



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO

---

---

FACULTAD DE CIENCIAS

Propuesta de red de monitoreo y evaluación  
físicoquímica de la calidad del agua en la  
cuenca de los ríos Atoyac-Zahuapan, Tlaxcala,  
México

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

Licenciado en Ciencias de la Tierra

PRESENTA:

**Alejandro Valencia Ruíz**

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Rodolfo Omar Arellano Aguilar

Ciudad Universitaria, CD.MX., 2024





Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



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

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

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

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

**1. Datos del alumno**

Valencia  
Ruíz  
Alejandro  
4426068263  
Universidad Nacional Autónoma de México  
Facultad de Ciencias  
Ciencias de la Tierra  
415069926

**2. Datos del asesor**

Dr.  
Rodolfo Omar  
Arellano  
Aguilar

**3. Datos del sinodal 1**

Dra.  
Ruth Cecilia  
Vanegas  
Pérez

**4. Datos del sinodal 2**

Dr.  
Harry  
Alvarez  
Ospina

**5. Datos del sinodal 3**

Dra.  
Karen  
Suárez  
Larios

**6. Datos del sinodal 4**

M. en C.  
Salvador  
Reynoso  
Cruces

**7. Datos del trabajo escrito**

Propuesta de red de monitoreo y evaluación fisicoquímica de la calidad del agua en la  
cuenca de los ríos Atoyac-Zahuapan, Tlaxcala, México  
140 p.  
2024

Este trabajo fue parte del proyecto CONAHCYT PRONACE AGUA, No. 305142  
*“Reapropiación socioambiental para el manejo integral y comunitario de la cuenca  
Atoyac – Zahuapan”*.

## Agradecimientos

**A mis padres.** Por brindarme su amor incondicional y su confianza en todo mi camino. Les agradezco su paciencia, sus oraciones, sus consejos y todos los momentos de felicidad que pasamos juntos. Gracias por esforzarse tanto, su ejemplo me da fortaleza y me acompaña todos los días. Los amo.

**A la UNAM.** Por darme la oportunidad de estudiar una carrera universitaria y sobre todo por permitirme desarrollarme como persona. En tus espacios viví momentos muy especiales que atesorare por siempre. Más que una escuela fuiste mi hogar.

**Al Dr. Omar Arellano Aguilar.** Por todo su apoyo para con mi tesis, por sus enseñanzas dentro y fuera del laboratorio, por su paciencia y por la amistad que me ha brindado. Gracias profe Omar, por darme la confianza de poder ayudarlo en los diferentes proyectos, de los cuales he aprendido mucho y me han permitido crecer como profesionalista. También le agradezco por enseñarme que la ciencia es un medio de resistencia.

**A los miembros de mi jurado.** *Dra. Cecy Vanegas, Dra. Karen Suárez, Dr. Harry Alvarez, y Mtro. Salvador Reynoso.* Por ayudarme a culminar mi proyecto de tesis, sus comentarios y sus observaciones, enriquecieron mi trabajo y me mostraron que siempre hay algo nuevo que aprender.

**Al Mtro. Manuel Hernández y a la Unidad de Análisis Ambiental.** Le agradezco por tomarse el tiempo de enseñarme cómo trabajar en campo y en el laboratorio. Pero, sobre todo, le agradezco su confianza y la amistad que me ha brindado.

**Al Centro Fray Julián Garcés y a la gente de Tlaxcala** que nos acoge con cariño y nos acompaña a muestrear.

**A mis compañeros de laboratorio.** *Laura, Parrita, Hugo, Diani, Dothi, Moni, Yere y Jackie,* les agradezco las pláticas, las risas, los consejos y las salidas. Ustedes le dieron un toque mágico y especial a este proceso.

**A Ilse.** Te agradezco todos los momentos en que me diste aliento y amor. Tu ejemplo me motivó y me dio fuerza para culminar mi carrera. Eres un ejemplo de perseverancia y amistad sincera.

**A Irma.** Te agradezco por tu confianza y creer en mí, además de las tardes llenas de matemáticas. Tu apoyo incondicional y tus asesorías me dieron la confianza para hacer el examen de ingreso a la UNAM.

**A la Fam. Hernández Suárez.** Gracias por acogerme y dejarme ser parte de su familia, su apoyo y por cuidarme como a un hijo más. Su amistad y su compañía fue fundamental para poder concluir este proceso. Siempre les estaré agradecido.

**A todos mis amigos:** los viejos y los nuevos, los que aún están y los que se han ido. Les agradezco por enseñarme el valor de la amistad y por todas las vivencias que pasamos juntos. Sus recuerdos viven en mí: *Mata, Chava, Jacquie, Rulo, Fi, Sebas, Tamayo, David R., Aldo y Gámez.*

## Resumen

Ante la creciente situación de emergencia sanitaria y ambiental que se vive en la Cuenca Alta del río Atoyac (CAA) y cuyos efectos transgreden a los ecosistemas y a la salud humana, resulta imperante la generación de mecanismos que ayuden a desarrollar una correcta gestión integral del agua en búsqueda de justicia social y ambiental. El problema es multifactorial y los impactos negativos por la falta de atención se han acumulado por más de 20 años. Varios estudios gubernamentales y del sector académico han expuesto el problema de la contaminación del agua. No obstante, el cúmulo de información que se ha generado de dichos estudios no refleja la dinámica cambiante de las condiciones en la CAA a lo largo del tiempo, lo que imposibilita que dicha información sea usada como un argumento sólido para contribuir a la gestión ambiental de la cuenca.

Además, para entender algunos aspectos clave de la cuenca, es preciso conocer las capacidades técnicas locales que puedan responder a estrategias de monitoreo ambiental, así como identificar los sitios clave para establecer un monitoreo permanente de la calidad del agua que refleje las condiciones y dinámicas cambiantes del río Atoyac.

En este sentido, el presente trabajo tuvo como objetivo identificar las capacidades técnicas-analíticas y los sitios de monitoreo más adecuados para integrar una propuesta de red de estaciones de monitoreo y con ello evaluar la calidad del agua de los ríos Atoyac y Zahuapan de manera permanente.

Se analizó de manera general la situación actual de las competencias técnicas de carácter ambiental (laboratorios técnicos) e instituciones que han estudiado el fenómeno de la contaminación del agua dentro de la zona de estudio, con el propósito de generar un antecedente que permita reconocer el alcance técnico con el que se cuenta en la CAA y que posteriormente de pie a integrar un sistema de vigilancia ambiental, cuya fortaleza sea el trabajo colaborativo entre instituciones y el intercambio de información técnica y confiable y que dé certidumbre a las comunidades involucradas. A partir de la búsqueda, se identificaron 37 laboratorios (públicos y privados) dentro de los Estados de Puebla y Tlaxcala

que poseen las capacidades técnicas para llevar a cabo un total de 122 pruebas analíticas para determinar la calidad del agua y contaminantes particulares. Dichos laboratorios, están acreditados bajo normativas nacionales y en algunos casos están acreditados bajo estándares internacionales como los de la EPA, lo que representa un alto nivel de competencia y rigor en los procedimientos de monitoreo ambiental en la región.

De igual manera, se realizaron mediciones de parámetros fisicoquímicos *in situ*, metales pesados y plaguicidas, correspondientes al periodo de estiaje del año 2022. Los datos fueron analizados mediante estadística multivariada (Análisis de Componentes Principales y Análisis de Conglomerados Jerárquicos). Los resultados obtenidos de las variables fisicoquímicas medidas *in situ* y de las concentraciones obtenidas de metales en agua y de plaguicidas en los sedimentos, mostraron similitud con los resultados reportados en los diferentes estudios consultados en este trabajo. Asimismo, como resultado de las pruebas de estadística multivariada, se obtuvo una clasificación de los sitios de monitoreo de acuerdo con el grado de similitud de las características fisicoquímicas evaluadas. El procedimiento metodológico que se empleó permitió definir estaciones de muestreo fijo para estudios subsecuentes. Lo anterior permite ubicar sitios representativos de la zona de estudio y por ende incorporarlos a una propuesta para implementar una red de monitoreo permanente.

## Siglas y acrónimos

ACJ: Análisis de Conglomerados Jerárquicos

ACP: Análisis de Componentes Principales

CAA: Cuenca del Alto Atoyac

CE: Conductividad Eléctrica

CF: Coliformes Fecales

CNDH: Comisión Nacional de los Derechos Humanos

CONAGUA: Comisión Nacional del Agua

CONAHCYT: Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías

DBO<sub>5</sub>: Demanda Bioquímica de Oxígeno a cinco días

DOF: Diario Oficial de la Federación

DQO: Demanda Química de Oxígeno

EMA: Entidad Mexicana de Acreditación

INEGI: Instituto Nacional de Estadística y Geografía

*In situ*: En sitio

LD: Límite de detección

OD: Oxígeno Disuelto

ORP: Potencial de Oxidación – Reducción (por sus siglas en inglés)

pH: Potencial de Hidrógeno

RENAMECA: Red Nacional de Medición de la Calidad del Agua

RH18: Región Hidrológica “Balsas”

SEMARNAT: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales

SST: Sólidos Suspendidos Totales (por sus siglas en inglés)

TOX: Toxicidad Aguda

UTM: Universal Transversal de Mercator

## Contenido

Agradecimientos.....	4
Resumen.....	5
Siglas y acrónimos.....	7
I. INTRODUCCIÓN.....	12
1.1. Monitoreo de la calidad del agua en la Cuenca del Río Atoyac y Zahuapan .....	14
1.2 Redes de monitoreo para evaluar la calidad del agua en ríos .....	16
1.2.1 Definición de objetivos para la elaboración una red de Monitoreo .....	17
1.2.2 Selección de variables por monitorear .....	18
1.2.3 Selección de la localización de las estaciones de monitoreo.....	19
1.2.3.1. Macrolocalización en una red de monitoreo .....	20
1.2.3.1.1 Metodologías de rediseño .....	20
1.2.3.1.2 Microlocalización en una red de monitoreo .....	21
1.2.4 Frecuencia de Muestreo .....	21
1.2.5. Antecedentes de monitoreo de los ríos Atoyac y Zahuapan .....	22
1.2.5.1. Reportes SEMARNAT – CONAGUA .....	22
1.2.5.2 Reportes del sector académico .....	32
1.3 Justificación .....	35
1.4. Objetivos.....	36
1.4.1. Objetivo general.....	36
1.4.2. Objetivos específicos .....	36
II. MÉTODO.....	37
2.1. Zona de estudio.....	37
2.2. Capacidades analíticas y monitoreo ambiental en la Cuenca Atoyac - Zahuapan.....	39
2.3. Estudio prospectivo.....	40
2.4. Descripción del muestreo prospectivo.....	42
.....	44
2.5. Procesamiento de muestras y trabajo en el laboratorio.....	44
2.5.1. Extracción de plaguicidas organofosforados (OP) en sedimentos con alto contenido de materia orgánica.....	44
2.5.1.1. Preprocesamiento de muestras de sedimento .....	44
2.5.1.2. Extracción asistida por microondas .....	45

2.5.1.3. Análisis por cromatografía de gases .....	46
2.5.2. Determinación de metales traza en muestras de agua de río por ICP-Ms .....	47
2.5.2.1. Procesamiento de muestras de agua.....	47
2.5.2.2. Metales totales.....	47
2.6. Análisis estadístico de los datos fisicoquímicos y de contaminantes analizados en las matrices ambientales bajo estudio (agua y sedimento) .....	47
2.6.1 Análisis estadístico multivariado de los parámetros fisicoquímicos .....	48
III. RESULTADOS .....	48
3.1. Capacidades analíticas para la vigilancia y monitoreo ambiental en la Cuenca Atoyac – Zahuapan .....	48
3.1.1. Capacidades analíticas en el estado de Puebla .....	50
3.1.2. Capacidades analíticas en el estado de Tlaxcala .....	51
3.2. Análisis de los parámetros fisicoquímicos evaluados <i>in situ</i> .....	53
3.3 Análisis de laboratorio.....	58
3.3.1 Niveles de plaguicidas organofosforados en sedimentos .....	58
3.3.2 Metales totales.....	61
3.4. Análisis de componentes principales (ACP).....	62
3.4.3. Análisis de conglomerados jerárquicos .....	66
IV. DISCUSIÓN .....	69
V. CONCLUSIONES.....	88
VI. RECOMENDACIONES.....	89
VII. REFERENCIAS .....	91
VIII. ANEXOS .....	98
Anexo 1. Zonificación de la red de monitoreo de la RENAMECA en el río Atoyac y Zahuapan para el estudio y la regulación de descargas de aguas residuales. ....	98
Anexo 2. Parámetros de calidad del agua evaluados por la CONAGUA .....	103
Anexo 3. Zonificación del corredor industrial y la zona urbana en la Cuenca del Alto Atoyac .....	104
Anexo 4. Relación de sitios de visitados en la campaña de campo .....	105
Anexo 5. Capacidades analíticas y monitoreo ambiental en la Cuenca Alta del Atoyac .....	106
Anexo 6. Directorio de entidades con capacidad analítica en la CAA.....	114
Anexo 7. Gradiente de temperatura del agua superficial de los sitios de muestreo .....	129
Anexo 8. Descripción general de los sitios considerados en el estudio prospectivo .....	130
Anexo 9. Análisis de clúster jerárquico: matriz de proximidades.....	140

## Índice de Tablas

<b>Tabla 1.</b> Resumen de concentraciones de parámetros fisicoquímicos criterio de la calidad del agua en el río Atoyac y sus afluentes (CONAGUA y SEMARNAT, 2023). .....	24
<b>Tabla 2.</b> Resumen de parámetros fisicoquímicos criterio de la calidad del agua en el río Zahuapan y sus afluentes (CONAGUA y SEMARNAT, 2023).....	27
<b>Tabla 3.</b> Escala de clasificación de la calidad del agua superficial, cuerpos de agua lóticos (ríos, arroyos y corrientes). .....	30
<b>Tabla 4.</b> Semáforo de calidad del agua superficial .....	30
<b>Tabla 5.</b> Evolución de parámetros fisicoquímicos evaluados en la cuenca del río Atoyac y Zahuapan de 2011 a 2021. ....	34
<b>Tabla 6.</b> Materiales y parámetros fisicoquímicos registrados in situ. ....	42
<b>Tabla 7.</b> Valores promedio de los parámetros fisicoquímicos registrados en las muestras de agua superficial colectadas en los sitios de estudio.....	55
<b>Tabla 8.</b> Parámetros fisicoquímicos de las muestras de sedimento recolectadas. ....	57
<b>Tabla 9.</b> Parámetros físicos medidos en los 15 puntos de muestreo. ....	58
<b>Tabla 10.</b> Concentración de plaguicidas organofosforados en muestras de sedimento de la CAA. ....	60
<b>Tabla 11.</b> Concentraciones promedio de metales en muestras de agua superficial de la CAA. ....	62
<b>Tabla 12.</b> Prueba de KMO y Barlett .....	62
<b>Tabla 13.</b> Varianza total explicada.....	63
<b>Tabla 14.</b> Matriz de componente rotado .....	64
<b>Tabla 15.</b> Grupos resultantes del análisis de conglomerados jerárquicos.....	67
<b>Tabla 16.</b> Promedios de las variables fisicoquímicos analizados por los grupos resultantes del ACJ. ....	68
<b>Tabla 17.</b> Sitios considerados para pertenecer a una red de monitoreo permanente de la calidad del agua en la CAA. ....	68

## Índice de Figuras

<b>Figura 1.</b> Metodología de localización de los sitios de muestreo (Sanders et al., 1976). Elaboración propia (idea Omar Arellano).....	20
<b>Figura 2.</b> Parámetros de calidad del agua en el río Atoyac y sus afluentes (2012 a 2022): a) Demanda Bioquímica de Oxígeno; b) Demanda Química de Oxígeno. Fuente: CONAGUA y SEMARNAT (2023). “Diagnóstico de la calidad del agua del río Atoyac y sus afluentes”. .....	25
<b>Figura 3.</b> Parámetros de calidad del agua en el río Atoyac y sus afluentes (2012 a 2022): c) Sólidos Suspendidos Totales; d) d) Toxicidad en el agua del río Fuente: CONAGUA y SEMARNAT (2023). “Diagnóstico de la calidad del agua del río Atoyac y sus afluentes”. ....	26
<b>Figura 4.</b> Parámetros de calidad del agua en el río Zahuapan y sus afluentes (2012 a 2022): a) Demanda Bioquímica de Oxígeno. Fuente: CONAGUA y SEMARNAT (2023). “Diagnóstico de la calidad del agua del río Zahuapan y sus afluentes”.....	27
<b>Figura 5.</b> Parámetros de calidad del agua en el río Zahuapan y sus afluentes (2012 a 2022): b) Demanda Química de Oxígeno; c) Sólidos Totales Disueltos. Fuente: CONAGUA y SEMARNAT (2023). “Diagnóstico de la calidad del agua del río Zahuapan y sus afluentes”.....	28

<b>Figura 6.</b> Gráfica de evolución de parámetros de la calidad del agua en el río Zahuapan y sus afluentes (2012 a 2022): d) Toxicidad en el agua. Fuente: CONAGUA y SEMARNAT (2023). “Diagnóstico de la calidad del agua del río Zahuapan y sus afluentes” .....	29
<b>Figura 7.</b> Mapa de distribución de los sitios de monitoreo de la CONAGUA y SEMARNAT (2022). Elaboración propia. Fuente. CONAGUA y SEMARNAT (2023). .....	31
<b>Figura 8.</b> Ubicación de distintos sitios de monitoreo ambiental (agua y sedimento) dentro de la Cuenca Alta del río Atoyac de 2010 a 2021. Fuente: Mora et al. (2021). Recuperado de <a href="https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969721018568#bi0005">https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969721018568#bi0005</a> .....	33
<b>Figura 9.</b> Cuenca del Alto Atoyac. Sobreposición de la cuenca sobre los Estados de Puebla y Tlaxcala (Imagen izquierda). Representación hidrológica de la cuenca; se muestran los ríos Atoyac-Zahuapan como principales ríos del sistema (Imagen derecha). Elaboración propia. ....	38
<b>Figura 10.</b> Distribución de los sitios prospectivos en los ríos Atoyac y Zahuapan. Elaboración propia (idea Omar Arellano Aguilar). .....	41
<b>Figura 11.</b> Método de colecta (recuperación de agua, mediciones in situ y colecta de muestras. .	44
<b>Figura 12.</b> Diagrama del proceso de extracción de plaguicidas organofosforados (PO’s) en sedimentos con alto contenido de materia orgánica por fase sólida (SPE) con extracción asistida por microondas (MAE). .....	46
<b>Figura 13.</b> Distribución en porcentaje de las instituciones que pueden realizar monitoreo ambiental en la cuenca. ....	50
<b>Figura 14.</b> Distribución de las entidades con capacidad de realizar pruebas analíticas en el ámbito ambiental dentro del Estado de Puebla. ....	51
<b>Figura 15.</b> Macrolocalización de instituciones públicas o privadas con capacidad analítica en la CAA. Elaboración propia. ....	52
<b>Figura 16.</b> Comportamiento de los parámetros fisicoquímicos medidos en los distintos sitios de muestreo. ....	56
<b>Figura 17.</b> Concentración total de compuestos organofosforados por sitio de muestreo. ....	59
<b>Figura 18.</b> Distribución de las variables fisicoquímicas de acuerdo con el análisis de componentes principales. ....	65
<b>Figura 19.</b> Distribución de los sitios de muestreo de acuerdo con los factores predominantes en cada componente. ....	65
<b>Figura 20.</b> Conglomerado jerárquico de los sitios de monitoreo en la cuenca Atoyac - Zahuapan, en relación con los parámetros fisicoquímicos evaluados. ....	66
<b>Figura 21.</b> Macrolocalización de los sitios considerados para la red de monitoreo de la calidad del agua en la CAA. Elaboración propia. ....	69

## I. INTRODUCCIÓN

La contaminación del agua se ha convertido en una amenaza creciente que afecta los ecosistemas y la salud humana (Comisión Nacional de los Derechos Humanos, 2019). Se estima que en México entre el 60 % - 70 % de los cuerpos de agua superficiales presentan algún grado de contaminación; además, 6 millones de personas carecen de acceso al agua potable y 11 millones de acceso al saneamiento (González *et al.*, 2022). Por otra parte, sólo el 50 % del volumen del agua recolectada en el alcantarillado recibe algún tipo de tratamiento, situación preocupante considerando que el 71 % del territorio nacional presenta un grado de presión hídrica que va de alta a muy alta (González *et al.*, 2022).

