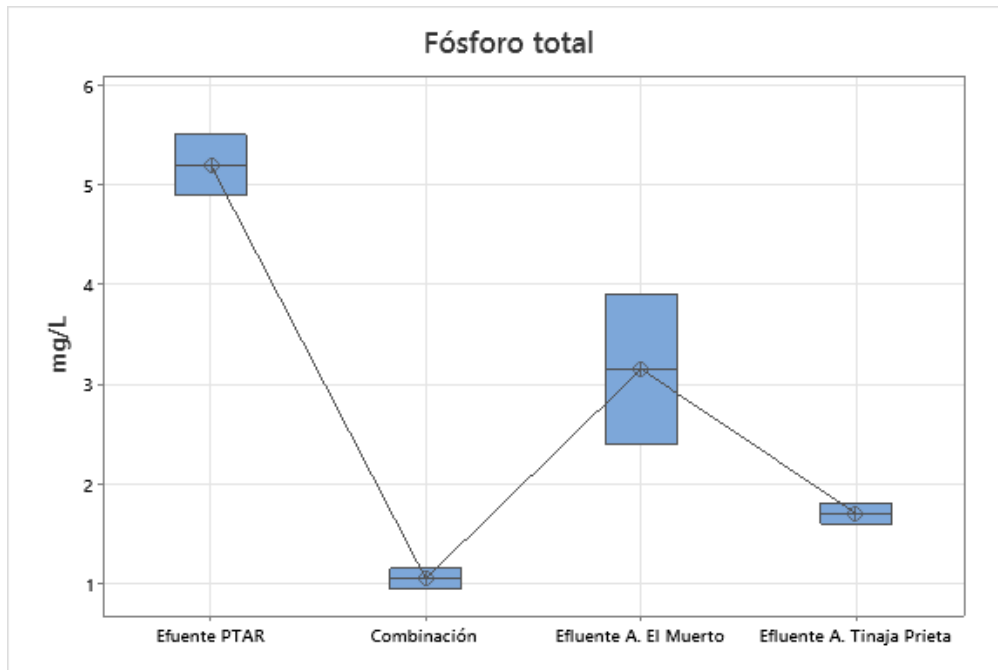


Figura 3-34 Resultados de fósforo total para aguas residuales, $n=8$, $p=0.0071$, $\alpha=0.05$

Al contrastar estos resultados con los obtenidos para fósforo total (**Figura 3-34**), se observa un cambio significativo, ya que los valores en cada punto de análisis cumplen con los límites establecidos por la norma. Es relevante destacar la estrecha relación entre el nitrógeno y el fósforo, dado que ambos son nutrientes esenciales para el crecimiento de las plantas. Sin embargo, su presencia en exceso, como se mencionó anteriormente, puede provocar procesos de eutrofización.

3.4. Modelado WEAP

3.4.1. Escenarios de abastecimiento

Para abordar la cuestión del abastecimiento de agua potable en las localidades afectadas, es esencial tener en cuenta las condiciones establecidas en WEAP. Según el censo de 2020, Escalerillas tiene una población de 5,299 habitantes, y Pozuelos cuenta con 1,339 habitantes. No obstante, es fundamental comprender la dinámica de crecimiento de la población, es decir, cuánto aumenta año tras año, con el fin de estimar las demandas anuales de agua durante el período de estudio, que abarca desde el año base en 2020 hasta 2040.

Para realizar estas estimaciones, se requiere obtener los datos de los censos poblacionales aplicados en ambas localidades y utilizar la base de datos histórica del INEGI. Los resultados de estos análisis se presentan en la **Tabla 25** y **Tabla 26**.

Tabla 25 Datos históricos de población “Escalerillas”.
Fuente: (INEGI, 2023)

Datos Históricos de población 240280252 Escalerillas				
Evento censal	Fuente	Total de habitantes	Hombres	Mujeres
2020	Censo	5,299	2,600	2,699
2010	Censo	4,778	2,377	2,401
2005	Conteo	4,422	2,202	2,220
2000	Censo	3,964	1,977	1,987
1995	Conteo	3,775	1,925	1,850
1990	Censo	3,222	1,652	1,570
1980	Censo	2,382	1,232	1,150
1970	Censo	198	-	-
1960	Censo	612	325	287
1950	Censo	589	315	274
1940	Censo	429	230	199
1930	Censo	330	171	159
1921	Censo	537	277	260
1910	Censo	183	100	83
1900	Censo	263	139	124

Tabla 26 Datos históricos de población “Pozuelos”. Fuente: (INEGI, 2023)

Datos Históricos de población 240280391 Pozuelos				
Evento censal	Fuente	Total de habitantes	Hombres	Mujeres
2020	Censo	1,339	660	679
2010	Censo	1,094	538	556
2005	Conteo	903	444	459
2000	Censo	741	348	393
1995	Conteo	628	298	330
1990	Censo	579	291	288
1980	Censo	483	259	224
1960	Censo	333	174	159
1950	Censo	246	141	105
1940	Censo	173	87	86
1930	Censo	118	53	65

Entendido, dado que la mayoría de los eventos censales ocurren cada 10 años, se procedió a analizar los crecimientos de población y se obtuvo un aumento anual promedio del 1% en estas poblaciones. Este dato será fundamental para estimar las demandas de agua a lo largo del período de estudio, que abarca desde el año base en 2020 hasta 2040. El crecimiento anual del 1% proporciona una base sólida para proyectar las necesidades de agua a medida que la población de Escalerillas y Pozuelos evoluciona con el tiempo. Con este dato, se procede a alimentar un nuevo escenario en el software WEAP, este escenario, representa los aumentos de población y la demanda requerida a través de los años.

Antes de proceder con la ejecución de este escenario, es fundamental determinar la dotación actual de agua, la cual se calcula a partir del suministro semanal y la población beneficiada. Hasta la última investigación realizada por Robledo en 2013 y Mballa & Hernández en 2018, se cuentan con un total de 33 tinacos, cada uno con una capacidad de 10,000 litros, destinados al abastecimiento de agua de un conjunto de 6,698 habitantes. Con una frecuencia de recarga de 3 veces por semana, se entregan 990,000 litros de agua semanalmente, lo que se traduce en

una asignación de aproximadamente 147.80 litros por persona por semana, y al calcularlo diariamente, esto equivale a unos 21.11 litros por habitante al día.

Es importante destacar que la cantidad de agua actualmente otorgada a la población es notablemente insuficiente, como se ha discutido previamente, en comparación con las recomendaciones de la Organización Mundial de la Salud (OMS) de 100 litros por persona al día o las pautas proporcionadas por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) en su libro "Datos Básicos para Proyectos de Agua Potable y Alcantarillado," que sugiere 35 litros por persona al día.

Para llevar a cabo la simulación en WEAP, es necesario contar con datos de población por año, lo que nos permite estimar que la dotación anual de agua por persona asciende a 7.36 metros cúbicos. Con estos datos, es posible correr la simulación, obteniendo la **Figura 3-35**.

En esta figura, se observa que el escenario inercial permanece prácticamente constante a lo largo de toda la simulación. Es importante destacar que este escenario inercial se utiliza para verificar la precisión de los datos ingresados, ya que no se aplican modificadores en la configuración de la simulación.

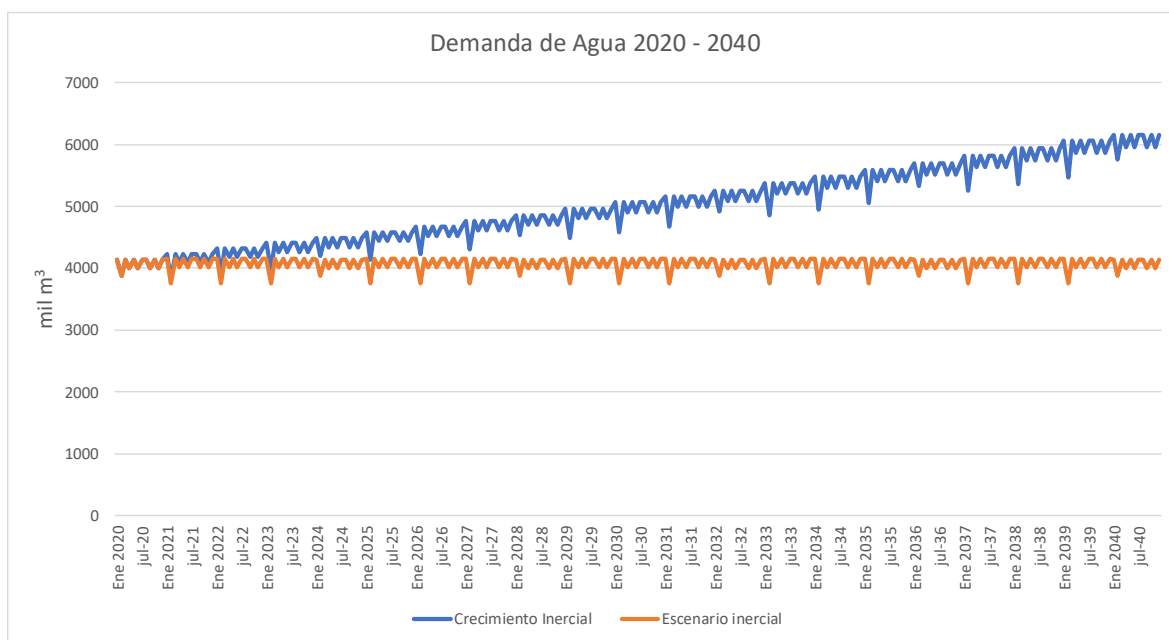


Figura 3-35 Demanda de agua para el periodo 2020-2040

El escenario que experimenta modificaciones es el de crecimiento inercial, como se detalla previamente, en el cual se ha incorporado una variable que refleja un incremento anual del 1% en la población.

Con el incremento en la demanda de agua, que oscila de 4,000 a 6,000 metros cúbicos, surge una problemática de creciente relevancia. A medida que transcurre el tiempo, la cantidad de tanques de almacenamiento instalados se torna insuficiente para satisfacer la demanda creciente de agua en ambas localidades. Esta disparidad entre la oferta y la demanda representa un desafío significativo.

Según las estimaciones realizadas a través de WEAP, se proyecta que para el año 2040 la población alcanzará los 6,466 habitantes en Escalerillas y los 1,634 habitantes en Pozuelos, sumando un total de 8,100 habitantes. Esto representa un aumento de 1,402 habitantes en comparación con la población inicial, esto se puede apreciar en la **Figura 3-36**.

Es importante resaltar, que el sistema de abastecimiento actual, al paso de los años, será insuficiente. Es decir, que se tendría que aumentar la frecuencia de llenado de los presentes tinacos para lograr abastecer a la población y cumplir con las necesidades.

La frecuencia de llenado tendría que ser diaria para los 33 tinacos, logrando así una dotación de 924,000 litros mensuales de agua.

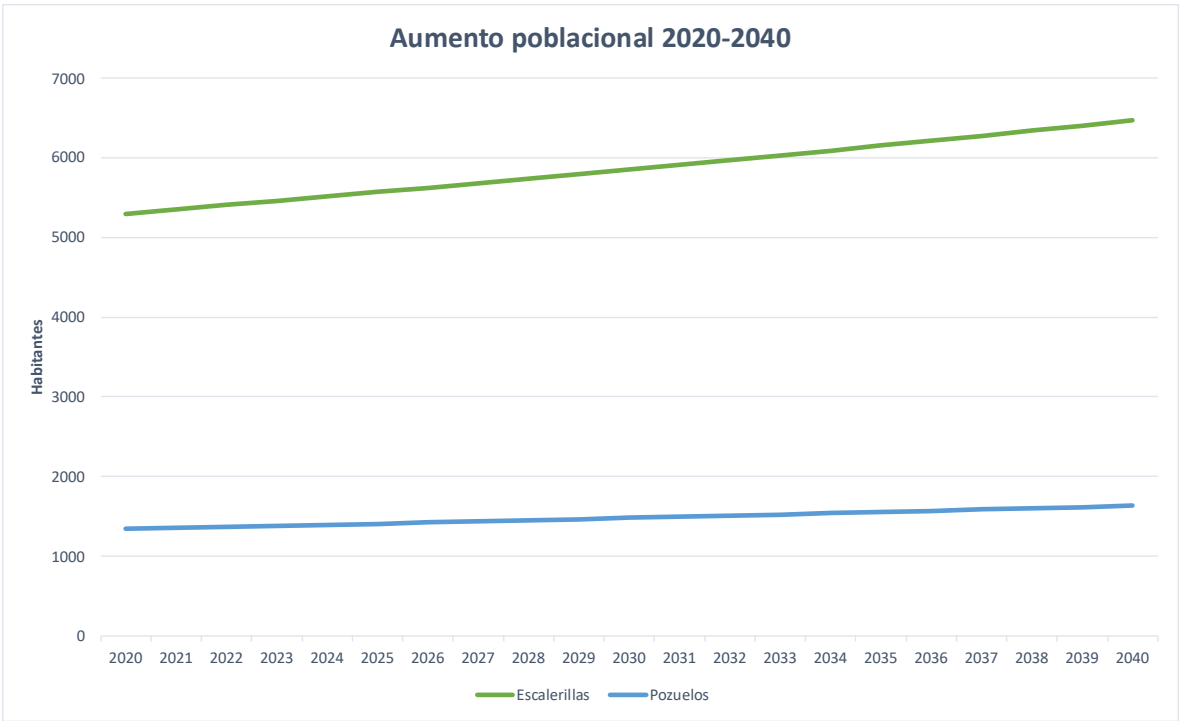


Figura 3-36 Aumento poblacional localidades Escalerillas y Pozuelos 2020 - 2040

Lo cual al 2040, se tendría una dotación de 114 litros/persona/día. Pero, se deben analizar los retos que se debe de enfrentar para poder abastecer todos los días los presentes tinacos.

Actualmente, en esta zona, las prioridades han recibido escaso interés, y en muchas ocasiones, no se puede cumplir con la frecuencia de llenado prometida, que debería ser diaria o al menos de 2-3 veces por semana. Además de la irregularidad en el llenado, se ha abordado la cuestión mediante la instalación de más tinacos, elevando su número a 81 tanques de almacenamiento, algunos de los cuales cuentan con una capacidad de hasta 5,000 litros.

La zona metropolitana de la ciudad enfrenta una crisis hídrica, lo que ha llevado a redirigir el servicio de suministro de agua en pipas hacia otras áreas de la ciudad. Esto ha resultado en una drástica disminución en la frecuencia de llenado, a veces extendiéndose a una vez cada quince días, lo que obliga a los residentes a gastar dinero de su propio bolsillo para asegurar su suministro de agua.

Sin embargo, el problema no termina ahí, ya que los habitantes de esta zona no hacen ninguna contribución financiera por el servicio que reciben en la actualidad. En otras palabras, no se realiza ningún pago por los servicios proporcionados. Esto sugiere que el suministro de agua representa una carga económica considerable para la administración gubernamental actual.

El costo de una pipa de 10,000 litros para un individuo promedio oscila entre \$1,000 y \$1,500 pesos. Sin embargo, para la administración local, los costos pueden variar, ya que actualmente se utilizan pipas proporcionadas por INTERAPAS para atender esta área. No obstante, según una reciente entrevista con el director del Departamento de Desarrollo Social, estas pipas suministradas por INTERAPAS a menudo resultan insuficientes para cubrir la demanda, lo que podría requiere la consideración de pago por renta de unidades adicionales.

Podemos tomar como base el precio más bajo para la población en general, que es de \$1,000, y considerando los puntos de llenado y la frecuencia de llenado, tenemos 71 puntos, más 11 adicionales de abastecimiento casa por casa, que también representa un gasto muy representativo para el ayuntamiento.

Bajo este esquema tenemos un total de 92 puntos de manera aproximada de abastecimiento en cada una de las localidades listadas en el área de estudio.

Entonces, para la Col. Las Pilitas tenemos 4 puntos de abastecimiento de agua, para Escalerillas 34, Casa Blanca 16, La Maroma 10 y Pozuelos 28.

Tan solo para la Col. Las Pilitas, se genera un gasto de \$7,000, para Escalerillas un total de \$34,750, para Casa Blanca \$13,400, La Maroma \$9,000 y Pozuelos un total de \$25,500, cada uno de estos gastos evaluados son por semana, y es de acuerdo con la frecuencia de llenado mencionada por los pobladores, además de tener información de los puntos de llenado que se emplean, el gran total semanal rondaría los \$153,800 pesos, un gasto considerable semanal que absorbe de manera total la actual administración sin ningún beneficio económico por parte de estas comunidades.

Si hacemos este cálculo por año se obtienen \$7,996,600, y esto es solo del presente año, si hacemos una correlación con años pasados de acuerdo con el número de tinacos, los números siguen siendo elevados.

Las estimaciones previas se fundamentaron en el costo actual de las pipas de agua que están disponibles para el público en general. Se ha obtenido un documento del ayuntamiento a través de la plataforma de transparencia, lo que posibilitará la comparación de estas estimaciones con el precio de \$1,000 por 10,000 litros de agua, al que actualmente incurre el ayuntamiento.

El periodo del gasto se comprende del 04 de noviembre del 2022 al 04 de noviembre del 2023, y de acuerdo con el documento el departamento de Desarrollo Social ha destinado un total de \$36,850,833.60 por el concepto de **pipa de agua, abastecimiento de agua mensual y/o abastecimiento de agua con camión cisterna**, y se adjunta una tabla con las cifras de atención en Escalerillas y Pozuelos durante el año en cuestión.

