



INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE ÁLAMO TEMAPACHE

TITULACIÓN

TESIS PROFESIONAL

“Monitoreo de la calidad del agua en zonas de descargas de aguas residuales en el Río Pantepec del Municipio de Álamo Temapache.”

PARA OBTENER EL TITULO DE

Ingeniero Ambiental

PRESENTA

Gerardo Martínez Acosta

Angel Arturo Juarez Morales

DIRECTOR DE TESIS

M.I. Víctor Hugo Tlapalcoyoa Francisco

DEDICATORIA

Dedico el presente trabajo, fruto de esfuerzo, dedicación y constancia, a mis padres, quienes han sido el pilar fundamental en mi formación personal y profesional, brindándome su apoyo incondicional, valores y motivación para alcanzar cada una de mis metas. A mis hermanos, por su compañía, comprensión y aliento constante a lo largo de este camino.

A mis maestros, quienes con su conocimiento, orientación y compromiso contribuyeron significativamente a mi desarrollo académico y profesional. Y a todas aquellas personas que, de manera directa o indirecta, formaron parte de este logro, impulsándome a seguir adelante y a no rendirme ante los desafíos.

Con gratitud y respeto, dedico este trabajo.

Gerardo Martínez Acosta

Ángel Arturo Juárez Morales

AGRADECIMIENTOS

El presente proyecto profesional no habría sido posible sin el valioso apoyo y la colaboración de diversas personas e instituciones que contribuyeron de manera significativa a su desarrollo y culminación.

En primer lugar, expreso mi más sincero agradecimiento a la Ing. Elvira Figón Cerecedo, por su orientación, disposición y acompañamiento constante a lo largo de este proceso. Asimismo, agradezco al personal del área ambiental, en especial al Ing. Juan Carlos Gonzáles Argüelles y Rosario Romero González, quienes brindaron un apoyo técnico y operativo fundamental durante las distintas etapas del proyecto.

De igual manera, reconozco y agradezco profundamente el acompañamiento académico de los maestros M.I. Víctor Hugo Tlapalcoyoa y Alfredo Carlos Cortes Hernández, cuyas enseñanzas, experiencia y asesoría fueron clave para fortalecer el enfoque técnico y metodológico del trabajo realizado.

Agradezco de manera especial a mis padres y hermanos, por su respaldo incondicional, su comprensión y su motivación constante, los cuales representaron un pilar esencial a lo largo de mi formación profesional.

Finalmente, extendo mi gratitud a mis amigos, por su apoyo moral y compañerismo, mismos que fueron de gran importancia durante el desarrollo de este proyecto.

Gerardo Martínez Acosta

Ángel Arturo Juárez Morales

RESUMEN

La contaminación de los ecosistemas acuáticos por descargas de aguas residuales es una problemática ambiental que puede tener efectos negativos en la vida acuática y la salud humana. El contenido de nutrientes de estos efluentes puede incrementar la concentración de nitrógeno (N) y fosforo (P), esto favoreciendo la eutrofización del sitio. Se dio seguimiento a un estudio realizado en el mes de abril de 2024, derivado de la mortandad de peces en la subcuenca del Río Tuxpan. Se identificaron dos puntos de descarga de aguas residuales municipales, se analizó la calidad del agua durante los meses de marzo y abril de 2025, se determinó oxígeno disuelto (OD), pH, potencial óxido-reducción (ORP), sólidos disueltos (TDS), demanda química de oxígeno (DQO) y nutrientes (N y P). En las zonas de descarga se observaron las concentraciones más bajas de OD con 1.3 ± 1.8 y 0.1 ± 0.2 mg/l, y concentraciones de hasta 924.5 mg/l DQO, 66.2 mg/l de N y 9.4 mg/l P, los cuales se lograron diluir aguas abajo y a la vez incrementar el OD, lo cual no propicia a la eutrofización en los puntos de monitoreo en este estudio.

Palabras clave: aguas residuales, calidad del agua, eutrofización, monitoreo, nutrientes.

ABSTRAC:

The pollution of aquatic ecosystems by waste water discharges is an environmental problem that can have negative effects on aquatic life and human health. The nutrient content of these effluents may increase the concentration of nitrogen (N) and phosphorus (P), thus favouring eutrophication of the site. A study carried out in April 2024 on fish mortality in the Tuxpan River subbasin was followed up. Two municipal waste water discharge points were identified, water quality was analysed during the months of March and April 2025, dissolved oxygen (OD), pH, potential oxide - reduction (ORP), dissolved solids (TDS), chemical oxygen demand (COD) and nutrients (N and P) were determined. The lowest concentrations of OD were observed in the discharge areas with 1.3 ± 1.8 and 0.1 ± 0.2 mg/l, and concentrations up to 924.5 mg/l COD, 66.2 mg/l N and 9.4 mg/l P, which were diluted downstream and at the same time increased the OD, This does not favour eutrophication at the monitoring points in this study.

Keywords: wastewater, water quality, eutrophication, monitoring, nutrients.

ÍNDICE TEMÁTICO

DEDICATORIA	I
AGRADECIMIENTOS	II
RESUMEN.....	III
ABSTRAC:	IV
1. INTRODUCCIÓN.	1
1.1 Antecedentes	2
1.2 Planteamiento del problema	3
1.3 Justificación.....	4
1.4 Hipótesis.....	4
1.5 Objetivos generales y particulares.....	5
1.6 Metas	5
2. MARCO TEÓRICO.....	6
2.1 Descripción general de un río.....	6
2.2 Las características físicas, químicas y biológicas en las aguas residuales	6
2.2.1 Características físicas	8
2.2.2. Características químicas	9
2.2.3. Características biológicas	11
2.3 Contaminación del agua	12
2.4 Contaminación por descarga de aguas residuales	12
2.5 Evaluación de la carga orgánica y nutrimental mediante DQO, DBO, NT Y PT	13
2.5.1. Demanda química de oxígeno (DQO).....	13
2.5.2. Demanda bioquímica de oxígeno (DBO).....	14
2.5.3. Nitrógeno total (NT).....	15
2.5.4. Fosforo total (PT).....	15
2.6 La autodepuración	16
2.7 Requerimientos de oxígeno	18

2.8	Eutrofización en ecosistemas acuáticos: procesos, nutrientes, estados tróficos y causas .	19
2.8.1.	Eutrofización de los cuerpos acuáticos	19
2.8.2.	Proceso eutrofización	20
2.8.3.	Nutrientes en ecosistemas acuáticos.....	20
2.8.4.	Niveles de eutrofia y estados tróficos.....	21
2.8.5.	Causas de la eutrofización.....	22
2.9	Normatividad aplicable a las descargas de aguas residuales en México.....	22
2.10	Monitoreo de la calidad del agua	23
2.10.1.	Etapas del monitoreo de la calidad del agua	24
2.10.2.	Requerimientos para el monitoreo	25
2.10.3.	Importancia del monitoreo de la calidad del agua.....	26
2.11	El manejo de sustancia y residuos peligroso	26
3.	ESTADO DEL ARTE.....	27
4.	METODOLOGÍA	29
4.1	Área de estudio.....	29
4.2	Reconocimiento de campo y diseño del muestreo	29
4.3	Selección y ubicación de los puntos de muestreo	30
4.4	Monitoreo de parámetros fisicoquímicos in situ	30
4.5	Muestreo y análisis de materia orgánica y nutrientes.....	31
4.5.1.	Demanda Química de oxígeno de rango medio APA (vial de 13 mm).....	31
4.5.2.	Nitrógeno total de rango bajo (vial 13 mm)	32
4.5.3.	Fosforo total rango bajo total (vial 13 mm)	33
4.6	Enfoque metodológico y alcance del estudio	33
5.	ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	35
5.1	Distribución de puntos de descarga y muestreo en el área de estudio.....	35
5.2	Comportamiento espacial de los parámetros fisicoquímicos medidos in situ en los puntos de muestreo	37

5.3	Distribución espacial de las materia orgánica y nutrientes en los puntos de muestreo	38
5.4	Variación espacial del oxígeno disuelto y del potencial oxido-reducción en los puntos de muestro	40
5.5	Dilución de los contaminantes aguas abajo.....	43
6.	CONCLUSIONES.	44
	ANEXOS.....	46
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	47

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Área de estudio: Zonas de descarga y puntos de muestreo en la Subcuenca Río Tuxpan .	35
Figura 2. Zona de descarga de aguas residuales de en la Localidad de Chapopote Núñez. De izquierda a derecha: Aguas Arriba, Descarga de Aguas Residuales y Aguas Abajo.	36
Figura 3. Zona de descarga de aguas residuales de en la Localidad de Pantepec. De izquierda a derecha: Aguas Arriba, Descarga de Aguas Residuales y Aguas Abajo.....	36
Figura 4. Zonas de referencia Hidalgo Amajac y Xuchil.....	36
Figura 5. Prueba t de student de dos colas	46

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Contaminantes de las aguas residuales domésticas (Basado en Henze et al., 2001).....	7
Tabla 2. Evaluación de las concentraciones de la carga orgánica y nutrientes	13
Tabla 3. Estado del agua según el oxígeno disuelto	18
Tabla 4. Variación del oxígeno de saturación según la temperatura	19
Tabla 5. Mediciones in situ de los puntos de muestreo	37
Tabla 6. Medición de pH y nutrientes (DQO, NT y PT)	39
Tabla 7. Dilución de los contaminantes aguas abajo comparando a aguas arriba.....	43

1. INTRODUCCIÓN.

La Subcuenca del Río Tuxpan de la zona que comprende a la zona urbana del Municipio de Álamo Temapache desempeña funciones fundamentales para el desarrollo ambiental, social y económico de la región, entre las que destacan el abastecimiento de agua para consumo humano, la pesca, el riego agrícola y las actividades recreativas. No obstante, este sistema hidrológico también ha sido utilizado como cuerpo receptor de descargas de aguas residuales de origen doméstico, lo que ha propiciado el deterioro de la calidad del agua y posibles alteraciones en el equilibrio ecológico.

En este contexto, el presente estudio se enfocó en el monitoreo de la calidad del agua con el objetivo de identificar indicios de procesos de eutrofización en la subcuenca. Para ello, se evaluaron parámetros clave como la concentración de nutrientes como nitrógeno y fosforo, materia orgánica, el oxígeno disuelto y el potencial óxido-reducción, los cuales permiten inferir las condiciones fisicoquímicas del sistema y su relación con la disponibilidad de oxígeno y la dinámica de materia orgánica. La selección de estos parámetros responde a su relevancia como indicadores tempranos de enriquecimiento trófico y deterioro ambiental en cuerpos de agua. Asimismo, el estudio incluyó el monitoreo de zonas de descarga de aguas residuales domésticas, con el fin de evaluar su influencia en la calidad del agua.

Los resultados obtenidos indican que, en los puntos analizados, las descargas presentaron un grado de dilución tal que las condiciones fisicoquímicas registradas fueron similares a las observadas en sitios aguas arriba, lo que sugiere una capacidad de asimilación y dispersión del sistema en las condiciones evaluadas. No obstante, este comportamiento no excluye la posibilidad de impactos acumulativos o efectos a mayor escala espacial y temporal, por lo que se resalta la importancia de continuar con el monitoreo y la gestión adecuada del recurso hídrico.

1.1 Antecedentes

En el estudio de calidad del agua realizado por Ramos (2016) en la cuenca del río Tuxpan, durante los meses de julio y agosto, se reportaron concentraciones elevadas de demanda química de oxígeno (DQO) en puntos de muestreo localizados en el municipio de Álamo Temapache, clasificándose dentro de niveles de contaminación de acuerdo con los criterios establecidos por la CONAGUA (2011). Dicho comportamiento fue asociado a la influencia de asentamientos humanos ubicados en las márgenes del río, así como al uso de agroquímicos en actividades agrícolas, particularmente en huertos citrícolas.

Posteriormente, en 2021 se reportó un crecimiento denso de fitoplancton en la zona Álamo–Limonar, a la altura de la localidad de Palo Blanco (Vanguardia de Veracruz, 2021). Este fenómeno limitó el desarrollo de organismos acuáticos como los peces, lo que sugiere condiciones asociadas a procesos de enriquecimiento de nutrientes en el sistema.

Asimismo, en abril de 2024, durante un periodo de baja precipitación (9 mm), se registró un evento de mortandad de peces en tres localidades colindantes a la subcuenca del río Tuxpan, en el municipio de Álamo Temapache. Días posteriores al evento, se documentaron concentraciones de oxígeno disuelto por debajo de 5 mg/L, así como la presencia de hidrófitas como el lirio acuático y especies del género *Elodea*. Estas condiciones son consistentes con procesos de eutrofización, los cuales pudieron favorecer la proliferación de vegetación acuática observada en el mes siguiente.