Los datos anteriores reflejan la crisis hídrica que está padeciendo el país, lo que a su vez ha provocado que en algunas regiones se acentúen los conflictos socioambientales, el desplazamiento, el incremento de enfermedades (transmisibles y no transmisibles) y las protestas sociales; dichas zonas de riesgo se denominan: Regiones de Emergencia Sanitaria y Ambiental (SEMARNAT, 2020).

Los ríos son sistemas esenciales en el funcionamiento de los ecosistemas, ya que interactúan con otros sistemas naturales dentro de una misma cuenca. Los humanos somos parte integral de las cuencas y aprovechamos del capital natural que estas nos ofrecen para satisfacer nuestras necesidades. En México, una de las causas que propician el deterioro de las cuencas hidrológicas es la contaminación, situación que provoca la pérdida de la calidad del agua y limita el acceso al recurso, lo que a su vez conduce a que se intensifique el uso del agua subterránea para uso doméstico, agrícola e industrial, causando su agotamiento. Esta situación pone en riesgo la integridad de los ecosistemas y de la sociedad, además de que afecta el derecho al agua, a la salud y a un medio ambiente sano (Pérez *et al.*, 2018; Bravo *et al.*, 2021, citados por Ibararán *et al.*, 2022)

De igual manera, los efectos de la contaminación en el agua de los ríos interfieren en la productividad del ecosistema y por ende de la economía regional, ya que reduce las fuentes

locales de bienestar y como consecuencia se merma el desarrollo social (Ibarrarán *et al.*, 2022).

Alcocer (2007) señaló que México posee recursos acuáticos epicontinentales limitados, ya que estos apenas constituyen el 0.1 % del total de las reservas del mundo. Aunado a ello, Arellano *et al.* (2017) resaltan que la contaminación de los ríos en México es una de las problemáticas ambientales de mayor preocupación, debido a que la concentración de los contaminantes en estos cuerpos de agua se extiende a lo largo de todo el cauce, afectando incluso las zonas en donde desembocan los ríos.

Bajo este panorama se encuentra la Cuenca del Alto Atoyac (CAA), la cual se localiza en los estados de Puebla y Tlaxcala, y es reconocida por ser una de las dos cuencas más contaminadas del país. En esta cuenca, el río Atoyac y sus tributarios los ríos Zahuapan y Alseseca, son receptores de innumerables descargas de aguas residuales de índole municipal e industrial, debido a su cercanía con las zonas industriales y urbanas (Ibarrarán *et al.*, 2022)

Esta problemática causa preocupación, debido a que el cauce del río Atoyac y sus afluentes sigue su curso a través del Área Metropolitana de Puebla-Tlaxcala, considerada la cuarta área urbana más grande de México con aproximadamente 3 millones de habitantes (Mora *et al.*, 2021).

Como resultado de la expansión urbana dentro de la cuenca, se ha incrementado la demanda de agua y su extracción, así como, una mayor salida de aguas residuales (Rodríguez *et al.*, 2012, citados por Ibarrarán *et al.*, 2022). Asimismo, Pérez *et al.* (2019) señalaron que el crecimiento urbano ha diseminado a las poblaciones rurales hacia los alrededores del área urbana, lo que dificulta al Estado establecer la infraestructura necesaria para garantizar el suministro y saneamiento del agua a los lugares más alejados, dando como resultado que la mayoría del recurso hídrico destinado para la vocación agrícola en la cuenca se tomó directamente de los ríos.

Adicionalmente, se reporta que los diferentes contaminantes que se encuentran en el agua y los sedimentos del río Atoyac han promovido un alza en enfermedades como cáncer, leucemia, problemas renales, etc. (Mora *et al.*, 2021).

La crisis ambiental en la CAA persiste, exigiendo una comprensión profunda de la situación, con la finalidad de generar estrategias más efectivas en su monitoreo, dirigidas a garantizar el bienestar social y ambiental.

### 1.1. Monitoreo de la calidad del agua en la Cuenca del Río Atoyac y Zahuapan

La sostenibilidad del agua requiere una visión de sistemas, en donde se conozcan y entiendan las interacciones entre los elementos que participan: aspectos ecológicos, sociales y económicos del uso del agua (Espinosa, 2014). En este sentido y dada la problemática que existe a nivel nacional con respecto a la calidad del agua, a partir de 1996 la Comisión Nacional del Agua planteó llevar a cabo el rediseño de la *Red Nacional de Monitoreo de la Calidad del Agua*, bajo la visión de ampliar y resolver los problemas de cobertura de sitios de monitoreo en los principales cuerpos de agua del país, con el objetivo de generar información representativa y confiable de la calidad del agua (SEMARNAT, 2020).

En 2012, comenzó a operar la Red Nacional de Medición de la Calidad del Agua (RENAMECA) que realiza el monitoreo sistemático de los cuerpos de agua nacionales más importantes del país, entre ellos el río Atoyac y Zahuapan, además de sus afluentes.

Esta red busca dar seguimiento de la calidad del bien hídrico a nivel nacional, regional y local, además de generar instrumentos de vigilancia y control para evaluar el cumplimiento de la regulación para el control de la contaminación en los cuerpos de agua. Siendo establecida bajo el objetivo de diseñar un sistema de detección oportuno para la protección de las fuentes de abastecimiento (SEMARNAT, 2015).

Según informa la Comisión Nacional del Agua (10 de octubre de 2023) en 2022 se contaba con 2,595 sitios de monitoreo de la calidad del agua operados por la CONAGUA en todo el país. De los cuales 1,723 sitios constituyeron la red de monitoreo de agua superficial,

mientras que la red de monitoreo de agua subterránea estuvo integrada por 775 sitios (CONAGUA, 2023).

En el caso del análisis de la calidad del agua superficial, la red de monitoreo establecida por la CONAGUA busca analizar la influencia antropogénica desde el punto de vista de la afectación por la presencia de centros urbanos e industriales, y basa su análisis técnico bajo el criterio de ocho parámetros primordiales (CONAGUA, 2023): *Demanda Bioquímica de Oxígeno a cinco días (DBO<sub>5</sub>)*, *Demanda Química de Oxígeno (DQO)*, *Sólidos Suspendidos Totales (SST)*, *Coliformes Fecales (CF)*, *Escherichia coli, (E\_COLI)*, *Enterococos (ENTEROC)*, *Porcentaje de Saturación de Oxígeno (OD %)* y *Toxicidad (TOX)*.

Hoy en día y bajo los últimos resultados publicados en el estudio de la calidad del agua a nivel nacional para el año 2022 (CONAGUA y SEMARNAT, 2023), la red nacional abordaba 73 sitios de monitoreo para la cuenca del Río Alto Atoyac en los estados de Puebla (41 sitios) y Tlaxcala (32 sitios).

Por su parte, desde la academia (universidades y centros de investigación), la cuenca ha sido estudiada bajo diversos enfoques disciplinarios, prevaleciendo como eje central: la contaminación del agua del río Atoyac y la evaluación del riesgo a la salud de las comunidades aledañas a la zona agrícola e industrial de la Cuenca Alta del Río Atoyac. Dicho lo anterior, la investigación objetiva y de carácter crítico forma parte fundamental de la generación de conocimiento, la difusión de la problemática, la enseñanza y la colaboración interdisciplinaria (López *et al.*, 2018).

En este sentido, existen diferentes publicaciones (nacionales e internacionales) que reportan la problemática ambiental y sanitaria en la cuenca, además de formar un antecedente histórico que data del año 2007 a la actualidad (Arellano, s.f.; Mora *et al.*, 2021) y que muestra los esfuerzos por medir el deterioro gradual de la calidad del agua a través del monitoreo de variables fisicoquímicas y biológicas del agua y sedimentos del río. En los diferentes estudios realizados, se han establecido estaciones de monitoreo que abarcan distintos sitios de interés, la gran mayoría distribuida en cuatro zonas básicas (Mora *et al.*, 2021): **a)** Zona 1, río Zahuapan (antes de la confluencia con el río Atoyac); **b)** Zona 2,

río Atoyac (antes de la confluencia con el río Zahuapan); **c)** Zona 3, zona de confluencia de los ríos Atoyac-Zahuapan (hasta la desembocadura de la presa Valsequillo); **d)** Zona 4, presa de Valsequillo.

Si bien, las redes de monitoreo establecidas por los diferentes grupos de investigación ya sean gubernamentales o académicos, persiguen diferentes propósitos, los resultados publicados por ambas entidades han proporcionado información confiable y de calidad. Dicho registro histórico de la evolución del problema representa una herramienta que permite mejorar la toma de decisiones relacionadas con la contaminación del agua, así como para implementar nuevas estrategias que ayuden a comprender la dinámica de la contaminación y sus repercusiones en los ríos.

No obstante, es fundamental destacar que las bases de datos sobre los contaminantes encontrados en los ríos Atoyac y Zahuapan, así como la detección de las fuentes de contaminación, son sólo una parte del alcance de la información recabada por las redes de monitoreo establecidas. En este sentido, también es posible contribuir a la gestión ambiental de la cuenca, al evaluar los efectos acumulativos de los contaminantes como factores de estrés ambiental.

Por otro lado, resulta importante señalar que se deben implementar mecanismos de participación y enseñanza a las comunidades afectadas, con la finalidad de que éstas tengan la certidumbre de que se están implementando acciones de vigilancia ambiental.

## 1.2 Redes de monitoreo para evaluar la calidad del agua en ríos

Se define como calidad del agua, a la condición en la que se encuentra un cuerpo de agua disponible para un propósito particular (Flores, 2017), tomando en cuenta que la condición de un cuerpo de agua está determinada por los parámetros biológicos físicos y químicos que describen a dicho sistema (Boyd, 2015, citado en Flores 2017).

Las redes de monitoreo de la calidad del agua son sistemas que se han venido implementando desde la década de los 70's, bajo la necesidad de conocer el estado en que se encuentran los sistemas acuáticos (Moreno *et al.*, 2008). Y comprenden todas las

actividades de muestreo que permiten la recopilación y el procesamiento de datos sobre la calidad del agua con el propósito de obtener información sobre las propiedades biológicas, físicas y químicas del agua (Harmancioglu *et al.*, 1999).

Debido a que su implementación en el monitoreo de ríos se ha ido perfeccionando a lo largo del tiempo, adaptándose a las necesidades específicas de cada región, se han establecido marcos metodológicos para su correcta implementación (Ruíz, 1998; Khalil y Adamowski, 2013, citados por Flores, 2017).

Dicha metodología tiene el objetivo de conducir a una gestión integral de los recursos hídricos, basada en el manejo sostenible, además de permitir detectar condiciones desfavorables en los distintos cuerpos de agua, lo que posibilita tomar acciones de recuperación (Moreno *et al.*, 2008). Asimismo, su establecimiento permite obtener información suficiente y oportuna sobre las influencias naturales y antropogénicas en el cuerpo de agua monitoreado, lo que facilita generar información representativa y confiable basada en un monitoreo integral, que involucre el análisis de las variables físicas, químicas y biológicas del sitio muestreado.

Proponer una red de monitoreo implica responder de manera integral el qué, dónde, cuándo y cuánto monitorear, además de cómo evaluar la efectividad de ésta, para considerar futuras necesidades de información (Moreno *et al.*, 2008). Las respuestas a las incógnitas anteriores dependerán de los objetivos planteados en el programa de monitoreo, las características del cuerpo de agua, la variabilidad de los parámetros de interés a escala temporal y espacial y el nivel de precisión y confiabilidad de las medidas, además de la disponibilidad de los recursos: materiales y económicos (Loftis *et al.*, 1991; Olsen y Robertson, 2003 citados por Moreno *et al.*, 2008).

#### 1.2.1 Definición de objetivos para la elaboración una red de Monitoreo

Las redes de monitoreo están diseñadas para cumplir objetivos que busquen garantizar la seguridad hídrica y la gestión de la calidad de los bienes hídricos en cumplimiento con las normas establecidas por la legislación nacional en materia hídrica. También se debe tomar

en cuenta la dinámica social y variables fisiográficas propias de la cuenca: características de la red hidrológica, el uso de agua dominante en la región, etc. (Moreno *et al.*, 2008).

Asimismo, existen objetivos específicos como: a) evaluar tendencias a corto y largo plazo en la variación temporal de los parámetros de calidad del agua; b) monitorear violaciones a estándares específicos en cuenca o usos particulares del recurso; c) la identificación de causas y fuentes externas que afectan la calidad del agua; d) realizar análisis a corto plazo de variaciones en la calidad del agua para investigaciones específicas; e) realizar seguimiento del ingreso de contaminantes y evaluar medidas de control del recurso agua; f) obtener información para la toma de decisiones y g) planificar políticas de tasa retributiva (Moreno *et al.*, 2008).

### 1.2.2 Selección de variables por monitorear

La elección de variables a monitorear en los ríos se determina bajo los criterios y objetivos (seguridad hídrica, seguridad sanitaria y/o seguridad ambiental) de la entidad encargada de implementar una red de monitoreo, y tomando en cuenta aspectos económicos y operativos (Loucks y Van-Beek, 2005, citado en Moreno *et al.*, 2008).

Sanders y colaboradores (1983) propusieron un sistema jerárquico de variables de calidad del agua según distintos procesos de corriente: **a) variables de primer nivel**, las cuales incluyen el caudal, los niveles de agua y el volumen de pequeños cuerpos de agua; **b) variables de calidad de efectos agregados o de segundo nivel**: temperatura, pH, salinidad, turbidez, la DBO (Demanda Biológica de Oxígeno), el OD (Oxígeno Disuelto) y la conductividad eléctrica; **c) variables de calidad que producen efectos agregados**: variables que generan turbidez como el material suspendido, coloides, grupos bióticos (concentración de algas filamentosas, diatomeas, etc.), minerales disueltos, etc.; **d) variables que producen efectos agregados o de cuarto nivel**: minerales que afectan la turbiedad como los óxidos de hierro, compuestos de magnesio y aluminio, etc.

Por su parte, Becq (1994) hace una clasificación basada en la capacidad técnica (equipos de monitoreo ambiental) con la que se cuenta para medir parámetros en una red de monitoreo ambiental de ríos:

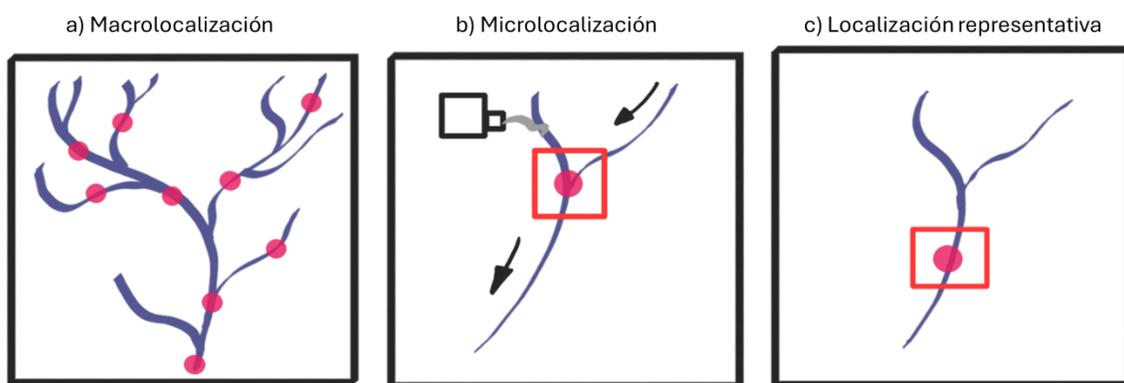
1. Mediciones '*in situ*', son parámetros que pueden ser medidos por sondas en un sitio específico: temperatura, oxígeno disuelto, pH, conductividad, salinidad, clorofila, detector de hidrocarburos, etc.
2. Aquellos parámetros que no pueden ser medidos por sondas *in situ* y por ende requieren equipo más especializado: nitratos, amoniacos, fosfatos, hidrocarburos totales, DBO, DQO, etc.
3. Parámetros que no pueden eficientemente automatizarse: ecotoxicológicos, metales, microbiológicos, plaguicidas etc. Estos parámetros resultan de gran importancia desde el punto de vista de la salud del ecosistema y la humana, pero requieren análisis más sofisticados y no pueden considerarse para una estación de verificación continua.

Debido a que por cuestiones económicas u operativas muchas veces no es posible seleccionar todos los parámetros resulta conveniente seleccionarlos según la información que se desee obtener de cada estación de monitoreo, las características de la cuenca o los impactos ambientales observados en ella (Harmancioglu *et al.*, 1999); Sin embargo, haciendo referencia solamente a la calidad del agua, Becq (1994) mencionó que los parámetros *in situ* o variables de calidad de efectos agregados, resultan óptimos, tomando como base el uso específico del agua y el nivel de seguimiento del cuerpo de agua a monitorear, además de la simplicidad de los procesos.

### 1.2.3 Selección de la localización de las estaciones de monitoreo

La selección de los puntos de muestreo representa un factor crítico (Sanders *et al.*, 1983), siendo el factor más importante en el diseño de una red de monitoreo (Harmancioglu *et al.*, 1999), ya que la distribución de las estaciones de muestreo en la red de flujo de la cuenca debe alinearse con los objetivos previamente establecidos.

Bajo los criterios de Sanders y cols. (1976, citados en Moreno *et al.*, 2008), el establecimiento de los sitios de muestreo implica de disponer de parámetros espaciales que garanticen la correcta localización de sitios (Figura 1), tales como: **a)** macrolocalización o tramo de la corriente en donde debe ubicarse la estación; **b)** microlocalización o definición del sitio específico en el tramo en donde se localiza la estación, procurando su ubicación en la zona de mezcla dentro del tramo; **c)** localización representativa del muestreo, esto es, en dónde y cómo debe tomarse una muestra en la sección transversal de la corriente en la estación seleccionada.



**Figura 1.** Metodología de localización de los sitios de muestreo (Sanders *et al.*, 1976). Elaboración propia (idea Omar Arellano).

#### 1.2.3.1. Macrolocalización en una red de monitoreo

Dentro de esta metodología existen dos corrientes, las cuales se diferencian según la información histórica de calidad y cantidad de agua disponible: a) método de elevación siguiendo las características de la red de drenaje o escurrimiento (información extraída de modelos de elevación digital del terreno), modelos de calidad del agua o trabajos exhaustivos en campo; b) método basado en registros históricos del caudal y la calidad del agua (orientados al rediseño de redes ya existentes).

##### 1.2.3.1.1 Metodologías de rediseño

Estas metodologías se fundamentan en usar la mayor cantidad de información histórica disponible de variables de calidad del agua medidas en una cuenca, y cuyo análisis se ejerce

bajo la aplicación de técnicas estadísticas (univariadas y multivariadas), geoestadísticas y de teoría de la información (Moreno *et al.*, 2008). Como resultado de dichas metodologías, se logra medir cuantitativamente el grado de eficiencia de una red de monitoreo en términos de la información introducida, ya que refleja la variabilidad espacial de la calidad del agua (Harmancioglu *et al.*, 1999).

#### 1.2.3.2 Microlocalización en una red de monitoreo

Esta metodología es aplicable en función de la macrolocalización y de las localizaciones que se consideran como críticas en un tramo específico de la corriente (Harmancioglu *et al.*, 1999). Estos criterios se evalúan en función de la longitud de mezcla a partir de las entradas y salidas del caudal o de fuentes contaminantes puntuales o difusas en el tramo de corriente considerado.

Bajo este criterio, la ubicación de las estaciones de monitoreo se basa en la longitud de mezcla estimada para garantizar la representatividad de las muestras en la sección transversal de la corriente monitoreada (Sanders *et al.*, 1983), dicha metodología ha sido ampliamente aceptada en trabajos en donde la microlocalización funciona para el desarrollo y optimización de expresiones para estimar la longitud de mezcla y para dar seguimiento a las descargas o vertimientos puntuales (Chatwin, 1971; Júnior *et al.*, 2005 citados por Moreno *et al.*, 2008).