Tabla 27 Cifras de atención en Escalerillas y Pozuelos, durante 2023. **Fuente:** (PNT, 2023)

Mes	Viajes al mes	Litros de Agua Potable	Hogares	Habitantes
Enero	378	7,560,000	1,718	7,732
Febrero	409	8,180,000	1,859	8,366
Marzo	393	7,860,000	1,786	8,039
Abril	415	8,300,000	1,886	8,489
Mayo	436	8,720,000	1,982	8,918
Junio	387	7,740,000	1,759	7,916
Julio	431	8,620,000	1,959	8,816
Agosto	444	8,880,000	2,018	9,082
Septiembre	420	8,400,000	1,909	8,591
Octubre	464	9,280,000	2,109	9,491
Totales	4,177	83,540,000		

Al analizar la tabla anterior, nos damos cuenta de varios detalles, en primera que la cantidad de hogares beneficiados crece de manera mensual, así como los habitantes, lo que nos hace dudar acerca del abastecimiento de agua.

Además, la cantidad de viajes al mes contra los litros de agua potable denota que todas las pipas son de 20,000 litros, cuando de acuerdo con las investigaciones realizadas con los locatarios de las poblaciones, los tinacos de almacenamiento son llenados hasta 1 vez por semana.

Si dividimos la cantidad de viajes mensuales por 30 días, obtenemos un promedio de 12 viajes de pipas por día, y durante los meses de verano, cuando la demanda de agua es más alta, se realizan entre 14 y 16 viajes diarios. Esto significa que, según las cifras proporcionadas por el ayuntamiento, se suministran diariamente 274,802.63 litros de agua. Con una población total de 6,638 habitantes entre ambas localidades, la asignación es de 41.40 L/Hab/día, lo cual supera considerablemente las recomendaciones de la CONAGUA, que aún no se ve reflejado en el área de estudio, dada la constante falta de agua en la zona.

El costo por litro se establece en \$0.44 pesos, lo que implica una inversión de \$8,800 por cada camión-cisterna de 20,000 litros. El documento está considerando que todas las pipas que se mandan a esta zona son de 20,000 litros de capacidad.

El costo por pipa es exagerado, tomando en cuenta que una particular por 10,000 cobra entre \$1,000 y \$1,500, tomando como referencia lo que marca el documento, es decir, para el ayuntamiento cada pipa le cuesta aproximadamente \$4,400, el doble de una pipa normal.

Adicionalmente, la tendencia de un aumento mensual en la población y hogares plantea dudas sobre la precisión de la información. Es improbable que la población y el número de hogares aumenten constantemente cada mes.

El valor que otorga el ayuntamiento en el presente documento contra lo estimado está 250% más allá de su precio, por lo que pueden existir errores o realmente se encuentra modificada la información.

Es crucial señalar que la ciudad enfrentó una crisis hídrica en los últimos meses. Desde junio de 2023, se presentó una situación crítica en la zona metropolitana debido a la escasez de agua la Presa El Realito ya no tenía más líquido para aportar a la ciudad. La solución de la Comisión Estatal del Agua, en colaboración con el

gobierno estatal, fue perforar tres pozos para cubrir una demanda de 72 L/s (Gobierno del Estado de San Luis Potosí, 2023).

Mientras se realizaban las obras, era necesario cubrir las necesidades de recurso hídrico de más de 2/3 de la zona metropolitana que era abastecida por la Presa El Realito, y la solución fue camiones cisterna para estas zonas de la ciudad.

El documento muestra durante los meses de junio a octubre se abastecieron más de 42,920m³ de agua hacia la zona poniente de la ciudad. Y aunque los residentes de esta zona comentaban que solo se abastecían por parte de este servicio 1 vez cada 15 días, el documento muestra que se realizaban viajes diarios y con una frecuencia muy alta, a pesar de la crisis hídrica que existía en la Zona Metropolitana de la ciudad de San Luis Potosí.

Esto nos hace entender que el sistema de abastecimiento actual es caro, teniendo que desembolsar cada año, más y más dinero, además este gasto no incluye nada con respecto a la problemática de abastecimiento.

Si relacionamos esta información con el aumento de la población obtenido por WEAP, considerando el mismo precio por camión cisterna y el de puntos de abastecimiento, el precio se elevaría a los \$9,757,000 de pesos anuales, pero tendríamos que hacer una evaluación cada año, conforme el aumento de los precios de gasolina, así como aumentos de salarios para los operadores y el costo del mantenimiento de estos camiones.

La relación estimación-gasto real, está dada por aumento de 4.60 de lo estimado, entonces, para el 2040 el ayuntamiento podría reportar un gasto anual de \$44,882,200 de pesos bajo las mismas condiciones anteriores o si no incluso hasta más.

El ayuntamiento sigue sin mostrar ninguna alternativa ante tal problema, los proyectos ejecutados en la zona están sin funcionar y simplemente están varados. Además, que los residentes de la zona de Escalerillas y Pozuelos no aportan ningún solo peso por el servicio de agua potable, si se intentara cobrar una parte representativa para este servicio, los gastos no fuesen tan elevados tal y como lo presenta el documento emitido por el departamento de Desarrollo Social y Bienestar del ayuntamiento del municipio de San Luis Potosí.

3.4.2. Escenarios de saneamiento

El escenario de saneamiento implementado en WEAP revela las concentraciones de contaminantes en el Río Santiago, basándose en los parámetros de calidad de agua recopilados en los distintos puntos de análisis. Este análisis proporciona información crucial para evaluar la viabilidad del funcionamiento de una planta de tratamiento de aguas residuales, cuyo propósito es reducir significativamente la carga contaminante que actualmente se vierte en el río.

Hay que recordar que, en esta zona, se cuenta con una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) de lodos activados que, en su primera etapa de instalación, tiene una capacidad de 5 L/s, equivalente a 432 m³/día. Sin embargo, actualmente se encuentra fuera de operación, lo que ha contribuido a la evidente contaminación en el Río Santiago y ha generado problemas de eutrofización a lo largo del cauce, afectando su punto final de descarga en la Presa San José.

Las plantas de tratamiento de lodos activados ofrecen distintos beneficios, tales como, eficiencia de remoción de contaminantes, reducción de olores, reducción de carga contaminante en los cuerpos de agua y el cumplimiento normativo (Pinzon & García, 2023), este último sin duda uno de los más importantes debido a la reciente actualización de la NOM-001-SEMARNAT-2021.

Se ha demostrado que las PTAR por lodos activados son capaces de lograr altos niveles de remoción de contaminantes, con eficiencias típicas de alrededor del 85% o más para la remoción de materia orgánica medida como DBO5 (Demanda Bioquímica de Oxígeno) y DQO (Demanda Química de Oxígeno), así como altas eficiencias en la remoción de sólidos suspendidos y nutrientes (Valeriano, 2023).

Sin embargo, es crucial tener en cuenta que el costo operativo de estas plantas es significativo. Según una entrevista realizada al jefe de operación y mantenimiento de INTERAPAS, una PTAR de características similares implica un gasto mensual de \$300,000. Esta cifra engloba los costos asociados con la operación, mantenimiento y los salarios de los operadores encargados de garantizar el funcionamiento adecuado de la PTAR (Mirabal, 2023).

En el contexto del modelado realizado con WEAP, se enfocó en algunos parámetros clave, como DBO, SST y OD, debido a las limitaciones inherentes al software y a

las capacidades específicas que ofrece. Para el caso de la DBO, es notorio el cambio que se genera al habilitar el funcionamiento de una PTAR.

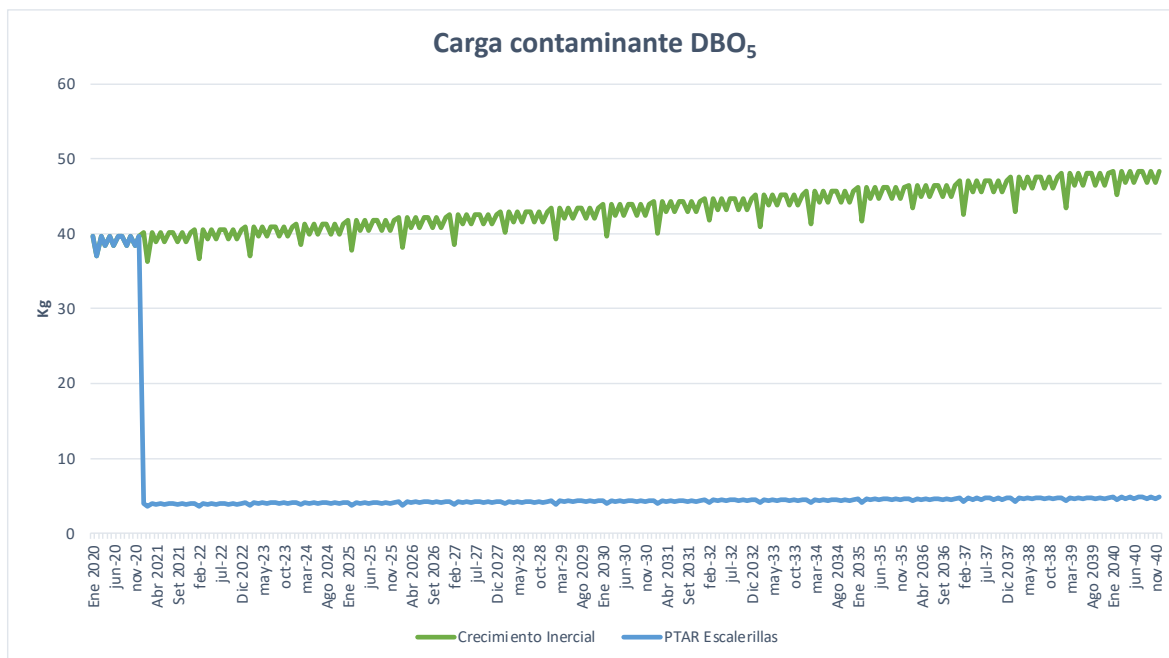


Figura 3-37 Carga contaminante de DBO₅

Se realizó una conversión de la DQO contra la DBO, debido a las limitaciones del modelo, tomando como consideración el 50% de la DQO como la DBO, es decir, si teníamos 100 mg/L de DQO en el agua tenemos presente 50 mg/L.

Esto con el fin de tomar en cuenta que el ambiente se encuentra en equilibrio con la cantidad de oxígeno.

En la **Figura 3-37** se evidencia una marcada reducción en la presencia de DBO₅ como carga contaminante en el cauce principal, el Río Santiago. Como se puede observar, a medida que la población crece, la cantidad de carga contaminante también aumenta proporcionalmente. Se observan pequeñas disminuciones, especialmente durante los meses más secos, cuando teóricamente el consumo de agua es menor, resultando en una carga contaminante más baja.

La implementación de una planta de tratamiento tiene un impacto significativo en la carga contaminante. Similarmente, se observa un cambio positivo en los niveles de oxígeno disuelto. Las cantidades mejoran considerablemente tras pasar por el proceso de tratamiento. El agua residual, al estar contaminada, tiende a mostrar

bajos niveles de oxígeno disuelto. Tomando en cuenta un agua completamente contaminada por aguas residuales municipales, la lectura puede llegar a 0, como fue el caso de los resultados del efluente de la PTAR que se encontró, evidenciando un agua residual que, a pesar de pasar por la planta, no experimenta un tratamiento adecuado.

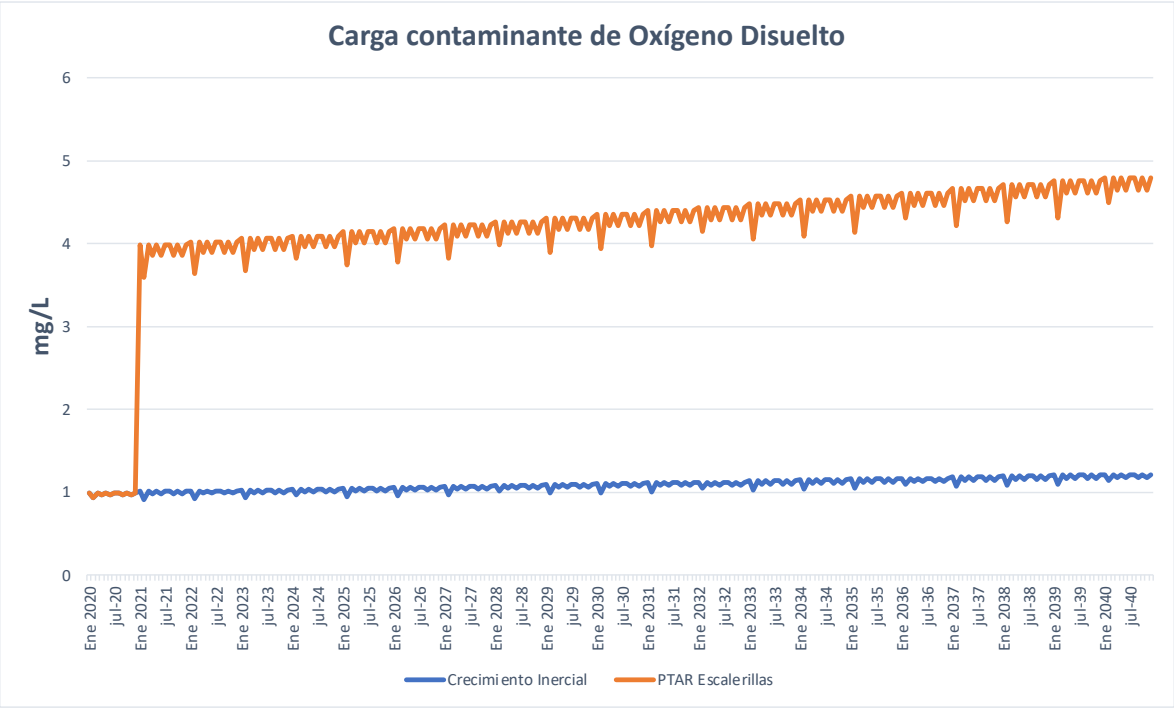


Figura 3-38 Carga contaminante de oxígeno disuelto

A pesar de tener una cantidad muy baja de oxígeno disuelto, aproximadamente 1 mg/L, que equivale al 10%, la planta de tratamiento logra aumentar significativamente la cantidad de oxígeno disuelto en el agua, hasta en un 50%. Según los indicadores propuestos por CONAGUA, si se presentan valores entre el 25% y el 75% de oxígeno disuelto, se considera un agua de buena calidad.

Finalmente, en el análisis de la carga contaminante de los sólidos suspendidos totales, se observa un comportamiento muy similar a las anteriores gráficas, esto se debe a los porcentajes de remoción (Figura 3-39). El modelo asume que estos porcentajes se mantienen constantes durante la operación de la planta de tratamiento.

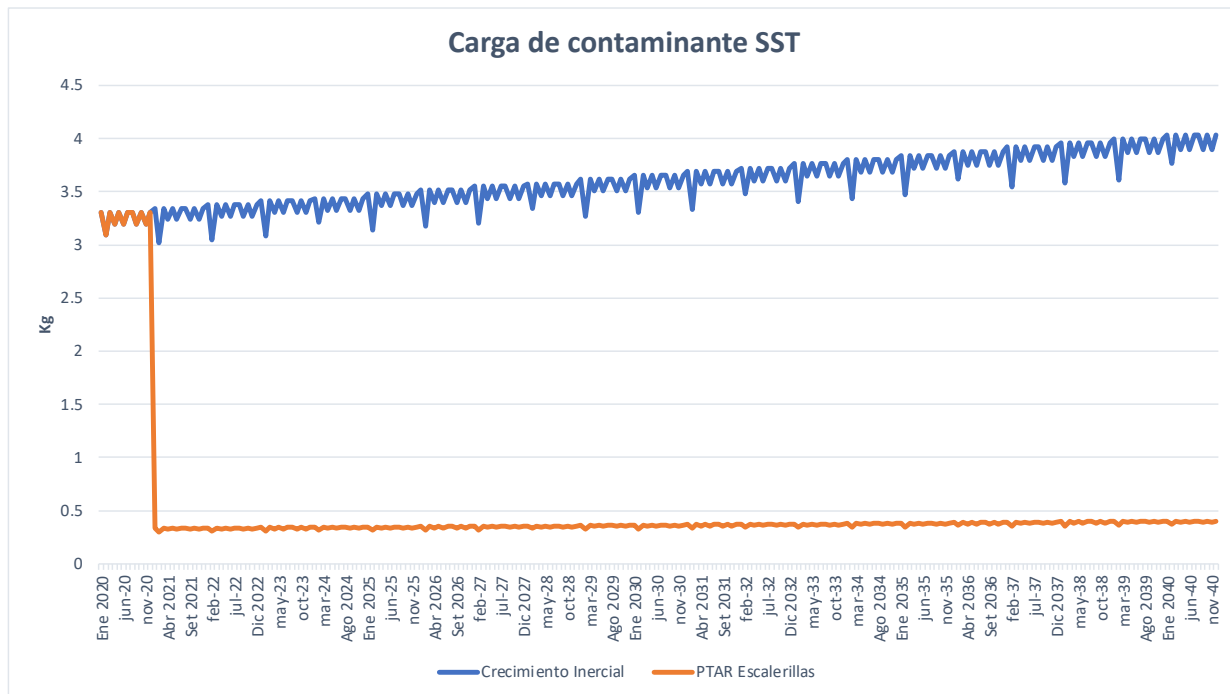


Figura 3-39 Carga de contaminante SST

No podemos representar variaciones de porcentajes de remoción debido a la ausencia de datos por parte de estar PTAR, pero, el software permite generar porcentajes de remoción de manera diaria y mensual.

Para el análisis estamos implementado un porcentaje de remoción de acuerdo con el autor ya citado, el cual permite corroborar la necesidad de una planta de tratamiento en la zona completamente funcional que permita disminuir la carga contaminante existente.

Considerando los costos asociados con la operación de una planta de tratamiento de esta magnitud, se vuelve necesario reconsiderar las soluciones en relación con el tema del saneamiento. Aunque el análisis previo destaca la necesidad de tener una planta operativa y funcional, la realidad financiera en una zona donde no se paga por el servicio de agua potable plantea un desafío significativo.