Con la entrada del huracán Alberto en junio y el inicio de la temporada de lluvias, se observó una aparente recuperación del sistema, atribuida posiblemente a procesos de dilución y renovación del agua. No obstante, las causas específicas que dieron origen a dicha contingencia ambiental no han sido completamente determinadas, lo que resalta la necesidad de estudios enfocados en el monitoreo de parámetros clave para la detección de procesos de eutrofización.

1.2 Planteamiento del problema

En el mes abril de 2024, dentro del periodo con menor precipitación (9 mm), se observó mortandad de peces en tres localidades colindantes a la subcuenca del Río Tuxpan pertenecientes al municipio de Álamo Temapache. Días posteriores al evento, los niveles de oxígeno disuelto se encontraban por debajo de 5 mg/L, y existía la presencia de hidrófitas como lirio acuático y elodeas, por lo que fue posible determinar que el segmento del río se encontraba en estado de eutrofización, lo cual desencadenó la proliferación de lirio acuático en el mes siguiente. Con la entrada del huracán Alberto en el mes de junio y el inicio de la temporada de lluvias, el cuerpo de agua logró recuperarse, sin embargo, las posibles causas que pudieron dar origen a la contingencia ambiental aún no habían sido definidas.

La creciente influencia antrópica sobre los ecosistemas hídricos superficiales de México especialmente en regiones con deficiencia en infraestructura de tratamientos de efluentes constituye un gran reto transversal para las políticas públicas de gestión hídrica y saneamiento ambiental. En este escenario, la subcuenca del Río Tuxpán, específicamente en el tramo que se extiende entre Chapopote Núñez y Pantepec, dentro del municipio de Álamo Temapache, presente situaciones de alta vulnerabilidad derivada de las descargas continuas y, numerosos casos no reguladas de aguas residuales municipales.

Estas descargas se caracterizan por tener altas concentraciones de materia orgánica y nutrientes, dichas características afectan directamente la calidad del agua, pudiendo provocar daños al ecosistema, tales como la eutrofización. Con la ausencia de mecanismos que permitan detectar indicios de contaminación por materia y nutrientes, el problema de la eutrofización de este ecosistema podría repetirse año con año, principalmente en periodos de sequía.

1.3 Justificación

La falta de sistemas eficaces de monitoreo, control y tratamiento de desechos líquidos en esta zona ha propiciado el deterioro progresivo de la calidad de agua, generando riesgos para la salud pública, afectaciones a los usos productivos de recurso (agrícola y recreativos) y la pérdida de servicios ecosistémicos esenciales. No obstante, la información técnica disponible resulta insuficiente para caracterizar con precisión las fuentes de contaminaciones puntuales y difusas, así como su impacto directo en el cuerpo receptor.

Ante este panorama, la puesta en marcha de un plan de monitoreo ambiental centrado en la calidad del agua se erige como herramienta estratégica para fortalecer la vigilancia ambiental. Asimismo, refuerza la capacidad técnica del municipio de Álamo Temapache para diseñar e implementar estrategias de monitoreo de fuentes contaminantes, asegurando el acceso a agua en condiciones seguras y sostenibles para las generaciones presentes y futuras.

1.4 Hipótesis

H0: La composición de materia orgánica y nutrientes en las descargas de aguas residuales será similares.

H1: La composición de materia orgánica y nutrientes de las descargas de aguas residuales en la Col. Pantepec será estadísticamente mayor que en la Loc. Chapopote Núñez.

H0: El cuerpo receptor no podrá ser capaz de diluir las contaminantes aguas abajo.
(Concentración Aguas arriba es menor que agua abajo)

H1: El cuerpo receptor tendrá la capacidad de diluir significativamente la concentración de la materia orgánica y nutrientes aguas abajo.

1.5 Objetivos generales y particulares

Objetivo general

- Evaluar el efecto de las descargas de aguas residuales tipo municipales en el segmento Loc. Chapopote Núñez – Col. Pantepec sobre la Subcuenca Río Tuxpan del Municipio de Álamo Temapache.

Objetivos específicos

- Monitorear la calidad del agua en los puntos de descargas de aguas residuales en la sección: Chapopote Núñez - Pantepec de la subcuenca del Río Tuxpan del Municipio de Álamo Temapache.
- Evaluar el grado de dilución de las descargas de aguas residuales y su efecto sobre la calidad del agua de la subcuenca Río Tuxpan.

1.6 Metas

- Lograr montar las técnicas analíticas para cuantificar nutrientes, es decir, nitrógeno total (NT) y fosforo total (PT), así mismo la determinación de la demanda de química de oxígeno (DQO), para la caracterización de aguas naturales y residuales.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Descripción general de un río

Un río puede definirse como un sistema natural de flujo continuo de agua que se desplaza desde zonas de mayor altitud hacia áreas de menor elevación hacia dirección de otros lados de cauce, en un cuerpo lacustre o directamente en el océano. La cantidad de agua que circula por un río depende principalmente de la extensión de su cuenca hidrográfica, entendida como el territorio que concentra y conduce la escorrentía superficial hacia un mismo cauce. Asimismo, el régimen de precipitaciones influye de manera directa en el caudal del río, ya que determina el volumen de agua pluvial que escurre y se incorpora al sistema fluvial (CONAGUA, 2021).

2.2 Las características físicas, químicas y biológicas en las aguas residuales

Las aguas residuales pueden ser descritas a partir de un conjunto de propiedades físicas, químicas y biológicas que permiten su adecuada caracterización y evaluación. Dichas propiedades presentan variaciones en función del origen tipo de descarga.

Desde el punto de vista físico, se consideran parámetros como la temperatura, el color, el olor, la turbidez y la concentración de sólidos suspendidos totales.

En cuanto a los aspectos químicos, se analizan variables como el Ph, la alcalinidad, la dureza, el oxígeno disuelto, la demanda bioquímica y química de oxígeno, la presencia de nutrientes como nitrógeno y fósforo, metales pesados y contaminantes emergentes, así como el potencial oxido-reducción.

Por su parte, las características biológicas incluyen la presencia de microorganismos patógenos, entre los que destacan bacterias indicadoras, virus, protozoos y helmintos.

El análisis integral de estos parámetros resulta esencial para seleccionar los procesos de tratamiento más adecuados y para evaluar los posibles impactos ambientales derivados de las descargas (CONAGUA, 2021).

Los efluentes domésticos están constituidas en su mayor proporción por agua, que representa alrededor del 99.0 % de su composición. El porcentaje restante integra una mezcla compleja

de sustancias, entre las que se distinguen compuestos orgánicos e inorgánicos, sólidos tanto en fase suspendida como disueltos, así como microorganismos de diversas naturalezas. Dada la presencia de estos componentes potencialmente contaminantes, el tratamiento de las aguas residuales se garantiza su seguridad ambiental y sanitaria (Von Sperling, 2007).

La génesis, volumen y naturaleza de los residuos generados en el ámbito doméstico están condicionados por múltiples factores interrelacionados: por un lado, los patrones de comportamiento, el estilo de vida y el nivel socioeconómico de los habitantes; por otro, el contexto normativo-jurídico y los recursos técnicos disponibles en el entorno en el que se desenvuelven dichas personas. Los contaminantes presentes en las aguas residuales se pueden dividir en diferentes categorías como se muestra en la **tabla 1**:

Tabla 1. Contaminantes de las aguas residuales domésticas (Basado en Henze et al., 2001)		
Microorganismos	Organismos patógenos como bacterias, virus y huevos de Helminto.	Riesgo para actividades acuáticas, baños y el consumo de mariscos.
Materia orgánica biodegradable	Disminución del oxígeno disuelto en ríos, lagos.	Muerte de peces, olor.
Nutrientes	Nitrógeno, fósforo, amoníaco.	Eutrofización, agotamiento de oxígeno disuelto, efectos tóxicos.
Metales	Hg, Pb, Cd, Cr, Cu, Ni	Efectos tóxicos, bioacumulación.

La materia orgánica constituye el contaminante predominante en las aguas residuales, y su cuantificación se ha realizado tradicionalmente mediante el índice de demanda química de oxígeno (DQO). Por su parte, los nutrientes son generalmente determinados a través de parámetros como nitrógeno total y fósforo total, entre otros indicadores específicos.

La caracterización de las aguas residuales posibilita describir su calidad, es decir, su composición y sus propiedades físicas y químicas, tanto en su estado natural como en sus formas residuales tanto brutas como tratadas para su posterior uso y aprovechamiento (Hernández, A. et al., 2017).

Las aguas residuales se originan principalmente a partir del uso del agua potable en actividades domésticas, comerciales e institucionales, lo que genera una mezcla de desechos líquidos y sólidos producidos por la población. Estos efluentes incluyen aportaciones procedentes de viviendas, establecimientos de servicios y comercio, así como infiltraciones

de aguas subterráneas, escurrimientos superficiales y aportes de origen pluvial, factores que influyen directamente en su volumen y composición (Tchobanoglous et al., 2023).

La composición de las aguas residuales presenta una alta variabilidad, ya que se ve influenciada por diversos factores, entre los que destacan en el consumo diario de agua por habitante, el cual incide directamente en la concentración de los contaminantes, así como los hábitos alimenticios de la población, que condiciona su composición química. De manera general, este tipo de efluentes está conformado mayoritariamente por agua, que representa alrededor del 99.9%, mientras que la fracción restante corresponde a materia sólida de distinta naturaleza (Rojas, Sistemas de Tratamiento de Aguas residuales, 2002).

- 70% material orgánico y 30% material mineral.
- 20% material sedimentable y 80% material no sedimentable.
- Del material sedimentable 67% orgánico y 33% mineral.
- Del material no sedimentable 50% orgánico y 50% mineral.

El análisis de las propiedades físicas, química y biológicas de las aguas residuales resulta fundamental para comprender su composición, evaluar los impactos que puedan generar en el ambiente y salud pública, así como para justificar la necesidad de aplicar procesos de tratamientos adecuados que permitan su manejo seguro.

2.2.1 Características físicas

El conocimiento de las características físicas de las aguas residuales es fundamental para su adecuada evaluación y tratamiento, ya que estas propiedades permiten identificar su estado, origen y posibles impactos ambientales. Entre los parámetros físicos más relevantes se encuentra el color, olor, el contenido sólido, la temperatura y la turbiedad (Metcalf & Eddie 2014 y Marcos Sperling 2007).

- El color: las aguas residuales pueden variar desde tonos grisáceos claros en efluentes recientes hasta tonalidades oscuras o negras cuando se encuentran en condiciones sépticas, reflejando el grado de degradación de la materia orgánica.
- El olor: se genera principalmente por los procesos de descomposición biológica, intensificándose en estados sépticos debido a la liberación de gases como el

sulfuro de hidrogeno, los cuales pueden causar molestias y efectos adversos en la salud.

- Sólidos: las aguas residuales están asociadas a la erosión del suelo, infiltraciones y conexiones no controladas a los sistemas de alcantarillado.
- La temperatura: suele ser ligeramente superior a la del agua potable y está influenciada por las condiciones climáticas, afectando procesos como la actividad microbiana, la solubilidad de los gases y la viscosidad del líquido.
- Turbiedad: se origina por la concentración de sólidos suspendidos, siendo generalmente mayor en aguas residuales frescas.

2.2.2. Características químicas

Las aguas residuales presentan una composición química compleja que incluye sólidos, materia orgánica, nutrientes y otros compuestos que influyen directamente en su tratamiento y disposición final (Sperling, 2007).

I. Sólidos totales en aguas residuales

- Los sólidos totales comprenden el conjunto de materiales orgánicos e inorgánicos presentes en el agua residual. Estos se clasifican en función de su capacidad de filtración, sedimentación y comportamiento frente al calor. Los sólidos suspendidos corresponden a partículas no filtrables, mientras que los sólidos disueltos atraviesan los filtros convencionales debido a su reducido tamaño. A su vez, ambos grupos pueden subdividirse en sólidos fijos, de naturaleza mineral e inerte, y sólidos volátiles, asociados principalmente a compuestos orgánicos biodegradables. Los sólidos sedimentables son aquellos que se depositan por gravedad en un periodo aproximado de una hora, evaluados comúnmente mediante el cono Imhoff

II. Materia orgánica presente en aguas residuales

- La materia orgánica es uno de los principales indicadores del grado de contaminación de las aguas residuales. Entre sus componentes destacan las grasas y aceites, que pueden interferir en los procesos

de tratamientos; los pesticidas, generalmente derivados de escurrientías agrícolas.