#### 1.2.4 Frecuencia de Muestreo

Establecer de manera correcta la frecuencia de muestreo es uno de los aspectos más importantes en la construcción de una red de monitoreo, ya que influye directamente sobre los objetivos bajo los cuales se planteó dicha red. En este sentido, Flores (2017), hace la analogía de que si se muestrea muy seguido la información obtenida puede ser redundante, por el contrario, el muestrear muy poco y sin un criterio temporal tendrá como consecuencia la pérdida de información relevante sobre la calidad del agua.

Para establecer de forma acertada la frecuencia de muestreo resulta indispensable contar con una serie de datos de monitoreos previos bajo un rango amplio de condiciones hidrológicas, lo cual permitirá el entendimiento estadístico de la población de datos a ser muestreada (Stanfield, 2001): evaluación de tendencias anuales, la estimación de transporte de masa, la evaluación del impacto ambiental y el cumplimiento de estándares de calidad del agua (Harmancioglu *et al.*, 1999).

Si por el contrario existen una carencia de datos disponibles, Sanders y Loftis (1994 citados en Moreno *et al.*, 2008) sugieren que inicialmente la frecuencia de muestreo debe ser estimada, usando datos del caudal y en el momento en que estén disponibles los datos de calidad del agua, estos podrán ser usados para el rediseño de la red de monitoreo.

#### 1.2.5. Antecedentes de monitoreo de los ríos Atoyac y Zahuapan

Debido a la problemática de contaminación que enfrenta la cuenca alta de los ríos Atoyac y Zahuapan, la CONAGUA y diversas instituciones se han enfocado en realizar campañas de monitoreo desde 2009 (Arellano, s.f.; DOF, 2011; CNDH, 2017; Mora *et al.*, 2021), dando como resultado la reclasificación de los ríos Atoyac y Zahuapan para fines de la Ley Federal de Derechos en materia de agua, así como para informar al público en general los niveles de contaminación y tipo de contaminantes presentes en los ríos.

##### 1.2.5.1. Reportes SEMARNAT – CONAGUA

En 2008 se llevó a cabo el '*Estudio de Clasificación del río Atoyac, Puebla-Tlaxcala*', en el que se concluyó que el agua de dicho río es alterada por las constantes descargas de aguas residuales de tipo industrial y doméstico, las cuales alcanzaban las 146.3 toneladas al día de materia orgánica (medida como demanda química de oxígeno), 62.8 toneladas de sólidos suspendidos totales, 14.7 toneladas al día de nutrientes, 0.14 toneladas al día de metales pesados y 0.09 toneladas al día de compuestos orgánicos tóxicos, aunado a la creciente contaminación microbiológica (CONAGUA y SEMARNAT, 2023). Por su parte, se reportó que en el río Zahuapan y Atipac (también conocido como Atenco o Apizaco) se desechan 59.22 toneladas al día de materia orgánica medida como demanda química de oxígeno, 25.83

toneladas al día de sólidos suspendidos totales, 15.54 toneladas por día de nutrientes, así como 0.011 toneladas de metales pesados (CONAGUA y SEMARNAT, 2023), lo que corroboró que la calidad del agua del río no cumplía con los estándares de la NOM-001-SEMARNAT-1996 (actualizada el 11 de marzo de 2022) .

Bajo dicho argumento técnico, en 2011 se aprobó en el Diario Oficial de la Federación la *'Declaratoria de Clasificación de los ríos Atoyac y Xochiac'* (DOF, 2011), instrumento que señala los parámetros que deben cumplir las descargas y las cargas de contaminantes que los cuerpos de agua pueden recibir, así como las metas de calidad y plazos para alcanzarlas. Además, basándose en los resultados del monitoreo, la CONAGUA clasificó al río Atoyac en seis zonas de estudio, siguiendo el mismo proceso para el río Zahuapan (DOF, 2011) (Ver Anexo 1).

Desde 2012 la CONAGUA ha implementado una red de monitoreo continuo de la calidad del agua en el río Atoyac y sus afluentes, abarcando 52 sitios de muestreo, mientras que para el río Zahuapan se han establecido 23 sitios de muestreo. Este seguimiento se realiza bajo la operación de la Red Nacional de Monitoreo de la Calidad del Agua (RENAMECA) y persiste hasta la actualidad, lo cual permite a la CONAGUA y a la SEMARNAT, el entender la evolución de la contaminación en la CAA. Para este propósito se emplean 47 parámetros indicadores de la calidad del agua y de contaminación regulados en la Declaratoria de Clasificación (DOF, 2011), los cuales expresan la relación entre la existencia de contaminantes en el agua y el grado de impacto en los diferentes usos de esta (ver Anexo 2).

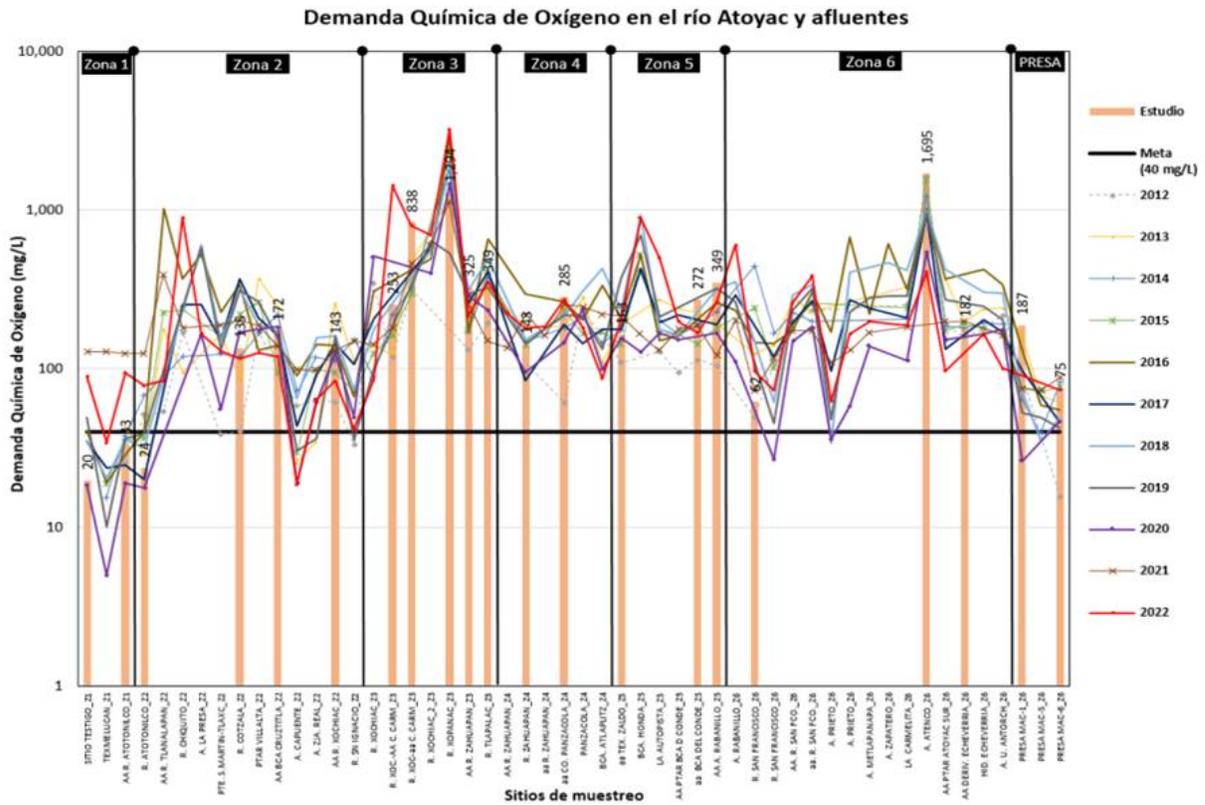
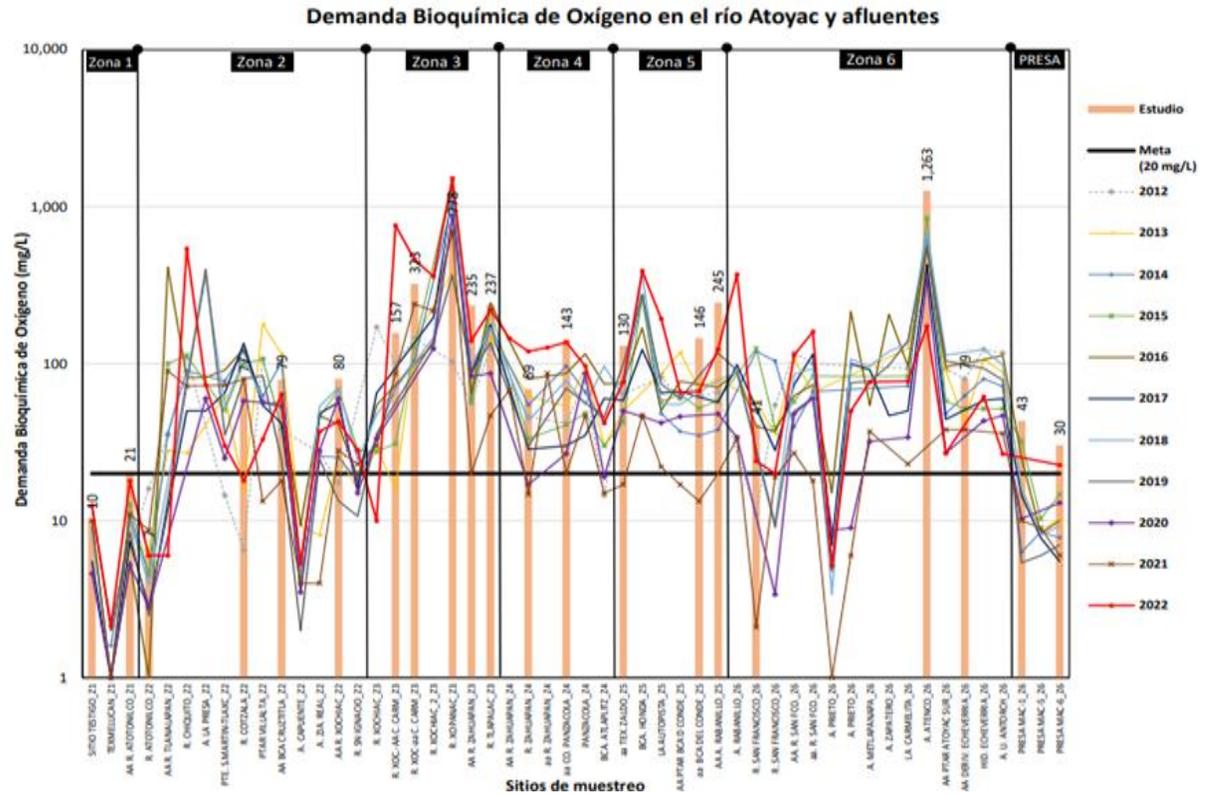
La Tabla 1 resume las concentraciones máximas y mínimas evaluadas durante 2022 por la CONAGUA y la SEMARNAT (2023) para cinco parámetros de la calidad del agua en el río Atoyac y sus afluentes, así como la meta establecida para cada uno de ellos de acuerdo con el estudio de la clasificación (DOF, 2011).

**Tabla 1.** Resumen de concentraciones de parámetros fisicoquímicos criterio de la calidad del agua en el río Atoyac y sus afluentes (CONAGUA y SEMARNAT, 2023).

Parámetro	Río Atoyac	Meta
Demanda Bioquímica de Oxígeno	27 mg/L - 193 mg/L	20 mg/L
Demanda Química de Oxígeno	96 mg/L - 382 mg/L	40 mg/L
Sólidos Suspendidos Totales	42 mg/L - 1047 mg/L	30 mg/L
Coliformes Fecales	4600 NMP/100 mL – 11,000000 NMP/100 mL	200 NMP/100 mL
Toxicidad Aguda	3.72 UT – 90 UT	1 UT

Nota. Parámetro criterio: parámetro clave que utiliza la CONAGUA para determinar la calidad del agua.

De igual forma, se presenta gráficamente la evolución del comportamiento de algunos de los parámetros de la calidad del agua estudiados por la CONAGUA y SEMARNAT (2023), para cada una de las zonas de estudio definidas en la Declaratoria de Clasificación de los ríos Atoyac y Zahuapan, tomando como criterio la meta establecida para cada parámetro (DOF, 2011): *Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)*, *Demanda Química de Oxígeno (DQO)*, *Sólidos Suspendidos Totales (SST)* y *Toxicidad Aguda (TOX)*. Este análisis ha permitido a las autoridades generar un registro de la dinámica de la contaminación del agua. Las Figuras 2 y 3 muestran el comportamiento (2012 a 2022) de cuatro indicadores criterio establecidos en la Declaratorio de Clasificación (DOF, 2011) a lo largo del río. Las barras representan los resultados del Estudio de Clasificación (DOF, 2011) y las líneas indican la mediana de las concentraciones anuales; la línea horizontal representa la meta o nivel de concentración que se espera alcanzar para cada parámetro de calidad del agua en los ríos Atoyac y Zahuapan (DOF, 2011).



**Figura 2.** Parámetros de calidad del agua en el río Atoyac y sus afluentes (2012 a 2022): a) Demanda Bioquímica de Oxígeno; b) Demanda Química de Oxígeno. Fuente: CONAGUA y SEMARNAT (2023). “Diagnóstico de la calidad del agua del río Atoyac y sus afluentes”.

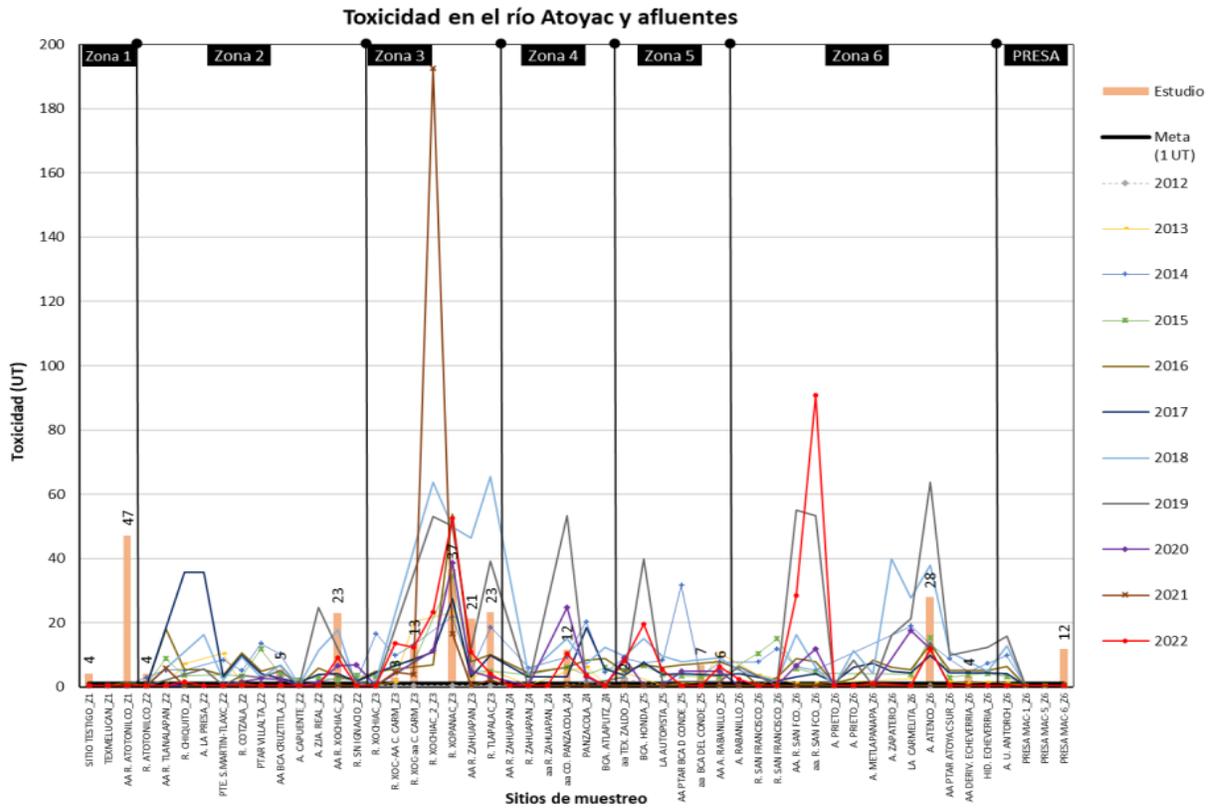
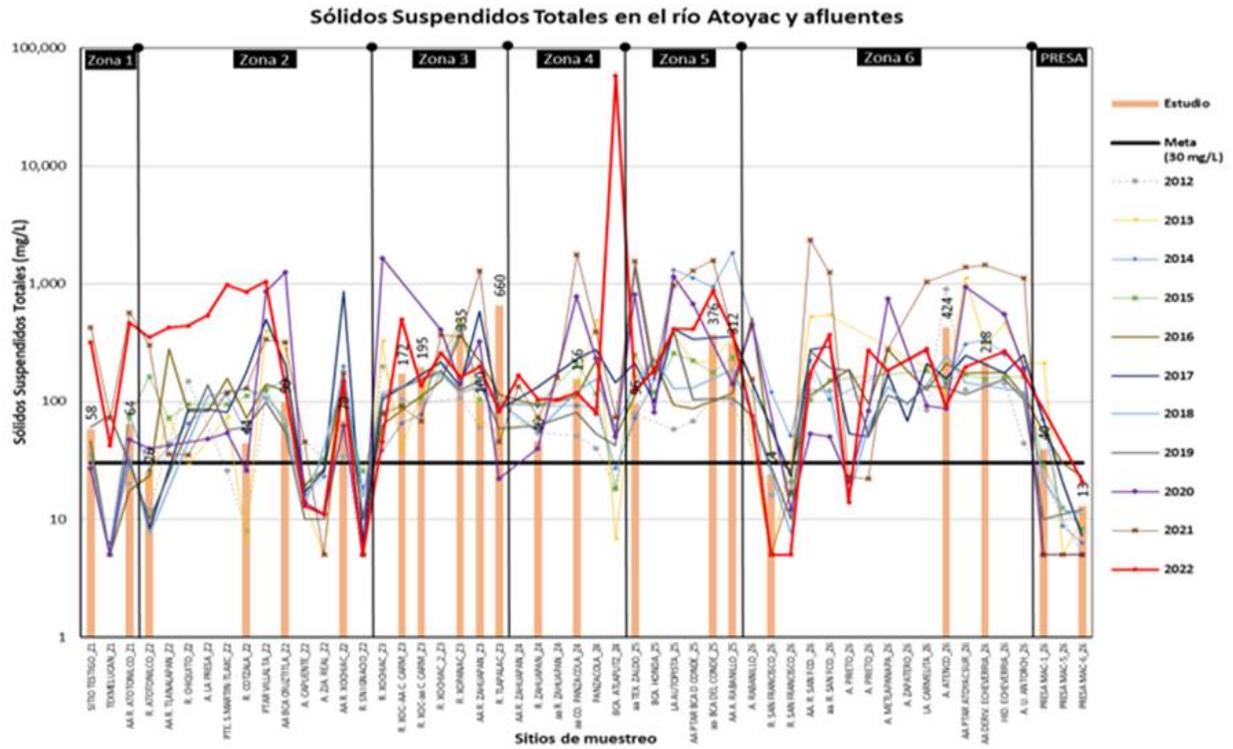
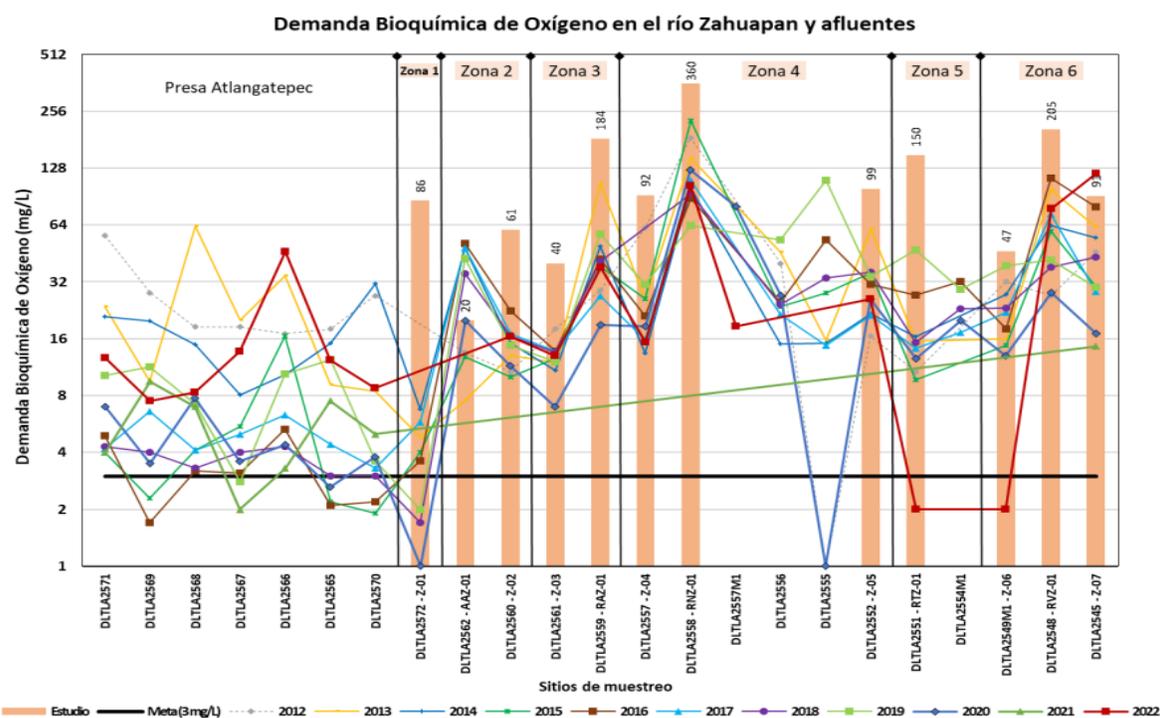


Figura 3. Parámetros de calidad del agua en el río Atoyac y sus afluentes (2012 a 2022): c) Sólidos Suspensos Totales; d) Toxicidad en el agua del río Fuente: CONAGUA y SEMARNAT (2023). “Diagnóstico de la calidad del agua del río Atoyac y sus afluentes”.