Con la dotación diaria promedio calculado de 21 L/Hab/día, y con las 2 localidades en conjunto tenemos 139,398 litros de agua, considerando que un 80% alcanza a llegar a la planta para el tratamiento 111,518 litros de manera diaria y el diseño actual soporta hasta 432,000 litros de manera diaria.

La planta solo podría estar operando al 30% de su capacidad actual, pero, los gastos no disminuyen de manera proporcional a la operación de la planta. Por qué al final, se deben de emplear con totalidad los recursos de la presente, y el mantenimiento debe hacerse por igual. Quizá los gastos energéticos empleados no sean tan significativos, pero, sin duda es un panorama que se debe evaluar.

3.5. Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS)

3.5.1. SCALL

Debido a los problemas identificados, es necesario implementar soluciones que permitan aminorar los gastos y sobre todo mejorar las necesidades básicas de la zona.

Los Sistemas de Captación de Agua de Lluvia (SCALL), tienen como objetivo recuperar y aprovechar el agua de lluvia que escurre por superficies impermeables (techos de construcciones), aprovechando la infraestructura que ya existe.

Este tipo de sistemas permite complementar la dotación de agua a zonas vulnerables, sobre todo en áreas dónde el abastecimiento de agua es escaso (Tellez Quintanar et al., 2022).

Los resultados del análisis hidrológico muestran una precipitación promedio anual de 400 mm y meses más lluviosos concentrados entre junio y septiembre, esto permite la oportunidad de implementar sistemas de captación de agua de lluvia (SCALL) como una medida efectiva para abordar el problema en Escalerillas y Pozuelos.

La instalación de SCALL en estas comunidades puede aprovechar la disponibilidad de precipitación durante los meses más lluviosos para recolectar y almacenar agua de lluvia. Estos sistemas podrían contribuir significativamente a mitigar la escasez de agua debido al sistema actualmente empleado.

Actualmente gobierno municipal inició un programa “Con Mi Cisterna Sí” que consiste básicamente entregan kits de sistemas de captación de agua de lluvia para estas comunidades mediante un estudio socioeconómico en el que de manera aleatoria como inicio de programa, se pretenden beneficiar a más de 1,000 familias y después ampliarse aún más por estas zonas, el kit contiene: un separador de aguas de capacidad de 40L, una bomba de agua, tubería de diferentes tamaños

para llevar a cabo la instalación, una bomba de agua y algunas otras herramientas, dentro de lo que destaca un tinaco de 1,000 litros de agua.

El programa "Con Mi Cisterna Sí" implementado por el gobierno municipal es un paso positivo hacia la mejora de las condiciones hídricas en comunidades necesitadas. La entrega de kits de sistemas de captación de agua de lluvia demuestra un esfuerzo por abordar la escasez de agua en estas áreas. Sin embargo, al analizar el contenido del kit, surge una preocupación importante en relación con la capacidad del tinaco proporcionado, que es de 1,000 litros.

Aunque el programa busca beneficiar a más de 1,000 familias inicialmente, la capacidad limitada del tinaco podría plantear desafíos significativos. En particular, la capacidad de almacenamiento puede no ser suficiente para capturar y retener una cantidad sustancial de agua de lluvia, especialmente en regiones propensas a sequías prolongadas. Esto podría limitar la efectividad del programa, especialmente durante periodos de estiaje en la ciudad, donde se necesita un suministro de agua sostenible.

Además, sería relevante evaluar la idoneidad del kit para las diferentes condiciones socioeconómicas de las comunidades destinatarias. Un estudio socioeconómico aleatorio es un buen comienzo, pero es crucial garantizar que los beneficiarios tengan la capacidad y los recursos para mantener y utilizar adecuadamente los sistemas de captación de agua proporcionados.

El programa "Con Mi Cisterna Sí" es una iniciativa valiosa, pero es esencial abordar las limitaciones actuales del kit, especialmente en términos de capacidad de almacenamiento, para asegurar una solución sostenible y efectiva a largo plazo para las comunidades involucradas.

Además, la implementación exitosa de SCALL no solo depende de la cantidad de precipitación, sino también de la infraestructura adecuada, la educación comunitaria y la participación de los residentes.

Al iniciar el programa, se debe tener un plan de control e implementación, pero, simplemente se otorgaron los kits y se requieren acciones, que pueden ser:

- Ofrecer capacitación sobre el mantenimiento y la gestión eficiente de estos sistemas.
- Asegurar la instalación correcta de los SCALL, teniendo en cuenta la ubicación y las necesidades específicas de cada comunidad.

- Considerar la capacidad de almacenamiento adecuada para satisfacer las demandas locales.
- Realizar ajustes según sea necesario para mejorar el rendimiento y la eficiencia.

Pero, es esencial abordar el tema del almacenamiento, por lo que, empleando una hoja de cálculo elaborada por CONAGUA con respecto al diseño de SCALL y tomando en cuenta la capacidad de agua del tinaco, nos permite obtener lo siguiente:

NO.	VIVIENDA / BENEFICIARIO	AÑO	HABITANTES VIVIENDA	DOTACION PROPUESTA	COEFICIENTE DE ESCURRIMIENTO	AREA DE CAPTACION	VOLÚMENES	Precipitación Mensual												TOTAL	DOTACION ANUAL PROMEDIO	CAPACIDAD PRELIMINAR DEL TANQUE	CAP. DEL TANQUE A UTILIZAR
								ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC				
1	Ciudadano	1	4 personas	35 l/h/día	0.90	140 m ²	CAPTACIÓN	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	38.5 l/h/d	12.9 m ³	1 m ³
							DEMANDA	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			
			MES DE INICIO	ENE	VOL. INICIAL DEL TANQUE	0.00 m ³	EN TANQUE	-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	HABITANTES MÁXIMO	SUPERF. MIN. RECOMENDADA	
						EXCEDENTE	0.00	0.00	0.00	0.00	0.59	4.04	7.78	2.82	6.04	0.00	0.00	0.00	0.00	21.27	4 hab.	127.2 m ²	
		2	4 personas	35 l/h/día	0.90	140 m ²	CAPTACIÓN	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			
		MES DE INICIO	ENE	VOL. INICIAL DEL TANQUE	-3.99 m ³	EN TANQUE	-4.68	-3.16	-3.26	-0.66	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	-2.13	-2.23	-3.99	-1.26	DOTACION MÁXIMA	DOTACION MÍNIMA	
				EXCEDENTE	0.00	0.00	0.00	0.00	0.59	4.04	7.78	2.82	6.04	0.00	0.00	0.00	0.00	21.27	101 l/h/día	-4 l/h/día			

Figura 3-40 Diseño de SCALL con tanque de almacenamiento de 1 m³

Se toma en cuenta un coeficiente de escurrimiento de 0.9 debido al material de construcción de las casas (techo cubierto con material) el cual no facilita la permeabilidad, una dotación propuesta de 30L/Hab/día de acuerdo con CONAGUA y 4 habitantes por casa hogar, además de un área de captación de 140 m² por el tamaño de las casas de las localidades que suelen ser muy grandes.

Al tener un tanque de almacenamiento con ese tamaño, podemos capturar agua durante los meses más lluviosos como podemos observar en la Figura 3-40, pero, no se permite aprovechar el volumen excedente hacia el futuro.

El año número 2 de la simulación de captación de agua de lluvia, inicia en números rojos, por lo tanto, la situación se repite, no tenemos agua para los días más secos y solo estamos enfocados en días de lluvia, y el objetivo final de la captación es al menos mantener un volumen constante de agua durante todo el año.

De acuerdo con el manual técnico de los SCALL propuesto por Anaya, et al., 2018, recomienda el cálculo del volumen de captación de agua de lluvia con los siguientes parámetros:

$$V_{cisterna} = D_j * M_{sequía+2}$$

Dónde D_j , es la demanda mensual en m^3 por mes y $M_{sequía+2}$ 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 30 L/Hab/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^3 .

NO.	VIVIENDA / BENEFICIARIO	AÑO	HABITANTES VIVIENDA	DOTACION PROPUESTA	COEFICIENTE DE ESCURRIMIENTO	AREA DE CAPTACION	VOLÚMENES	Precipitación Mensual												TOTAL	DOTACION ANUAL PROMEDIO	CAPACIDAD PRELIMINAR DEL TANQUE	CAP. DEL TANQUE A UTILIZAR	
								ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC					
1	Ciudadano	1	4 personas	35 l/h/día	0.90	140 m ²	CAPTACIÓN	3.65	0.76	1.08	3.54	5.93	8.24	12.12	7.16	10.24	1.21	1.97	0.35	446.50	38.5 l/h/d	12.9 m ³	25 m ³	
			MES DE INICIO	ENE	VOL. INICIAL DEL TANQUE	0.00 m ³	DEMANDA	4.34	3.92	4.34	4.20	4.34	4.20	4.34	4.20	4.34	4.20	4.34	4.20	4.34	51.10	HABITANTES MÁXIMO		SUPERF. MIN. RECOMENDADA
			EXCEDENTE	-0.69	-3.16	-3.26	-0.66	1.59	5.63	13.41	16.23	22.27	19.14	16.91	12.92	8.36	4 hab.	127.2 m ²						
		2	4 personas	35 l/h/día	0.90	140 m ²	CAPTACIÓN	3.65	0.76	1.08	3.54	5.93	8.24	12.12	7.16	10.24	1.21	1.97	0.35	446.50	56.25	DOTACION MÁXIMA	DOTACION MÍNIMA	25 m ³
			MES DE INICIO	ENE	VOL. INICIAL DEL TANQUE	12.92 m ³	DEMANDA	4.34	3.92	4.34	4.20	4.34	4.20	4.34	4.20	4.34	4.20	4.34	4.20	4.34	51.10	101 l/h/día	78 l/h/día	
			EXCEDENTE	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	14.32	2.42			

Figura 3-41 Diseño de SCALL con tanque de almacenamiento de 25 m^3

Con el cambio del volumen del tanque, los números mejoran bastante, puesto que ya no tenemos volúmenes excedentes durante los meses más lluviosos, exceptuando septiembre con solo 0.33 m^3 .

Al inicio del segundo año, podemos verificar que tenemos suficiente volumen en tanque para los días más secos, incluso al llegar a los meses más lluviosos tenemos un volumen en excedente lo cual con esta simulación podemos concluir que el cambio de almacenamiento es favorable para la captación de agua de lluvia, tomando en cuenta una superficie amplia.

Lo mínimo recomendado por CONAGUA es un área de 109 m^2 , esto se calcula relacionando la dotación mínima propuesta, el volumen de demanda por el año completo y el total de la precipitación promedio anual.

La ventaja de las viviendas en estas zonas es que suelen ser grandes, y alcanzan a cumplir con especificaciones mínimas.

En contraste con la herramienta de SamSamWater, permite generar una simulación similar con la diferencia que permite obtener una imagen satelital del área, y calcular la superficie. Además, de la conexión con la base de datos climática que permite calcular la precipitación media mensual.

Se tomó un predio al azar dentro de una de las comunidades afectadas, que es Pozuelos, con coordenadas 22.08, -101.1130, con un cálculo de 268.30 m^2 de área superficial, un tipo de techo de block y 35 L/hab/día de dotación.

Los resultados de la simulación mencionan que las lluvias en el mes más seco son de 7.10 mm mientras que para los meses más lluviosos alcanzan 81.10 mm obteniendo un promedio medio anual de 424 mm (

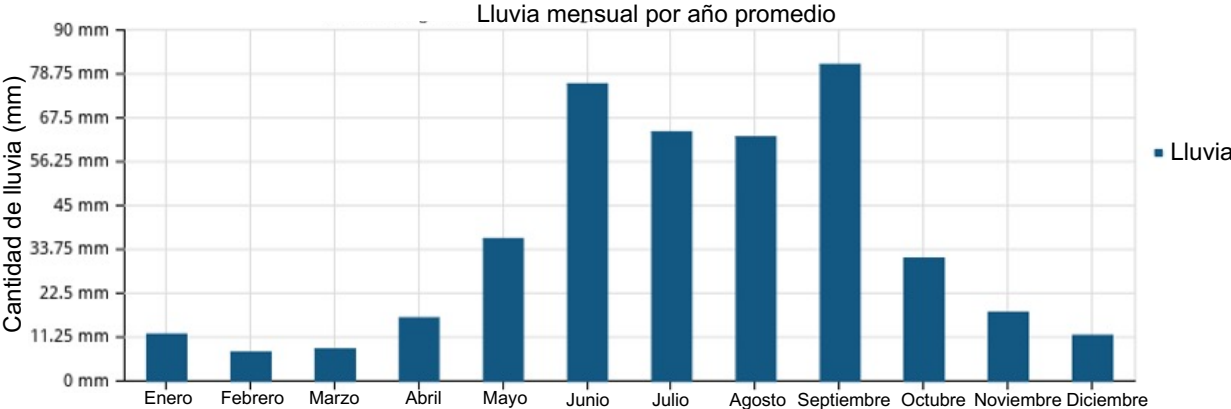


Figura 3-42).

Figura 3-42 Lluvia mensual para un año promedio. Fuente: (SamSamWater, 2023)

Entonces, un techo plano o de block, tiene un coeficiente de escurrimiento de 0.7, es decir, que puede captar el 70% de agua de lluvia. Con base a este coeficiente de escurrimiento y la superficie del techo ya calculada, se puede obtener un volumen de captación de 1,371 L (7.3 mm x 268.3 m² x 0.7) en el mes más seco, mientras que para el mes más lluvioso (septiembre) una captación de 15,231 L (Figura 3-43). Por lo tanto, la cantidad anual total que se puede recolectar es de 79,600 litros en un año promedio.

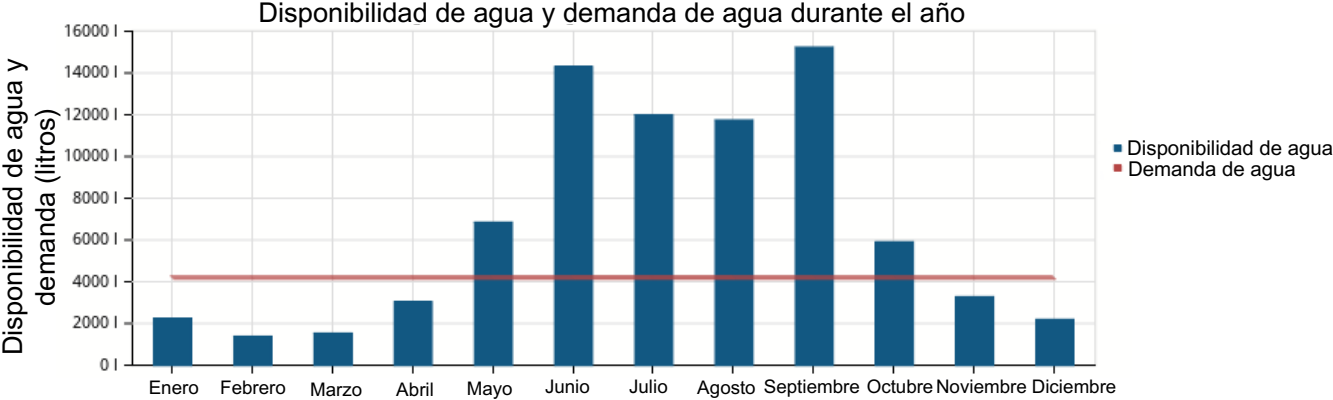


Figura 3-43 Disponibilidad y demanda de agua durante el año. Fuente: (SamSamWater, 2023)

Puesto que la demanda de agua es de 140 litros por día, se requieren de 4,200 litros por mes para abastecer un hogar de 4 integrantes, y la demanda total anual es de

51,100 litros. Por lo que, durante 6 meses del año (mayo, junio, julio, agosto, septiembre y octubre), la cantidad de agua que se puede recolectar del techo es mayor que la demanda de agua (**Figura 3-44**). Este exceso de agua se puede almacenar para su uso en los meses en los que la disponibilidad de agua es menor que la demanda.

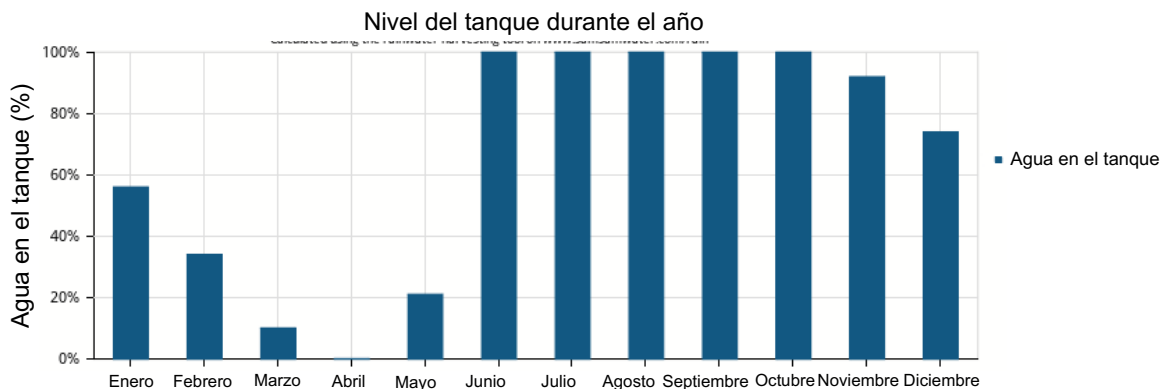


Figura 3-44 Nivel de agua en el tanque durante el año. **Fuente:** (SamSamWater, 2023)

Es posible construir un tanque o adquirir uno completamente nuevo de plástico para recoger y almacenar el agua durante los meses húmedos, de manera que esta agua pueda utilizarse durante los meses secos. Para esta ubicación, el tamaño del techo y la demanda de agua, el tamaño óptimo de un depósito de almacenamiento (tanque) es de 11700 litros (11.7 m³).