- La demanda bioquímica de oxígeno a 5 días (DBO_5), que estima el oxígeno consumido por los microorganismos durante la degradación biológica de la materia orgánica.
- La demanda química de oxígeno (DQO) mide el oxígeno requerido para la oxidación química de los compuestos orgánicos, mientras que la DBO última representa el consumo total de oxígeno durante la estabilización completa.

III. Nitrógeno total

- El nitrógeno en las aguas residuales se presenta en diversas formas químicas que participan activamente en los procesos biológicos. El nitrógeno orgánico se encuentra asociado a proteínas, aminoácidos y urea. Durante la descomposición inicial, este se transforma en amoníaco, el cual posteriormente es oxidado a nitrito y finalmente a nitrato, constituyendo las etapas del proceso de nitrificación. Estas transformaciones son fundamentales para el diseño de sistemas de tratamiento biológico.

IV. Fósforo total

- El fósforo es otro nutriente clave presente en las aguas residuales y puede encontrarse en forma orgánica, ligado a la materia orgánica o inorgánica, principalmente como ortofosfatos y polifosfatos. Su control es esencial para prevenir procesos de eutrofización en los cuerpos receptores.

V. Otros parámetros químicos

- El pH: indica la condición ácida o alcalina del agua residual y tiende a disminuir durante la oxidación biológica.
- La alcalinidad: representa la capacidad amortiguadora del sistema frente a cambios de pH, debido a la presencia de bicarbonatos, carbonatos e iones hidroxilo.

- Los cloruros: provienen principalmente del agua potable y de descargas domesticas e industriales.
- Los aceites, grasas y metales pesados: son contaminantes relevantes, estos últimos asociados principalmente a vertidos industriales y potencialmente tóxicos.

2.2.3. Características biológicas

El tratamiento y la recuperación de las aguas residuales se basan, en gran medida, en la acción de los microorganismos, los cuales desempeñan un papel fundamental en la degradación y estabilización de la materia orgánica. Desde el punto de vista biológico, estos efluentes albergan diversos grupos de organismos que influyen directamente en su comportamiento y en la eficiencia de los procesos de tratamiento (Rengel, 2000 y Sperling, 2007).

- Las bacterias: constituyen el grupo predominante y son responsables de la descomposición de la materia orgánica, además de presentar la capacidad de formar floculas que facilitan la remoción de solidos coloidales; sin embargo, algunas especies pueden ser patógenas y representar un riesgo sanitario.
- Las algas: son organismos fotosintéticos que utilizan la luz solar y el dióxido de carbono para su crecimiento, contribuyendo a la producción de oxígeno, aunque su proliferación excesiva puede afectar negativamente la calidad del agua.
- Los protozoarios: cumplen una función reguladora al alimentarse de bacterias y otros microorganismos, ayudando a mantener el equilibrio biológico dentro de los sistemas de tratamiento.
- Virus: compuestos por material genético y una cubierta proteica, son de particular relevancia debido a su origen patógeno y a la dificultad que representa su eliminación, constituyendo uno de los principales riesgos para la salud publica asociados a las aguas residuales.

2.3 Contaminación del agua

La contaminación del agua se produce cuando agentes químicos, físicos o biológicos, así como ciertas formas de energía, se incorporan a los cuerpos de agua y provocan alteraciones en sus condiciones naturales, disminuyendo su calidad y limitando su función dentro de los ecosistemas y para el aprovechamiento humano. Estos contaminantes pueden originarse en fuentes puntuales, como descargas específicas provenientes de industrias o plantas de tratamientos, o fuentes no puntuales, asociadas principalmente a la escorrentía superficial que transporta contaminantes desde áreas agrícolas, urbanas y vías de comunicación. Entre los contaminantes más frecuentes los nutrientes como nitrógeno y fósforo, los metales pesados, los pesticidas, los hidrocarburos. Los residuos plásticos, los sedimentos y diversos microorganismos patógenos, los cuales representan riesgos ambientales y sanitarios significativos (CONAGUA, 2021).

2.4 Contaminación por descarga de aguas residuales

Las aguas residuales corresponden a efluentes que han sufrido modificándose en su composición original como resultado de las actividades humanas, incorporando una amplia variedad de contaminantes. Estas descargas pueden agruparse en municipales o domésticas, originadas en viviendas y servicios urbanos y caracterizadas por la presencia de materia orgánica, detergentes, grasas y microorganismos; industriales, asociadas a procesos productivos y que pueden contener sustancias químicas peligrosas, metales pesados, aceites y solventes; agropecuarias, generadas por actividades agrícolas y ganaderas, las cuales suelen transportar fertilizantes, plaguicidas, residuos orgánicos, antibióticos y elevadas concentraciones de nutrientes .

La liberación de estos efluentes en cuerpos de agua sin un tratamiento adecuado ocasiona un deterioro significativo de la calidad del agua, afecta el equilibrio de los ecosistemas acuáticos y representa un riesgo para la salud de las comunidades cercanas (CONAGUA, 2021).

2.5 Evaluación de la carga orgánica y nutrimental mediante DQO, DBO, NT Y PT

La evaluación de la carga orgánica es una suma importancia para analizar el estado de calidad del agua en el tramo seleccionados en el río, así también el análisis de nutrimental para observar el desarrollo de los procesos de ciertos compuestos.

Los análisis de concentración se muestran en la siguiente **tabla 2**:

Tabla 2. Evaluación de las concentraciones de la carga orgánica y nutrientes	
Parámetro	Concentración media (mg/L)
DQO total	750
DBO total	350
NT	60
PT	15
SST	400
SSV	320

2.5.1. Demanda química de oxígeno (DQO)

La demanda química de oxígeno (DQO) es un parámetro utilizado para estimar la cantidad total de oxígeno necesaria para oxidar la materia orgánica y ciertos compuestos inorgánicos presentes en una muestra de agua, expresándose comúnmente en miligramos de oxígeno por litro. Su determinación se basa en la oxidación de los compuestos presentes mediante un agente químico fuerte, generalmente dicromato de potasio, en un medio ácido y con la presencia de catalizadores que favorecen la reacción.

Este parámetro integra tanto la fracción biodegradable como la no biodegradable de la materia orgánica, además de diversas sustancias con carácter reductor, como sulfuros, fenoles, detergentes, pesticidas, hidrocarburos y algunos compuestos nitrogenados. Por esta razón la DQO es considerada un indicador de la carga contaminante potencial máxima de un efluente.

Desde el punto de vista ambiental y sanitario, la DQO es especialmente relevante en el control de descargas industriales, ya que permite identificar la presencia de compuestos que

no siempre son detectados mediante la demanda bioquímica de oxígeno. Asimismo, es un parámetro clave para evaluar la eficiencia de procesos físico-químicos y biológicos, tales como la floculación-precipitación, los tratamientos de oxidación avanzada y los sistemas de tratamiento aerobios y anaerobios (APHA, 2022; Tchobanoglous et al., 2023).

2.5.2. Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)

La Demanda bioquímica de oxígeno (DBO) es un indicador fundamental de la calidad del agua que expresa la cantidad de oxígeno disuelto requerida por los microorganismos aerobios para degradar la materia orgánica biodegradable presente en una muestra. De manera convencional, este parámetro se determina durante un periodo de 5 días a 20 °C, conocido como DBO

A diferencia de la demanda química de oxígeno (DQO), que cuantifica la oxidación química total de la materia orgánica, DBO refleja únicamente los procesos biológicos asociados a la actividad microbiana, por lo que representa de forma más realista el impacto de las descargas orgánicas sobre los ecosistemas acuáticos (Metcalf & Eddy, 2023).

Desde el punto de vista académico y ambiental, concentraciones de DBO inferiores a 3 mg/L suelen asociarse con cuerpos de agua poco impactados, mientras que valores entre 3 y 6 mg/L reflejan contaminación ligera a moderada. Intervalo de 6 a 20 mg/L son característicos de descargas domésticas, y concentraciones superiores a 20 mg/L indican una contaminación severa, típica de aguas residuales sin tratamiento adecuado (Metcalf & Eddy, 2023).

La razón DQO/DBO es ampliamente utilizada en ingeniería ambiental para estimar la biodegradabilidad de un efluente. Relaciones cercanas a 1-2 indican una materia orgánica fácilmente degradable, mientras que valores superiores a 4 sugieren la presencia de compuestos recalcitrantes o potencialmente tóxicos que dificultan los procesos biológicos de tratamientos.

2.5.3. Nitrógeno total (NT)

El nitrógeno total (NT) es un parámetro integral de calidad de agua que representa la suma de todas las formas nitrogenadas presentes en una muestra, incluyendo nitrógeno orgánico, amoniacal, nitritos y nitratos. Este indicador es ampliamente utilizado para evaluar el impacto de las actividades humanas sobre los cuerpos de agua y su potencial para generar procesos de eutrofización (Tchobanoglous et al., 2023).

El nitrógeno es un elemento esencial para la síntesis de proteínas, ácidos nucleicos y otros compuestos celulares en los seres vivos. Sin embargo, cuando se encuentra en concentraciones elevadas en sistemas acuáticos, puede provocar desequilibrios ecológicos significativos, como el crecimiento excesivo de algas y cianobacterias, la disminución del oxígeno disuelto y la generación de condiciones tóxicas para la fauna acuática. En particular, el amonio y los nitritos pueden resultar nocivos para peces y otros organismos, e incluso causar metahemoglobinemia en humanos bajo ciertas condiciones de exposición (Rajasulochana & Preethy, 2022).

Desde una perspectiva ambiental, concentraciones de NT inferiores a 1 mg/L suelen asociarse con cuerpos de agua poco alterados. Valores entre 1 y 3 mg/L indican aportes moderados de origen antrópico, mientras que concentraciones cercanas o superiores a 10 mg/L representan un alto riesgo de eutrofización. Niveles mayores a 20 mg/L son característicos de contaminación severa relacionada con aguas residuales o el uso intensivo de fertilizantes agrícolas.

2.5.4. Fosforo total (PT)

El fósforo total (PT) es un parámetro clave en la evaluación de la calidad del agua que cuantifica la concentración total de fósforo presente en una muestra, incluyendo las fracciones orgánicas e inorgánicas, tanto disueltas como particuladas, expresadas comúnmente como fósforo elemental. Este indicador es fundamental para analizar el potencial de enriquecimiento nutritivo de los ecosistemas acuáticos.

Las formas de fósforo consideradas en la medición de PT comprenden los ortofosfatos, que son directamente asimilables por organismos fotosintéticos; los polifosfatos, utilizados principalmente en detergentes y que pueden hidrolizarse a ortofosfatos; y el fósforo orgánico, asociado al resto biológico y compuesto celulares que se liberan durante los procesos de descomposición (Metcalf & Eddy, 2023).

Desde una perspectiva ecológica, el fósforo suele actuar como nutriente limitante en la mayoría de los cuerpos de agua continentales, especialmente en lagos y ríos de baja productividad natural. Incrementos en la concentración de PT favorecen el desarrollo excesivo de algas y cianobacterias, algunas de las cuales producen toxinas que afectan la salud humana y biota acuática. Además, la acumulación de la biomasa algal puede provocar una reducción significativa del oxígeno disuelto durante su descomposición, alterando el equilibrio ecológico del sistema acuático (Rajasulochana & Preethy, 2022).

Las principales fuentes de fósforo en los cuerpos de agua incluye el uso de detergentes domésticos, la aplicación de fertilizantes fosfatados en actividades agrícolas, las descargas de aguas residuales domésticas, los procesos de erosión del suelo que transporta partículas ricas en fósforo, y los efluentes de la industria alimentaria, donde se emplean compuestos fosforados en diversas etapas de producción.

2.6 La autodepuración

Los ríos poseen una capacidad natural de autodepuración, la cual depende de procesos físicos, químicos y biológicos que permiten la asimilación y degradación de contaminantes. Sin embargo, esta capacidad está condicionada por ciertos parámetros de calidad del agua, cuyos límites determinan la posibilidad de mantener ecosistemas acuáticos saludables y usos humanos seguros (Alley, 2007 y Bain & Stevenson, 1999).

- **Oxígeno disuelto**

El oxígeno disuelto (OD) es uno de los indicadores más importantes de la salud ecológica de un río. Concentraciones iguales o superiores a 5mg/L son generalmente consideradas adecuadas para la supervivencia de peces y otros

organismos acuáticos, mientras que valores inferiores pueden generar estrés biológico y condiciones hipóxicas.

- Temperatura

La temperatura del agua influye directamente en la solubilidad del oxígeno y en las tasas metabólicas de los organismos acuáticos. Incrementos térmicos asociados a descargas industriales, particularmente aquellas que utilizan el agua como medio de enfriamiento, pueden alterar significativamente la estructura de las comunidades biológicas. Por esta razón, se recomienda que dichas descargas permitan el enfriamiento previo del agua antes de su reincorporación al cuerpo receptor.