Por otro lado, la Tabla 2 resume las concentraciones máximas y mínimas registradas en el río Zahuapan y sus afluentes durante la evaluación realizada en 2022 (CONAGUA y SEMARNAT, 2023). En las Figuras 4, 5 y 6 se observan el comportamiento de las concentraciones de cuatro de los parámetros de la calidad del agua, evaluados en seis zonas de estudio a lo largo del río Zahuapan. Las barras representan los resultados del Estudio de Clasificación (DOF, 2011) y las líneas indican la mediana de las concentraciones anuales; la línea horizontal representa la meta de calidad del agua para alcanzar la sustentabilidad en el sistema (DOF, 2011).

**Tabla 2.** Resumen de parámetros físicoquímicos criterio de la calidad del agua en el río Zahuapan y sus afluentes (CONAGUA y SEMARNAT, 2023).

Contaminante	Río Zahuapan	Meta
Demanda Bioquímica de Oxígeno	13 mg/L – 120 mg/L	3 mg/L
Demanda Química de Oxígeno	33 mg/L – 179 mg/L	10 mg/L
Sólidos Suspendidos Totales	34 mg/L – 173 mg/L	30 mg/L
Coliformes Fecales	24,000 NMP/100 mL	200 NMP/100 mL
Toxicidad Aguda	< 1 UT	1 UT



**Figura 4.** Parámetros de calidad del agua en el río Zahuapan y sus afluentes (2012 a 2022): a) Demanda Bioquímica de Oxígeno. Fuente: CONAGUA y SEMARNAT (2023). “Diagnóstico de la calidad del agua del río Zahuapan y sus afluentes”.

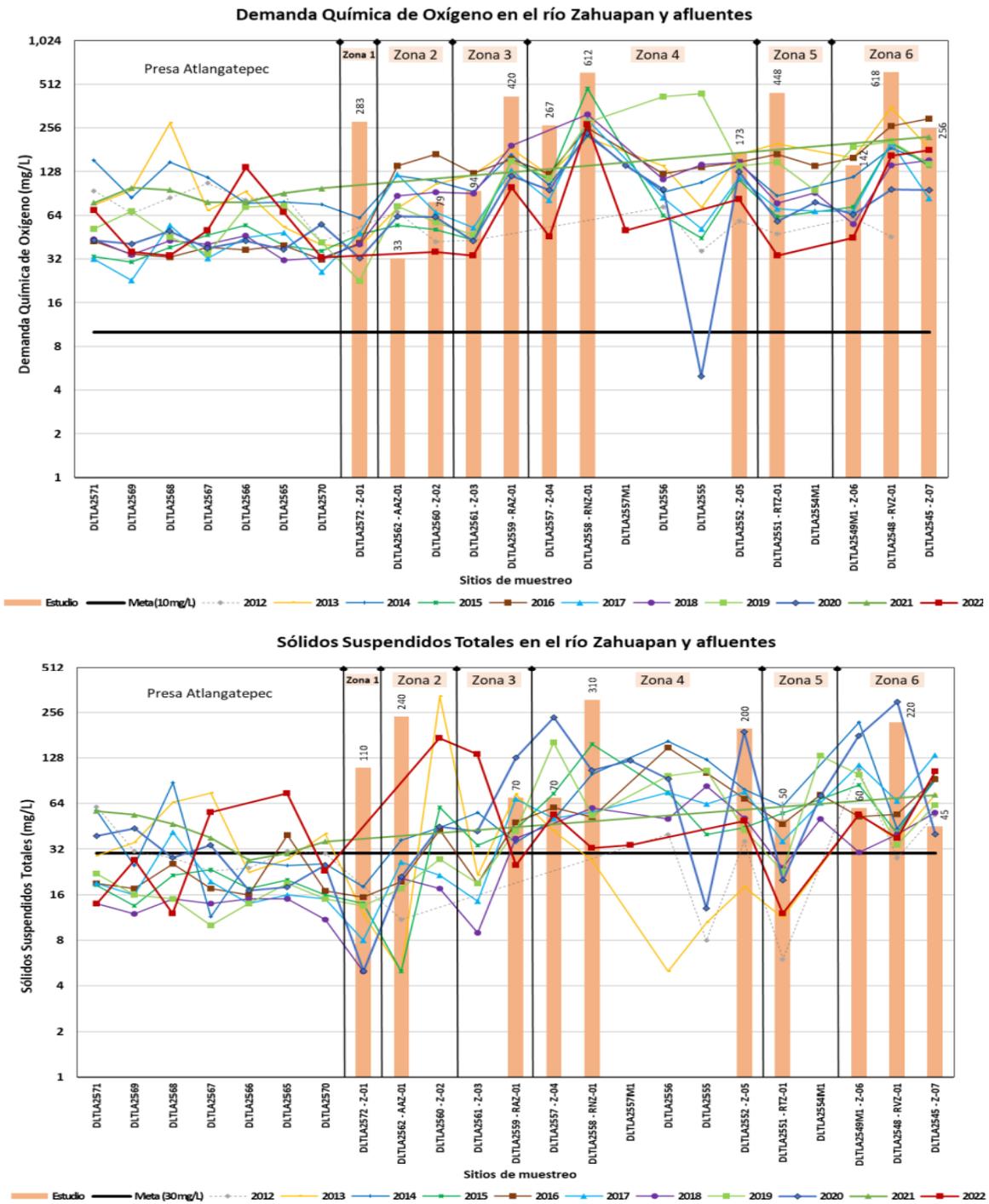
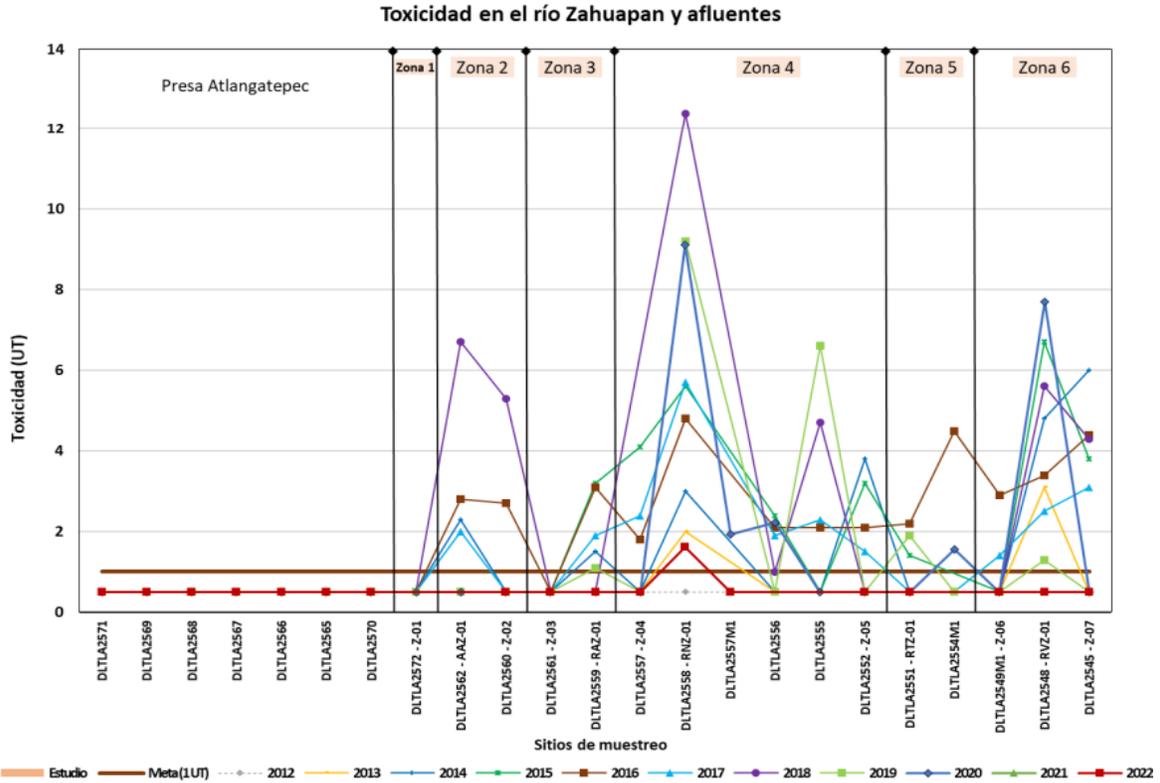


Figura 5. Parámetros de calidad del agua en el río Zahuapan y sus afluentes (2012 a 2022): b) Demanda Química de Oxígeno; c) Sólidos Totales Disueltos. Fuente: CONAGUA y SEMARNAT (2023). “Diagnóstico de la calidad del agua del río Zahuapan y sus afluentes”.



**Figura 6.** Gráfica de evolución de parámetros de la calidad del agua en el río Zahuapan y sus afluentes (2012 a 2022): d) Toxicidad en el agua. Fuente: CONAGUA y SEMARNAT (2023). “Diagnóstico de la calidad del agua del río Zahuapan y sus afluentes”.

Los resultados presentados en los informes diagnósticos de los ríos Atoyac y Zahuapan (2012-2022), también se resumen a través de un sistema de ‘semáforo’ que simplifica la escala de clasificación de la calidad del agua, enfatizando en si el sitio de muestreo cumple o no con los criterios establecidos para ocho indicadores de la calidad del agua.

La Tabla 3 muestra la escala de clasificación de los indicadores de la calidad del agua; se considera como incumplimiento cuando se califica el sitio como contaminado o fuertemente contaminado. Así mismo, la Tabla 4 resume el sistema de semáforo de calidad del agua establecido por la CONAGUA y SEMARNAT (2023): a) Verde: cumplen con todos los indicadores de la calidad del agua; b) Rojo: no cumple con los criterios para demanda bioquímica de oxígeno, demanda química de oxígeno, toxicidad y enterococos; c) Amarillo: no cumple con los criterios para *escherichia coli*, coliformes fecales, solidos suspendidos totales y porcentaje de saturación de oxígeno (CONAGUA y SEMARNAT, 2022).

**Tabla 3.** Escala de clasificación de la calidad del agua superficial, cuerpos de agua lóticos (ríos, arroyos y corrientes).

CALIDAD DEL AGUA DE CUERPOS LÓTICOS								
INDICADORES DE CALIDAD DEL AGUA			CALIFICACIÓN, CÓDIGO DE COLORES Y ESCALA DE CALIDAD DEL AGUA DEL INDICADOR					SEMÁFORO
INDICADOR	ABREVIACIÓN	UNIDADES	CUMPLIMIENTO			INCUMPLIMIENTO		COLOR DEL SEMÁFORO EN CASO DE INCUMPLIMIENTO DEL INDICADOR
			EXCELENTE	BUENA CALIDAD	ACEPTABLE	CONTAMINADA	FUERTEMENTE CONTAMINADA	
DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO, 5 DÍAS	DBO	mg/L	DBO≤3	3<DBO≤6	6<DBO≤30	30<DBO≤120	DBO>120	ROJO
DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO	DQO	mg/L	DQO≤10	10<DQO≤20	20<DQO≤40	40<DQO≤200	DQO>200	ROJO
SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES	SST	mg/L	SST≤25	25<SST≤75	75<SST≤150	150<SST≤400	SST>400	AMARILLO
COLIFORMES FECALES	CF	NMP/100 mL	CF≤100	100<CF≤200	200<CF≤1000	1000<CF≤10000	CF>10000	AMARILLO
ESCHERICHIA COLI	EC	NMP/100 mL	EC≤126	126<EC≤576	576<EC≤850	850<EC≤1000	EC>1000	AMARILLO
PORCENTAJE DE SATURACIÓN DE OXÍGENO DISUELTTO	OD	%	70<OD≤110	50<OD≤70 Y 110<OD≤120	30<OD≤50 Y 120<OD≤130	10<OD≤30 Y 130<OD≤150	OD≤10 Y OD>150	AMARILLO
INDICADOR	ABREVIACIÓN	UNIDADES	CUMPLIMIENTO			INCUMPLIMIENTO		COLOR DEL SEMÁFORO EN CASO DE INCUMPLIMIENTO DEL INDICADOR
			NO TÓXICO	TOXICIDAD BAJA	TOXICIDAD MODERADA	TOXICIDAD ALTA		
TOXICIDAD DAPHNIA MAGNA, 48 h	TA	Unidades de Toxicidad	TA < 1	1≤TA≤1.33	1.33<TA< 5	TA ≥ 5		ROJO
TOXICIDAD VIBRIO FISCHERI, 15 min	TA	Unidades de Toxicidad	TA < 1	1≤TA≤1.33	1.33<TA< 5	TA ≥ 5		ROJO
TODOS LOS INDICADORES								VERDE

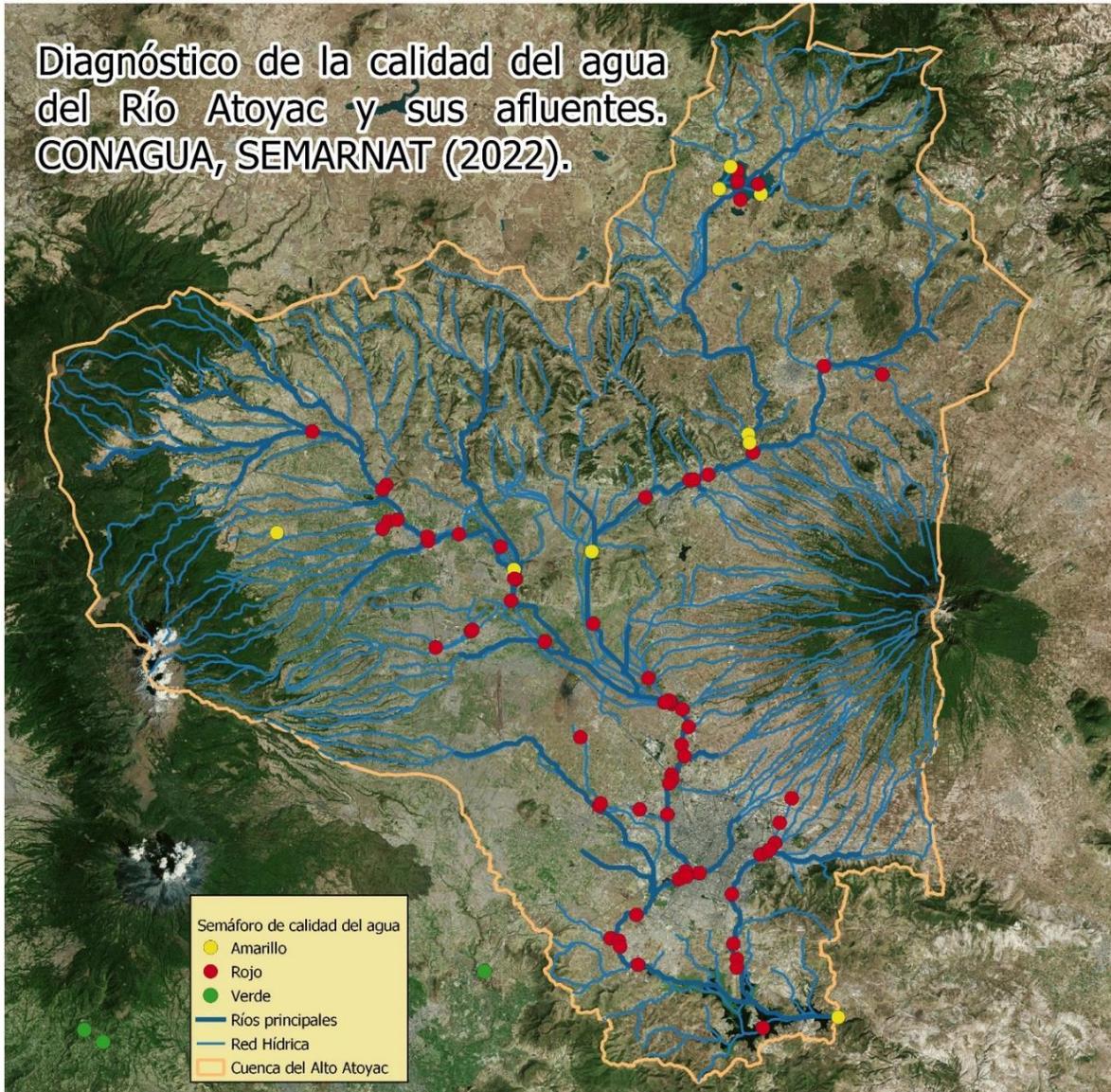
Nota. Fuente: CONAGUA y SEMARNAT (2023).

**Tabla 4.** Semáforo de calidad del agua superficial

SEMÁFORO DE CALIDAD DEL AGUA SUPERFICIAL		
Indicador	No cumple	Cumple
DBO	Rojo	Verde
DQO	Rojo	Verde
TOX	Rojo	Verde
ENTEROC	Rojo	Verde
E_COLI	Amarillo	Verde
CF	Amarillo	Verde
SST	Amarillo	Verde
OD%	Amarillo	Verde

Los sitios en **verde** cumplen con todos los Indicadores de Calidad del Agua.  
 Los sitios en **amarillo** no cumplen uno o más de los parámetros señalados en el color.  
 Los sitios en **rojo**, no cumplen uno o más de los parámetros señalados con el color.

Nota. Fuente: CONAGUA y SEMARNAT (2023).



**Figura 7.** Mapa de distribución de los sitios de monitoreo de la CONAGUA y SEMARNAT (2022). Elaboración propia. Fuente. CONAGUA y SEMARNAT (2023).

De manera general, con los valores promedio de las concentraciones anuales para los parámetros de calidad del agua regulados en la Declaratoria (DOF, 2011) y las metas establecidas en el estudio de Clasificación, se puede observar el comportamiento de cada sitio de estudio monitoreado por la RENAMECA en la CAA (CONAGUA y SEMARNAT, 2023). En la Figura 7, se muestran los setenta y cinco sitios monitoreados por las autoridades y se resalta que ningún sitio cumple con los criterios de calidad del semáforo. Aunado a lo anterior, los informes diagnósticos también muestran los resultados de pruebas analíticas

realizadas para la detección de otros 41 contaminantes criterios, que, de igual forma exhiben que el agua en la CAA se encuentra contaminada (CONAGUA y SEMARNAT, 2023).