El tanque estará lleno en junio, julio, agosto, septiembre y octubre, y luego se drenará lentamente hasta que esté (casi) vacío a finales de abril.

Es importante destacar, que la simulación se basa en el promedio mensual de lluvia. La lluvia real difiere de un mes a otro y de un año a otro. Entonces, la cantidad de agua disponible y el llenado del tanque pueden ser diferentes y cambiar de un año a otro.

Cuando se planifica la construcción de un sistema de recolección de agua de lluvia, es esencial considerar las condiciones tanto de un año seco, con una probabilidad del 20%, como de un año húmedo, también con una probabilidad del 20%.

En un año seco, para garantizar un suministro adecuado de agua, se requiere la construcción de un tanque de mayor capacidad para el sistema de recolección de agua de lluvia. En este escenario, un depósito de 12,300 litros (12.3 m^3) se proyecta como suficiente para cubrir las necesidades durante todo el año. La decisión clave es si el sistema debe dimensionarse específicamente para esta situación.

Por otro lado, en un año húmedo, la cantidad de agua disponible será más que suficiente y no se requerirán medidas adicionales.

Ambas simulaciones aportan datos interesantes, pero, ambas formulan la posibilidad de un rediseño en cuestión del almacenamiento mínimo requerido, dejando en claro que un tanque de 1 m^3 es insuficiente para captar agua durante todo el año, reiterando lo anterior que este sistema otorgado solo permite ser una solución temporal.

3.5.2. Humedal

A la luz de los resultados previos, es imperativo considerar el diseño e implementación de un humedal como una propuesta viable para el tratamiento de aguas residuales en la zona de Escalerillas y Pozuelos. Dada la abundancia de beneficios previamente mencionados, esta propuesta se presenta como una oportunidad valiosa para aprovechar el terreno, mejorar la estética visual y, lo más importante, contribuir al tratamiento efectivo del agua.

Con los parámetros seleccionados durante el desarrollo de la metodología, el objetivo es diseñar un humedal que pueda tratar las aguas del efluente de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales, aprovechando el terreno y las conexiones existentes de tubería en el área. La finalidad es generar una mejora en el terreno actual al aprovechar las características del ecosistema, contribuyendo así a su mejora y sostenibilidad.

Se requiere una serie de datos para poder llegar al diseño final del sistema de humedales siguiendo la lógica a describirse:

- Población proyecto

- Caudales de diseño
- Clasificación del flujo
- Carga hidráulica/Piezométrica
- Ley de Darcy
- Coeficiente de permeabilidad/conductividad eléctrica
- Dimensionamiento del humedal
- Perfiles de velocidad de flujo
- Aforo del caudal de ingreso al humedal
- Selección de la cantidad de vertedores de orificios para la tubería de distribución y diseño de vertedores

Estos datos proporcionarán una base sólida para el diseño efectivo de tu sistema de humedales. Es crucial realizar mediciones precisas y considerar las condiciones específicas del sitio para garantizar un rendimiento óptimo.

- Población proyecto

La población de proyecto es esencial en la planificación y diseño de sistemas de agua potable o alcantarillado. Es un estimado de la cantidad de personas que se espera que utilicen o sean servidas por el sistema al final del período de diseño.

La población que habrá “n” años, después del año “i” se calcula con la siguiente ecuación:

$$P_{i+n} = P_i(1 + T_c)^n$$

El periodo de diseño para los componentes de los sistemas de agua potable y alcantarillado abarca un rango de 5 a 20 años, conforme a las pautas establecidas por CONAGUA en su obra "Datos Básicos para Proyectos de Agua Potable y Alcantarillado" (Libro 4).

Es posible marcar un inicio de operación en el año 2025 y un horizonte empleando el máximo de 20 años, dónde se pretende que este sistema siga funcionando en un futuro de manera ininterrumpida, por lo que el horizonte del proyecto será hasta el año 2045. La temperatura media anual del sitio está rondando los 22°C.

Empleando la fórmula de proyección poblacional se obtiene:

$$P_{i+n} = 6698 (1 + 0.01)^{20} = 6698(1.0201) \cong 6833$$

La dotación actual de la población se calculó anteriormente, teniendo un total de 21.11 litros/hab/día.

La aportación al drenaje sanitario se establece como el 75% de la dotación de agua potable, considerando que el 25% se pierde por diferentes factores.

$$Aportación = 0.75 * 21.11 = 15.83 \text{ litros/hab/día}$$

Debido a las variaciones del servicio de agua potable, se requiere emplear coeficientes que pueden absorber los máximos gastos extraordinarios generados, estos pueden incluir lluvias dentro del área de estudio.

El coeficiente que mejor se adapta a estos parámetros es el Coeficiente de variación máxima instantánea o de Harmon.

$$M = 1 + \frac{14}{4 + \sqrt{P}} = 1 + \frac{14}{4 + 6.833}; M = 3.11$$

Considerando que la CONAGUA considera que los sistemas de alcantarillado deben construirse herméticamente, no debe adicionarse algún otro caudal por inclusión. Por lo tanto, el caudal mínimo que llegará a la planta es del 50% del gasto medio.

Además, se debe considerar un coeficiente de seguridad, este permite garantizar un buen funcionamiento del sistema, en caso de presentarse aportaciones no previstas, debido a las conexiones al sistema en zonas que no estén consideradas o como las aportaciones por aguas pluviales (CONAGUA, 2019b). Este coeficiente está entre 1 y 2, y para este caso emplearemos el más alto que es 2.

Debemos calcular los siguientes gastos: medio, mínimo, máximo instantáneo y máximo extraordinario. Estos valores nos proporcionarán información clave, como el gasto promedio anual, el volumen mínimo de escurrimiento posible, el pico máximo que podría ocurrir en un instante y las aportaciones excepcionales no contempladas dentro del sistema.

$$Q_{med} = \frac{P * Ap}{1000} = \frac{6833 * 15.83}{1000} = 108.16 \frac{m^3}{día} = 1.25 \frac{L}{s}$$

$$Q_{min} = Cvm * Q_{med} = 0.5 * 1.25 = 54.08 \frac{m^3}{día} = 0.625 \frac{L}{s}$$

$$Q_{máxinst} = M * Q_{med} = 3.11 * 108.16 = 336.37 \frac{m^3}{día} = 3.89 \frac{L}{s}$$

$$Q_{maxextra} = Cs * Q_{máxinst} = 2 * 336.37 = 672.75 \frac{m^3}{día} = 7.79 \frac{L}{s}$$

A manera de resumen, se presentan los datos básicos de diseño para el sistema de tratamiento de aguas residuales:

Tabla 28 Datos básicos para diseño de humedal

Parámetro	Resultado
Población de proyecto, habitantes	6,833
Dotación asignada	21.11 L/hab/día
Aportación de aguas residuales	15.83 L/hab/día
Coefficiente de variación mínima	0.5
Coefficiente de Harmon	3.11
Coefficiente de seguridad	2.0
Gasto mínimo	108.16 m ³ /día - 1.25 L/s
Gasto medio	54.08 m ³ /día - 0.625 L/s
Gasto máximo instantáneo	336.37 m ³ /día - 3.89 L/s
Gasto máximo extraordinario	672.75 m ³ /día - 7.79 L/s

Para el humedal artificial, se empleará el método analítico de Kadlec & Knight, 1996.

Tabla 29 Parámetros de reducción

Parámetro	Influente (mg/L)	Efluente mg/L (NOM-001-SSA1-2021)
DBO ₅	140	30
SST	116	84
N _T	150	35
P _T	5.5	5

Y se emplearan las constantes K_A para un humedal de flujo subsuperficial, indicadas en la **Tabla 17**.

Se realizará un dimensionamiento biológico con base al contaminante que se desee remover del sistema (siempre y cuando se tengan las constantes cinéticas del contaminante), en caso de que la remoción de todos los contaminantes es prioritaria, se realizan los cálculos necesarios para cada uno y se selecciona la de mayor tamaño.

Aplicando la siguiente ecuación, se obtendrá la superficie necesaria para la remoción de los contaminantes:

$$S = \frac{Q}{k_A} \ln \left[\frac{C_0 - C^*}{C_1 - C^*} \right]$$

Determinación de superficies:

$$S_{DBO} = \frac{\frac{54.08 m^3}{día}}{0.493 \frac{m}{d}} \ln \left[\frac{150 \frac{mg}{L} - 11.45 \frac{mg}{L}}{30 \frac{mg}{L} - 11.45 \frac{mg}{L}} \right] = 220.57 m^2$$

$$S_{DBO5} = 220.57 m^2$$

$$S_{SST} = 2.51 m^2$$

$$S_{NT} = 1,088.20 m^2$$

$$S_{PT} = 156.79 m^2$$

El análisis biológico demuestra, que el dimensionamiento biológico de mayor tamaño, es el que garantiza la remoción de nitrógeno total, por lo tanto se toma este valor de superficie para el dimensionamiento del humedal.

Con esta área, es posible generar el dimensionamiento hidráulico, que permite calcular las longitudes de largo y ancho para la posible configuración del humedal de tratamiento.

Se determina la sección transversal del humedal aplicando la siguiente ecuación:

$$A_s = \frac{Q_{med,d}}{k_s * s}$$

Tabla 30 Rangos de magnitud de la conductividad hidráulica k_s en función del tipo de material granular utilizado como substrato en un humedal de flujo subsuperficial. **Fuente:** (García & Corzo, 2008)

Tipo de substrato	Tamaño efectivo D ₁₀ (mm)	Porosidad (%)	Conductividad hidráulica k_s (m ³ /m ² *día)

Arena graduada	2	28-32	100 - 1000
Arena gravosa	8	30-35	500 - 5,000
Gravas finas	16	35-38	1,000 – 10,000
Gravas medianas	32	36-40	10,000 – 50,000
Rocas pequeñas	128	38-45	50,000 – 250,000

Para este diseño, se propone el uso de gravas con diámetro de 12.7mm, con un valor de conductividad hidráulica de 4,000 m³/m²*día y un factor de seguridad por reducción de $k_s \frac{1}{4}$, para evitar problemas de atascamiento por acumulación de lodos o raíces.

Además, se pretende implementar un pendiente de lecho de 0.01 m/m.

$$A_s = \frac{54.08 \text{ m}^3/d}{\left(\frac{4000}{\frac{4}{m^2 * d}} \text{ m}^3\right) * 0.01 \text{ m/m}} = 5.408 \text{ m}^2$$

As, se refiere al área de la sección trasnversal, y se requiere fijar la profundidad del humedal, para así, obtener el valor del ancho del humedal.

La profundidad puede variar de 0.3m a 1.0m, y en la práctica se ha encontrado que el valor que funciona es de 0.6m, por lo que emplearemos ese valor para obtener el ancho.

$$W = \frac{5.408 \text{ m}^2}{0.6 \text{ m}} = 9.0133 \text{ m} \approx 9 \text{ m}$$

Conocido el ancho del humedal y la superficie determinada con el dimensionamiento biológico se determina la longitud del sistema mediante la siguiente ecuación:

$$L = \frac{1088.20 \text{ m}^2}{9 \text{ m}} = 120.9111 \text{ m} \approx 121 \text{ m}$$

Es necesario calcular la relación ancho-largo, esto en beneficio de depuración de las aguas, pero, existen problemas como flujos preferenciales o presencia de agua sobre el lecho. Se recomiendan lechos de relación largo ancho 2 a 1, 3 a 1 y 4 a 1. Como la relación sobrepasa lo recomendado, ya que al dividir el ancho y el largo el resultado es 13.44, emplearemos una reconfiguración, y dividir la superficie total, en

varias celdas, para este caso, tendríamos 3 en total de largo igual a 25 metros y de ancho 15 metros.

Esta configuración permite cumplir con la configuración propuesta de largo-ancho. Teniendo un área total de 1,125 metros.

Y para verificar que el área se adapta a las consideraciones del tipo de humedal seleccionado, se procede a la verificación de la carga orgánica superficial:

$$C_s = \frac{Q * C_0}{S} = \frac{54.08 \frac{m^3}{día} * 140 \frac{mg}{L}}{1125 m^2} = \frac{6.73 gDBO_5}{m^2} * día$$

La carga orgánica para este tipo de configuración tiene un rango de 3 a 7.5, por lo que la carga orgánica superficial bajo esa área es válida.

Se procede a verificar el tiempo de retención hidráulica, por días, esta configuración tiene un rango de 4 a 15 días.

$$TRH = \frac{\text{Área} * \text{profundidad} * 0.365}{Q_{med}} = \frac{1088.20 m^2 * 0.6m * 0.365}{54.08 \frac{m^3}{día}} = 4.40 \text{ días}$$

Con base en los parámetros de diseño definidos, se presenta la viabilidad de establecer un humedal artificial en el área de estudio. Integrando los tratamientos primarios ofrecidos por la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR), se plantea la implementación del humedal como una fase de pulimento para el agua residual. Esta estrategia posibilitaría la reducción del área de diseño del humedal, lo cual, a su vez, permitiría la incorporación de múltiples sistemas de tratamiento adicionales en la misma área geográfica. Este enfoque no solo optimizaría la eficacia del tratamiento, sino también maximizaría la capacidad de tratamiento en el contexto del área de estudio.

De acuerdo con Párraga & Rodríguez en 2022, la vida útil de un humedal es de 25 años, y sus requerimientos energéticos para operar son mínimos, dado que se aprovecha la topografía del área y el agua puede bajar por gravedad. Además, recomiendan que el mantenimiento del humedal sea podar cada año, cuando se empiecen a secar las partes aéreas de las plantas; y de 3 a 4 años deben cambiarse el medio granular debido que se pueden presentar obstrucciones por la acumulación de sólidos generando interrupción del flujo, además se tendría que eliminar los excesos de vegetación, regular el nivel del agua y limpieza de tuberías de distribución (Párraga & Rodríguez, 2022).

Con la información de los anteriores autores, nos permite inferir que la operación y mantenimiento de un humedal es bastante accesible y además que no requiere de gran personal.

De acuerdo con Fuentes en 2021, menciona que un humedal tiene un costo de operación y mantenimiento de 1 a 3 pesos por m³, mientras que el precio de tratamiento de una PTAR es de 7 a 10 pesos por m³ (Fuentes, 2021).

Y el beneficio económico no solo se aplica dentro de la operación y mantenimiento, también en la construcción del mismo, una PTAR puede significar un costo de inversión bastante elevado, tal es el caso de de la localidad de Pergueros, la cuál solicitó una inversión de \$19,837,831.93 para una PTAR de beneficio a 3,869 habitantes o el caso de la rehabilitación de una PTAR ubicada en el municipio de tijuana para la ampliación de su caudal de tratamiento, dónde la inversión proyectada es más de \$500,000,000 (ASTEPA, 2018; CESPT, 2020).

De acuerdo con datos de AACUI, en el 2023, un sistema de tratamiento que se propone bajo el área de diseño propuesta sin considerar ningún tipo de tratamiento, supera apenas \$1,100,000. Y con la instalación de un sistema primario de tratamiento el costo total aumenta \$1,450,000 (AACUI, 2023).

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.

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, aunque 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, SDT, NT, PT), 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 permitirá 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 m³/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 DBO₅, 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.

REFERENCIAS

- AACUI. (2023). Evaluación de costos de humedal. San Luis Potosí, San Luis Potosí, México: AACUI.
- Alfaro de la Torre, C., Tejeda Gonzalez, J. C., Garcia Romero, E., Salto Quintana, F., & Gonzalez Balderas, R. d. (2021). Situación del abastecimiento de agua a las poblaciones rurales en México: estudio de caso en San Luis Potosí. *Aqua-LAC*, 13(2), 116-137.
- Alva, F. B., & Martínez, T. Y. (2018). Crecimiento urbano y su impacto en el paisaje natural: El caso del área metropolitana de San Luis Potosí. *Revista Internacional de Estadística y Geografía*, 9(2), 66-77.
- Andagua, L. V., León, L. P., Cadenas, J. P., Loayza, M. R., Moreno, M. M., & Collas, L. M. (2022). Humedal estacionario construido para el tratamiento de drenaje ácido de mina de la Planta Concentradora de Mesapata-Catac. *Aporte Santiaguino*, 15(1), 117-133.
- Angel, S., Parent, J., Civco, D. L., & Blei, A. M. (2011). *Making Room for a Planet of Cities*. Lincoln Institute of Land Policy.
- ArcGIS Resource Center. (s.f.). *¿Qué es ArcGIS?* Retrieved 16 de Julio de 2023, from <https://resources.arcgis.com/es/help/getting-started/articles/026n00000014000000.htm>
- Asprilla, W. J., Ramírez, J. S., & Rodríguez, D. C. (2020). Humedales artificiales de flujo subsuperficial: comparación de metodologías de diseño para el cálculo del área superficial basado en la remoción de materia orgánica. *Ingenierías USBMed*, 11(2), 65-73.
- ASTEPA. (2018). Validación o dictamen de factibilidad PTAR Pegueros. Tepatitlán, Jalisco, México: CONAGUA.
- Ávalos, E. P. (2022). Evaluación de elementos potencialmente tóxicos en agua, sedimento y lirio acuático de la presa San José en San Luis Potosí. San Luis Potosí: Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
- Baltazar, T. J. (25 de Octubre de 2022). Estado actual del abastecimiento al poniente de la ciudad. (J. J. Félix-Carrillo, Entrevistador)

- Banco Mundial. (2017). *Informe sobre el desarrollo mundial 2017: La gobernanza y las leyes*. Washington: Banco Mundial.
- Blanco-Zuñiga, C. R., Useche-de-Vega, D. S., & Rojas-Arias, N. (2022). Efecto de la potencia y número de aspas de un aireador rotativo sobre la transferencia de oxígeno disuelto en agua. *Ingeniería*, 27(1), 1-14.
- Boyd, C. E. (16 de Octubre de 2017). *Conductividad eléctrica del agua, parte 1*. Profesor Boyd: Principios y medición de un importante parámetro de producción: <https://www.globalseafood.org/advocate/conductividad-electrica-del-agua-parte-1/>
- Brenes, R., Cadena, A., & Ruiz-Guerrero, R. (2011). Monitoreo de la concentración de nitrato en el acuífero del Valle de Puebla. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 27(4), 313-321.
- Calcina-Benique, M., Calcina-Benique, L. E., L.E., C.-R., Huaraya-Chambi, F., Salas-Camargo, A., & Tejada-Meza, K. (2022). Arsénico en aguas subterráneas de la cuenca del río Callacame y su impacto en suelos agrícolas en Desaguadero, Puno – Perú. *DYNA*, 89(221), 178-184.
- Camacho, J. (2021). *Presa San José: Un gigante de la ingeniería hidráulica en SLP*. Retrieved 01 de Septiembre de 2023, from <https://www.liderempresarial.com/presa-san-jose-un-gigante-de-la-ingenieria-hidraulica-en-slp/>
- Camacho-Ballesteros, A., Ortega-Escobar, H. M., Sánchez-Bernal, E. I., & Can-Chulim, Á. (2020). Indicadores de calidad físico-química de las aguas residuales del estado de Oaxaca, México. *Terra Latinoamericana*, 38-2(Número especial), 361-375.
- Campos, A. D. (1992). *Procesos del Ciclo Hidrológico*. Universitaria Potosina.
- Campos-Aranda, D. F. (2015). Búsqueda de tendencias en la precipitación anual del estado de Zacatecas, México; en 30 registros con más de 50 años. *Ingeniería. Investigación y Tecnología*, XVI(3), 355-368.
- Cárdenas, C. G., & Sánchez, O. I. (2013). Nitrógeno en aguas residuales: orígenes, efectos y mecanismos de remoción para preservar el ambiente y la salud pública. *Universidad y Salud*, 15(2), 72-88.