- pH

El potencial de hidrogeno (pH) condiciona la disponibilidad de nutrientes y la toxicidad de diversas sustancias químicas. La mayoría de los organismos acuáticos presentan tolerancia óptima en un intervalo de pH entre 6.5 Y 9.0. Valores fuera de este rango pueden provocar estrés fisiológico severo y limitar la biodiversidad del ecosistema fluvial.

- Sólidos suspendidos totales

Los sólidos suspendidos totales (SST) afectan la transparencia del agua, la fotosíntesis y los hábitats bentónicos. Para fuentes destinadas al abastecimiento de agua potable, se recomiendan concentraciones relativamente bajas, mientras que en otros usos se toleran valores más elevados, aunque concentraciones excesivas pueden afectar negativamente la vida acuática y los procesos de autodepuración del río.

- Nitratos

Los nitratos (NO_3) son nutrientes esenciales para la biota acuática: sin embargo, concentraciones elevadas favorecen la eutrofización y el crecimiento excesivo de algas. Diversas agencias ambientales establecen un límite máximo de 10 mg/L, principalmente para proteger la salud humana y reducir riesgos ecológicos asociados al enriquecimiento nutritivo.

2.7 Requerimientos de oxígeno

El oxígeno disuelto (OD) es un componente fundamental de los ecosistemas acuáticos, ya que ingresa al agua principalmente mediante el intercambio con la atmósfera y la actividad fotosintética de algas y plantas acuáticas. Este oxígeno es indispensable para los procesos de respiración de peces, macroinvertebrados, microorganismos y otros organismos que habitan en los cuerpos de agua.

La concentración de (OD) es considerada uno de los indicadores más utilizados para evaluar la calidad del agua, debido a su estrecha relación con la salud ecológica de ríos y lagos. Niveles adecuados de oxígeno disuelto permiten el mantenimiento de comunidades biológicas diversas y funcionales, mientras que concentraciones bajas pueden provocar estrés fisiológico, alteraciones en la cadena trófica y, en casos extremos, mortalidad de organismos acuáticos.

Tabla 3. Estado del agua según el oxígeno disuelto		
OD(mg/l)	Descripción	Consecuencias
0	Anoxia	Muerte masiva de organismos aerobios
<3	Crisis biótica	Desaparición de organismos y especies sensibles
5	Límite mínimo	Necesario para mantener la biótica acuática
5-8 8-12	Aceptable - Buena	Adecuado para la vida de la mayoría de especies de peces
>12	Sobresaturada	Sistemas en plena producción fotosintética

La temperatura del agua es un factor determinante en la concentración de oxígeno disuelto, ya que existe una relación inversa entre ambos parámetros: a medida que la temperatura se incrementa, la capacidad del agua para retener oxígeno disminuye. Esta reducción en el nivel de saturación de oxígeno influye directamente en la disponibilidad del gas para los organismos acuáticos y, por tanto, en la calidad ecológica del cuerpo de agua (Bain & Stevenson, 1999).

Tabla 4. Variación del oxígeno de saturación según la temperatura	
Temperatura (°)	Oxígeno de saturación (mg/l)
10	10,92
12	10,43
13	10,2
14	9,98
15	9,76
16	9,56
17	9,37
18	9,18
19	9,01
20	8,84
21	8,68
22	8,53
23	8,38
24	8,25
25	8,11

2.8 Eutrofización en ecosistemas acuáticos: procesos, nutrientes, estados tróficos y causas

2.8.1. Eutrofización de los cuerpos acuáticos

La eutrofización es un procesos ambiental caracterizado por el incremento excesivo de nutrientes, principalmente nitrógeno y fosforo, en los cuerpos de agua, lo que provoca cambios significativos en su estructura y funcionamiento ecológico. Este fenómeno se asocia comúnmente con el crecimiento acelerado de algas y plantas acuáticas, así como con la degradación de la calidad del agua (Smith et al., 2021).

El concepto de clasificación trófica de los cuerpos de agua tiene su origen en los trabajos de Naumann a inicios del siglo XX, quien propuso la distinción entre sistemas oligotróficos y eutróficos con base en la abundancia de algas y la productividad biológicas. Los sistemas oligotróficos se caracterizan por bajas concentraciones de nutrientes y escaso desarrollo algal, mientras que los eutróficos presentan una elevada disponibilidad de nutrientes y una alta biomasa algal (Wetzel, 2020).

En la actualidad, esta clasificación se ha ampliado e integrado a enfoques modernos de gestión del agua, que consideran no solo la presencia de algas, sino también variables fisicoquímicas, biológicas y el origen antrópico de los nutrientes, con el fin de evaluar y

prevenir los impactos negativos de la eutrofización en ecosistema acuático continentales (Dodds & Smith, 2022).

2.8.2. Proceso eutrofización

El proceso de eutrofización se inicia con el incremento excesivo de nutrientes, principalmente nitrógeno y fosforo, en cuerpos de agua, lo que desencadena una serie de transformaciones físicas, químicas y biológicas este enriquecimiento nutritivo estimula el crecimiento acelerado del fitoplancton y otras formas de vegetación acuática, aumentando la turbidez del agua y reduciendo la penetración de la luz (Dodds & Smith, 2022).

Como consecuencia del aumento de la biomasa algal, se produce una alteración de los hábitats acuáticos y una disminución progresiva del oxígeno disuelto (OD), especialmente durante los periodos de respiración y descomposición de la materia orgánica. La pérdida de oxígeno se intensifica cuando el fitoplancton forma capas superficiales densas que limitan el intercambio gaseoso entre el agua y la atmosfera agravando las condiciones hipóxicas en el sistema acuático (Smith et al., 2021).

2.8.3. Nutrientes en ecosistemas acuáticos

Los nutrientes son elementos esenciales para el crecimiento de plantas y algas, entre los que destacan el carbono, nitrógeno, fosforo y potasio, considerados macronutrientes. En los ecosistemas acuáticos continentales, el carbono y el potasio suelen encontrarse en concentraciones suficientes, mientras que el nitrógeno y el fosforo generalmente están presentes en cantidades relativamente bajas. Esta condición hace que ambos elementos actúen como nutrientes limitantes del crecimiento algal, controlando la productividad biológica de los ríos y lagos (Sierra, 2011).

- Nitrógeno

El nitrógeno desempeña un papel fundamental en la síntesis de proteínas y ácidos nucleicos, por lo que resulta indispensable para el desarrollo del fitoplancton. Concentraciones elevadas de este nutriente en cuerpos de agua suelen asociarse con escurrimientos agrícolas y uso intensivo de fertilizantes

nitrogenados. Para reducir riesgos de eutrofización y proteger la salud humana y ambiental, organismos internacionales recomiendan concentraciones máximas cercanas a 10 mg/L de nitratos en aguas superficiales destinadas a diversos usos.

- Fosforo

El fosforo es frecuentemente el principal factor limitante de la producción primaria en sistemas fluviales y lacustres. Incrementos relativamente pequeños en su concentración pueden detonar un crecimiento acelerado de algas. Estudios recientes indican que concentraciones de fosforo total cercana o superiores a 0.1 mg/L pueden favorecer procesos de eutrofización, mientras que límites más restrictivos son recomendado para prevenir proliferaciones algales y mantener el equilibrio ecológico de los cuerpos de agua.

2.8.4. Niveles de eutrofia y estados tróficos

Los estados tróficos describen el grado de enriquecimiento de nutrientes en un cuerpo de agua y permiten evaluar su productividad biológica y condición ecológica. Esta clasificación se basa principalmente en la disponibilidad de nutrientes, la biomasa algal y la concentración de oxígeno disuelto, y es ampliamente utilizada en estudios de calidad del agua y gestión ambiental (Wetzel, 2020).

Un sistema oligotrófico se caracteriza por bajas concentraciones de nutrientes, escasa producción algal y altos niveles de oxígeno disuelto a lo largo de la columna de agua, lo que favorece la presencia de especies sensibles y una elevada calidad ecológica. En contraste, los cuerpos de agua mesotróficos representan una condición intermedia, donde el aporte de nutriente y la productividad biológica son moderados y aún se mantiene un equilibrio relativo del ecosistema.

Finalmente, los cuerpos de agua hipertróficos muestran un enriquecimiento extremo de nutrientes, con proliferaciones de algas frecuentes, elevada turbidez y condiciones hipóxicas o anóxicas persistentes, lo que limita severamente la diversidad biológica y el uso del recurso

hídrico. Cabe destacar que un mismo cuerpo de agua puede transitar entre distintos estados tróficos a lo largo del año, en función de las condiciones climáticas, el régimen hidrológico y la magnitud de las descargas de origen natural o antrópico, generando cambios significativos en la composición de especies presentes.

2.8.5. Causas de la eutrofización

La eutrofización es un proceso de deterioro ambiental asociado principalmente a actividades humanas que incrementa la carga de nutriente en los ecosistemas acuáticos. Entre las principales causas antrópicas se encuentra la descarga de aguas residuales sin un tratamiento adecuado, las cuales aporta elevadas concentraciones de materia orgánica, nitrógeno y fósforo. Asimismo, el uso intensivo de fertilizantes agrícolas ricos en estos nutrientes favorece su transporte hacia ríos lagos y embalses a través de la escorrentía superficial, generando contaminación difusa en los cuerpos de agua.

Cuando un sistema acuático se encuentra eutrofizado, se produce un crecimiento excesivo de algas, cianobacterias y macrófitos acuáticos. Esta proliferación incrementa la turbidez del agua y reduce la penetración de la luz solar hacia las capas más profundas, lo que limita la fotosíntesis de los organismos bentónicos. Como consecuencia, disminuye la producción de oxígeno disuelto, favoreciendo la aparición de condiciones hipóxicas o anóxicas. De manera progresiva, los sedimentos del fondo se transforman en ambientes anaerobios, alterando significativamente el equilibrio ecológico y la biodiversidad del ecosistema acuático (Moreno, Quintero, & López, 2010).

2.9 Normatividad aplicable a las descargas de aguas residuales en México

En México el control de las descargas de aguas residuales se sustenta en un marco jurídico ambiental cuyo objetivo principalmente es la protección de los cuerpos de agua y la preservación de los ecosistemas acuáticos. Este marco normativo regula tanto el uso del recurso hídrico como las condiciones bajo las cuales pueden realizarse las descargas,

estableciendo obligaciones para su tratamiento y monitoreo previo a su vertido (SEMARNAT, 2021).

- Ley de aguas nacionales
Su reglamento constituye el eje central de la gestión del agua del país, ya que determinan las competencias de las autoridades, así como los criterios para autorizar, controlar y sancionar las descargas de aguas residuales en cuerpos de jurisdicción federal.
- NOM-001-SEMARNAT-2021
Fija los límites máximos permisibles de contaminantes que deben cumplirse en las descargas hacia ríos, lagos y otros cuerpos receptores nacionales, con el fin de reducir los impactos sobre la calidad del agua y la biodiversidad.
- NOM-002-SEMARNAT-1996
Regula las descargas de aguas residuales que se realizan en los sistemas de alcantarillado urbano o municipal, estableciendo parámetros específicos que deben cumplir los usuarios para evitar afectaciones a la infraestructura y a los procesos de tratamiento
- NOM-003-SEMARNAT-1997
Define los criterios de la calidad que deben cumplir las aguas residuales tratadas cuando se destinan a servicios públicos como el riego de áreas verdes y otras actividades de contacto indirecto.

En conjunto, estas disposiciones normativas establecen lineamientos técnicos para el tratamiento, monitoreo y vigilancia de las descargas de aguas residuales, promoviendo una gestión integral del recurso hídrico y la prevención de la contaminación de los cuerpos receptores (SEMARNAT, 2021).

2.10 Monitoreo de la calidad del agua

El monitoreo de la calidad del agua es un proceso técnico y científico que consiste en la observación sistemática, medición y evaluación de las características físicas, químicas y biológicas de los cuerpos de agua superficiales y subterráneos. Su finalidad principal es

determinar el estado del recurso hídrico, identificar alteraciones derivadas de actividades humanas o procesos naturales, y verificar el cumplimiento de los criterios establecidos en la legislación ambiental vigente. En el contexto de la gestión integral del agua, el monitoreo constituye una herramienta fundamental para la protección de la salud pública, la conservación de los ecosistemas acuáticos y la toma de decisiones informadas (Bartram & Ballance, 2022).

En México, el monitoreo de la calidad del agua adquiere especial relevancia debido a la presión ejercida por descargas de aguas residuales, actividades agrícolas e industriales, así como al crecimiento urbano. Por ello, este proceso se encuentra estrechamente vinculado con instrumentos normativos como la norma oficial mexicana.