#### 1.2.5.2 Reportes del sector académico

Dentro de los grupos académicos la problemática del río Atoyac se ha abordado desde tres ejes temáticos, los cuales responden a las condiciones en las que se encuentra el río (Mora *et al.*, 2021): **calidad del agua de la cuenca** (parámetros fisicoquímicos, análisis de fósforo, nitrógeno y salinidad, compuestos farmacológicamente activos, metales pesados en agua superficial, plaguicidas y otros compuestos orgánicos, contaminación microbiológica e índices de calidad del agua); **evaluación de los sedimentos del río** (contenido mineral y granulometría, elementos mayores y trazas, índices de acumulación de contaminantes / enriquecimiento de elementos mayores y traza, microplásticos, contaminación orgánica y microbiológica) y, **efectos de la contaminación en la salud humana**. Es preciso mencionar que hoy en día los estudios sobre los efectos de la contaminación en la salud de los ecosistemas o sobre la integridad del ecosistema en la CAA son escasos.

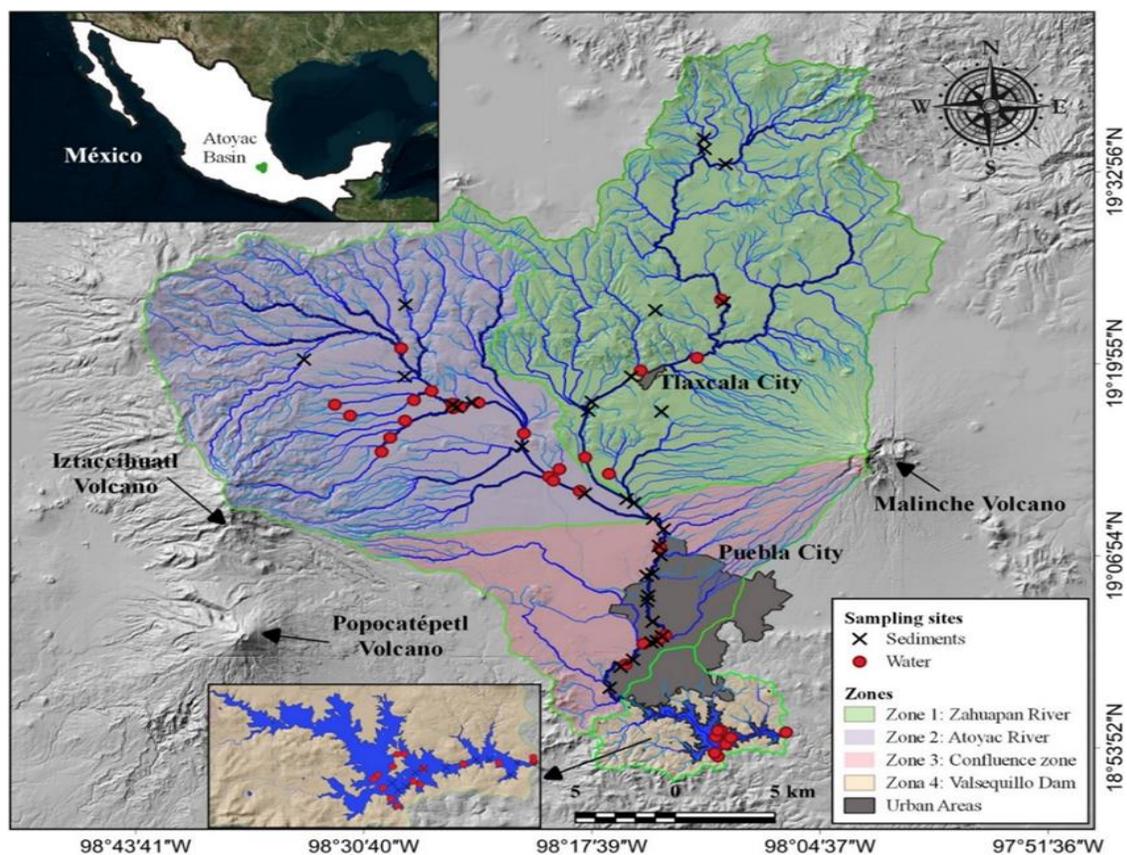
En cuanto a la calidad del agua, la información recopilada en diferentes estudios publicados en los últimos años permite identificar las zonas de estudio de los distintos grupos de trabajo dentro de la CAA, y en base a ello, establecer que la cuenca cuenta con cuatro zonas de intervención (Mora *et al.*, 2021). La Figura 8 muestra un mapa de distribución de los distintos sitios que se han muestreado dentro de la cuenca desde 2010 hasta 2021, con trabajos de monitoreo de contaminantes en el agua y sedimentos. Asimismo, la Tabla 5 resume los valores promedio de diferentes parámetros fisicoquímicos de algunos estudios realizados a lo largo de cuatro zonas de la cuenca.

Hay que tener en cuenta que los procesos de investigación académica se ven limitados en cuanto a periodos y sitios de monitoreo, si bien, la información emitida ha logrado generar un diagnóstico complementario al de las autoridades sobre las condiciones del agua en los ríos Atoyac y Zahuapan, añadiendo la identificación de patrones en cuanto a la movilidad, la persistencia y los efectos de los contaminantes. Ello aporta argumentos para generar una evaluación sobre la eficiencia de los distintos proyectos de intervención que se han

realizado por parte de las autoridades y la detección de cambios en las condiciones ambientales.

Otro rasgo que destaca de la investigación académica es que ha permitido visualizar la variabilidad estacional (estiaje y lluvias) del estado de la contaminación de los ríos en diferentes años, lo que es crucial para entender las variaciones en términos de caudal, efectos climáticos, ciclos biogeoquímicos, actividad biológica, etc.

Cabe mencionar, que a diferencia de la investigación gubernamental y dado que los objetivos particulares de cada estudio buscan la generación de nuevos conocimientos y la comprensión profunda de la contaminación en la cuenca (no sólo del agua), el alcance de los resultados no sólo se reporta para el ámbito académico, sino que también la información pertenece a la comunidad en general.



**Figura 8.** Ubicación de distintos sitios de monitoreo ambiental (agua y sedimento) dentro de la Cuenca Alta del río Atoyac de 2010 a 2021. Fuente: Mora et al. (2021). Recuperado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969721018568#bi0005>

**Tabla 5.** Evolución de parámetros fisicoquímicos evaluados en la cuenca del río Atoyac y Zahuapan de 2011 a 2021.

Zona	Año	Estación	T °C	pH	CE µS/cm	OD mg/L	Turb NTU	D <sub>5</sub> BO mg/L	DQO mg/L	TSS mg/L	TDS mg/L	# de muestras	Fuente
<b>1</b>	2013	Lluvias	10.2	7.95	1614	3.4	–	198	–	–	1157	11	Mena <i>et al.</i> (2017)
	2013-14	Secas	17.92	7.61	736.4	2.94	44.4	52.6	122.4	28.3	497.1	12	Martinez (2016)
	2013	Lluvias	17.79	7.44	280.6	4.78	30.5	21.11	110.3	373.7	338.9	9	
		Min	1.4	6.24	124	1.3	0.29	0	23	0	43.6	–	
<b>Río Zahuapan</b>	Max	24.4	8.5	5130	6.96	150.5	450	338	952	5890	–		
	2011	–	–	6.89	282.1	–	–	–	–	–	200.1	10	González <i>et al.</i> (2019)
<b>2</b>	2013-14	Secas	18.33	7.37	854.9	2.19	68.9	109.1	206.7	65.43	615.8	14	Martinez (2016)
	2013	Lluvias	18.12	7.21	418.2	4.04	26.04	26	89.74	309.3	319.9	10	
	2016	Secas	15.49	6.43	520.3	0.29	655.9	85	218	–	616	–	Hernández <i>et al.</i> (2019)
	2016	Lluvias	18.55	6.92	1292	0.18	448.6	199	816	–	900	–	
<b>Río Atoyac</b>	Min	14	5.96	109	0.18	0.14	10	29	16	76	–		
	Max	24.3	8.7	1870	5.8	655.9	399	816	973	1330	–		
<b>3</b>	2011	–	–	6.9	667	–	–	–	–	–	489	–	González <i>et al.</i> (2019)
	2013	Secas	–	–	–	–	–	123	–	–	–	3	Aburto <i>et al.</i> (2017)
	2013-14	Secas	20.29	7.89	1360	1.77	143.3	170.8	410.9	105.1	859.8	18	Martinez (2016)
	2013	Lluvias	19.99	7.67	506.9	3.68	72.32	26.5	220.1	1125.5	690.7	10	
	2016	Secas	19.94	8.21	–	0.27	102.2	105	260.6	–	–	39	Castresana <i>et al.</i> (2018)
	2016	Lluvias	20.25	8.02	–	1.47	234.41	69.79	130.91	–	–	–	
	2016	Secas	17.59	7.44	990.2	0.24	261.2	93.15	423	–	723.7	3	Hernández <i>et al.</i> (2019)
	2016	Lluvias	18.87	8.26	728	1.9	262.5	84.33	251.7	–	438.5	3	
<b>Zona de Confluencia</b>	Min	14.2	6.9	217	0	0.4	15	56	20	198	–		
	Max	27.3	10.24	1672	5.6	460	480	1055	2996	2533	–		
	2011	–	–	7.2	818	–	–	–	–	–	604	–	González <i>et al.</i> (2019)
	2013-14	Secas	19.6	7.69	774.2	5.15	7.11	26.78	57.78	8.52	484.5	27	Martinez (2016)
<b>4</b>	2013	Lluvias	22.96	7.6	692.8	412	1.12	15.56	43.2	20	467.3	18	
	2015	Secas	17.45	–	–	3.8	8.46	2.9	–	4	–	10	Laug (2016)
	2015	Lluvias	20.91	7.57	910	19.76	7.38	2.8	–	6	455.3	10	
	Min	17.27	7.01	592	1.02	0.48	2.6	18	0	20	–		
<b>Presa Valsequillo</b>	Max	28.5	9.06	928	21.24	24	50	96	50	700	–		

Nota. Fuente: Mora *et al.* (2021). Recuperado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969721018568#bi0005>

Por consiguiente, la propuesta de una red de monitoreo ambiental que busque mejorar la comprensión de la situación de la Cuenca del Río Atoyac – Zahuapan, precisa de establecer sitios prioritarios para el manejo y vigilancia de la calidad del agua, basados en el impacto social y afectación territorial, que además muestren evidencia de las condiciones medioambientales que permitan conocer los cambios que ha tenido el ecosistema a lo largo del tiempo (Arrollo, 2017).

### 1.3 Justificación

La Cuenca del Alto Atoyac (CAA) es un sistema hídrico que presenta altos niveles de contaminación, los cuales superan los límites máximos permitidos en la Declaratoria de Clasificación publicada en el Diario Oficial de la Federación (DOF, 2011), y cuyos efectos han provocado la pérdida de la calidad del agua, dificultando el acceso al recurso y poniendo en riesgo la integridad de los ecosistemas y la salud de las personas que la habitan.

A pesar de los esfuerzos de las autoridades nacionales y de los grupos académicos para monitorear el estado de la calidad del agua en la CAA, aún no se ha logrado instaurar un sistema de vigilancia ambiental integral, que englobe los objetivos de todos los involucrados y permita el trabajo en conjunto para establecer estrategias que garanticen la gestión integral del agua.

Ante tal necesidad, se requiere el desarrollar e incorporar mecanismos de intervención basados en un enfoque de investigación práctico, es decir, buscando soluciones concretas al problema de la contaminación del agua y que estén fundamentadas en un registro que refleje la dinámica de los contaminantes y sus cambios a lo largo del tiempo. En ese sentido, es necesario un monitoreo que no sólo tenga el objetivo de dar seguimiento a la calidad del agua, sino que también permita analizar la eficiencia de las acciones de intervención y las políticas de saneamiento implementadas.

Es por ello, que en el presente trabajo se propuso evaluar, a través del análisis de parámetros fisicoquímicos, la viabilidad de diseñar una red de estaciones de monitoreo ambiental, cuyo fin es simplificar y consolidar sitios prioritarios de monitoreo que reflejen

la dinámica hidrológica de la cuenca, además de tener un control sobre las descargas de aguas residuales de tipo industrial y urbano, y evidenciar los cambios en el sistema en función de las prácticas de restauración.

Se espera que el presente trabajo sea un antecedente que ayude con la necesidad de tener en la CAA una red de monitoreo que no sólo brinde información sobre los niveles de contaminantes y los valores de los parámetros fisicoquímicos en el agua, sino que también se tome en cuenta la dinámica hidrológica, además de que sirva para instaurar el ejercicio de trabajar bajo objetivos comunes entre las autoridades, grupos académicos y las comunidades afectadas.

#### 1.4. Objetivos

##### 1.4.1. Objetivo general

Evaluar la calidad del agua del Río Atoyac y Zahuapan a través de parámetros fisicoquímicos con la finalidad de determinar criterios para el diseño y propuesta de una red de estaciones de monitoreo.

##### 1.4.2. Objetivos específicos

- Reunir información sobre la capacidad de análisis de la calidad del agua que se tiene en la cuenca de los ríos Atoyac y Zahuapan.
- Caracterizar ambientalmente los ríos Atoyac y Zahuapan, a través de un estudio prospectivo.
- Colectar datos sobre la calidad del agua en los ríos Atoyac y Zahuapan, mediante el registro de parámetros fisicoquímicos de 21 sitios de muestreo.
- Analizar el comportamiento de los datos recolectados en campo y contrastarlos con los reportes históricos de la calidad del agua de la cuenca.
- A partir de un análisis multivariado, identificar y proponer sitios de monitoreo que reflejen comportamientos contrastantes, con la finalidad de definir las características de una red de estaciones de monitoreo.

## II. MÉTODO

### 2.1. Zona de estudio

La cuenca hidrológica Río Alto Atoyac (CAA) forma parte de la cuenca del Río Balsas, en la región hidrológica y administrativa RH18 y VI respectivamente, ambas conocidas como Balsas. Además, se extiende geográficamente en los estados de Tlaxcala, Puebla y en menor medida en el Edo. De México por los paralelos 19° 57' 10.82'' y 18° 51' 42.27'' de latitud norte, mientras que de longitud oeste comprende las coordenadas 97° 57' 34.07'' y 98° 17' 43.23'' (INEGI, 2019). La cuenca posee una superficie aproximada de 4001.66 km<sup>2</sup>, en donde se encuentran 69 municipios: 47 pertenecientes a Tlaxcala y 22 a Puebla (Ibarrarán y Viniegra, 2022).

A nivel fisiográfico la cuenca se ubica en el Valle Puebla-Tlaxcala, región montañosa dentro del Eje Neovolcánico, en donde se ubican los estratovolcanes Iztaccíhuatl y Popocatepetl hacia el oeste y noroeste respectivamente y hacia el este el estratovolcán Matlalcuéyetl (La Malinche). Dichas condiciones dan a la cuenca una altitud máxima de 5200 msnm en el volcán Iztaccíhuatl y una altitud mínima de 2016 msnm en la cortina de la presa Manuel Ávila Camacho también conocida como presa Valsequillo (INEGI, 2019).

El clima predominante dentro de la cuenca es templado subhúmedo con lluvias en verano, en donde el rango de temperatura media va de 12 °C a 16 °C, el cual tiende a variar debido a las condiciones orográficas dentro de la zona (INEGI, 2019). Los meses que registran las mayores temperaturas son abril, mayo y junio con un promedio de 19 °C, mientras que las temperaturas promedio más bajas se presentan en los meses de noviembre a febrero, que van de los 13.9 °C a 15.3 °C (Mora *et al.*, 2021). El nivel de precipitación anual oscila entre 500 y 1200 mm, considerando que al igual que la temperatura, ésta tiene una estrecha relación con la altitud; es más intensa y frecuente en las zonas altas en comparación con las zonas medias y bajas (INEGI, 2019).

En cuanto a la hidrología superficial la cuenca tiene un drenaje dendrítico, conformado por un conjunto de corrientes perennes e intermitentes. Los principales ríos que atraviesan la

cuenca son el río Atoyac y el Zahuapan (Figura 9). El río Atoyac nace de los deshielos del flanco norte del volcán Iztaccíhuatl, asimismo, la corriente toma ese nombre al unirse con los ríos Tlahuapan y Turín. Por su parte, el río Zahuapan nace en la sierra de Tlaxco, donde sus primeros escurrimientos son controlados por la presa Atlanga; aguas abajo atraviesa a la ciudad de Tlaxcala al confluir con el Atoyac (INEGI, 1986).



**Figura 9.** Cuenca del Alto Atoyac. Sobreposición de la cuenca sobre los Estados de Puebla y Tlaxcala (Imagen izquierda). Representación hidrológica de la cuenca; se muestran los ríos Atoyac-Zahuapan como principales ríos del sistema (Imagen derecha). Elaboración propia.

La cuenca ha sido objeto del desarrollo de una enorme extensión de tierras de cultivo por tratarse de tierras fértiles y abundantes fuentes de agua. No obstante, debido a este último factor y a su ubicación entre polos de desarrollo económico (Ciudad de México y el Puerto de Veracruz), también se han establecido complejos sistemas de producción industrial (transnacional y nacional), lo cual estimuló la expansión urbana desde la construcción de la autopista México-Puebla en 1962 (Velazco, 2018) (ver Anexo 3), lo que dio origen a un corredor económico entre el centro, el sureste y el golfo del país (Ramírez y López, 2018).

Con la entrada en vigor del Tratado de Libre Comercio de América del Norte (TLCAN) en 1994, la industria en la zona alcanzó su apogeo, lo que trajo como consecuencias efectos devastadores en el territorio, incluyendo deforestación, ocupación de zonas de recarga de los acuíferos, establecimiento de asentamientos de manera irregular, procesos de conurbación, extracción irregular del agua, descarga no controlada de agua residual de carácter industrial y de drenajes municipales en los diferentes ríos y afluentes de la cuenca (Grajales y Welti, 2003; Ramírez y López, 2018). Lo anterior condujo a la crisis socioambiental que repercute en la zona y por lo que ha sido declarada dentro de las Regiones de Emergencia Sanitaria y Ambiental en 2020 (SEMARNAT, 2020; Luna, 2021).

## 2.2. Capacidades analíticas y monitoreo ambiental en la Cuenca Atoyac - Zahuapan

Con la finalidad de valorar la capacidad de respuesta técnica para evaluar los niveles de contaminación hídrica que existe en la CAA, se realizó una búsqueda por medio de servidores web para localizar todos los laboratorios aprobados por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) y por la Entidad Mexicana de Acreditación (EMA), así como, laboratorios independientes y los pertenecientes a entidades académicas y centros de investigación (establecidas específicamente en los estados de Puebla y Tlaxcala), dedicados a realizar pruebas analíticas orientadas al monitoreo ambiental, principalmente en el sector hídrico (medir la calidad del agua: superficial, potable y residual), ya fuese con un fin público o privado.

La búsqueda de los laboratorios que ofrecen servicios analíticos se realizó mediante el *directorio de laboratorios acreditados por la Entidad Mexicana de Acreditación (EMA) y aprobados por la Conagua* (CONAGUA, 2020) (última fecha de actualización 24 de julio del 2020) y posteriormente fue corroborada, haciendo una búsqueda dentro del *Listado de laboratorios de ensayos acreditados emitida por la EMA* (EMA, 2022); en este último se utilizó como criterio de búsqueda: *ubicación y rama*.

Dentro de '*ubicación*' se identificó información referente a los estados de Puebla y Tlaxcala y en '*rama*' se filtró, utilizando los términos: *agua* y *residuos*. En esta búsqueda no se

incluyeron laboratorios de ensayos cuya rama está orientada a la química (farmacéutica, derivados del petróleo, etc.), fuentes fijas (análisis de emisiones de gases, ruido, etc.), salud agropecuaria o alimentos, debido a que el interés general de la investigación se centra en formar un directorio de entidades con capacidad de monitoreo ambiental.