- Castañeda, O. J., Jiménez, V. T., & Ramírez, R. R. (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), 1-18.
- Castro, M., Almeida, J., Ferrer, J., & Díaz, D. (2014). Indicadores de la calidad del agua: Evolución y tendencias a nivel global. *Ingeniería Ambiental*, 10(17), 111-124.
- Castro, N. A., & Rajadel, O. N. (2021). Otra cara de la problemática del agua y el cambio climático; dos realidades sinérgicas yuxtapuestas. *Universidad y Sociedad*, 13(4), 351-360.
- Castro, P. N., & Rajadel, A. O. (2021). Otra cara de la problemática del agua y el cambio climático; dos realidades sinérgicas yuxtapuestas. *Revista Universidad y Sociedad*, 13(4), 351-360.
- Castro, S. L. (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.
- CESPT. (2020). Proyecto de construcción y rehabilitación de la planta de tratamiento de aguas residuales San Antonio de los Buenos. Tijuana, Baja California, México.
- Ciencia y Tecnología del Tequila* (Segunda ed.). (s.f.). Gschaedle: CONACYT.
- CNCUB. (22 de Noviembre de 2021). *Matorrales*. Ecosistemas de México: <https://www.biodiversidad.gob.mx/ecosistemas/Matorral>
- CNDH. (2014). *El Derecho Humano al Agua Potable y Saneamiento*. CNDH.
- Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. (19 de Marzo de 2019). *Gobierno de México*. Retrieved Febrero de 2022, from ¿Sabes cuánta agua consumes?: <https://www.gob.mx/conanp/articulos/sabes-cuanta-agua-consumes>
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2019). *Estadísticas del Agua*. México: CONAGUA.
- CONAGUA. (14 de Febrero de 2014). *Uso sustentable del agua*. <https://www.gob.mx/e pn/articulos/uso-sustentable-del-agua>
- CONAGUA. (2015b). Diseño de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Municipales: Humedales Artificiales. En C. N. (CONAGUA) (Ed.), *Manual de Agua Potable*,

- Alcantarillado y Saneamiento (MAPAS)* (pág. 121). Ciudad de México: Comisión Nacional del Agua (CONAGUA).
- CONAGUA. (2017c). *Situación del Subsector de Agua Potable, Drenaje y Saneamiento*. México: CONAGUA, SEMARNAT.
- CONAGUA. (2019a). *Estadísticas del Agua*. México: CONAGUA.
- CONAGUA. (2019b). *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento*. México: CONAGUA.
- CONAGUA. (2020). *Escalas de clasificación de la calidad de agua por parámetro*. México: Gerencia de Calidad del Agua.
- CONAGUA. (2021a). *Inventario Nacional de Plantas Municipales de Potabilización y de Tratamiento de Aguas Residuales en Operación*. Ciudad de México: CONAGUA.
- CONAGUA. (Septiembre de 2021b). *Registro Público de Derechos de Agua*. <http://sina.conagua.gob.mx/sina/tema.php?tema=usosAgua&ver=reporte&o=0&n=nacional>
- CONANP. (2021). *Estudio Previo Justificativo para la declaratoria del Área de Protección de Flora y Fauna Sierra San Miguelito*. San Luis Potosí: SEMARNAT.
- CONEVAL. (2021). *Índice de Rezago Social 2020*. Ciudad de México: CONEVAL.
- COPLADE (Comité de Planeación del Desarrollo Estatal). (2021). *Plan Estatal de Desarrollo. Informe*. San Luis Potosí, San Luis Potosí, México.
- Corporativo Ambiental. (2019). *Evaluación ambiental y caracterización de posible afectación del Área Natural Protegida, Zona de Conservación Ecológica Estero El Salado, en la localidad de Puerto Vallarta, por contingencia ambiental derivada de la ruptura del colector centro norte en su*. Puerto Vallarta: SEAPAL.
- Cosgrove, W. J., & Loucks, D. P. (2015). Water management: Current and future challenges and research directions. *Water Resources Research*, 51(6), 4823-4839.
- de la Peña, M. E., Ducci, J., & Zamora, P. V. (2013). *Tratamiento de aguas residuales en México*. Ciudad de México: Banco Interamericano de Desarrollo. https://agua.org.mx/wp-content/uploads/2018/02/Tratamiento_de_aguas_residuales_en_Mexico2013.pdf

- de León, O. (2017). *Aplicación de tecnologías apropiadas para mejorar el abastecimiento y la calidad del agua en comunidades rurales*. Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Facultad de Ingeniería. San Luis Potosí: Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
- Díaz de León, Z. O. (Febrero de 2017). *Aplicación de tecnologías apropiadas para mejorar el abastecimiento y la calidad del agua en comunidades rurales*. San Luis Potosí, San Luis Potosí, México: Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
- Díaz, F. E. (Diciembre de 2005). *Interceptación pluvial por plantaciones de pinus michoacana, encinar, y pastizal en la zona baja de la cuenca*. Tesis, 1-71. Michoacán, México: Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- Dotro, G., Langergraber, G., Molle, P., Nivala, J., Puigagut, J., Stein, O., & von Sperling, M. (2017). *Humedales para Tratamiento* (Primera ed.). Londres: IWA Publishing.
- Duhau, E. (1991). *Gestión de los servicios urbanos en México: Alternativas y tendencias*. En M. Schteingart, & D. Luciano (Edits.), *Servicios urbanos, gestión local y medio ambiente* (págs. 83-108). Ciudad de México: El Colegio de México.
- EPA. (2013, Enero 29). *Field Measurement of Oxidation-Reduction Potential (ORP)*. Athenas, Georgia, Estados Unidos: EPA.
- EPA. (20 de Junio de 2023). *Indicators: Conductivity*. National Aquatic Resource Surveys: <https://www.epa.gov/national-aquatic-resource-surveys/indicators-conductivity>
- FAO. (30 de Agosto de 2006). *Evapotranspiración Del Cultivo: Guías para Determinación Los Requerimientos de Agua de Los Cultivos*. 322. Roma, Italia: FAO.
- Fletcher, T. D., Shuster, W., Hunt, W. F., Ashley, R., Butler, D., Arthur, S., . . . Viklander, M. (2015). SUDS, LID, BMPs, WSUD and more – The evolution and application of terminology surrounding urban drainage. *Urban Water Journal*, 12(7), 525-542. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2014.916314>
- Flores, L. H., Chávez, D. Á., Ruíz, C. J., De La Mora, O. C., Figueroa, M. U., & Hernández, A. U. (2020). Estimación del factor de transporte del índice de fósforo con climatologías y escenarios de cambio climático en tierras de Jalisco, México. *Revista mexicana de ciencias pecuarias*, 11(2), 75-92.

- Foley, J. A., Defries, R., Asner, G. P., Barford, C., Bonan, G., Carpenter, S. R., . . . Kucharik, C. (2005). Global Consequences of Land Use. *Science*, 309(5734), 570-574. <https://doi.org/10.1126/science.1111772>
- Fuentes, G. J. (27 de Septiembre de 2021). *Noticias*. Humedales artificiales para tratar aguas residuales: <https://ciatej.mx/el-ciatej/comunicacion/Noticias/Humedales-artificiales-para-tratar-aguas-residuales/225>
- García, E. (2004). *Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen*. Ciudad de México: Instituto de Geografía - UNAM.
- García, S. J., & Corzo, H. M. (2008). *Depuración con Humedales Construidos. Guía Práctica de Diseño, Construcción y Explotación de Sistemas de Humedales de Flujo Subsuperficial* (Primera edición ed.). Catalunya: Universidad Politécnica de Catalunya.
- García-González, M. L., Carreño-Meléndez, F., & Mejía-Modesto, A. (Junio de 2017). Evolución de los conjuntos urbanos y su influencia en el crecimiento poblacional y el desarrollo de los espacios periurbanos en Calimaya, Estado de México, de 1990 a 2015. *Papeles de población*, 123(92), 217-243.
- Gil Antonio, M. d., Reyes Hernández, H., Márquez Mireles, L. E., & Cardona Benavides, A. (2014, Septiembre-Diciembre). Disponibilidad y uso eficiente de agua en zonas rurales. *Investigación y Ciencia*, 22(63), 67-73.
- Gobierno del Estado de San Luis Potosí. (26 de Junio de 2023). *En San Luis Potosí si hay apoyo ante crisis hídrica*. <https://slp.gob.mx/cea/Paginas/Noticias/Noticias%202023/Junio%202023/EN-SAN-LUIS-POTOSÍ-SÍ-HAY-APOYO-ANTE-CRISIS-HÍDRICA.aspx>
- Gómez-Baggethun, E., Gren, Å., Barton, D. N., Langemeyer, J., McPhearson, T., O'Farrell, P., . . . Peleg, K. (2013). Urban Ecosystem Services. En T. Elmqvist, M. Fragkias, J. Goodness, B. Güneralp, P. J. Marcotullio, R. I. McDonald, . . . C. Wilkinson, *Urbanization, Biodiversity and Ecosystem Services: Challenges and Opportunities* (págs. 175-251). Springer.
- González-Arellano, S., Larralde-Corona, A. H., & Cruz-Bello, G. M. (2021). El periurbano en México: identificación y caracterización sociodemográfica y territorial. *Papeles de Población*, 27(108), 129-145.

- Gschaedler, A. C., Rodríguez, G. B., Prado, R. R., & Flores, M. J. (2015). *Ciencia y Tecnología del Tequila: Avances y perspectivas* (Segunda ed.). Guadalajara: Logiprint Digital, S. de R.L. de C.V.
- Guevara, S. A., & Lara, P. J. (2015). Agua, pobreza y uso del tiempo en México: Análisis cuantitativo como sustento del diseño de una política pública de doble dividendo. *Nova Scienta*, 7(15), 462-481.
- HACH. (Agosto de 2014). Manual de Usuario. 2100N . Düsseldorf, Germany, Germany: HACH COMPANY World Headquarters.
- Hernández-Cruz, A., Sandoval-Solís, S., & Mendoza-Espinosa, L. G. (2022). United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. *Environmental Science & Policy*, 136, 510-519.
- Ibana-Lopez, K., Sihuay-Perales, M., Garate-Quispe, J., Araújo-Flores, J., Herrera-Machaca, M., Alarcón, A. G., & Rodriguez-Achata, L. (2021). Contaminación de agua superficial de la periferia urbana de Puerto Maldonado, al sureste de la amazonia peruana. *Revista de investigaciones veterinarias del Perú*, 32(6), 1-14.
- IMTA. (2019). *Sistema de Captación de Agua de Lluvia SCALL*. Instituto Mexicano de Tecnología de Agua. México: IMTA.
- INEGI. (2002). *Estudio Hidrológico del estado de San Luis Potosí* (Primera edición ed.). San Luis Potosí: INEGI.
- INEGI. (2002). *Síntesis de Información Geográfica del Estado de San Luis Potosí*. Aguascalientes: INEGI.
- INEGI. (2020). *Población*. https://www.inegi.org.mx/temas/estructura/#Informacion_general
- INEGI. (2021, Marzo 16). *Censo de Población y Vivienda 2020*. Retrieved Agosto 2022, from <https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2020/default.html>
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM. (2011). Hoja metodológica del indicador Índice de calidad del agua (Versión 1,00). *Sistema de Indicadores Ambientales de Colombia - Indicadores de Calidad del agua superficial*. IDEAM.

- INTERAPAS. (2013). Gestión del agua en la zona metropolitana de San Luis Potosí, Cerro de San Pedro y Soledad de Graciano Sánchez. San Luis Potosí: INTERAPAS.
- INTERAPAS. (2023). *Agua Potable*. Retrieved 01 de Septiembre de 2023, from <https://interapas.mx/agua-potable-2023/>
- IPICYT & SEGAM. (2018). *Estudio Técnico de Factibilidad para el establecimiento del Área Natural Protegida Reserva Estatal "Sierra de San Miguelito"*. San Luis Potosí: SEGAM.
- Kadlec, R. H., & Knight, R. L. (1996). *Treatment Wetlands* (Primera edición ed.). Boca Raton: CRC Press, Inc.
- Lampoglia, T. C., Agüero, R. P., & Barrios, C. N. (2008). *Orientaciones sobre agua y saneamiento para zonas rurales*. Organización Panamericana de la Salud.
- LIFE Integrated Projects. (Febrero de 2023). Recomendaciones Básicas: Diseño de sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS) en Navarra. 126. Navarra, España: NILSA.
- López, Á. B. (2012). *Cambio de uso de suelo y su impacto en el sistema acuífero del valle de San Luis Potosí, aplicando modelación numérica*. San Luis Potosí: IPICYT.
- López, R. (2021). México experimenta escasez de agua y falta de equidad en su distribución. *Gaceta UNAM*, 15-20.
- Luna-Pabello, V. M., & Aburto-Castañeda, S. (2014). Sistema de humedales artificiales para el control de la eutroficación del lago del bosque de San Juan de Aragón. *Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas*, 1(32-55), 17.
- Maguey, H. (29 de Octubre de 2018). *Gaceta UNAM*. Más de 80% del agua se va en uso agrícola y de la industria: <https://www.gaceta.unam.mx/crisis-agua-industria/>
- Marcotullio, P., Hughes, S., Sarzynski, A., Pincetl, S., Sanchez Peña, L. R.-L., & Seto, K. C. (2014). Urbanization and the carbon cycle: Contributions from social science. *Earth's Future*, 6(4), 496-514. <https://doi.org/10.1002/2014EF000257>
- Mariles, G. J. (2017). Regionalización de datos de escurrimiento de las regiones hidrológicas 20-21 y 36-37 para la obtención de gastos de diseño. México: UNAM.

- Marín-Velásquez, T. D., & Arriojas-Tocuyo, D. D. (2020). Remoción de turbidez de agua mediante filtración utilizando cáscara de coco (*Cocos nucifera*) a nivel de laboratorio. *Revista ION*, 33(2), 99-110.
- Martínez, V. M., Palacio, E. V., Cangas, R. R., Fernández, N. M., & Cotarelo, G. N. (2014). Determinación del ciclo de nitrógeno en diferentes aguas utilizadas para el consumo humano. *Higiene y Sanidad Ambiental*, 14(3), 1213-1217.
- Mballa, L. V., & Hernández, E. F. (Junio de 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*, 1(11), 137-152.
- McDonald, R. I., Kareiva, P., & Forman, R. T. (2008). The implications of current and future urbanization for global protected areas and biodiversity conservation. *Biological Conservation*, 141(6), 1695-1703. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2008.04.025>
- Meride, Y., & Ayenew, B. (2016). Drinking water quality assessment and its effects on residents health in Wondo genet campus, Ethiopia. *Environmental System Research*, 5(1), 1-7.
- Merino, P. L., & Velázquez, M. A. (2018). *Agenda Ambiental 2018: Diagnóstico y Propuestas*. (UNAM, Ed.) Ciudad de México, Ciudad de México, México: UNAM.
- Mirabal, A. J. (Febrero de 2023). Costos operación PTAR. (J. J. Félix-Carrillo, Entrevistador)
- Monroy, O. (2013). Manejo sustentable del agua en México. *Revista Digital Universitaria*, 14(10), 1-15.
- Moreira-Villavicencio, L. (2022). Infraestructura y dotación de servicio del transporte público urbano de la ciudad de Portoviejo. *Revista de Arquitectura*, 24(2), 10-16. <https://doi.org/10.14718/RevArq.2022.24.3950>.
- Mundo, M. D., Pérez, D. S., & Hernández, D. (2022). Diseño, construcción y costo de un sistema de colección de agua de lluvia cimbreada, para comunidades rurales excluidas. *Espacio I+D*, 11(30), 53-73.
- Muñoz, H., Orozco, S., Vera, A., Suárez, J., García, E., Neria, M., & Jiménez, J. (2015). Relación entre oxígeno disuelto, precipitación pluvial y temperatura: río Zahuapan, Tlaxcala, México. *Tecnología y Ciencias del Agua*, VI(5), 59-74.