- NOM-001-SEMARNAT-2021
Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores.
- NOM-127-SSA1-2021
Que define los criterios de calidad del agua para uso y consumo humano.

2.10.1. Etapas del monitoreo de la calidad del agua

El monitoreo de la calidad del agua se desarrolla a través de una serie de etapas interdependientes que garantizan la confiabilidad y utilidad de la información generada.

La primera etapa corresponde a la planeación del programa de monitoreo, en la cual establecen los objetivos, se selecciona los puntos de muestreo, se define los parámetros a evaluar y se determina la frecuencia de muestreo, considerando el cuerpo de agua y su uso predominante. Esta etapa es clave para asegurar que los resultados sean representativos y comparables en el tiempo (Chapman & Kimstach, 2021).

La segunda etapa es el muestreo en campo, donde se recolectan las muestras de agua siguiendo protocolos estandarizados que minimicen errores y contaminaciones. Durante esta fase se miden parámetros in situ, como temperatura, pH, oxígeno disuelto y conductividad eléctrica, los cuales son esenciales para evaluar el estado inmediato del cuerpo de agua. Posteriormente, las muestras son trasladadas al laboratorio para el análisis de parámetros

físicoquímicos y microbiológicos, tales como demanda bioquímica de oxígeno, sólido suspendido, nutrientes y coliformes fecales, indicadores contemplados en la NOM-001-SEMARNAT-2012 para la evaluación de descargas de aguas residuales.

La última etapa corresponde al análisis, interpretación y comunicación de resultados. En esta fase, los datos obtenidos se comparan con los límites establecidos en las normas oficiales mexicanas y otros criterios de referencia, lo que permita identificar incumplimiento, tendencias de deterioro o mejoras en la calidad del agua. Los resultados se integran en informes técnicos que sirven como base para la implementación de medidas de control, sanción o remediación ambiental.

2.10.2. Requerimientos para el monitoreo

El monitoreo de la calidad del agua requiere una serie de condiciones técnicas, humanas y normativas para garantizar la validez de los resultados. Entre los principales requerimientos se encuentra la disponibilidad de personal capacitado en muestreo y análisis de agua, así como el uso de equipos debidamente calibrados y métodos analíticos estandarizados. Además, es indispensable contar con sistema de aseguramiento y control de calidad que permita detectar errores y asegurar la trazabilidad de los datos generados (WHO, 2023).

Desde el punto de vista normativo, el monitoreo debe alinearse con lo establecido en las normas oficiales mexicanas.

- La NOM-001-SEMARNAT-2021
Especifica los parámetros y límites máximos permisibles que deben considerarse en el monitoreo de descargas.
- La NOM_127-SSA1-2021
Orienta la evaluación de la calidad del agua destinada al consumo humano.

El cumplimiento de estas disposiciones es esencial para proteger la salud de la población y prevenir daños ambientales.

2.10.3. Importancia del monitoreo de la calidad del agua

La importancia del monitoreo de la calidad del agua radica en su papel como herramienta preventiva y de gestión ambiental. A través de este proceso es posible detectar de manera temprana la presencia de contaminantes, evaluar los impactos de las actividades humanas y medir la efectividad de las políticas públicas en materia de saneamiento y protección del recurso hídrico. Asimismo, el monitoreo contribuye al cumplimiento de la legislación ambiental y al fortalecimiento de la gobernanza del agua (UNEP, 2022).

En el contexto mexicano, el monitoreo continuo permite verificar el cumplimiento de normas como la NOM-001-SEMARNAT-2021. Reduciendo el riesgo de contaminación de ríos, lagos y acuíferos. De igual forma, es una herramienta clave para garantizar que el agua destinada al consumo humano cumpla con los criterios de la calidad establecidos en la NOM-127-SSA1-2021, contribuyendo así a la prevención de enfermedades y a la protección de salud pública.

2.11 El manejo de sustancia y residuos peligroso

Durante las actividades de monitoreo y análisis de la calidad del agua se utilizan reactivos químicos y se generan residuos que pueden representar un riesgo para la salud y el medio ambiente. En este contexto, la NOM-052-SEMARNAT-2005 establece los criterios técnicos para la identificación, clasificación y manejo de residuos peligrosos, abarcando aspectos como su segregación, etiquetado, almacenamiento temporal, transporte y disposición final en instalaciones autorizadas. El cumplimiento de esta norma es esencial para prevenir impactos ambientales negativos y garantizar condiciones seguras durante las actividades de laboratorio y campo.

3. ESTADO DEL ARTE

Nombre del artículo	Objetivo	Aportación	Referencia
Estrategia de monitoreo hídrico comunitario para la microcuenca río Jorco basado en el análisis de indicadores físicoquímicos, microbiológicos y biológicos de la calidad de agua	Proponer una estrategia de monitoreo hídrico comunitario para el mejoramiento de la gestión de la microcuenca río Jorco. La caracterización de la calidad del agua se efectuó mediante indicadores físicoquímicos, microbiológicos y biológicos.	El amoníaco (N) usualmente está asociado al vertido de excretas humanas, principalmente en sitios urbanizados, esta condición puede ser la causante de amoníaco (N) en el río. Los niveles de oxígeno disuelto es un buen indicativo de que el río se encuentra adecuadamente oxigenado, condición necesaria para una buena degradación aeróbica de la materia orgánica disuelta o suspendida en el río por medio de microorganismos. La estrategia planteada consistió en implementar un monitoreo hídrico comunitario siguiendo un plan de acción cuya dinámica consistió en llevar a cabo monitoreos de calidad del agua en el río Jorco, para buscar junto con la comunidad soluciones correctivas y preventivas ante el problema de la contaminación.	a
Contaminación de ríos urbanos: El caso de la subcuenca del río Sordo en Xalapa, Veracruz, México	Realizar un primer diagnóstico de la calidad del agua en la subcuenca del río Sordo, incluyendo el arroyo Papas y el río Carneros que son sus dos principales afluentes	En temporadas de sequía, se observó hasta 500ppm de DQO (semejantes a las descargas de aguas residuales domesticas) y también valores considerablemente bajos de OD. Los valores de los parámetros monitoreados, exceden de manera significativa, los niveles establecidos por USEPA como adecuados para la	b

		conservación de la vida acuática y la estabilidad de los ecosistemas. El deterioro en la calidad del agua de la subcuenca del río Sordo, se asocia a la falta de infraestructura de saneamiento debido a la descarga de aguas residuales domesticas sin tratamiento previo.	
Tendencia de la calidad del agua en ríos de tabasco México	Determinar la tendencia espacial y temporal de siete parámetros físicoquímicos (DBO5, DQO, SST, OD, pH, grasas y aceites, y temperatura) en los ríos de Tabasco, así como modelar dichas tendencias para apoyar la gestión del agua.	Proporciona un análisis histórico (1978-2011) de la calidad del agua en Tabasco, identificando tendencias de contaminación y mejoras en distintas regiones. Destaca problemas como altos niveles de DQO y bajos niveles de oxígeno disuelto en la región Chontalpa, y aporta modelos de pronóstico útiles para la toma de decisiones ambientales.	c

^aCalvo y Salazar (2023); ^bOlgún, Zamora y Owen (2010); ^cRamos, Broca, Laines y Carrera (2012)

4. METODOLOGÍA

4.1 Área de estudio

El Municipio de Álamo Temapache se localiza en la zona Norte de estado de Veracruz y pertenece a la región de la Huasteca Baja. Su fisiografía comprende principalmente llanuras y lomeríos pertenecientes a la Llanura costera del Golfo de México, donde su uso de suelo es principalmente agrícola, predomina el clima cálido subhúmedo con lluvias en verano (INEGI, 2010), con un rango de temperatura de 23 – 26°C y precipitación anual promedio de 1170 mm (SMN, 2025), se ubica en la cuenca del Río Tuxpan cuya superficie aproximada es de 5 837m² conformado por las subcuencas: ríos Pantepec, Vinazco, Tecomate, Buenavista y Tuxpan (INEGI, 2016).

El estudio se desarrolló en la subcuenca del Río Tuxpán, dentro del municipio de Álamo Temapache, Veracruz, abarcando un tramo aproximado de 26.8 km de longitud.

El área de estudio se delimito geográficamente entre las coordenadas 20.92834° N- 97.68242° W y 20.91921° N – 97.56857° W, correspondiendo a una sección del río caracterizada por la presencia de asentamientos humanos y descargas de aguas residuales municipales. La selección de este tramo respondió a la necesidad de evaluar el impacto de las actividades antrópicas sobre la calidad del agua superficial, particularmente en zonas donde se identifican descargas directas sin tratamiento previo.

4.2 Reconocimiento de campo y diseño del muestreo

Previo el establecimiento del programa de monitoreo, se realizó un reconocimiento de campo con la finalidad de identificar fuentes puntuales de contaminación y definir estratégicamente los sitios de muestreo. Como resultado de esta etapa, se identificaron dos puntos principales de descarga de aguas residuales municipales, pertenecientes a la localidad de Chapopote Núñez y a la colonia Pantepec. A partir de estos puntos se diseñó un esquema de muestreo longitudinal que permitió evaluar comparativamente las condiciones del agua antes, durante y después de la incorporación de los efluentes al cauce del río.

4.3 Selección y ubicación de los puntos de muestreo

Con base en el diseño establecido, se definieron ocho puntos de muestreo distribuidos a lo largo del tramo de estudio.

- El primer punto: Se ubicó 100 m aguas arriba de la descarga de Chapopote Núñez, considerando como un punto de referencia local sin influencia directa del efluente.
- El segundo punto: Correspondió a la descarga directa de las aguas residuales municipales de esta localidad.
- El tercer punto: Se localizó 100 m aguas debajo de la unión del efluente con el cauce del río, permitiendo evaluar el impacto inmediato de la descarga sobre la corriente principal.
- El cuarto punto: Se ubicó 100 m aguas arriba de la descarga de la colonia Pantepec.
- El quinto punto: En la descarga directa
- El sexto punto: En 100 m abajo siguiendo el mismo criterio de análisis del efecto de las aguas residuales
- El séptimo punto: En la localidad hidalgo Amajac, con el objetivo de detectar posibles descargas no identificadas asociadas a asentamientos humanos cercanos al río.
- El octavo punto: En la localidad de Xùchil, el cual fue considerado como punto de referencia, debido a que en esta zona el agua del río es utilizada para el abastecimiento de agua potable.

4.4 Monitoreo de parámetros fisicoquímicos in situ

El monitoreo de la calidad del agua incluyó la determinación in situ de parámetros fisicoquímicos fundamentales, tales como pH, potencial oxido-reducción (ORP), oxígeno disueltos (OD), conductividad eléctrica (CE), sólidos disueltos totales (TDS), y temperatura del agua. Estos parámetros proporcionan información relevante sobre las condiciones químicas y físicas del sistema acuático, así como sobre la disponibilidad de oxígeno y el grado de mineralización del agua.

Las mediciones se realizaron mediante un medidor multiparamétrico portátil HI98194 (Hanna Instruments, USA), el cual fue calibrado previamente conforme a las especificaciones del fabricante. El monitoreo se llevó a cabo con una frecuencia de dos veces por mes en cada uno de los puntos de muestreo, lo que permitió identificar variaciones espaciales y temporales en la calidad del agua.

4.5 Muestreo y análisis de materia orgánica y nutrientes

De manera complementaria a las mediciones in situ, se realizó la colecta de muestras de agua superficial para la determinación de parámetros asociados a las presencias de materias orgánicas y nutrientes. Las muestras fueron recolectadas siguiendo procedimientos estandarizados, asegurando su representatividad y evitando alteraciones durante su transporte y conservación.

En el laboratorio se determinó la demanda química de oxígeno (DQO) como indicador de la carga total de materia orgánica presente en el agua, así como el nitrógeno total (NT) y el fósforo total (PT), elementos clave para la evaluación del aporte de nutrientes al ecosistema acuático. Los análisis se realizaron con una frecuencia mensual mediante la técnica de tubo sellado, utilizando los métodos de fábrica 28, 60 y 75 descritos en el manual de operación del espectrofotómetro visible IRIS HI801 (Hanna instruments, USA).

4.5.1. Demanda Química de oxígeno de rango medio APA (vial de 13 mm)

Procedimiento de medición:

- Se utilizaron viales de reactivo de rango medio para DQO H193754B-0. Se añadieron 2ml de agua desionizada al primer vial (n. °1) y 2ml de muestra al segundo vial (n. °2), manteniendo los viales en un ángulo de 45 grados.
- Posteriormente, se insertaron los viales en el reactor y se calentaron durante 2 horas a 150°C. Se enfriaron hasta temperatura ambiente en una gradilla.
- Se seleccionó el método COD MR EPA (13mm) utilizando el procedimiento descrito en la sección método de fábrica. Primero se dio lectura al banco y posteriormente a los viales correspondientes a las muestras.
- El instrumento mostró los resultados en mg/L de oxígeno (O₂).