De igual forma, se realizó una búsqueda de instituciones de educación superior y centros de investigación (públicos o privados), que incluyen dentro de sus actividades servicios de monitoreo ambiental. Como criterio de inclusión se consideró a los centros de investigación que cuentan con laboratorios especializados en materia, mientras que las escuelas de educación superior fueron incluidas bajo el criterio de contar con programas académicos de índole ambiental y laboratorios de docencia e investigación en la materia.

Posteriormente, de las entidades y laboratorios seleccionados se procedió a investigar y organizar la información sobre el servicio que estas ofertan o tienen para medir la calidad del agua: *parámetros a medir, prueba-técnica analítica y Norma y/o método de referencia*, así como su información de contacto (teléfonos, páginas web y direcciones). Lo anterior con la finalidad de integrar un directorio que dé respuesta a saber qué instituciones cuentan con las capacidades técnico - analíticas para poder llevar a cabo monitoreos ambientales en torno al agua de los ríos.

### 2.3. Estudio prospectivo

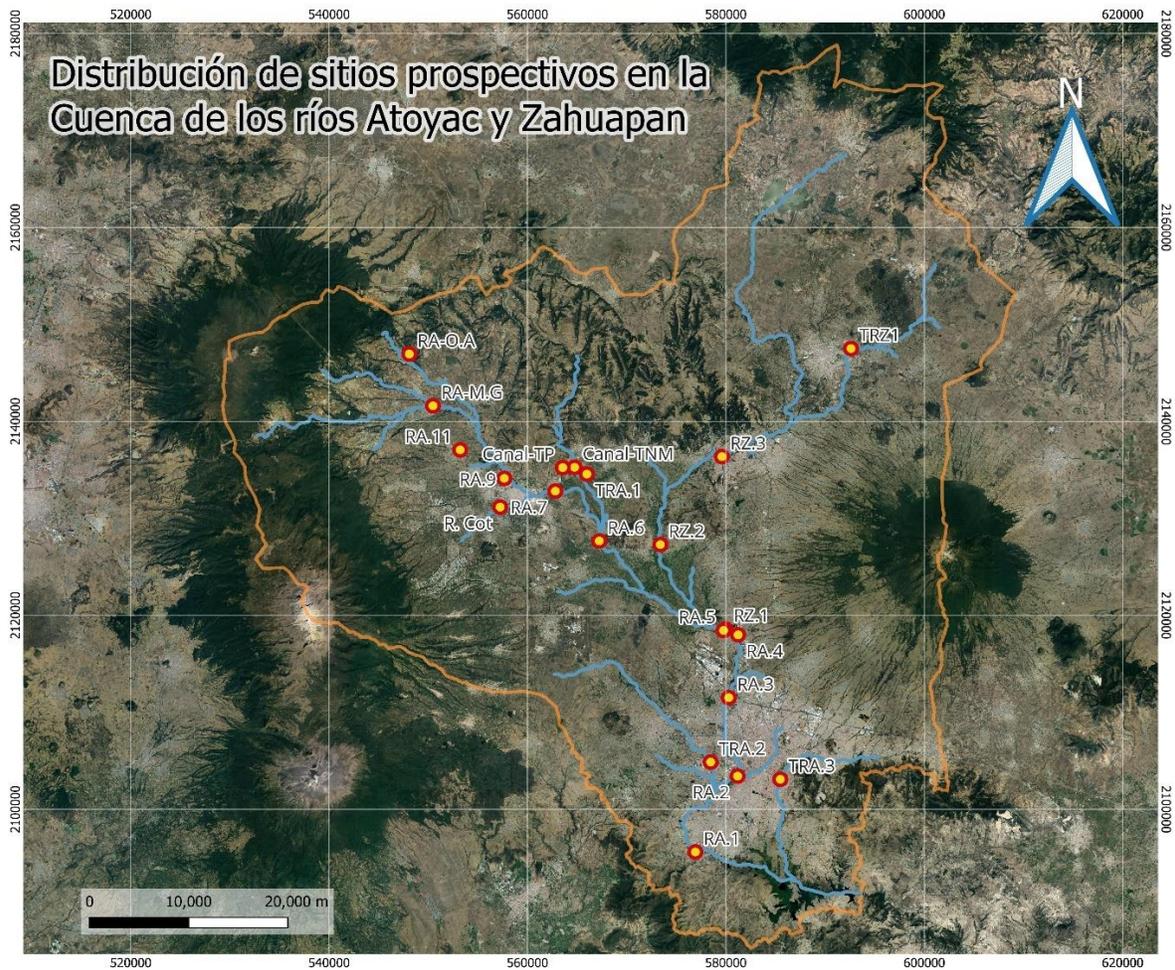
Con base en los sitios de muestreo presentados en distintos trabajos pertenecientes a entidades estatales y académicas, se realizó una valoración geográfica para constatar las zonas en las que se ha estudiado a la CAA. Posteriormente, mediante visualización remota (Google Earth), se preseleccionaron 21 sitios de interés a lo largo de los cauces principales del río Atoyac y Zahuapan, así como sus afluentes (arroyos, cañadas, etc.).

Los 21 sitios fueron seleccionados con base en los siguientes criterios de inclusión:

1. Accesibilidad al sitio de muestreo vía terrestre.
2. Identificación de zonas urbanas y rurales.
3. Facilidad de acceso a pie hasta los puntos de colecta.

4. Cobertura de aspectos fisiográficos, tales como cambios altitudinales, zonas con distintos usos de suelo y sitios de convergencia entre los principales afluentes.

Una vez que se tuvo la lista de sitios, se realizaron recorridos en campo a cada uno de los sitios preseleccionados para realizar una descripción ambiental detallada y mediciones de parámetros fisicoquímicos, con el objetivo de establecer sitios permanentes que conformen un sistema de monitoreo de la calidad del agua para los ríos Atoyac y Zahuapan. En la Figura 10 se muestra la ubicación geográfica de los sitios preseleccionados. Para mayor detalle ver Anexo 4, el cual muestra la nomenclatura de los sitios de muestreo preseleccionados y sus coordenadas de georreferenciación en sistema UTM.



**Figura 10.** Distribución de los sitios prospectivos en los ríos Atoyac y Zahuapan. Elaboración propia (idea Omar Arellano Aguilar).

## 2.4. Descripción del muestreo prospectivo

El recorrido y muestreo de los ríos Atoyac y Zahuapan se realizó en junio de 2022; el recorrido permitió valorar *in situ* los diferentes sitios de estudio preseleccionados y evaluar si cumplían con los criterios de inclusión para ser considerados parte de la red de sitios de monitoreo. Asimismo, se realizó una descripción ambiental, la cual consistió en el registro de parámetros fisicoquímicos *in situ* de agua y de sedimento, así como, el registro de las características del sitio de muestreo (color aparente, profundidad, tamaño de cause, visibilidad, etc.) y colecta de muestras (agua y sedimento) para su posterior análisis en laboratorio. Además, se elaboró una descripción general de cada sitio, tomando en cuenta: vegetación, presencia de fauna, infraestructura hídrica y presencia de basura.

La Tabla 6 resume los parámetros fisicoquímicos analizados en campo por matriz ambiental, los cuales fueron medidos por triplicado. La selección de variables responde a la capacidad técnica de mediciones por sonda en el sitio de estudio, además de que dichos datos nos permiten hacer un seguimiento del río y simplificar procesos.

Debido a que no todos los sitios de estudio presentaban las condiciones propicias de accesibilidad al río, se estandarizó la técnica de colecta de agua superficial por medio de una cubeta de plástico. El procedimiento de colecta consistió en lanzar la cubeta a la zona central del cauce del río y recuperar por arrastre la mayor cantidad de volumen de agua, dicha técnica de colecta sigue las recomendaciones de toma de muestras de aguas residuales de la Agencia de Protección Ambiental (EPA, por sus siglas en inglés) (Solís, 2013).

**Tabla 6.** *Materiales y parámetros fisicoquímicos registrados in situ.*

Agua		Equipo
Parámetros fisicoquímicos	Temperatura [°C]	Multiparámetro Hanna modelo HI9829
	pH [H <sup>+</sup> ]	
	CE [μS/cm]	

	TDS [ppm]	
	OD [mg/L]	
	ORP [mV]	
	Salinidad [‰]	
<b>Sedimento</b>		<b>Equipo</b>
Parámetros fisicoquímicos	Temperatura [°C]	Medidor portátil de pH y temperatura Hanna
	pH [H <sup>+</sup> ]	
<b>Parámetros físicos del río</b>		<b>Equipo</b>
Propiedades físicas del río	Profundidad	Cuerda graduada con contrapeso
	Ancho del cauce	Cinta métrica/ medidor laser <i>Bosch GML-40</i>
	Turbidez	HydroColor app
	Color	Interpretación del observador
<b>Toma de muestras</b>		
Sedimentos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cuchara de metal</li> <li>• Frascos de vidrio de boca ancha y tapa de metal de 100 mL</li> <li>• Tapa de aluminio</li> </ul>	
Agua	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tubos Corning 50 mL</li> <li>• 3 goteros</li> <li>• Ácido nítrico suprapur al 70% Sigma Aldrich®</li> </ul>	

Las muestras de agua fueron colectadas directamente del agua recuperada en la cubeta por medio de tubos corning (previamente etiquetados) y fijadas con 2 gotas de ácido nítrico (HNO<sub>3</sub>) suprapur al 70 %. Por su parte, las muestras de sedimento se tomaron de los sitios de muestreo cuyas planicies de inundación permitían coleccionar lo más cercano al río por medio de una cuchara de metal. Se almacenaron en frascos de vidrio bien etiquetados y cubiertos con papel aluminio para evitar fotodegradación.

Una vez obtenidas las muestras, estas fueron transportadas en una cama de hielo a 4 °C dentro de hieleras, con la finalidad de garantizar la conservación de los compuestos de interés y su traslado hasta el laboratorio.



**Figura 11.** Método de colecta (recuperación de agua, mediciones in situ y colecta de muestras).

## 2.5. Procesamiento de muestras y trabajo en el laboratorio

El trabajo de laboratorio se realizó en la Unidad de Análisis Ambiental de la Facultad de Ciencias de la UNAM, llevando a cabo los siguientes procedimientos para la medición de parámetros de interés: metales en muestras de agua y plaguicidas en muestras de sedimentos.

2.5.1. Extracción de plaguicidas organofosforados (OP) en sedimentos con alto contenido de materia orgánica.

### 2.5.1.1. Preprocesamiento de muestras de sedimento

En el laboratorio se procedió a la desecación de las muestras de sedimento por medio de una Liofilizadora LABCONCO/Freezone 4.5. Una vez secos los sedimentos, se tamizaron a 1 mm (malla 18) y el resultante se colocó en charolas de aluminio, mismas que fueron etiquetadas y cubiertas con papel aluminio para resguardar a  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  antes de comenzar la extracción.

### 2.5.1.2. Extracción asistida por microondas

El proceso de extracción asistido por microondas (MAE) se llevó a cabo de acuerdo con el Método EPA 3546. Se pesaron 5 g del liofilizado de cada sitio de estudio por duplicado, junto con muestras adicionales para obtener el porcentaje de recobro del método. Se colocaron en vasos de teflón *Green Chem*<sup>®</sup> (vasos para extracción con disolventes orgánicos) de microondas CEM/MARS-X<sup>®</sup>. A cada vaso se le adicionaron 25 mL de acetato de etilo de grado HPLC.

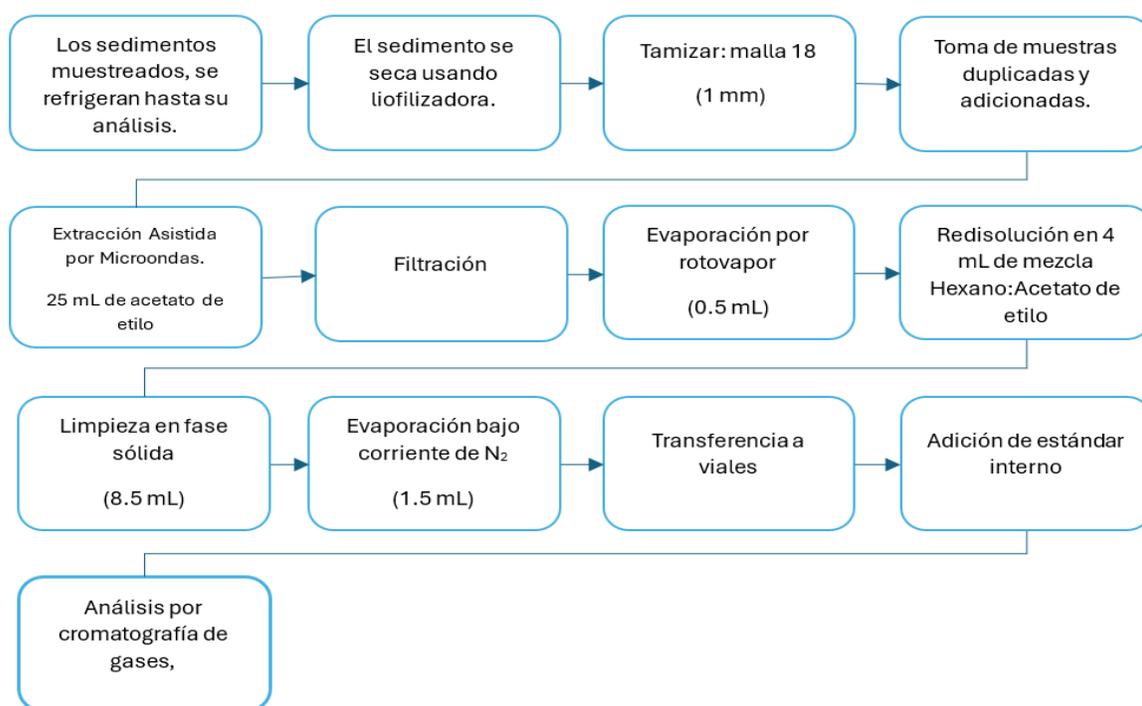
La extracción en el microondas se hizo en una sola etapa y a 1200 Watts como uso de energía máxima. El proceso establecido define una rampa de temperatura hasta llegar a 110 °C con un mantenimiento de 15 minutos sin sobrepasar una presión de 200 PSI. Una vez culminado el proceso de extracción, se dejó enfriar el sistema a temperatura ambiente.

Los extractos resultantes se filtraron mediante filtros Whatman<sup>®</sup> del número 5 de grado cualitativo en matraces de ebullición de 50 mL con fondo plano. Se agregaron gránulos de cobre (Sigma-Aldrich  $\geq 99.8\%$ ), con la finalidad de eliminar interferencias por sulfuros. Los vasos de teflón utilizados en el proceso de extracción se enjuagaron con 3 mL de acetato de etilo, con la finalidad de recuperar el extracto que pudiera haberse quedado en las paredes del vaso e igualmente se filtraron. La disolución extraída se evaporó en el rotovapor (Heidolph<sup>®</sup>) hasta concentrar la muestra a 0.5 mL y se reconstituyó con 4 mL de una mezcla de acetato de etilo y hexano 25:75.

Los 4.5 mL resultantes de los extractos se agregaron dentro de cartuchos de fase sólida LC-Si (Superclean<sup>®</sup>) de 6 mL (0.5 g) para la limpieza o *clean-up* de la muestra y montados en el Manifold Supelco de 12 plazas, dichos cartuchos fueron previamente acondicionados con 5 mL de etilo y 5 mL de hexano con la finalidad de eliminar posibles interferencias. Inmediatamente, para la elución de los analitos se agregaron primero los 4.5 mL con el extracto redisoluto y después 4 mL de la mezcla de acetato de etilo y hexano. Los 8 mL resultantes de la limpieza fueron almacenados en viales previamente etiquetados con la clave del sitio de muestreo. Posteriormente, el extracto contenido en los viales fue evaporado en una corriente de nitrógeno hasta alcanzar un volumen de 1.5 mL.

Los extractos resultantes fueron transferidos a viales de 1.5 mL (marcados y pesados) y se les adicionó una alícuota de 50  $\mu$ L de trifenil fosfato (TPP) como estándar interno y se pesó el vial (previamente tarado). El peso se registró para su uso en los cálculos de concentración. El extracto resultante se utilizó a la brevedad para su determinación en los cromatógrafos de gases.

La Figura 12 muestra un diagrama del proceso de extracción por microondas de los plaguicidas organofosforados.



**Figura 12.** Diagrama del proceso de extracción de plaguicidas organofosforados (PO's) en sedimentos con alto contenido de materia orgánica por fase sólida (SPE) con extracción asistida por microondas (MAE).

### 2.5.1.3. Análisis por cromatografía de gases

La determinación y cuantificación de los plaguicidas organofosforados en los sedimentos se realizó por cromatografía de gases con detector de nitrógeno – fósforo (GC NPD), de acuerdo con el método EPA 8141 b. La técnica analítica se llevó a cabo por medio del cromatógrafo de gases Agilent Technologies® modelo 6890N, equipado con un inyector

automático, detector de nitrógeno-fósforo (NPD) y una columna capilar HP-5MS (Agilent®) de 30 m de longitud x 0.25 mm de diámetro interno, con recubrimiento de 0.25 µm de (5 % fenil)-metilpolisiloxano. Se utilizó helio como gas acarreador. El modo de inyección fue Splitless.

## 2.5.2. Determinación de metales traza en muestras de agua de río por ICP-MS

### 2.5.2.1. Procesamiento de muestras de agua

Inmediato a su colecta, 50 mL de cada muestra de agua del río Atoyac fueron filtrados in situ con filtros Millipore de 0.22 µm y .25 mm de diámetro y portafiltros de Millipore de .25 mm de diámetro, en tubos Corning. Posteriormente se fijaron las muestras con 2 gotas de ácido nítrico (HNO<sub>3</sub>) suprapuro al 70 % Sigma Aldrich®.

### 2.5.2.2. Metales totales

La determinación y cuantificación de los metales totales de las muestras de agua se analizaron en el Laboratorio ICP-MS del Instituto de Geofísica de la UNAM, por medio de un espectrómetro de masa con fuente de plasma acoplado inductivamente Thermo Scientific® (ICP-MS modelo iCAP Qc).

Como control de calidad se analizaron muestras duplicadas, con blancos de reactivo y un estándar certificado NIST RM® Buffalo River Sediment para obtener el porcentaje de recuperación.

## 2.6. Análisis estadístico de los datos fisicoquímicos y de contaminantes analizados en las matrices ambientales bajo estudio (agua y sedimento)

Inicialmente las variables de estudio fueron analizadas mediante distintos procedimientos de estadística descriptiva para responder a la naturaleza dinámica de los datos como: *el tipo de distribución que siguen los datos y las diferencias significativas* (dada su distribución espacial). Posteriormente, a los datos fisicoquímicos obtenidos de cada estación de monitoreo se les aplicó la prueba de normalidad *Shapiro-Wilk* (prueba para una cantidad

de datos  $n \leq 50$ ), con una probabilidad de 95 %. La hipótesis nula que nos dice que los datos tienen una distribución normal, fue rechazada al nivel de significancia  $\alpha$  ( $\alpha=0.05$ ), si la probabilidad de la prueba es inferior al nivel de significancia ( $p < 0.05$ ) (Gil, 2020). El análisis estadístico se realizó con el software SPSS, versión 26.

#### 2.6.1 Análisis estadístico multivariado de los parámetros fisicoquímicos

La clasificación, el modelado y la interpretación de los datos monitoreados son los pasos más importantes en la evaluación de la calidad del agua (Boyacioglu, 2006). En este sentido la estadística multivariada representa una forma de analizar la gran cantidad de variables medidas, las cuales están asociadas a conjuntos de datos que precisan de ser analizados para extraer la información sobre el comportamiento de los sistemas hídricos.

El análisis de los parámetros fisicoquímicos medidos en el agua superficial del río Atoyac y sus afluentes, se realizó por medio de las técnicas de análisis de componentes principales (ACP) y análisis de conglomerado jerárquico (ACJ), utilizando el método de enlace de similitud de Ward por criterio de distancia euclidiana al cuadrado, en ambos casos se empleó el software IBM SPSS versión 26. Este procedimiento de estadística multivariada facilita la interpretación de los datos, ya que reconoce las componentes o factores más significativos que representan la mayoría de las variaciones de un sistema, lo que ayudó a evaluar las variaciones en la calidad del agua en la cuenca del río Atoyac y Zahuapan.