- Muñoz, V. J., Macías, R. H., Delgado, R. G., Rivera, G. M., Inzunza, I. M., & Jacobo, S. M. (2017). Niveles de nitrógeno y fosforo en maíz (zea mayz l.) forrajero bajo riego con aguas residuales tratadas. *Agrofaz*, 17(2), 45-52.
- Nagendra, H., Bai, X., Brondizio, E. S., & Lwasa, S. (2018). The urban south and the predicament of global sustainability. *Nature Sustainability*, 1(7), 341-349. <https://doi.org/10.1038/s41893-018-0101-5>
- OECD. (2019). *OECD territorial reviews: Bergamo, Italy*. OECD Publishing.
- OMS. (1971). *International Standards for Drinking-Water*. Ginebra: Third Edition.
- OMS. (2011). *Guías para la calidad del agua de consumo humano* (Cuarta edición ed.). Ginebra: Organización Mundial de la Salud.
- OMS. (2014). *El derecho humano al agua y al saneamiento*. OMS.
- OMS. (21 de Marzo de 2022). *Agua para consumo humano*. Retrieved 2022 de Agosto, from <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/drinking-water>
- OMS. (2022). *Saneamiento*. Retrieved 12 de Julio de 2023, from <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/sanitation>
- ONU. (2010). *The Millennium Development Goals Report 2010*. New York: ONU.
- ONU. (2020). *Informe de los Objetivos de Desarrollo Sostenible*. New York: ONU.
- ONU-Habitat. (2018). *Índice básico de las ciudades prósperas*. Ciudad de México: ONU-Habitat.
- ONU-Habitat. (21 de Marzo de 2021). *Comprender las dimensiones del problema del agua*. <https://onuhabitat.org.mx/index.php/comprender-las-dimensiones-del-problema-del-agua>
- Organización de las Naciones Unidas (ONU). (2022). *Informe de los Objetivos de Desarrollo Sostenible*. New York: ONU.
- Organización Meteorológica Mundial (OMM). (2012). *Índice normalizado de precipitación: Guía del usuario* (OMM-No° 1090 ed.). Ginebra: M. Svoboda, M. Hayes y D. Wood.

- Organización Mundial de la Salud (OMS). (2022a). *Agua para consumo humano*. Retrieved 11 de Julio de 2023, from <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/drinking-water>
- Organización Mundial de la Salud (OMS). (21 de Marzo de 2022b). *Centro de Prensa*. Agua para consumo humano: <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/drinking-water>
- Ott, W. R. (Enero de 1978). *Water quality indices: A survey of indices used in the United States*. U.S. Environmental Protection Agency.
- Oxfam Intermón. (06 de Marzo de 2020). *La importancia del abastecimiento de agua*. <https://blog.oxfamintermon.org/la-importancia-del-abastecimiento-de-agua/>
- Padilla, R. (22 de Marzo de 2022). *Gaceta UdeG*. Una persona necesita 100 litros de agua al día: OMS: <http://www.gaceta.udg.mx/una-persona-necesita-100-litros-de-agua-al-dia-oms/>
- Párraga, C. S., & Rodríguez, M. J. (2022). Diseño de un humedal artificial como una alternativa no convencional para el tratamiento de aguas residuales en la PTAR Salitre. Bogotá, Colombia: Universidad Católica de Colombia.
- Perdomo, J. (2021). Gestión estratégica para el uso sustentable del agua del sistema de riego Río Santo Domingo: Una visión desde los actores. *Ambientellanía*, 4(1), 48-57.
- Pérez, D. J., Peña, C. E., Cervantes, L. R., & Hernández, T. I. (2016). Metales pesados y calidad agronómica del agua residual tratada. *IDESIA (Arica)*, 34(1), 19-25.
- Pérez-Díaz, J. P., Ortega-Escobar, H. M., Ramírez-Ayala, C., Flores-Magdaleno, H., Sánchez-Bernal, E. I., Can-Chulim, Á., & Mancilla-Villa, O. R. (2019). Evaluación de la calidad del agua residual para el riego agrícola en Valle del Mezquital, Hidalgo. *Acta Universitaria*, 29, 1-21.
- Pérez-López, E. (2016). Control de calidad en aguas para consumo humano en la región occidental de Costa Rica. *Tecnología en marcha*, 29(3), 3-14.
- Pinzon, C. F., & García, P. C. (2023). Evaluación del agua para consumo humano utilizando el índice de riesgo de la calidad del agua en el municipio de Puerto Nariño (Amazonas). *Agricolae & Habitat*, 6(2), 27-40.

- Plataforma Nacional de Transparencia. (16 de Noviembre de 2023). Gastos para la distribución y abastecimiento de agua en la zona poniente de S.L.P. San Luis Potosí, San Luis Potosí, México.
- Prüss-Ustünm, A., Wolf, J., Corvalán, C., Bos, R., & Neira, M. (2018). *Preventing disease through healthy environments: A global assessment of the burden of disease from environmental risks*. Francia: World Health Organization.
- Raffo, L. E., & Ruiz, L. E. (2014). Caracterización de las aguas residuales y la demanda bioquímica de oxígeno. *Industrial Data*, 17(1), 71-80.
- Ramírez, J. D. (2021). Sistema de medición y control de temperatura para un prototipo de planta de tratamiento de aguas residuales. *Investigación e Innovación en Ingenierías*, 9(1), 100-109.
- Robledo, C. J. (Octubre de 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, México: El Colegio de San Luis, A.C. .
- Rodríguez, S., Sawyer, R., & García, M. (2018, Mayo 12). *Gestión de agua y saneamiento sostenible*. Abastecimiento comunal por gravedad con tratamiento: <https://sswm.info/es/gass-perspective-es/sistemas-de/sistemas-de-abastecimiento-de-agua/sistemas-de-abastecimiento-de-0/abastecimiento-comunal-por-gravedad-con-tratamiento>
- Rodríguez-González, M. R., Jácome-Burgos, A., Molina-Burgos, J., & Suárez-López, J. (2013). Humedal de flujo vertical para tratamiento terciario del efluente físico-químico de una estación depuradora de aguas residuales domésticas. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, XIV(2), 223-235.
- Rojas, K., Vera, I., & Vidal, G. (2013). Influencia de la estación y de las especies *Phragmites australis* y *Schoenoplectus californicus* en la eliminación de materia orgánica y nutrientes contenidos en aguas servidas durante la operación de puesta en marcha de humedales construidos de flujo horiz. *Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, 1(69), 289-299.
- Rojas-Ramírez, J. J. (2019). Periurbanización en Zonas metropolitanas de Guadalajara y Ocotlán, Jalisco. *Bitácora Urbano Territorial*, 29(1), 23-32.

- Rozas, B. P. (2011). Universalización del acceso a los servicios de agua y saneamiento: problemas de un desafío pendiente. Ceará, Brasil: CEPA-ONU. <https://www.cepal.org/sites/default/files/news/files/rozasportugues.pdf>
- SamSamWater. (2023). *SamSamWater Rainwater Harvesting Tool*. <https://www.samsamwater.com/rain/>
- Sánchez, J. d. (2017). Saneamiento descentralizado y reutilización sustentable de las aguas residuales municipales en México. *Sociedad y Ambiente*, 5(14), 119-143.
- SCFI. (2001). NMX-AA-038-SCFI-2001, Análisis de agua - Determinación de turbiedad en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - Método de prueba. Ciudad de México: Diario Oficial de la Federación.
- SCFI. (2015). NMX-AA-034-SCFI-2015, Análisis de Agua - Medición de sólidos y sales disueltas en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - Método de prueba. Ciudad de México: Diario Oficial de la Federación.
- Secretaría de Desarrollo Social y Regional. (2021). *Mapeo de las Zonas de Atención Prioritaria 2021*. San Luis Potosí: Secretaría de Desarrollo Social y Regional.
- Secretaría de Salud. (2022). *NORMA Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021, Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua*. Diario Oficial de la Federación.
- SEGAM. (2020). *Plan de Manejo ANP "Reserva Estatal Sierra de San Miguelito*. San Luis Potosí: SEGAM.
- Segura, E. I. (2017). Cinética de decaimiento de coliformes fecales en un humedal artificial. Jiutepec: IMTA.
- SEI (Stockholm Environment Institute). (2020). *WEAP: Evaluación y Planeación del Agua*. Retrieved 11 de Julio de 2023, from <https://www.sei.org/projects-and-tools/tools/weap-evaluacion-y-planeacion-del-agua/#descripci%C3%B3n>
- SEI. (2017). Hidrología. En S. E. Institute (Ed.), *Tutorial* (págs. 118-137). Estocolmo: Stockholm Environment Institute.
- SEMARNAT. (2018). *Informe de la situación del medio ambiente en México*. México: SEMARNAT, CONAGUA.

- SEMARNAT. (2019). Manifestación de impacto ambiental modalidad regional para el desarrollo del proyecto: cambio de uso de suelo en terreno forestal para la construcción de la prolongación avenida Juárez-eje 140, del Km 0+000 al Km 10+28 en el municipio de San Luis Potosí, S. San Luis Potosí, San Luis Potosí: SEMARNAT.
- SEMARNAT. (2021). *Calidad de Agua*. Retrieved 30 de Septiembre de 2023, from http://dgeiawf.semarnat.gob.mx:8080/approot/dgeia_mce/html/RECUADROS_INT_GLOS/D3_AGUA/D3_AGUA04/D3_R_AGUA05_01.htm
- Seto, K. C., Fragkias, M., Güneralp, B., & Reilly, M. K. (2011). A Meta-Analysis of Global Urban Land Expansion. *PloS ONE*, 6(8), e23777. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0023777>
- Seto, K. C., Güneralp, B., & Hutyra, L. R. (2012). Global forecasts of urban expansion to 2030 and direct impacts on biodiversity and carbon pools. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109(40), 16083-16088. <https://doi.org/10.1073/pnas.1211658109>
- SGM. (2017). *Sistemas de información geográfica*. Retrieved 12 de Julio de 2023, from <https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/SIG/Introduccion-SIG.html>
- SIAPA. (2014). Saneamiento de Agua. En SIAPA (Ed.), *Criterios y lineamientos técnicos para factibilidades* (págs. 1-11). Ciudad de México: SIAPA.
- Silva, J., Torres, P., & Madera, C. (2008). Reuso de aguas residuales domésticas en agricultura. Una revisión. *Agronomía Colombiana*, 26(2), 347-359.
- Song, U. (2021). Comparison of water depth tolerance in two major wetland macrophytes, *Phragmites australis* and *Typha angustifolia*. *PHOTOSYNTHETICA*, 59(2), 238-244.
- Suárez, J., Muñoz, H., Orozco, S., Sánchez, G., Ritter, W., Carreón, M. F., . . . Treviño, J. M. (2009). Disponibilidad de agua y el cambio climático global en la subcuenca del Río Zahuapan, Tlaxcala, México. *Gestión Ambiental*, 18, 49-61.
- Swistock, B. (17 de Agosto de 2021). *Interpretación de los análisis del agua de riego*. Interpretación básica de cómo diversos parámetros de calidad del agua pueden influir en el crecimiento de las plantas durante el riego: <https://extension.psu.edu/interpretacion-de-los-analisis-del-agua-de->

riego#:~:text=Fósforo%20(P),-

Los%20niveles%20de&text=Los%20niveles%20superiores%20a%205%20mg%2F L%20pueden%20causar%20antagonismo,para%20reducir%20el%20impacto%20a mbiental.

Tellez Quintanar, C., Mocva, K. K., González, C. C., & Centeno, Á. J. (2022). ¿Cómo hacer un sistema de captación de agua de lluvia (SCALL) en mi escuela? Jiutepec, Morelos, México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

Tilley, E., Lukas, U., Lüthi, C., Reymond, P., Schertenleib, R., & Zurbrügg, C. (2022). *Humedal artificial de flujo superficial libre*. Retrieved 01 de Septiembre de 2023, from <https://sswm.info/es/gass-perspective-es/tecnologias-de/tecnologias-de-saneeamiento/tratamiento-semi-centralizado/humedal-artificial-de-flujo-superficial-libre>

Torres, P., Hernán Cruz, C., & Patiño, P. J. (2009). Índices de calidad de agua en fuentes superficiales utilizadas en la producción de agua para consumo humano. Una revisión crítica. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 8(15), 79-94.

Torrescano, E. J. (2009). Parámetros de operación en el proceso de tratamiento de agua residual por lodos activados. *Aquaforum*, 13(52), 14-19.

Torres-Navarro, C., Malta-Callegari, N., & Arriagada-Vergara, R. (2019). Metodología para cuantificar costos de distribución de agua potable en zonas rurales. *Ingeniería Industrial*, XL(1), 88-96.

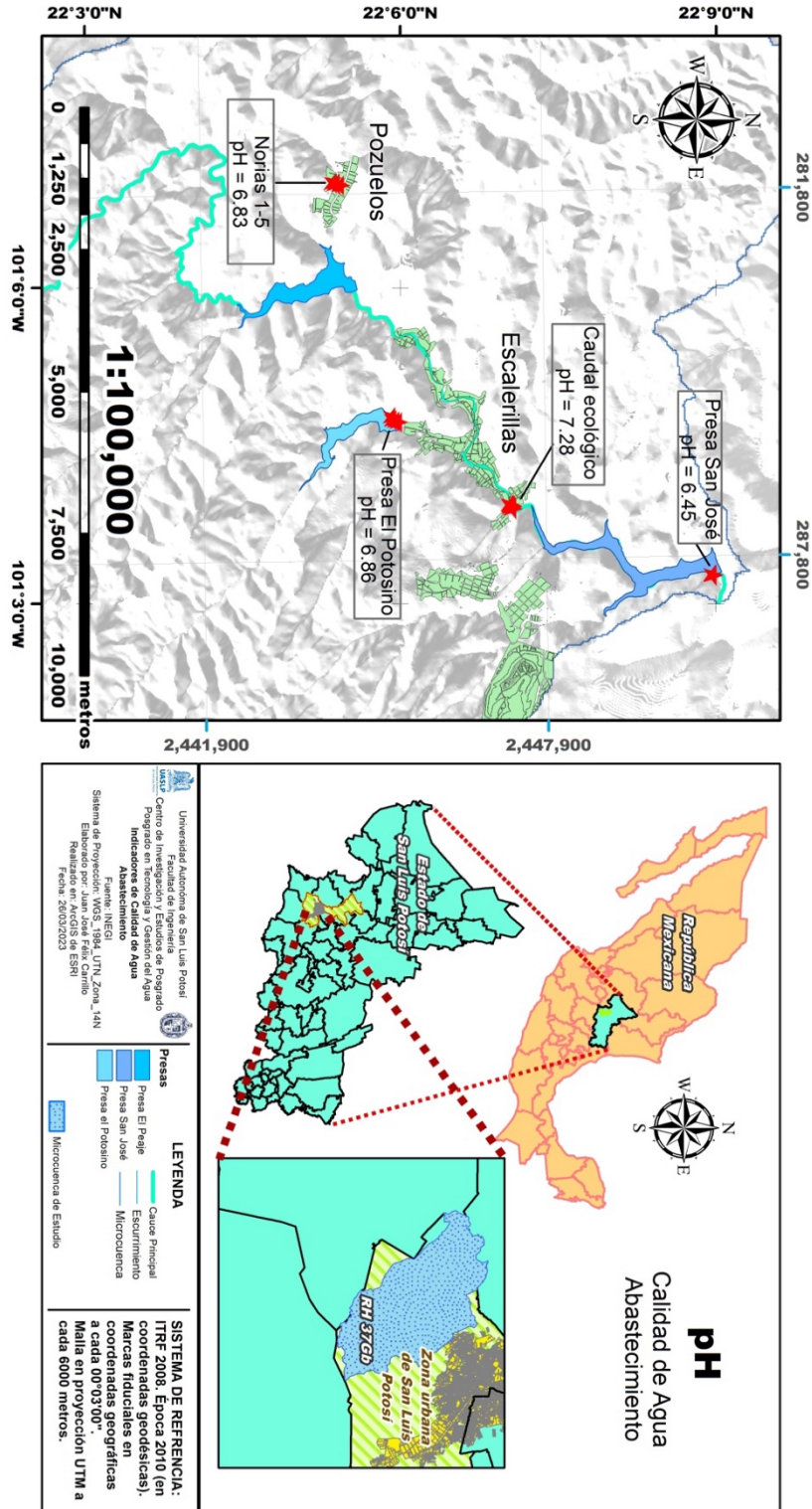
UNICEF. (2023). *Progress on household drinking water, sanitation and hygiene 2000-2022: Special focus on gender*. New York: UNICEF. Retrieved 10 de Julio de 2023, from <https://www.unicef.org/es/comunicados-prensa/1-de-cada-3-personas-en-el-mundo-no-tiene-acceso-a-agua-potable>

United Nations (UN-HABITAT). (2016). *Urbanization and Development: Emerging futures*. Kenya: United Nations (UN-HABITAT).