4.5.2. Nitrógeno total de rango bajo (vial 13 mm)

Procedimiento de medición:

- Se retiró la tapa de dos viales de gestión de nitrógeno total de rango bajo H193767A-B. y se agregaron un paquete de PERSULFATO/N a cada vial.
- Posteriormente se agregó 2 ml de agua desionizada al primer vial (n. °1) y 2 ml de muestra al segundo vial (n. °2), y Agito vigorosamente durante 30 segundos o hasta que el polvo se disuelva por completo. Se Insertaron los viales en el reactor y caliéntalos durante 30 minutos a 105 °c. Se enfriaron hasta temperatura ambiente en una gradilla.
- Seleccione el método de nitrógeno total LR (13 mm) utilizando el procedimiento descrito en la sección Métodos de fábrica.
- Se retiraron las tapas de los viales y se añadieron un paquete de BISULFITO/N a cada vial. Se agitaron suavemente durante 15 segundos. Posteriormente se pulso la tecla para acceder al menú del temporizador. 1; la pantalla mostrara la cuenta atrás o espere 3 minutos.
- Se retiraron las tapas de los viales y se añadieron un paquete de reactivo de nitrógeno total H193767-O a cada vial. Se agitaron suavemente durante 15 segundos. Se presionó la tecla para seleccionar el temporizador para iniciar el temporizador 2, la pantalla mostrara la cuenta regresiva o espere 2 minutos.
- Se retiraron las tapas de dos viales de reactivo de nitrógeno total de rango bajo H193766V-OLR se añadieron 2 ml de blanco digerido (n. °1) a uno de los viales de reactivo y 2 ml de muestra digerida (n. °2) al segundo vial de reactivo, y se invirtieron 10 veces.
- Se insertó el vial de blanco (n. °1) en el adaptador. se pulsa la tecla para seleccionar el temporizador 3 para iniciar el temporizador 3; la pantalla mostrara la cuenta regresiva del cero o espere 5 minutos. Cuando el medidor este en cero y listo para la medición se retira el vial en blanco se insertan el vial de muestra (#2) en el adaptador.
- El instrumento mostro los resultados en mg/L de nitrógeno (N).

4.5.3. Fosforo total rango bajo total (vial 13 mm)

Procedimiento de medición:

- Se retiraron las tapas de un vial de reactivo H193758V-O. se añadieron 5 ml de muestra al vial.
- Para posteriormente se añadió un paquete de PERSULFATO/P persulfato de potasio, y agito suavemente el vial hasta que todo el polvo se disolvió por completo.
- Se insertó el vial en el reactor y se dejó calentando durante 30 minutos a 150 °C. Al final de la gestión, los viales se dejan en gradilla para tubos de ensayo y que se enfríen a temperatura ambiente.
- Se seleccionó el método de fosforo total LR (13 mm) utilizando el procedimiento descrito en la sección métodos de fábrica.
- Se insertó el adaptador de vial 13 mm utilizando el procedimiento descrito en la sección adaptadores de cubetas y viales.
- Se retiran las tapas del vial y se añaden exactamente 2 ml de solución de NaOH H193758O-O 1,54 n, se invierten el vial varias veces para mezclar.
- Inserte el vial en el adaptador. Cuando el medidor este puesto a cero y listo para la medición.
- Posteriormente se retira el vial, y se añadieron un paquete de reactivo de fosforo H193758-O. se agito durante 2 minutos hasta que el polvo se disuelva por completo.
- Se insertó el vial en el adaptador, se presionó la tecla para acceder al menú del temporizador para iniciar el temporizador 1; la pantalla la cuenta regresiva antes de le medición o espere 3 minutos.
- El instrumento muestra los resultados en mg/L de fosforo (P).
- Nota: el método detecta formas inorgánicas libres (ortofosfato) y condensadas (meta, piro y orto polifosfato) de fosfato presentes en la muestra.

4.6 Enfoque metodológico y alcance del estudio

En el enfoque metodológico adoptado permitió integrar información obtenida directamente en campo con resultados analíticos de laboratorio, proporcionando una evaluación integral del estado de la calidad del agua de la Subcuenca Rio Tuxpán en el tramo estudiado, la

comparación entre puntos aguas arriba, puntos de descarga y puntos aguas abajo facilitó la identificación del impacto directo de las aguas residuales municipales, así como una evaluación preliminar de la capacidad de dilución y autodepuración del cuerpo de agua. Este desarrollo metodológico constituye una base sólida para el análisis de resultados y la discusión de los efectos de las actividades humanas sobre el ecosistema acuático.

4.7 Análisis estadístico:

El análisis estadístico de los datos se realizó empleando el software Minitab 19 Statistical Software. Las diferencias con p-value inferiores a 0.05 ($p < 0.05$), se consideraron significativas.

5. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

5.1 Distribución de puntos de descarga y muestreo en el área de estudio

Durante el reconocimiento del área de estudio se identificaron dos puntos de descarga de aguas residuales tipos domésticas, correspondientes a la localidad de Chapopote Núñez y la colonia Pantepec, los cuales descargan directamente al cuerpo de agua. Con base en esta identificación, se estableció una red de ocho puntos de muestreo distribuidos estratégicamente a lo largo del cauce como lo muestra en **figura 1**, con el propósito de evaluar la influencia de dichas descargas sobre la calidad de agua.

Se identificaron los puntos de muestreo como se indica a continuación: 1- AACH (aguas arriba Chapopote); 2 - DACH (descarga de aguas residuales en Chapopote); 3 - ABCh (aguas abajo Chapopote); 4 - AAP (aguas arriba Pantepec); 5 - DAP (descarga de aguas residuales en Pantepec); 6 - ABP (aguas abajo Pantepec); 7- HA (Localidad de Hidalgo Amajac) y 8 – Xu (Localidad del Xúchil)

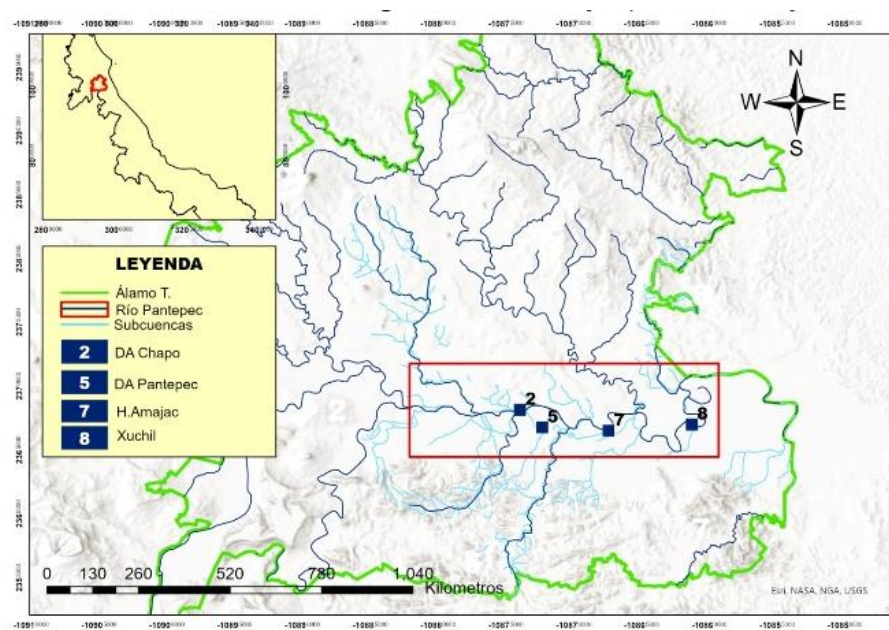


Figura 1. Área de estudio: Zonas de descarga y puntos de muestreo en la Subcuenca Río Tuxpan.

En las siguientes figuras se muestran los sitios seleccionados para la realización de las muestras.



Figura 2. Zona de descarga de aguas residuales de en la Localidad de Chapopote Núñez. De izquierda a derecha: Aguas Arriba, Descarga de Aguas Residuales y Aguas Abajo.



Figura 3. Zona de descarga de aguas residuales de en la Localidad de Pantepec. De izquierda a derecha: Aguas Arriba, Descarga de Aguas Residuales y Aguas Abajo.



Figura 4. Zonas de referencia Hidalgo Amajac y Xuchil

5.2 Comportamiento espacial de los parámetros fisicoquímicos medidos in situ en los puntos de muestreo

Los resultados obtenidos a partir de las mediciones in situ de los parámetros fisicoquímicos del agua se presentan en la tabla 1, donde se muestran los valores promedios y su respectiva desviación estándar para cada uno de los puntos de muestreos evaluados a lo largo del cuerpo de agua. Estos parámetros permiten caracterizar el estado ambiental del sistema acuático y evaluar la influencia de las descargas de aguas residuales sobre la calidad del agua.

Tabla 5. Mediciones in situ de los puntos de muestreo

Punto	ORP (mV)	OD (mg/l)	CE (μ S/cm)	TDS (mg/l)
1 AACH	119 ± 5	7.5 ± 2.3	284 ± 9	136 ± 2
2 DACH	-143 ± 71	1.3 ± 1.8	664 ± 163	332 ± 80
3 ABCh	-21 ± 16	5.3 ± 1.2	268 ± 6	138 ± 5
4 AAP	86 ± 31	7.4 ± 1.3	291 ± 10	147 ± 2
5 DAP	-212 ± 43	0.1 ± 0.2	2030 ± 397	1043 ± 203
6 ABP	-83 ± 14	4.1 ± 2	458 ± 64	230 ± 41
7 HA	64 ± 61	4.1 ± 1.3	277 ± 10	139 ± 5
8 Xu	74 ± 31	6.3 ± 1	284 ± 9	142 ± 5

En los puntos AACH y AAP, ubicados aguas arriba de las zonas de descarga, se registraron condiciones favorables, con ORP positivos (86-119 mV) y concentraciones elevadas de OD (7.4-7.5 mg/L), lo que indica ambientes predominantemente oxidantes y bien oxigenados. Los valores de CE y TDS en estos puntos fueron bajos y homogéneos, característicos de tramos con mínima influencia antrópica.

Por lo contrario, en los puntos de descarga DACH y DAP se observaron las mayores alteraciones fisicoquímicas. En particular, DAP presento condiciones críticas, con ORP fuertemente negativo (-212 ± 43 mV), OD cercano a cero (0.1 ± 0.2 mg/L) y valores elevados de CE (2030 ± 397 μ S/ cm) y TDS (1043 ± 203 mg/L), evidenciando una alta carga contaminante y condiciones reductoras asociadas a la descarga de agua residuales.

Aguas debajo de las descargas (ABCh y ABP) se identificó una recuperación parcial del sistema, reflejada en el incremento de OD (4.1-5.3 mg/L) y en la disminución de la CE y los TDS, lo que sugiere la acción de procesos de dilución y autodepuración natural. Finalmente, los puntos HA y Xu se registraron condiciones más estables, con ORP positivo y valores moderados a altos de OD, indicando una mejora general de la calidad del agua en los tramos finales del área de estudio.

En cuanto a la determinación in situ, la concentración de OD fue bajo en las zonas de descarga e incrementaron aguas abajo y el ORP mostró un comportamiento semejante al OD, observando que existe una relación positiva entre estos parámetros (**Figura 2**). En el estudio de Li et al. (2011) aplicaron la medición de ORP en el tratamiento de aguas como parámetro de control, con valores más positivos en sistemas de aireación (con mayor OD) y más negativos en sistemas con alto contenido de materia orgánica y anaerobios.

En conjunto, los resultados muestran que las descargas de agua residuales influyen de manera directa en el equilibrio redox, la disponibilidad de oxígeno y la concentración de sólidos disueltos, mientras que aguas abajo se evidencia una recuperación progresiva del cuerpo de agua.

5.3 Distribución espacial de las materia orgánica y nutrientes en los puntos de muestreo

Los resultados de pH, Demanda Química de Oxígeno (DQO), Nitrógeno Total (NT) y Fósforo Total (PT), obtenidos en los puntos de muestreos se presentan en la **tabla 6**:

En general, el pH se mantuvo ligeramente alcalino en todos los puntos (7.6 – 8.6), sin variaciones abruptas asociadas a las descargas de aguas residuales.

La DQO mostro una clara influencia de las zonas de descarga. En los puntos aguas arriba y finales del tramo (AACH y Xu) se registraron valores bajos (17-18 mg/L), mientras que en DACH y DAP se observaron incrementos significativos, alcanzando 743 y 924.5 mg/L, respectivamente, lo que indica una elevada carga de materia orgánica. Aguas debajo de las descargas (ABCh y ABP), la DQO disminuyo considerablemente, evidenciando proceso de dilución y autodepuración.