### III. RESULTADOS

#### 3.1. Capacidades analíticas para la vigilancia y monitoreo ambiental en la Cuenca Atoyac – Zahuapan

Dentro de la CAA existen 37 instituciones de carácter público o privado con la capacidad técnica y científica para indagar sobre la condición ambiental que se presenta en el agua de la cuenca (Figura 15). En primer lugar, se encontró que 15 organismos pertenecen al ámbito académico, ya sean como universidades que ofertan carreras universitarias relacionadas al área ambiental (cuentan con laboratorios para la docencia e investigación) o como centros de investigación pertenecientes a universidades. En este sentido, se encontró a 10

instituciones de educación superior con las posibilidades de generar actores sociales en la esfera ambiental y generar conocimiento mediante proyectos de ciencia básica o aplicada.

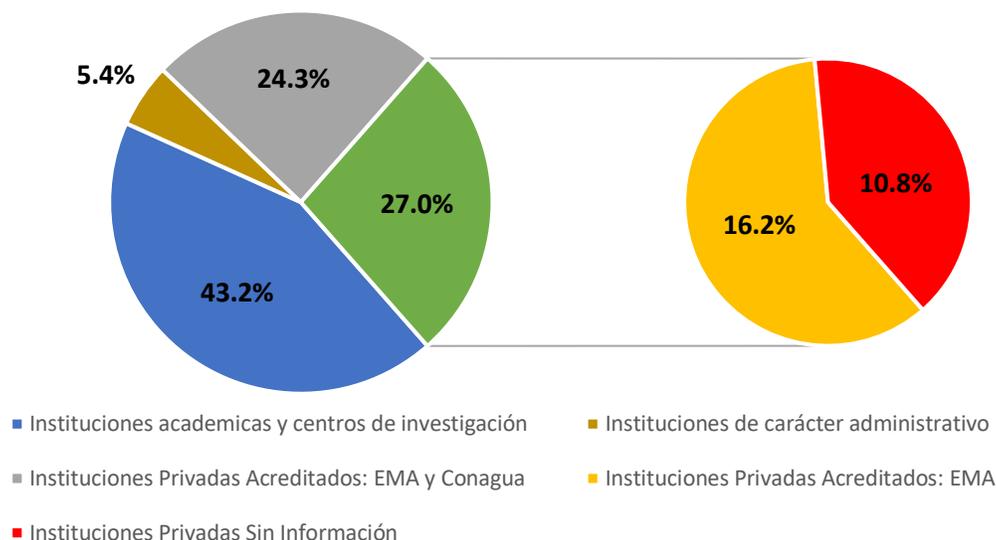
Particularmente en Tlaxcala, se encontró un centro de investigación de carácter público y federal en el estado de Tlaxcala. En Puebla, existen 2 instituciones responsables de la seguridad y administración hídrica: Conagua Dirección Local Puebla (Laboratorio de calidad del agua y monitoreo) y Concesiones Integrales, S.A. de C.V. (compañía privada encargada de los servicios de agua).

Por su parte, 19 instituciones son de índole privada y ofertan servicios técnicos de análisis y gestión ambiental; dentro de las 19 instituciones privadas que se revisaron, se logró comprobar que 15 (78.9 %) poseen acreditación técnica por parte de la EMA, mientras que 4 (21.1 %) que llevan a cabo diagnósticos ambientales en materia de agua, no especifican acreditaciones, técnicas o métodos de análisis (Figura 13).

En cuanto a las pruebas analíticas, se logró identificar un total de 122, las cuales se cumplen bajo criterios de normatividad nacional y en algunos casos, bajo métodos de referencia emitidos por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (*EPA, por sus siglas en inglés*); dichas pruebas analíticas se listan en el Anexo 5. Dentro del análisis de calidad de agua ofertados por los diferentes laboratorios de índole privado, se reportan métodos que permiten establecer criterios puntuales sobre del estado del agua en la cuenca: demanda bioquímica de oxígeno (DBO5), demanda química de oxígeno (DQO), sólidos suspendidos totales (SST), coliformes fecales (CF), *Escherichia coli* (E\_COLI), porcentaje de saturación de oxígeno (OD %), Toxicidad, etc.

Con la información que se obtuvo, se elaboraron dos bases de datos que contienen la información general (nombre de la institución, acreditaciones y lista de pruebas analíticas que realizan) y los datos de contacto (página web, teléfonos y dirección) de cada una de las instituciones que cumplió con los criterios de la investigación (ver Anexo 6). De igual manera, se georreferenció la ubicación de cada una de las entidades consideradas a fin de incorporar una representación visual de la cobertura que se tienen en dichos estados para abordar la problemática de la contaminación del agua en la cuenca del Río Atoyac.

### Capacidades analíticas en la cuenca Atoyac - Zahuapan



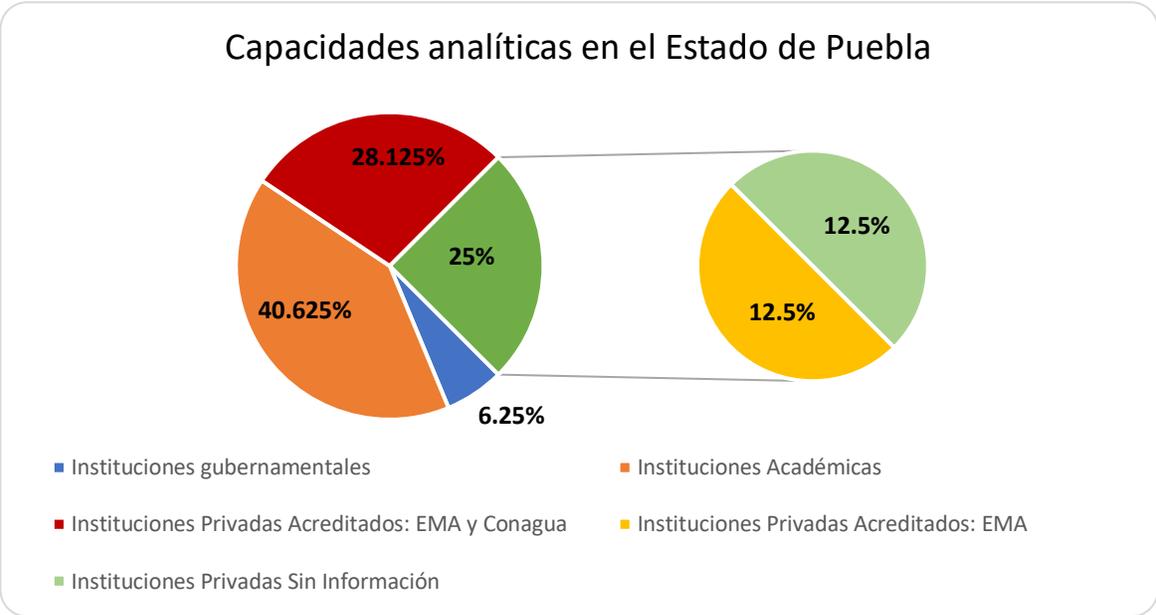
**Figura 13.** Distribución en porcentaje de las instituciones que pueden realizar monitoreo ambiental en la cuenca.

#### 3.1.1. Capacidades analíticas en el estado de Puebla

Se localizaron 32 instituciones de índole públicas y privadas que incorporan servicios técnicos relacionados con el análisis de calidad del agua: 13 de estos pertenecen a instituciones académicas (8 universidades: públicas y privadas) y representan al 40.6 % de los laboratorios con capacidades analíticas en el estado (Figura 14).

Por su parte, 2 laboratorios (6.3 %) pertenecen a instituciones de giro gubernamental y se encuentran acreditadas ante la EMA bajo la norma NMX-EC-17025-IMNC-2018 (ISO/IEC 17025:2017) y con aprobaciones para realizar mediciones directas y fisicoquímicas en agua, espectrofotométricos UV/VIS/IR y microbiología (EMA, 2022). Mientras que el 53.1% está constituido por 17 laboratorios privados, de estos, nueve laboratorios se encuentran certificados ante la Entidad Mexicana de Acreditación (EMA) y fueron aprobados por la Comisión Nacional del Agua para llevar a cabo diversas técnicas analíticas bajo normas y métodos de referencia; las ocho restantes son instituciones prestadoras de servicios técnicos y de gestión ambiental, de estos, cuatro cuentan con acreditaciones emitidas por la EMA (no se encontró su registro ante la EMA), para realizar monitoreo y análisis de aguas

residuales, mientras que cuatro son consultorías aprobadas, que llevan a cabo diagnósticos ambientales en materia de agua, pero no especifican técnicas, métodos o acreditaciones.



**Figura 14.** Distribución de las entidades con capacidad de realizar pruebas analíticas en el ámbito ambiental dentro del Estado de Puebla.

3.1.2. Capacidades analíticas en el estado de Tlaxcala

Existen cinco instituciones que llevan a cabo funciones en materia de agua. De estas, tres pertenecen a instituciones públicas (60 %) y dos a iniciativa privada (40 %). Dicho lo anterior sólo hay un laboratorio que aparece en el directorio emitido por la Gerencia de Calidad de Agua de la Subdirección General Técnica en la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2020) y que cuenta con la aprobación de la Entidad Mexicana de Acreditación (EMA) para llevar a cabo diversas técnicas analíticas bajo normas y métodos de referencia.

En el estado de Tlaxcala son tres de las instituciones de carácter público que cuentan con laboratorios capaces de desarrollar pruebas de carácter ambiental, dos pertenecen a instituciones académicas: *Centro de Investigación en Biotecnología Aplicada – IPN* y *Universidad Autónoma de Tlaxcala: Centro de Investigación en Genética y Ambiente / Laboratorio de Toxicología y Química Ambiental*. La tercera institución es de carácter gubernamental estatal: *Centro de Investigación y de Innovación del Estado de Tlaxcala, Laboratorio de Pruebas Ambienta*

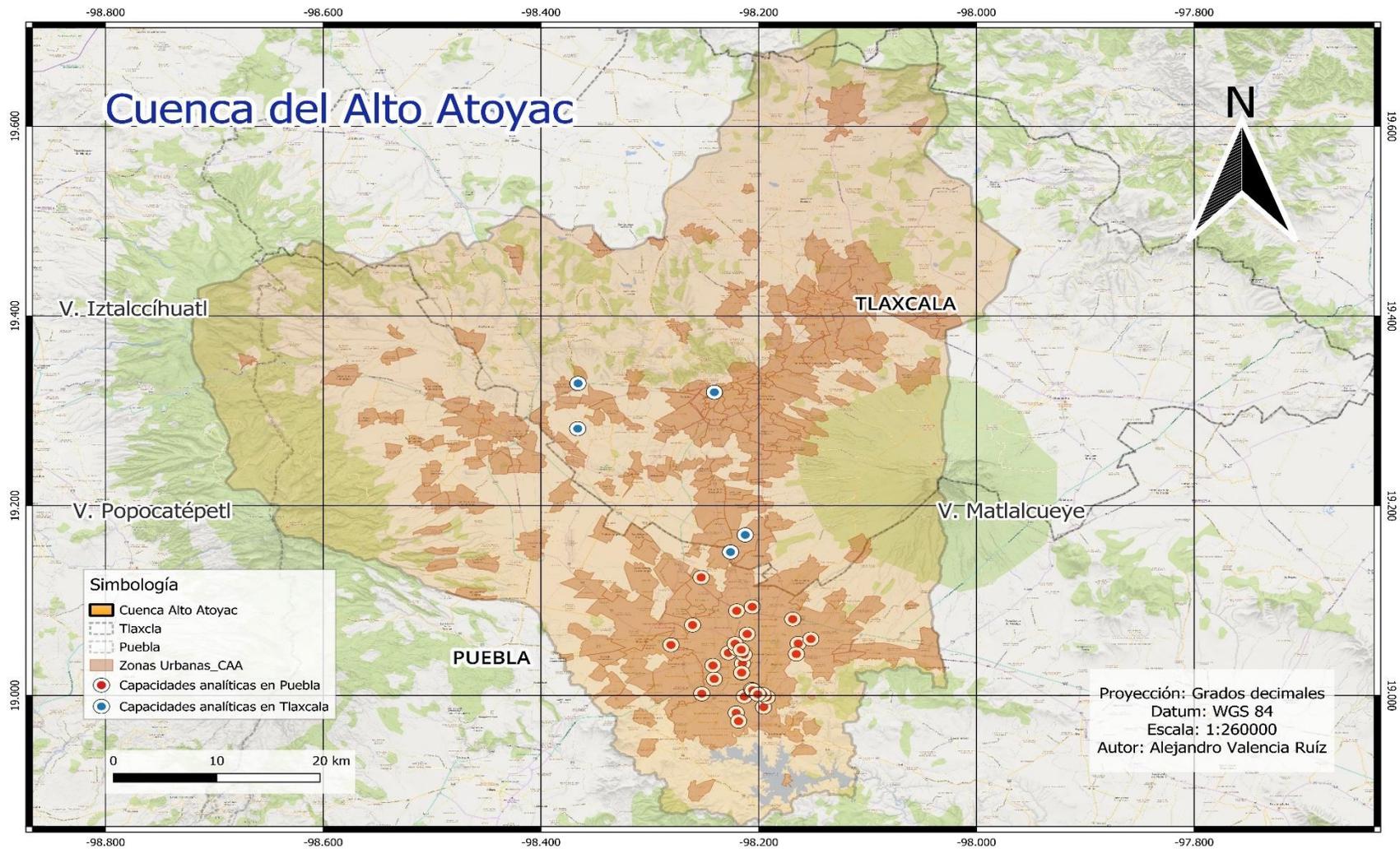


Figura 15. Macrolocalización de instituciones públicas o privadas con capacidad analítica en la CAA. Elaboración propia.

### 3.2. Análisis de los parámetros fisicoquímicos evaluados *in situ*

Como resultado del trabajo de campo, se registraron parámetros fisicoquímicos en 15 sitios de los 21 sitios preseleccionados. Seis sitios fueron descartados para la colecta debido a que no tenían las condiciones propicias para acercarse de forma directa al río (difícil acceso) o eran sitios sin agua; cinco de los puntos que no se lograron muestrear se localizan al noreste de la cuenca (TRA1, Canal-TNM, Canal-TP, RA9 y RA11) y uno en el centro (RA4). En la Tabla 7 se muestran los valores promedios registrados por cada sitio.

La mayor temperatura en el agua superficial del río se registró en el sitio TRA3 con 24.43 °C, punto ubicado dentro de la ciudad en el Edo. de Puebla y que recibe descargas de tipo doméstico de la zona habitacional aledaña. Subsecuentemente, los sitios RA1, TRA2 y RZ2 presentaron temperaturas de 22.6 °C, 22.3 °C y 22.2 °C, puntos de muestreo que se localizan dentro de la zona industrial-urbana de la cuenca. Por su parte, los sitios de estudio que presentaron las menores temperaturas se ubicaron dentro de la zona media-alta de la cuenca, siendo 16 °C la lectura más baja, la cual se registró en el sitio RZ3, ubicado en el Edo. de Tlaxcala, el cual corresponde a un punto turístico dentro de la ciudad. Los puntos RAMG y RA7, también presentaron bajas temperaturas 16.5 °C y 17.6 °C respectivamente; el primero se ubica en la zona alta de la cuenca y destaca por no presentar alteración antrópica evidente, tanto en el sistema lótico como en la vegetación circundante. En contraste, en el punto RA7 existe un sistema de descarga industrial a aproximadamente a 500 m antes del punto de muestreo, además, posterior al punto de muestreo se ubican dos manantiales que vierten sus aguas sobre un sistema previamente contaminado. El Anexo 7 muestra el gradiente de temperatura del agua superficial de cada sitio muestreado en la CAA de acuerdo con su ubicación geográfica.

El pH se registró por encima de su valor neutro en todos los sitios visitados, el sitio RCOT presentó pH 8.3, manifestando una tendencia a la basicidad; se destaca que el agua del río en este paraje se distingue por la gran cantidad de colorante que lleva el agua, el cual le da una apariencia azul turquesa. Los registros mínimos para esta variable se ubicaron en los sitios TRZ1 y RZ2, ambos con pH 7.2 y cercanos al valor neutro.

El potencial de óxido reducción (ORP) mostró valores negativos en 14 de las estaciones de monitoreo evaluadas, valores que van desde los -545.9 mV a los -38.8 mV. Estos resultados sugieren que el 93 % de los sitios de monitoreo registran condiciones reductoras. El sitio RA5 exhibió el ORP más bajo con -545.9 mV, ubicado en la unión del río Atoyac y Zahuapan; en este sitio, se presentaron las condiciones más críticas para trabajar, dado que la mezcla de químicos que lleva el río produce un olor muy fuerte y provoca irritación en los ojos. Por el contrario, el sitio RAMG fue el único que manifestó un resultado positivo con 19.6 mV.

En cuanto a los valores de oxígeno disuelto (OD), estos reflejan el agotamiento de oxígeno en el agua de los ríos Atoyac y Zahuapan, ya que presentan valores críticos de concentración de oxígeno disuelto, con niveles que denotaron condiciones de anoxia total e hipoxia severa (0 a 2.57 mg/L OD). A lo largo de la cuenca sólo cuatro estaciones mostraron una concentración mayor a 0 mg/L: RZ1 (0.9 mg/L), RZ3 (0.1 mg/L), RAMG (2.6 mg/L) y RAOA (2.2 mg/L).

Como resultado de la medición de los sólidos disueltos totales (TDS), el nivel más alto fue 1219 ppm y se registró en el sitio RCOT, mientras que el mínimo fue de 63 ppm en el sitio RAOA; los sitios RA1, TRA2, TRA3, TRZ1 y RCOT superaron las 500 ppm de TDS, resaltando que los primeros cuatro se encuentran aguas abajo después de la zona de confluencia y cercanos a la presa 'Valsequillo'.

Otro parámetro que resulta relevante es la conductividad, debido a que nos indica la presencia de iones en el agua. Se reportó un máximo de 2197  $\mu\text{S cm}^{-1}$  en el punto RCOT, el cual rebasa el límite de 1500  $\mu\text{S cm}^{-1}$  (EPA, 2024) que estipula la EPA para ríos en EUA. De igual manera, el sitio con menor registro fue RAOA con 109  $\mu\text{S cm}^{-1}$ .

La Figura 16 muestra el comportamiento de los parámetros fisicoquímicos medidos *in situ* en los sitios de muestreo. En general se observa que existe una tendencia al aumento de las variables fisicoquímicas conforme el río fluye a través de las zonas industriales y urbanas (cuenca media y baja).

**Tabla 7.** Valores promedio de los parámetros fisicoquímicos registrados en las muestras de agua superficial colectadas en los sitios de estudio.