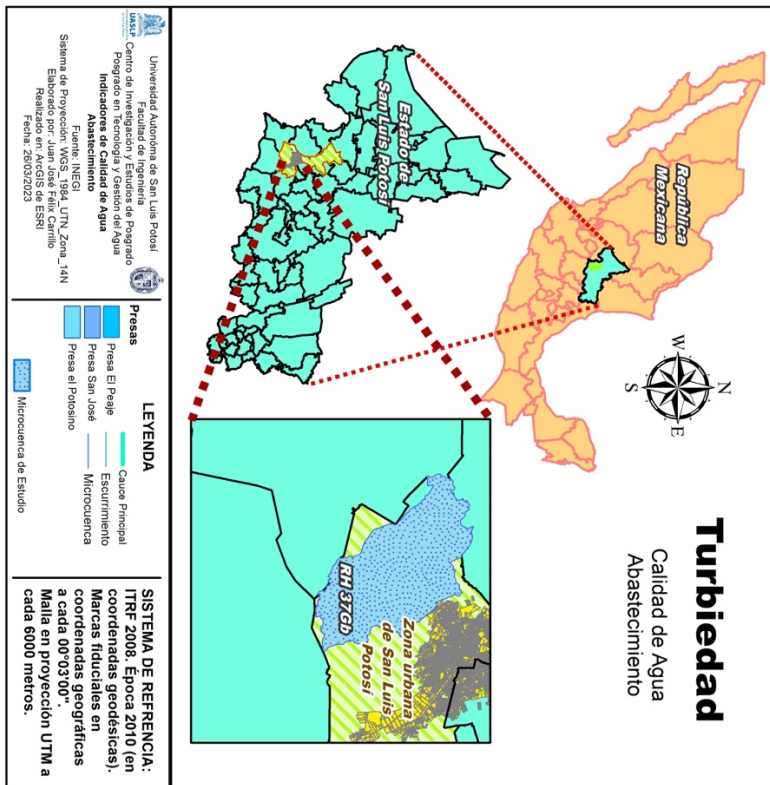
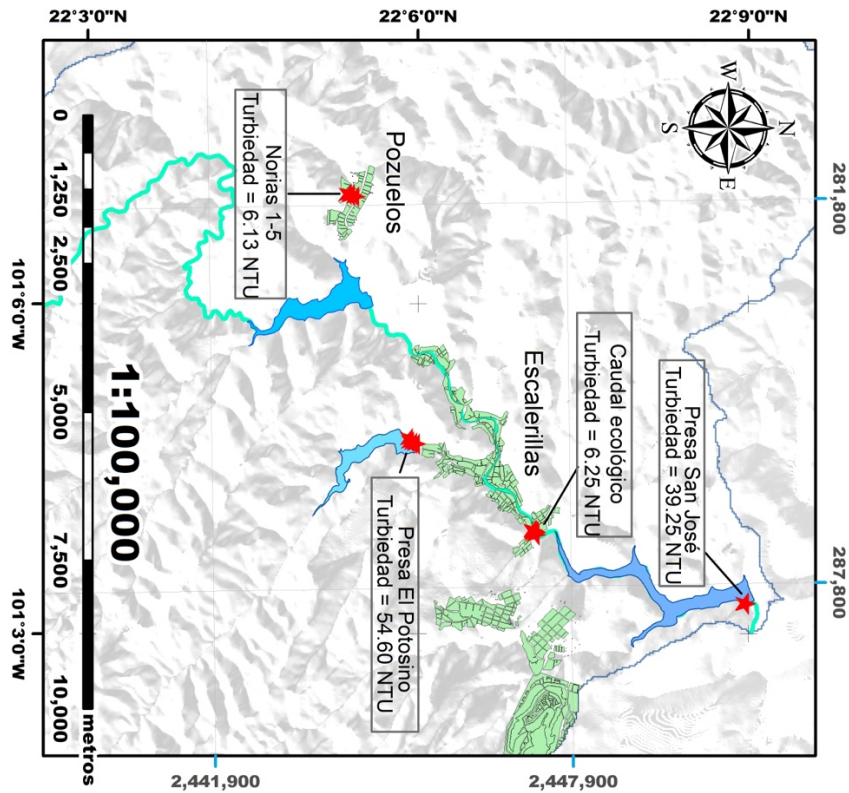
United Nations World Water Assessment Programme (UN WWAP). (2015). *he United Nations World Water Development Report: Water for a sustainable world*. Paris: United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization.

- Valeriano, M. E. (31 de Mayo de 2023). Eficiencia de la planta de tratamiento de aguas residuales del distrito de Yunguyo - Puno, 2022. *Tesis*. Puno, Perú: Universidad Privada de San Carlos.
- Velázquez-Rodríguez, A. S., Báez-Pérez, A., Hidalgo-Moreno, C., Parsa-Retana, M., Etchevers-Barra, J., & Paz-Pellat, F. (2022, Marzo 30). Formación de suelos a partir de tepetates: unidades estructurales, carbono orgánico y estabilidad estructural. *Terra Latinoamericana*, 40(1447), 1-19.
- Vidal, G., & Hormázabal, S. (2018). *Humedales construidos: Diseño y operación* (Primera ed.). Concepción: Universidad de Concepción.
- Vymazal, J. (2011). Constructed Wetlands for Wastewater Treatment: Five Decades of Experience. *Environ. Sci. Technol.*, 45, 61-69.
- Vymazal, J., & Kröpfelová, L. (2014). *Wastewater Treatment in Constructed Wetlands with Horizontal Sub-Surface Flow* (1 ed.). Springer Dordrecht.
- WEAP. (Noviembre de 2022). *¿Por qué WEAP? Antecedentes:* <https://www.weap21.org/index.asp?action=201#Approach>
- WETWINE. (2018). *Tecnología WETWINE*. Retrieved 01 de Septiembre de 2023, from <https://wetwinesoftware.eu/sistema-wetwine/tecnologia-wetwine/>
- Wills, M., & Irvine, K. (1996). Application of the National Sanitation Foundation Water Quality Index in Cazenovia Creek, NY, Pilot Watershed Management Project. *Middle States Geographer*, 95-104.
- Woods, B. B., Willson, S., Udale-Clarke, H., Illman, S., Scott, T., Ashley, R., & Kellagher, R. (2015). *The SuDS Manual*. Londres: CIRIA.
- World Bank. (2019). *World development report 2019: The changing nature of work*. World Bank.
- Zarza, L. F. (2015). *¿Cuáles son los usos del agua?* <https://www.iagua.es/respuestas/cuales-son-usos-agua>
- Zegarra-Tarqui, J. L., Santos-De Brito, J., & Fátima-Carvalho, M. (2015). Escurrimiento en pavimentos de bloques de suelo-cemento: un abordaje experimental. *Ingeniería, investigación y tecnología*, 16(1), 35-47.

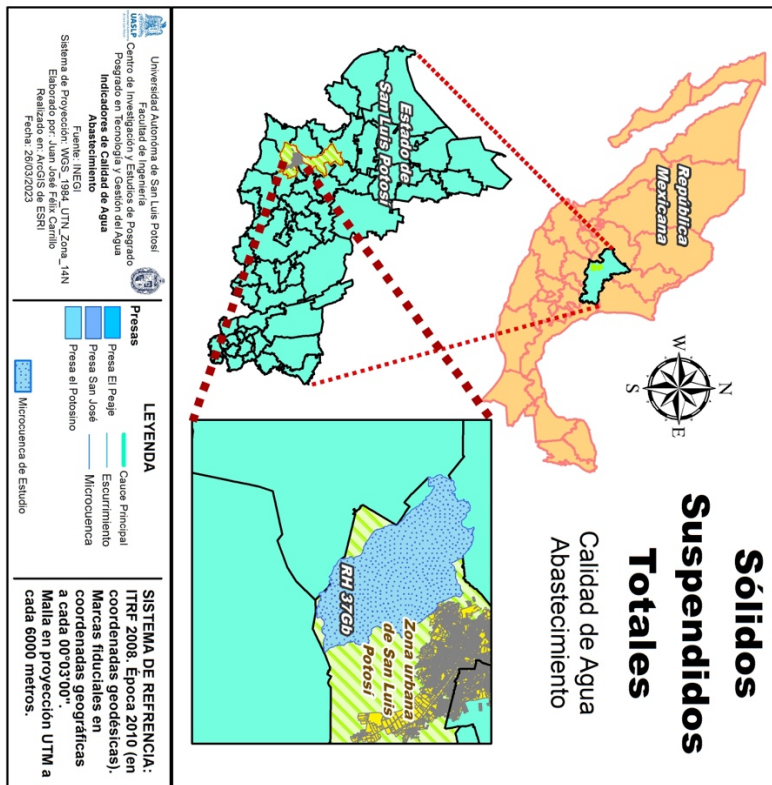
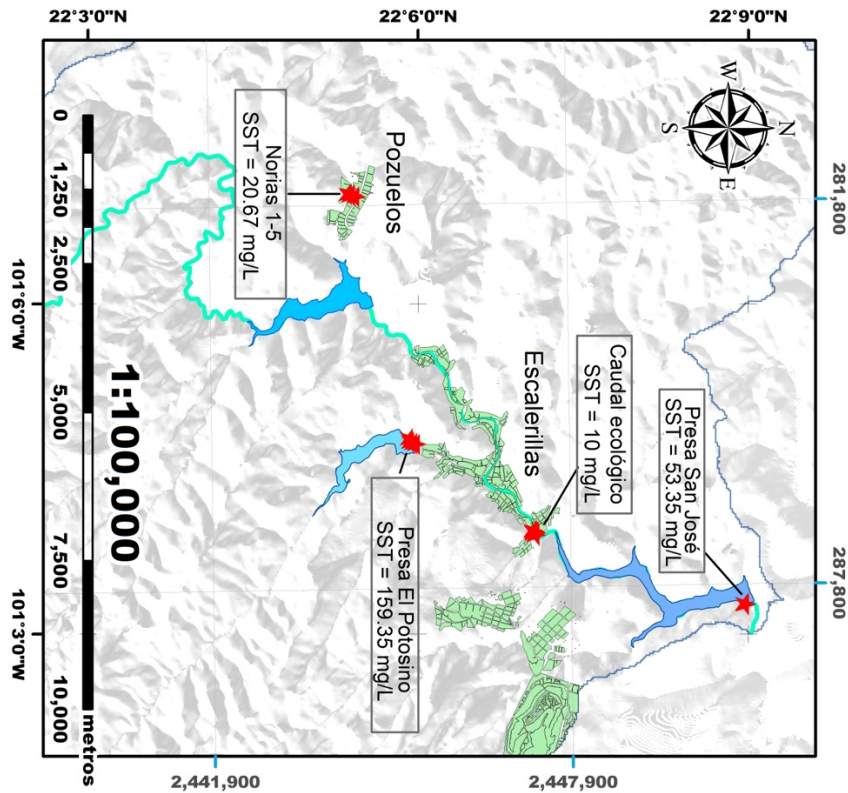
ANEXOS



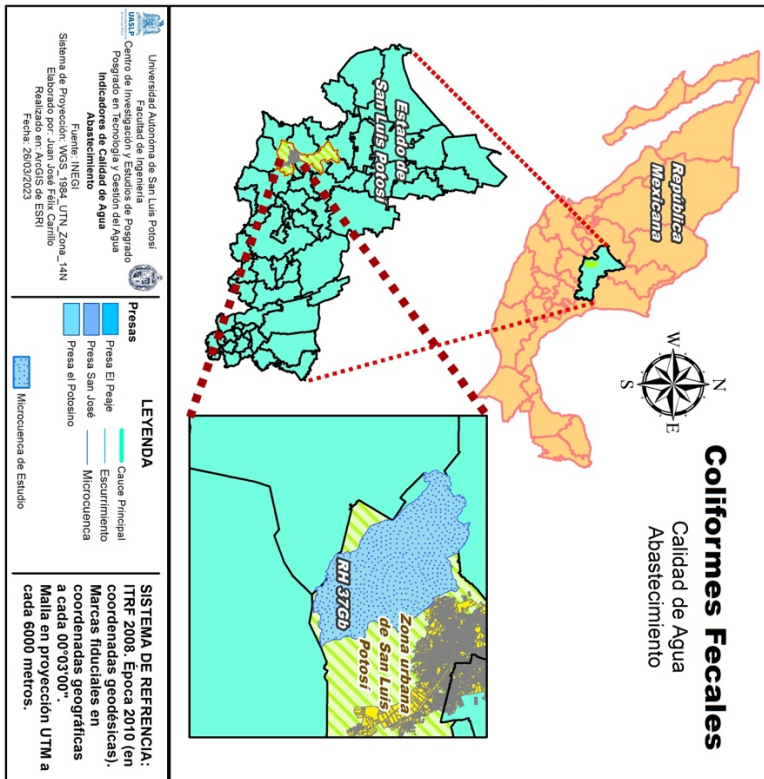
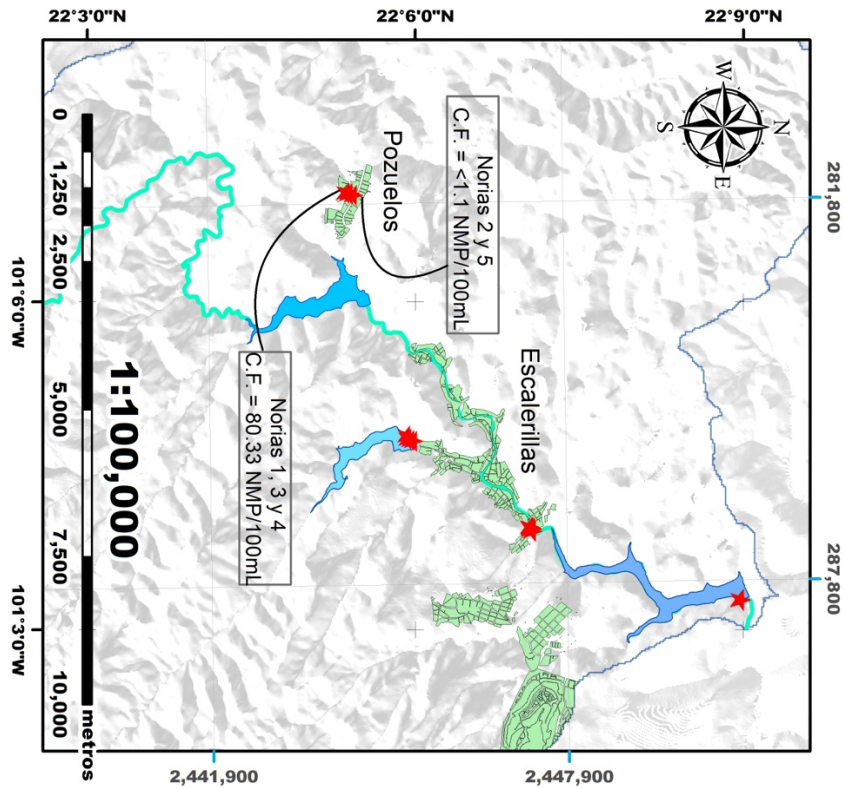
Anexo 1 Calidad de agua de posibles fuentes de abastecimiento, parámetro pH



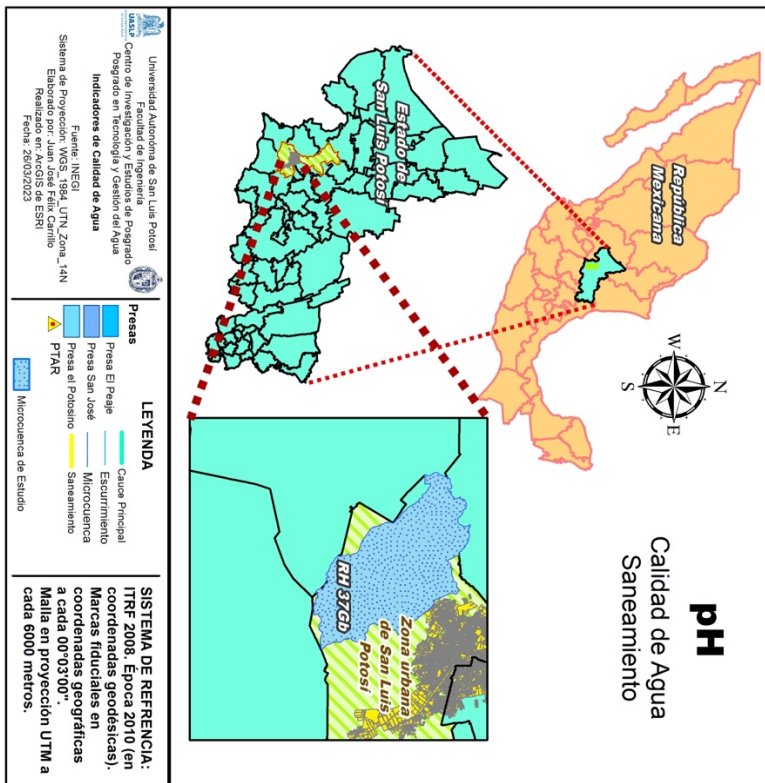
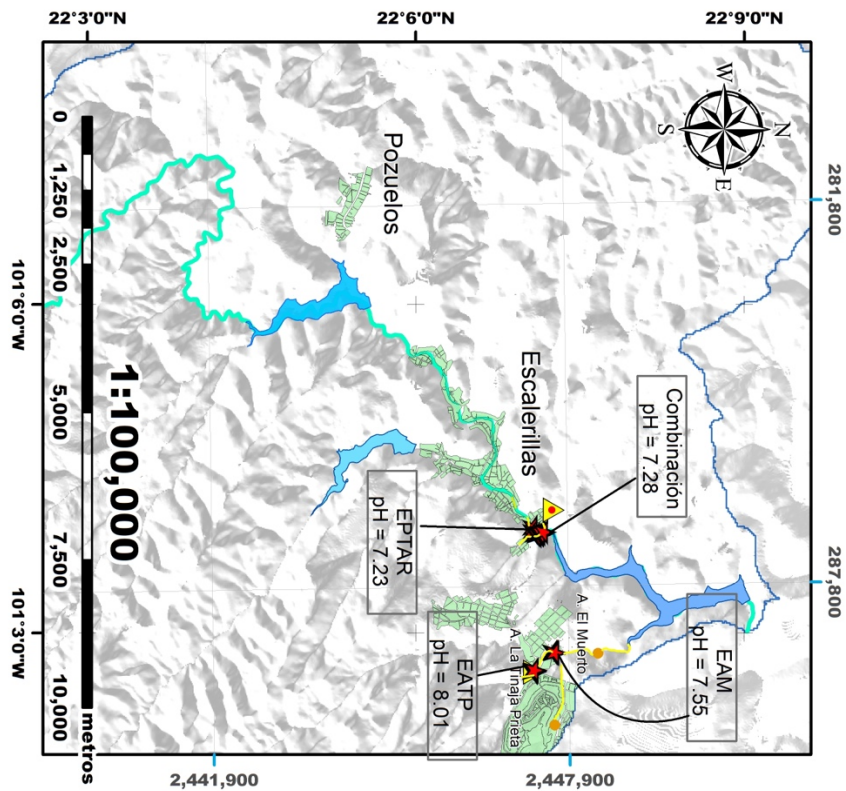
Anexo 2 Calidad de agua de posibles fuentes de abastecimiento, parámetro turbiedad