Tabla 6. Medición de pH y nutrientes (DQO, NT y PT)				
Punto	pH	DQO (mg/L)	NT (mg/L)	PT (mg/L)
AACH	8.3 ± 0.2	18	0.6	0.78
DACH	7.7 ± 0.7	743	49.1	6.55
ABCh	8.4 ± 0.3	62.5	4.35	1
DAP	7.6 ± 0.1	924.5	66.2	9.4
ABP	8.1 ± 0.3	69.5	5.7	1.4
HA	7.8 ± 0.4	19	0.6	0.68
Xu	8.6 ± 0.2	17	0.5	0.28

El comportamiento del nitrógeno total y del fósforo total fue similar al de la DQO. Las concentraciones más bajas se registraron en los puntos menos impactados (<1 mg/L), mientras que los puntos de descarga se alcanzaron valores elevados de NT (49.1 – 66.2 mg/L) y PT (6.55 – 9.4 mg/L), reflejando una importante aportación de nutrientes. Aguas abajo, ambas concentraciones disminuyeron, aunque permanecieron por encima de los valores de referencia, lo que sugiere un enriquecimiento nutrimental residual.

Se observó la disminución gradual de materia orgánica y nutrientes respecto a las zonas de descarga de aguas residuales. Los cambios en la concentración en la DQO, NT y PT en el agua dependen principalmente de la distancia del punto de descarga a la zona de impacto (Savic, 2022).

En cuanto a los nutrientes, los puntos 2, 3, 5 y 6 NT y, todos los puntos para PT mostraron indicios de eutrofización, es decir, NT>1.5 mg/l y PT>0.075 mg/l. De acuerdo con Preisner (2020) la relación de masa NT:PT (7.3:1) puede utilizarse para estimar la producción acelerada de ciertas especies de algas causadas por la carga o desequilibrio de nutrientes, valores NT:PT < 7.3 indican limitación de N (puntos 1, 3, 5, 6, 7 y 8) y NT:PT > 7.3 limitación de P (punto 2), siendo este un mejor indicador para la detección de eutrofización de un cuerpo de agua.

En conjunto, los resultados evidencian que las descargas de aguas residuales incrementan la materia orgánica y los nutrientes en el cuerpo de agua, con una recuperación parcial del sistema en los tramos aguas abajo.

El análisis estadístico (prueba t-Student de dos colas) arrojó que tanto la DQO y NT nutrientes son estadísticamente diferentes ($p > 0.05$). Esto podría justificarse debido a que pesar de a que ambas sitios están conformado por viviendas, la Colonia Pantepec tiene características de una comunidad rural, debido a ello es probable que cuente con menos servicios para la descarga de sus aguas residuales domésticas, por ejemplo, que carezcan de fosas sépticas, además que es apreciable identificar criadero de ganado, donde las aguas residuales generadas en estas actividades, pudieran descargarse en el canal, incrementado la concentración de DQO, NT en la zona de unión, mientras que para el PT, asociado principalmente al uso de detergentes, sea estadísticamente iguales en ambos puntos de descarga.

5.4 Variación espacial del oxígeno disuelto y del potencial oxido-reducción en los puntos de muestreo

Los resultados del Oxígeno Disuelto (OD) y del Potencial Oxido-Reducción (ORP) obtenidos en los diferentes puntos de muestreos se muestran en la **figura 5**, donde se observa un comportamiento espacial claramente diferenciado a lo largo del cuerpo de agua, asociado a la influencia de las descargas de aguas residuales y a los procesos de autodepuración natural.

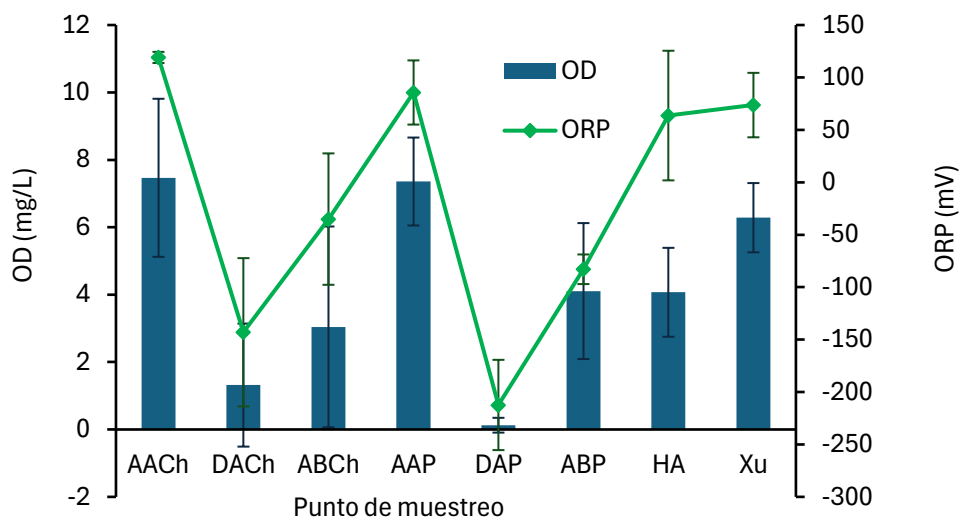


Figura 5. Análisis de valores OD y ORP

En el punto AACH (aguas arriba de Chapopote) se registraron valores elevados de OD, cercanos a 7-8 mg/L, acompañados de un ORP positivo superior a +100 mV. Estas condiciones son indicativas de un ambiente predominantemente oxidante y bien oxigenado, característico de un tramo con baja influencia antrópica y con adecuada capacidad de intercambio gaseoso, lo cual favorece la estabilidad ecológica y el desarrollo de organismos acuáticos sensibles.

En contraste, el punto DACH (Descargas de Aguas Residuales de Chapopote) presentó una disminución significativa del OD, con valores cercanos a 1 mg/L, así como un ORP negativo (aproximadamente -100 mv). Este comportamiento refleja un ambiente reductor, asociado a la incorporación de altas cargas de materia orgánica biodegradable que incrementan el consumo de oxígeno por procesos biológicos y químicos. Estas condiciones sugieren un impacto directo de la descarga sobre la calidad del agua, generando estrés ambiental y limitando la presencia de organismos aerobios.

Posteriormente, en el punto ABCh (Aguas Debajo de Chapopote) se observa una recuperación parcial del sistema, evidenciada por un incremento del OD hasta valores cercanos a 3 mg/L y un ORP ligeramente positivo. Este patrón indica el inicio de proceso de autodepuración, tales como la recuperación natural, dilución y la degradación progresiva de la materia orgánica, aunque las condiciones aun no alcanzan niveles óptimos de calidad.

En el punto AAP (Aguas Arriba de Pantepec) se registraron nuevamente valores elevados de OD, cercanos a 7 mg/L, y un ORP positivo cercano a +100 mV, lo cual sugiere una mejora sustancial en las condiciones fisicoquímicas del agua. Este comportamiento puede atribuirse a la ausencia inmediata de descargas y a la capacidad del cuerpo de agua para recuperar condiciones oxidantes antes de recibir nuevas aportaciones contaminantes.

Sin embargo, en punto DAP (descargas de aguas residuales de Pantepec) se presenta el escenario más crítico, con valores mínimos de OD cercanos a 0 mg/L y un ORP marcadamente negativo, inferior a -200 mV. Estas condiciones reflejan un ambiente altamente reductor, típico de zonas con fuerte contaminación orgánica, donde predominan procesos anaerobios y existe un alto riesgo de generación de compuestos indeseables como sulfuro y amonio reducido.

En los puntos ABP (Aguas Debajo de Pantepec) y HA, se observa una recuperación progresiva del OD, con valores aproximados de 4 mg/L, así como un aumento del ORP hacia valores positivos. Este comportamiento confirma la capacidad de recuperación parcial del sistema, aunque los valores registrados indican que la influencia de la descarga persiste a cierta distancia aguas abajo.

Finalmente, en el punto Xu, el OD alcanza valores cercanos a 6 mg/L y el ORP se mantiene positivos, lo que sugiere condiciones más estables y oxigenadas, compatibles con un tramo donde los procesos de dilución, reparación y degradación natural han reducido significativamente el impacto de las descargas.

En conjunto, los resultados evidencian una relación inversa entre oxígeno disuelto y el impacto de las descargas de aguas residuales, así como una clara correspondencia entre valores bajos de OD y ORP negativos en los puntos de descarga. Estos hallazgos confirman que las aguas residuales influyen de manera directa en el equilibrio redox del sistema y en la disponibilidad de oxígeno, siendo factores clave para la evaluación de la calidad del agua y del estado ambiental del cuerpo acuático.

En cuanto a la determinación in situ, la concentración de OD fue bajo en las zonas de descarga e incrementaron aguas abajo y el ORP mostró un comportamiento semejante al OD, observando que existe una relación positiva entre estos parámetros (**Figura 5**). En el estudio

de Li et al. (2011) aplicaron la medición de ORP en el tratamiento de aguas como parámetro de control, con valores más positivos en sistemas de aireación (con mayor OD) y más negativos en sistemas con alto contenido de materia orgánica y anaerobios.

5.5 Dilución de los contaminantes aguas abajo

El análisis estadístico de cola derecha para la materia orgánica y nutrientes para evaluar la capacidad de amortiguar los contaminantes ,es decir, su capacidad de dilución del cuerpo receptor para la DQO , NT y PT indican que aguas abajo de la descarga aun no le es posible recuperar sus características que tiene aguas arriba($p<0.0$) , sin embargo aguas más abajo (en HA y XU) las características son estadísticamente semejantes al punto inicial del monitoreo, es decir previo a cualquier aporte de aguas residuales en el segmento de estudio

Tabla 7. Dilución de los contaminantes aguas abajo comparando a aguas arriba			
	DQO (%)	NT (%)	PT (%)
ABCh	92	91	85
ABP	92.9	91	89
XU	98.1	99	97

Con base en el análisis estadístico de cola derecha aplicado a la materia orgánica y nutrientes, se observa que el cuerpo receptor presenta una capacidad progresiva de amortiguamiento frente a los contaminantes aportados por las descargas de aguas residuales. Los resultados para Demanda Química de Oxígeno, Nitrógeno Total y Fósforo Total muestran que inmediatamente aguas abajo de la descarga, en el punto ABCh, el río aún no logra recuperar las condiciones registradas aguas arriba, lo que evidencia un impacto significativo de los contaminantes ($p<0.0$). Sin embargo, conforme aumenta la distancia del flujo y se alcanzan los sitios ABP, HA y especialmente XU, los porcentajes de recuperación se incrementan notablemente, alcanzando valores de hasta 98.1% en DQO, 99% en NT y 97% en PT. Esto indica que el río presenta una capacidad natural de dilución y autodepuración, permitiendo que aguas más abajo sus características fisicoquímicas sean estadísticamente semejantes a las condiciones iniciales del monitoreo, previas a cualquier aporte de aguas residuales en el segmento de estudio.

6. CONCLUSIONES.

La medición de ORP más negativos, indican un sitio con menor contenido de OD, y en este estudio, mayor contenido de materia orgánica (DQO).

En este periodo de estudio, el flujo de agua y la distancia entre los puntos de descarga y los puntos de impacto aguas abajo favorecen a la dilución de las materias orgánicas y nutrientes, y las relaciones de NT: PT no resultan ser tan favorables para la eutrofización en esta área de la subcuenca del Río Tuxpan.

Por esta razón es importante continuar con el monitoreo de la calidad del agua, para mantener alerta a la población en cuanto a la seguridad de este importante recurso hídrico.

Los resultados obtenidos en el presente estudio permiten establecer un diagnóstico integral del estado de la calidad de agua en el tramo evaluado de la subcuenca del río Tuxpán, considerando la influencia de descargas de aguas residuales, la dinámica hidrológica y la respuesta de los parámetros fisicoquímicos y nutrientes.

El análisis conjunto de los indicadores medidos evidencia una relación directa entre el potencial de óxido-reducción (ORP), el oxígeno disuelto (OD) y la carga de materia orgánica, expresada principalmente a través de la demanda química de oxígeno (DQO), lo que confirma la utilidad de estos parámetros como herramientas clave para la evaluación de procesos de degradación orgánica en cuerpos de agua superficiales.

En particular, la presencia de valores más negativos de ORP en ciertos puntos de muestreos indico condiciones menos oxidantes, asociadas a una disminución en las concentraciones de oxígeno disuelto y a un incremento relativo de materia orgánica.

Este comportamiento sugiere la existencia de aportes orgánicos provenientes de las descargas identificadas, los cuales influyen de manera puntual en la calidad del agua.

No obstante, los resultados también muestran que la capacidad de autodepuración del sistema fluvial, favorecida por el flujo del agua y la distancia entre los puntos de descargas y los sitios de impactos aguas abajo, contribuye significativamente a la dilución y atenuación de la materia orgánica y de los nutrientes a lo largo del tramo estudiado.

Asimismo, el análisis de los nutrientes totales, particularmente del nitrógeno total (NT) y fosforo total (PT), así como de sus relaciones estequiométricas (NT: PT), permitió identificar que, durante el periodo de estudio, no se presentaron condiciones óptimas para el desarrollo de procesos de eutrofización.

Si bien se detectaron concentraciones relevantes de nutrientes en zonas cercanas a las descargas, la proporción entre estos elementos no resulto favorables para estimular un crecimiento excesivo de biomasa algal, lo cual indica que, bajo las condiciones actuales de caudal y dispersión, el sistema mantiene un estado de equilibrio relativo.

No obstante, los valores elevados de DQO, junto con variabilidad observada en parámetros como la conductividad eléctrica (CE) y solidos disueltos totales (TDS), evidencian las persistencias de presiones antropogénicas que podrían comprometer la calidad del agua a mediano y a largo plazo, especialmente ante posibles cambios en el régimen hidrológicos, incrementos en la carga contaminante o disminuciones en el caudal del río. En este sentido, los resultados obtenidos constituyen una línea base fundamental para la evaluación futura del estado ambiental de la subcuenca.

En conclusión, aunque el tramo estudiado del Río de Tuxpán no presenta actualmente condiciones críticas de eutrofización, si muestra señales claras de impacto por materia orgánica y descargas de origen antrópico, lo que hace indispensable la continuidad del monitoreo sistemático de la calidad del agua.

Mantener y fortalecer estos programas de vigilancias permitirá detectar oportunamente cambios en las condiciones fisicoquímicas y ecológicas del río, contribuir a la toma de decisiones informadas para su gestión y conservación, y sobre todo, salvaguardar la seguridad y el bienestar de las comunidades que dependen de este importante recurso hídrico.

ANEXOS

Pruebas t de Student de dos colas para el análisis de estadístico de materia orgánica y nutrientes.

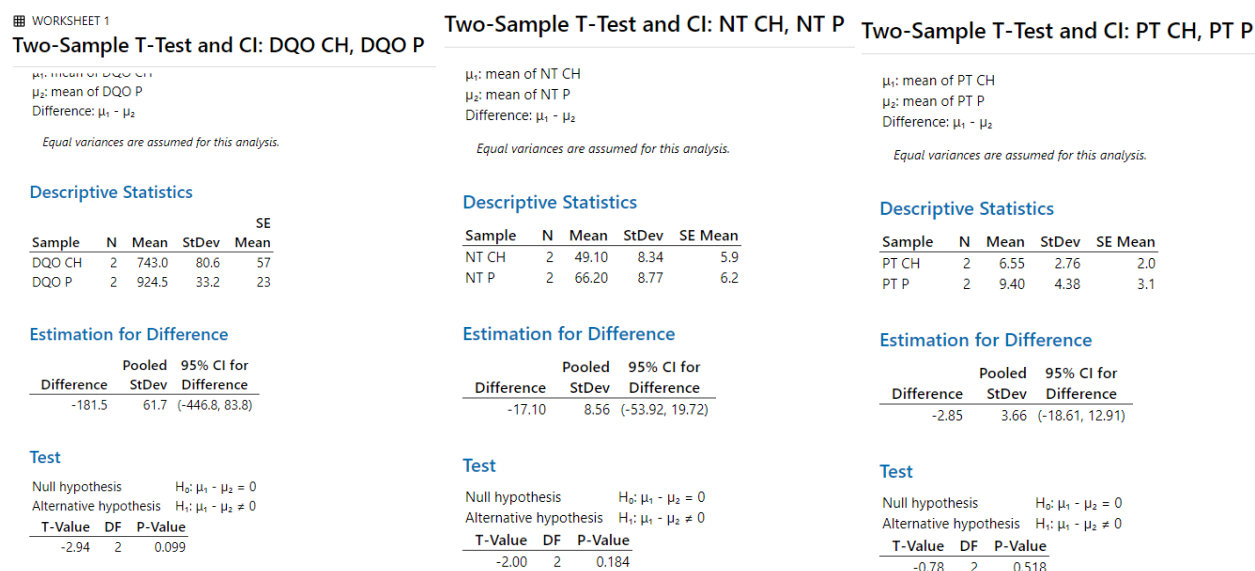


Figura 5. Prueba t de student de dos colas

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. A Hernández García, H., Buitrón Méndez, G., M Lopez-Vazquez, C., & J Cervantes Carrillo, F. (2017). *Tratamiento biológico de aguas residuales: principios, modelación y diseño*. IWA publishing.
2. American Public Health Association (APHA), American Water Works Association (AWWA), & Water Environment Federation (WEF). (2022). *Standard methods for the examination of water and wastewater* (24th ed.). APHA Press.
3. Bartram, J., & Ballance, R. (2022). *Water quality monitoring: A practical guide to the design and implementation of freshwater quality studies and monitoring programmes*. CRC Press.
4. Bhagowati, B., Talukdar, B., & Ahamad, K. U. (2019). Lake eutrophication: causes, concerns and remedial measures. In *Emerging issues in the water environment during anthropocene: a South East Asian perspective* (pp. 211 - 222). Singapore: Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-32-9771-5_12
5. Calvo-Brenes, G. y Salazar-Céspedes, K. (2023). *Estrategia de monitoreo hídrico comunitario para la microcuenca río Jorco basado en el análisis de indicadores físicoquímicos, microbiológicos y biológicos de la calidad de agua*. Tecnología en Marcha, 36(4), 181-193.
6. Cervantes-Astorga, E., Aguilar-Juárez, O., Carrillo-Nieves, D., & Gradilla-Hernández, M. S. (2021). A GIS methodology to determine the critical regions for mitigating eutrophication in large territories: the case of Jalisco, Mexico. *Sustainability*, 13(14), 8029. <https://doi.org/10.3390/su13148029>
7. Chapman, D., & Kimstach, V. (2021). *Selection of water quality variables*. In D. Chapman (Ed.), *Water quality assessments*. UNESCO Publishing.
8. Collins, A. L., Price, J. N., Zhang, Y., Gooday, R., Naden, P. S., & Skirvin, D. (2018). Assessing the potential impacts of a revised set of on-farm nutrient and sediment 'basic' control measures for reducing agricultural diffuse pollution across England. *Science of the Total Environment*, 621, 1499 - 1511. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.10.078>
9. Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2021). *Estadísticas del agua en México*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

10. Correll, D. L. (1998). The role of phosphorus in the eutrophication of receiving waters: a review. *Journal of environmental quality*, 27(2), 261 - 266. <https://doi.org/10.2134/jeq1998.00472425002700020004x>
11. Dodds, W. K., & Smith, V. H. (2022). Nitrogen, phosphorus, and eutrophication in streams. *Inland Waters*, 12(1), 1–17. <https://doi.org/10.1080/20442041.2021.2011535>
12. Dzialowski, A. R., Wang, S. H., Lim, N. C., Spotts, W. W., & Huggins, D. G. (2005). Nutrient limitation of phytoplankton growth in central plains reservoirs, USA. *Journal of Plankton Research*, 27(6), 587 - 595. <https://doi.org/10.1093/plankt/fbi034>
13. Edition, F. (2011). Guidelines for drinking-water quality. *WHO chronicle*, 38(4), 104-8.
14. Gray, N. (2017). *Water technology*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781315276106>
15. Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) (2010). *Compendio de información Geográfica municipal 2010 Álamo Temapache Veracruz Ignacio de la Llave, México, 2010*. https://www.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos_geograficos/30/30160.pdf
16. Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) (2016). Estudio de la información integrada de la Cuenca Río Tuxpan”, México, 2016. https://www.inegi.org.mx/contenido/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/702825087463_1.pdf
17. Li, B., y Bishop, P. L. (2001). The application of ORP in activated sludge wastewater treatment processes. *Environmental engineering science*, 18(5), 309 - 321. <https://doi.org/10.1089/10928750152726032>
18. Metcalf & Eddy, Inc. (2023). *Wastewater engineering: Treatment and resource recovery* (6th ed.). McGraw-Hill Education.
19. Olguín, E. J., González-Portela, R. E., Sánchez-Galván, G., Zamora-Castro, J. E. y Owen, T. (2010). *Contaminación de ríos urbanos: El caso de la subcuenca del río Sordo en Xalapa, Veracruz, México*. Revista Latinoamericana de Biotecnología Ambiental y Algal, 1(2), 178-190.
20. Pirsahab, M., Khamutian, R., y Khodadadian, M. (2014). A comparison between extended aeration sludge and conventional activated sludge treatment for removal of linear alkylbenzene sulfonates (Case study: Kermanshah and Paveh WWTP). *Desalination and Water Treatment*, 52(25-27), 4673 - 4680. <https://doi.org/10.1080/19443994.2013.809965>

21. Preisner, M. (2020). Surface water pollution by untreated municipal wastewater discharge due to a sewer failure. *Environmental Processes*, 7(3), 767-780. <https://doi.org/10.1007/s40710-020-00452-5>
22. Rajasulochana, P., & Preethy, V. (2022). Comparison on efficiency of various techniques in treatment of wastewater: A comprehensive review. *Resources, Environment and Sustainability*, 8, 100049. <https://doi.org/10.1016/j.resenv.2022.100049>
23. Ramos Sánchez, A. (2017). *Análisis de la calidad del agua del río Tuxpan en los municipios de Álamo Temapache y Tuxpan Veracruz* (Doctoral dissertation, Universidad Veracruzana. Facultad de Ciencias Biológicas y Agropecuarias. Región Poza Rica-Tuxpan).
24. Ramos-Herrera, S., Broca-Martínez, L. F., Laines-Canepa, J. R. y Carrera-Velueta, J. M. (2012). *Tendencia de la calidad del agua en ríos de Tabasco, México*. *Ingeniería*, 16(3), 207-217.
25. Savic, R., Stajic, M., Blagojević, B., Bezdan, A., Vranesevic, M., Nikolić Jokanović, V., ... & Ondrasek, G. (2022). Nitrogen and phosphorus concentrations and their ratios as indicators of water quality and eutrophication of the hydro-system danube–tizza–danube. *Agriculture*, 12(7), 935. <https://doi.org/10.3390/agriculture12070935>
26. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2021). *Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-2021, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores nacionales*. Diario Oficial de la Federación.
27. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (1996). *Norma Oficial Mexicana NOM-002-SEMARNAT-1996, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal*. Diario Oficial de la Federación.
28. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (1997). *Norma Oficial Mexicana NOM-003-SEMARNAT-1997, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público*. Diario Oficial de la Federación.
29. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2021). *Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-2021, que establece los límites máximos permisibles de*

- contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación*. Diario Oficial de la Federación.
30. Secretaría de Salud. (2021). *Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021, Agua para uso y consumo humano*. Diario Oficial de la Federación.
31. Sistema Meteorológico Nacional (SMN), (15 de abril 2025). *Normales climatológicas por estado: Veracruz*. <https://smn.conagua.gob.mx>.
32. Smith, V. H., Tilman, G. D., & Nekola, J. C. (2021). Eutrophication: Impacts of excess nutrient inputs on freshwater, marine, and terrestrial ecosystems. *Environmental Pollution*, 275, 116654. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.116654>
33. Tchobanoglous, G., Stensel, H. D., Tsuchihashi, R., Burton, F. L., & Abu-Orf, M. (2023). *Wastewater engineering: Treatment and resource recovery* (6th ed.). McGraw-Hill Education.
34. Tchobanoglous, G., Stensel, H. D., Tsuchihashi, R., Burton, F. L., & Abu-Orf, M. (2023). *Wastewater engineering: Treatment and resource recovery* (6th ed.). McGraw-Hill Education.
35. United Nations Environment Programme (UNEP). (2022). *Progress on ambient water quality*. UNEP.
36. Vanguardia de Veracruz. 2021. ¡Río Pantepec se está extinguiendo!. Consultado el 29/Abril/2024 (<https://vanguardiaveracruz.com/rio-pantepec-se-esta-extinguiendo/>)
37. Von Sperling, M. (2007). *Wastewater characteristics, treatment and disposal*. IWA publishing.
38. Wetzel, R. G. (2020). *Limnology: Lake and river ecosystems* (3rd ed.). Academic Press.
39. World Health Organization. (2023). *Guidelines for drinking-water quality* (4th ed., actualización 2023). WHO.