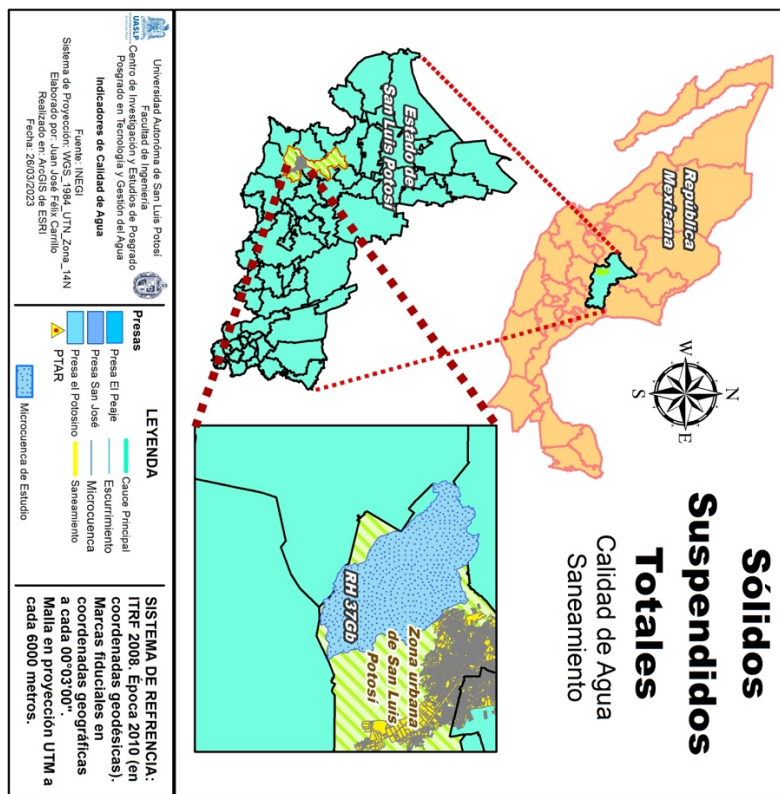
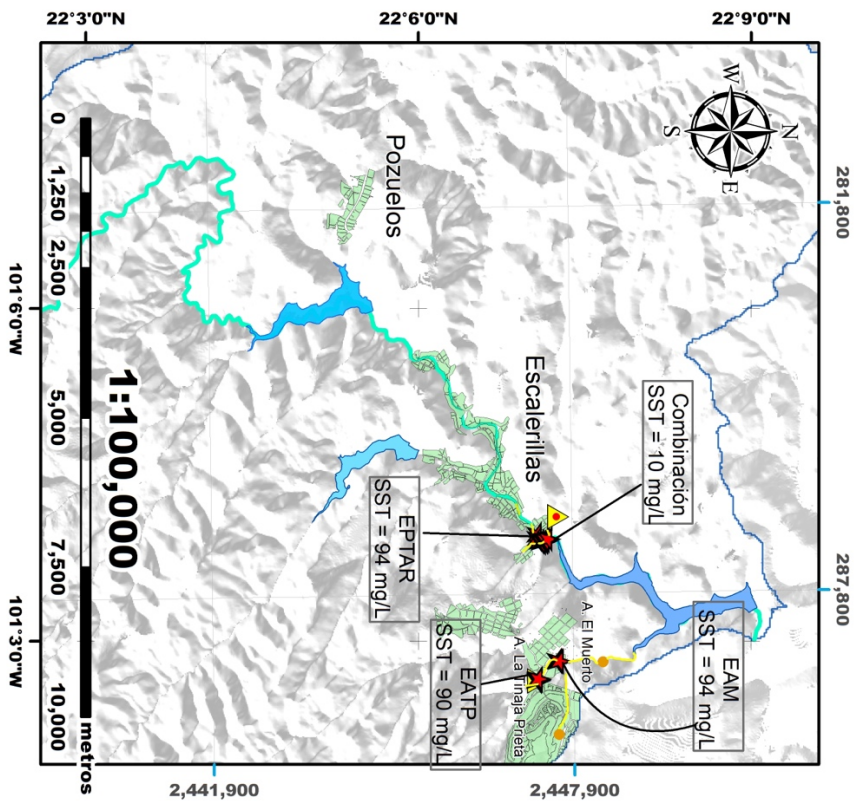
Anexo 3 Calidad de agua de posibles fuentes de abastecimiento, parámetro SST



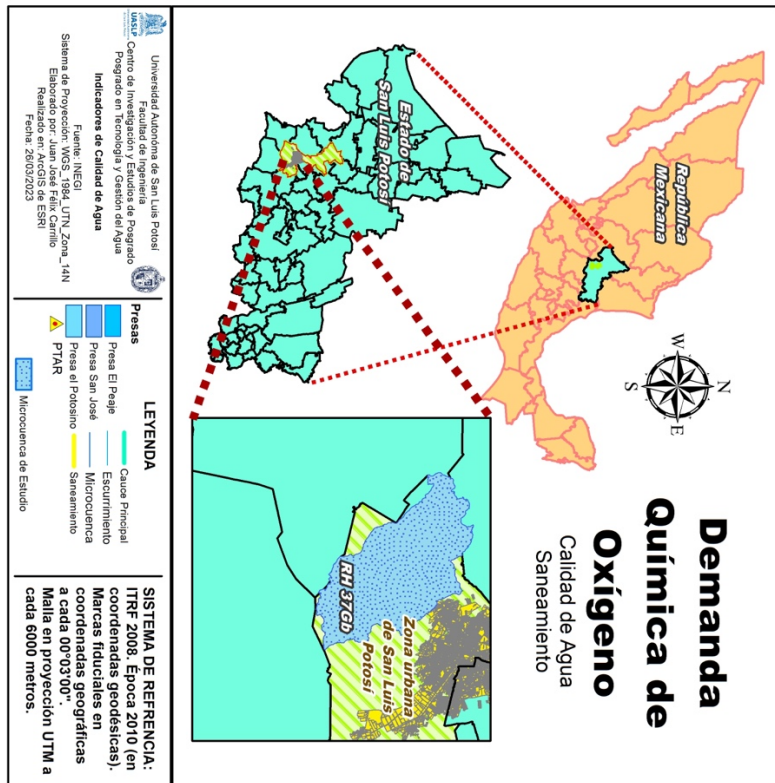
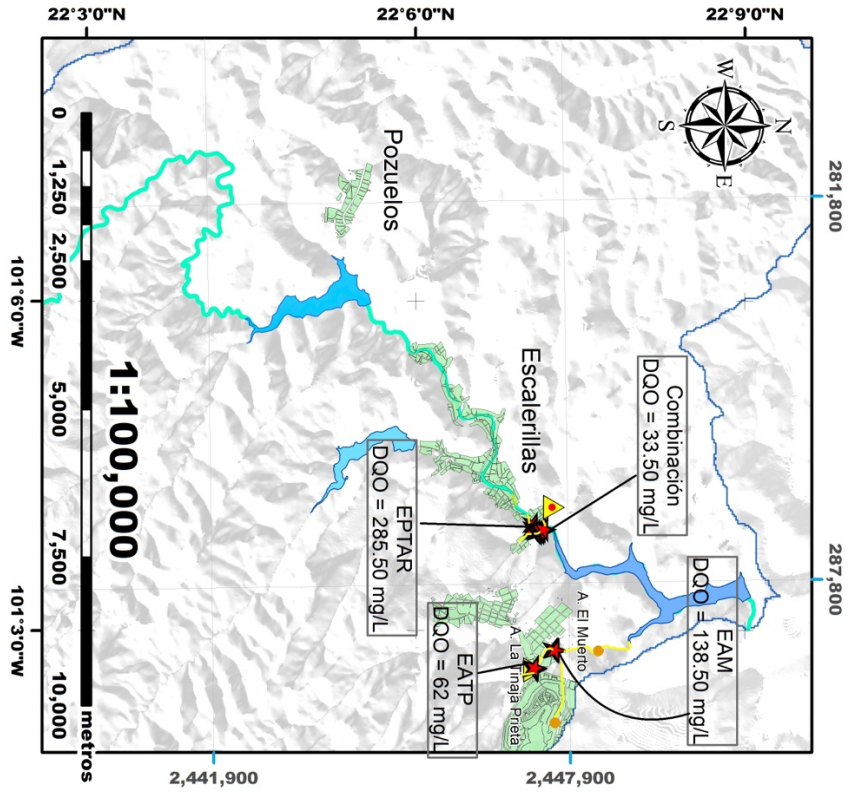
Anexo 4 Calidad de agua de posibles fuentes de abastecimiento, parámetro coliformes fecales



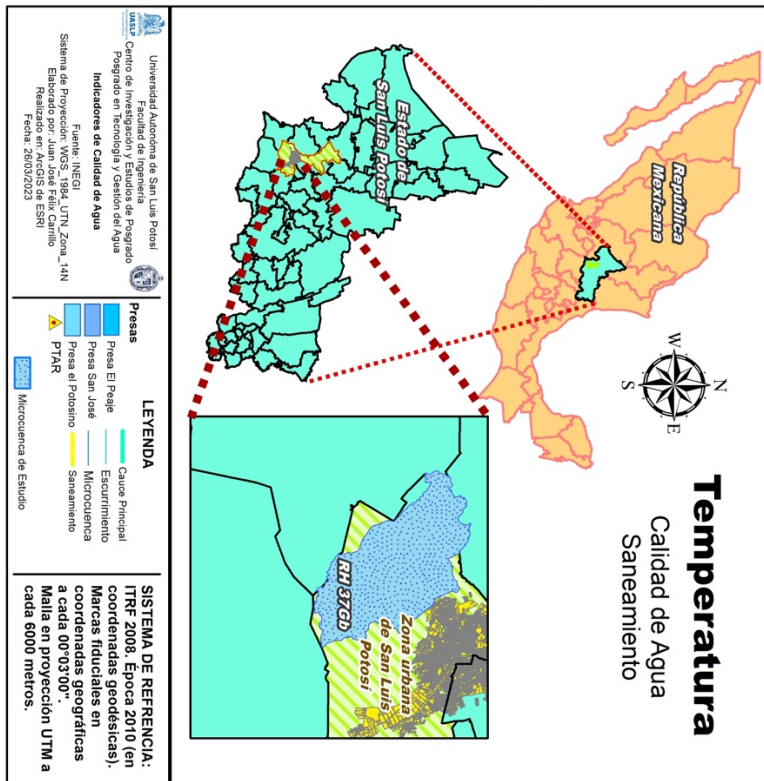
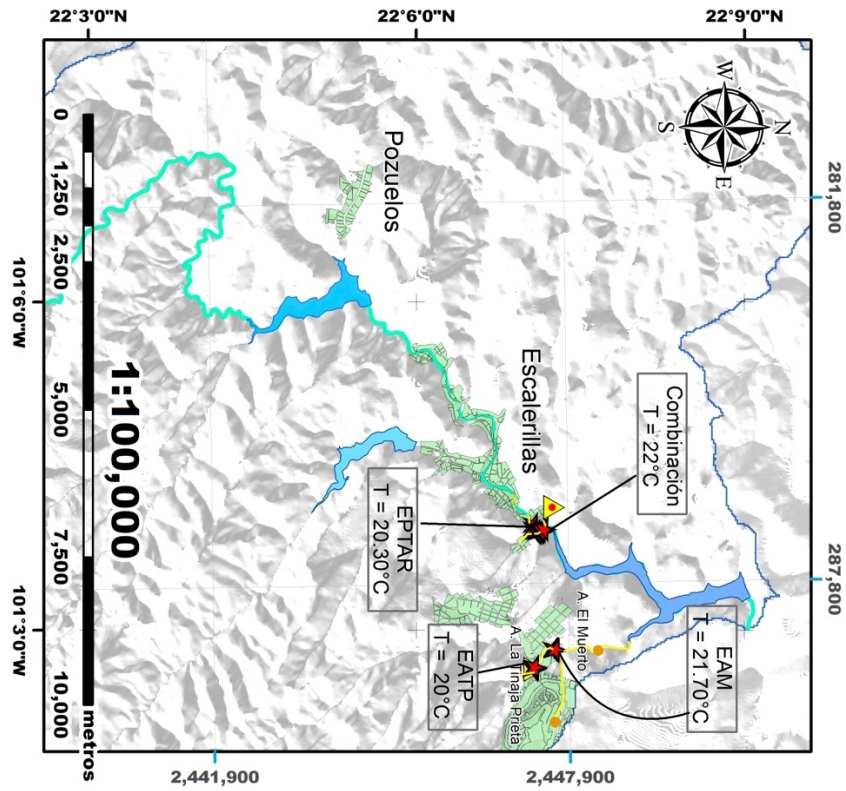
Anexo 5 Calidad de agua de fuentes contaminadas por aguas residuales, parámetro pH



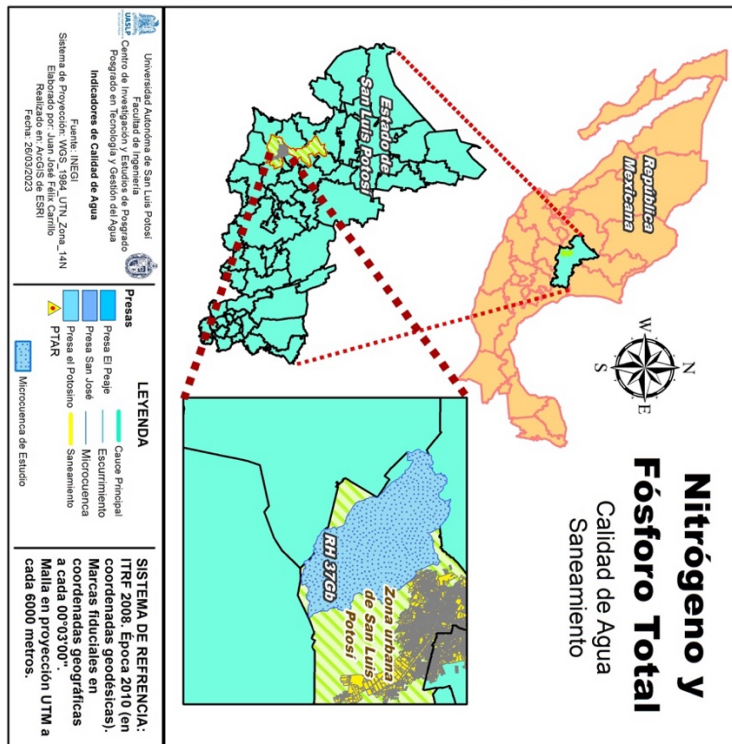
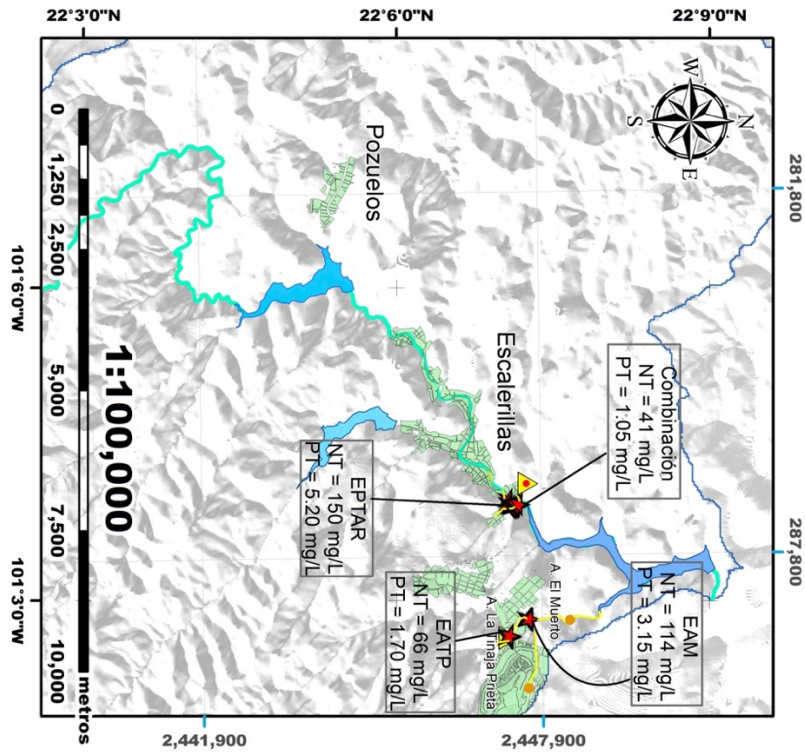
Anexo 6 Calidad de agua de fuentes contaminadas por aguas residuales, parámetro SST



Anexo 7 Calidad de agua de fuentes contaminadas por aguas residuales, parámetro DQO



Anexo 8 Calidad de agua de fuentes contaminadas por aguas residuales, parámetro temperatura



Anexo 9 Calidad de agua de fuentes contaminadas por aguas residuales, parámetro nitrógeno y fósforo total