ID	Sitio	Altitud [msnm]	Temperatura [°C]	pH	ORP [mV]	OD [mg/L]	CE [μS/cm]	TDS [ppm]	Salinidad [‰]
1	RA1	2056	22.62 ± 0.02	7.86 ± 0.03	-509.60 ± 0.85	0.00 ± 0.00	1129.33 ± 0.58	591.33 ± 0.58	0.59 ± 0.00
2	RA2	2108	21.47 ± 0.02	7.83 ± 0.04	-370.17 ± 8.37	0.00 ± 0.00	920.33 ± 3.21	493.33 ± 2.31	0.49 ± 0.00
3	TRA2	2148	22.25 ± 0.04	8.09 ± 0.03	-530.40 ± 0.96	0.00 ± 0.00	1604.33 ± 20.31	846.33 ± 9.87	0.85 ± 0.01
4	TRA3	2119	24.43 ± 0.09	7.81 ± 0.02	-489.00 ± 9.95	0.00 ± 0.00	1651.33 ± 4.93	835.00 ± 3.61	0.84 ± 0.01
5	RA3	2122	19.34 ± 0.03	7.80 ± 0.02	-134.03 ± 6.34	0.00 ± 0.00	773.67 ± 0.58	433.33 ± 0.58	0.43 ± 0.00
6	RZ1	2181	19.59 ± 0.11	7.57 ± 0.06	-110.88 ± 16.48	0.89 ± 1.77	628.75 ± 12.18	350.25 ± 5.85	0.34 ± 0.00
7	RA5	2184	19.42 ± 0.04	7.35 ± 0.01	-545.87 ± 0.59	0.00 ± 0.00	677.00 ± 1.00	378.67 ± 0.58	0.37 ± 0.00
8	TRZ1	2406	19.69 ± 0.07	7.23 ± 0.01	-307.07 ± 2.51	0.00 ± 0.00	1151.00 ± 4.36	640.00 ± 1.73	0.64 ± 0.00
9	RA6	2200	20.68 ± 0.05	7.37 ± 0.01	-300.70 ± 3.42	0.00 ± 0.00	618.67 ± 1.15	337.00 ± 0.00	0.33 ± 0.00
10	RZ2	2210	22.22 ± 0.01	7.20 ± 0.01	-102.20 ± 0.96	0.00 ± 0.00	807.00 ± 0.00	426.00 ± 0.00	0.42 ± 0.00
11	RZ3	2204	16.01 ± 0.11	7.67 ± 0.01	-123.80 ± 0.70	0.14 ± 0.02	630.33 ± 0.58	380.33 ± 1.15	0.37 ± 0.00
12	RA7	2226	17.56 ± 0.01	7.32 ± 0.02	-222.83 ± 0.42	0.00 ± 0.00	746.00 ± 0.00	434.33 ± 0.58	0.43 ± 0.01
13	RCOT	2280	19.78 ± 0.02	8.31 ± 0.01	-203.63 ± 2.44	0.00 ± 0.00	2197.00 ± 0.00	1219.33 ± 0.58	1.26 ± 0.00
14	RAMG	2399	16.53 ± 0.05	7.66 ± 0.03	19.57 ± 2.20	2.57 ± 0.10	205.67 ± 0.58	122.33 ± 0.58	0.12 ± 0.00
15	RAOA	2511	18.00 ± 0.01	7.44 ± 0.02	-38.77 ± 0.64	2.21 ± 0.04	109.00 ± 0.00	63.00 ± 0.00	0.06 ± 0.00

*Nota.* Los datos se muestran como: media ± desviación estándar.

*Acronimos.* Potencial de Hidrógeno (pH); Potencial de Oxidación – Reducción (ORP); Conductividad Eléctrica (CE); Sólidos Disueltos Totales (TDS).

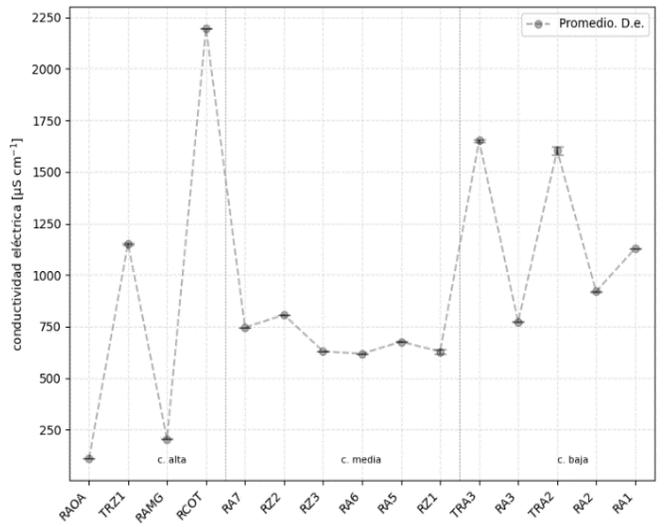
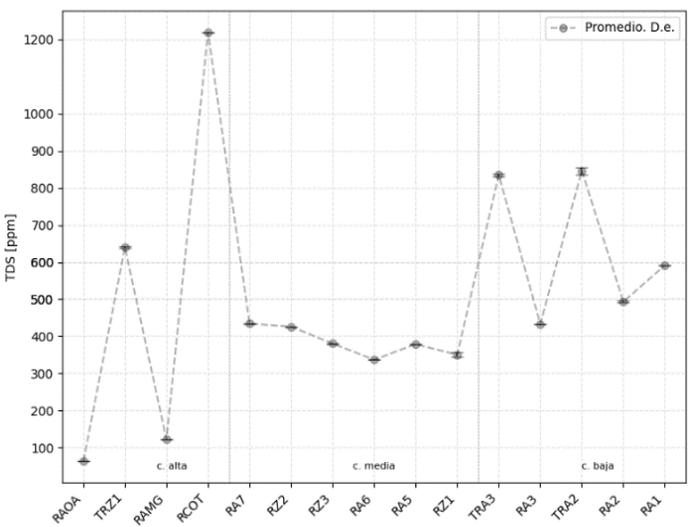
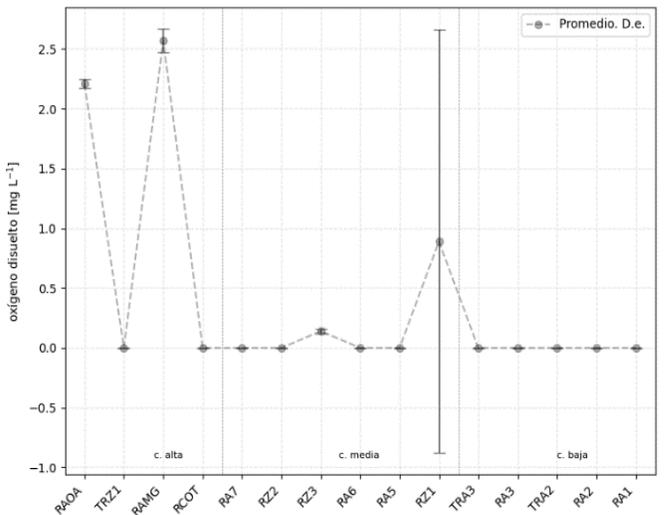
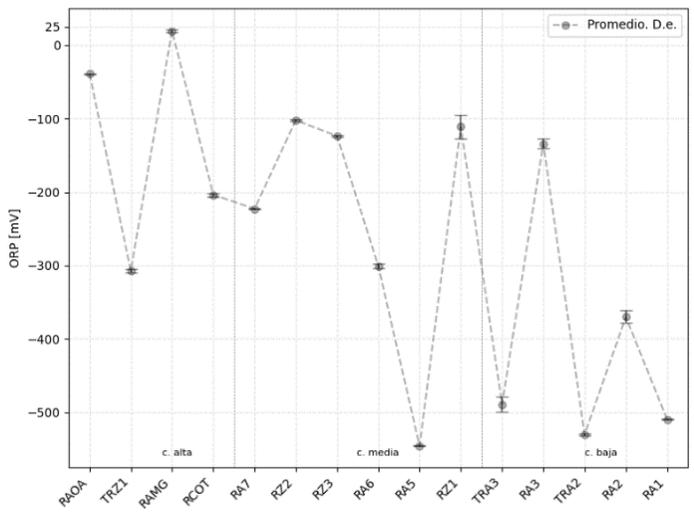
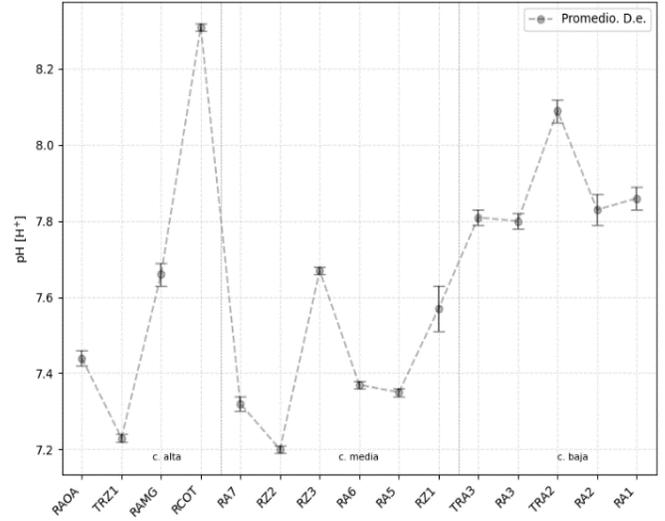
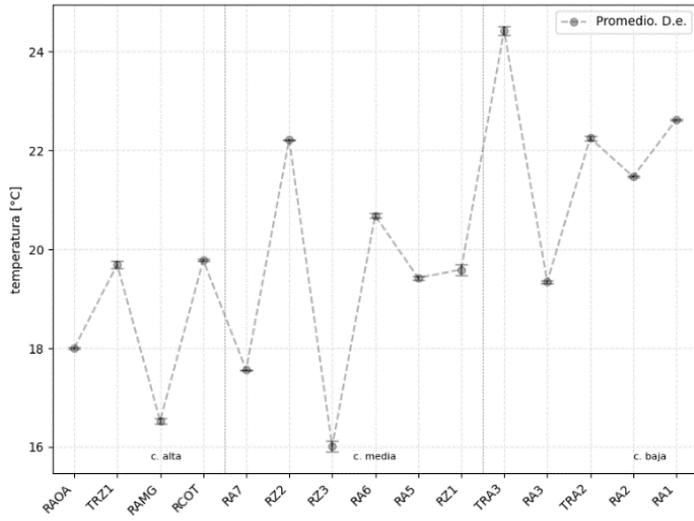


Figura 16. Comportamiento de los parámetros fisicoquímicos medidos en los distintos sitios de muestreo.

El registro *in situ* de los parámetros fisicoquímicos (temperatura y pH) se realizó en nueve muestras de sedimento (Tabla 8).

En el sedimento, la temperatura más alta se registró en la estación RCOT (24.8 °C), resaltando que la coloración del sedimento era negro-azul, debido a que el río aledaño (río Cotzala) presentaba una alta carga de colorante azul, derivado de las descargas de la industria textil; por su parte, el registro más bajo fue de 18.9 °C en el sitio RA3, este lugar se caracterizó por tener sedimentos finos (arcillas de color gris claro), asimismo, se encuentra cercano a una planta de tratamiento.

El pH mostró que todos los sitios se encuentran en el rango de la neutralidad, con una ligera tendencia hacia la acidificación. En este aspecto, el sitio RAOA, mostró un pH de 6.72, mientras que los sitios TRZ1 y RAMG exhiben suelos neutros con pH de 6.98.

**Tabla 8.** *Parámetros fisicoquímicos de las muestras de sedimento recolectadas.*

ID	Sitio	Temperatura [°C]	pH
1	RA1	23.9	6.91
2	RA2	22.93	6.95
3	RA3	18.9	6.89
4	RA5	23.2	6.88
5	TRZ1	24.2	6.98
6	RA7	20.3	6.8
7	RCOT	24.8	6.8
8	RAMG	22.2	6.98
9	RAOA	20.3	6.72

Nota. Se realizó un registro único en cada sitio de muestreo. Precisión de la sonda:  $\pm 0.02$  pH;  $\pm 0.15$  Temperatura [°C].

De igual forma, se registraron los parámetros físicos (altitud, profundidad, ancho del canal y turbidez) de los diferentes sitios de estudios (Tabla 9). La profundidad promedio de la cuenca en temporada de estiaje fue de 71.86 cm (81.54 cm en el río Atoyac y 45.25 cm en el río Zahuapan), por lo que se considera que el río es poco profundo en época de estiaje; por su parte, el ancho de canal promedio fue de 14.68 m (ancho del cauce en el río Atoyac 14.36 m y 14.6 m en el río Zahuapan). En cuanto a la turbidez, los resultados obtenidos no fueron los más precisos, debido a que la mayoría de los sitios de muestreo presentan abundante cobertura vegetal, lo que causó un sesgo en la calibración de la aplicación, debido a que el follaje impide el paso completo de la luz. El Anexo 8 muestra de manera general la descripción realizada en cada sitio de estudio.

**Tabla 9.** *Parámetros físicos medidos en los 15 puntos de muestreo.*

ID	Edo	Clave	Altitud (msnm)	Profundidad (cm)	Ancho del Canal (m)	Turbidez (NTU)	Color (agua)
1	Puebla	RA1	2056	170	14.82	>80±0	Gris Oscuro
2	Puebla	RA2	2108		21.01	-	Café Oscuro
3	Puebla	TRA3	2148	15	18	-	Café-Verde
4	Puebla	TRA2	2119	120	9.62	-	Verde (en el puente) Marrón (en el desagüe)
5	Puebla	RA3	2122	90	33.55	>80±0	Gris claro
6	Tlaxcala	RZ1	2181	52	14.2	19±7	Café-Gris
7	Tlaxcala	RA5	2184	77	15.24	0±1	Café Oscuro
8	Tlaxcala	TRZ1	2406	34	4.52	31±11	Café-Verde
19	Tlaxcala	RA6	2200	63	11.93	0±1	Gris claro
10	Tlaxcala	RZ2	2210	65	16.72	3±1	Café-Verde
11	Tlaxcala	RZ3	2204	30	22.98	6±2	Transparente
12	Tlaxcala	RA7	2226	25	9.75	>80±0	Café-Gris
13	Puebla	RCOT	2280	275	18.5	1±1	Azul turquesa
14	Puebla	RAMG	2399	32	5.63	>80±0	Transparente
15	Puebla	RAOA	2511	30	4	-	Transparente

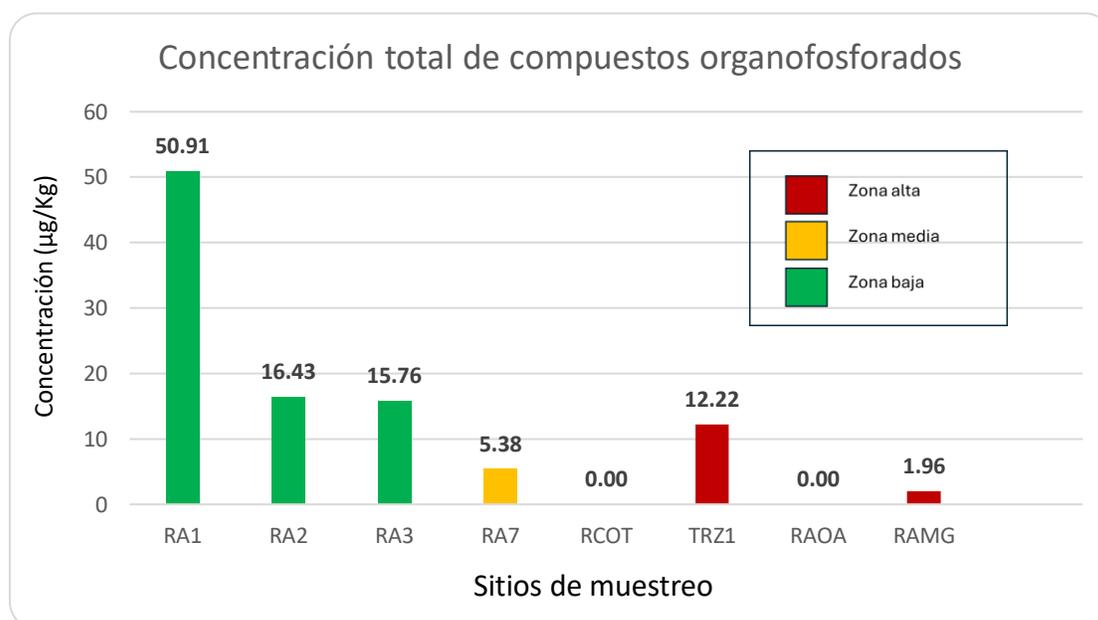
### 3.3 Análisis de laboratorio

#### 3.3.1 Niveles de plaguicidas organofosforados en sedimentos

Se analizaron 11 plaguicidas organofosforados (POF) en los sedimentos colectados durante la época de estiaje. Se observa que los niveles de POF muestran un comportamiento de incremento, conforme se desciende altitudinalmente de la zona alta a la zona baja de la cuenca, siendo las estaciones RA3, RA2 y RA1 las que presentan las mayores concentraciones promedio de plaguicidas (Tabla 10). Cabe resaltar que el sitio TRZ1, también muestra una alta concentración de organofosforados, sin embargo, dicho sitio se ubica altitudinalmente en la zona alta de la cuenca, lugar donde nace el río Zahuapan.

Asimismo, se encontró que seis de los compuestos organofosforados evaluados están por encima del límite de detección: *Ethoprophos*, *Monocrotophos*, *Diazinon*, *Metil Paratión*,

*Malatión y Chlorpyrifos*. El *Monocrotophos* fue el compuesto con mayor presencia dentro del sedimento analizado, y se registró en seis de los ocho sitios de muestreo, los cuales se distribuyen en las zona alta, media y baja de la cuenca, por lo que podemos considerar que dicho plaguicida es ampliamente utilizado en el territorio. La Figura 17 muestra la suma total de los compuestos organofosforados encontrados en el sedimento de cada sitio; se observa que el sitio RA1 presenta la mayor acumulación de plaguicidas entre todos los sitios muestreados con 50.91  $\mu\text{g}/\text{Kg}$ , mientras que los sitios RCOT y RAOA no registran la presencia de plaguicidas.



**Figura 17.** Concentración total de compuestos organofosforados por sitio de muestreo.

**Tabla 10.** Concentración de plaguicidas organofosforados en muestras de sedimento de la CAA.

Sedimento		LD	RA1	RA2	RA3	RA7	RCOT	TRZ1	RAMG	RAOA
Ethoprophos	µg/Kg	0.01	0.62 ± 0.88	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD
Monocrotophos	µg/Kg	0.03	47.80 ± 28.49	12.11 ± 17.13	15.76 ± 3.85	5.38 ± 0.34	<LD	1.90 ± 2.68	1.96 ± 2.78	<LD
Dimetoato	µg/Kg	0.03	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	8.72 ± 12.33	<LD	<LD
Diazinon	µg/Kg	0.01	<LD	3.27 ± 4.63	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD
Chlorpyriphos metil	µg/Kg	0.04	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD
Metil Paratión	µg/Kg	0.02	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD
Malatión	µg/Kg	0.02	2.48 ± 3.51	<LD	<LD	<LD	<LD	1.60 ± 2.27	<LD	<LD
Chlorpyriphos	µg/Kg	0.02	<LD	1.05 ± 1.48	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD
Etil paratión	µg/Kg	0.69	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD
Merphos-Tributylphosphorotrithioite	µg/Kg	0.03	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD
EPN	µg/Kg	0.59	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD
<b>TOTAL</b>		<b>50.91</b>	<b>16.43</b>	<b>15.76</b>	<b>5.38</b>	<b>0.00</b>	<b>12.22</b>	<b>1.96</b>		<LD

Nota. LD es la abreviatura de Límite de Detección.

Los datos se presentan como promedio ± desviación estándar.

### 3.3.2 Metales totales

Se obtuvieron las concentraciones de metales pesados en muestras de agua de nueve sitios de muestreo durante la temporada de estiaje (Tabla 11): RAOA, RAMG, RA7, RA5, RA3, RA1, RZ1, RZ2 y RCOT. Se observa que las concentraciones promedio más altas ( $>0.1$  mg/L) fueron del cobalto (Co), níquel (Ni), cobre (Cu), titanio (Ti) y plomo (Pb). Por su parte, el hierro (Fe), arsénico (As) y plata (Ag) mostraron que sus concentraciones rondan entre los 0.01 y los 0.1 mg/L. Por último, el cromo (Cr), manganeso (Mn), zinc (Zn), cadmio (Cd), antimonio (Sb), bario (Ba) y mercurio (Hg) se encuentran por debajo de los 0.01 mg/L.

Bajo los criterios establecidos en la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua para la 'Protección de la vida acuática' (CONAGUA, 2022), los resultados obtenidos indican que todos los sitios muestreados registraron valores superiores al límite permitido para el plomo (0.03 mg/L). De igual forma ocho de los nueve sitios muestreados (RAMG, RA7, RA5, RA3, RA1, RZ1, RZ2 y RCOT) presentaron concentraciones superiores al índice establecido para el cobre (0.05 mg/L). En este sentido, el sitio RA3 fue el que presentó la mayor cantidad de metales pesados (Cu, As, Ag, Ba, Pb y Hg) que rebasan los criterios para la protección de la vida acuática, seguido del sitio RA1 (Ni, Cu, Cd y Pb) y RZ1 (Cu, As, Ag y Pb).

Al comparar los valores encontrados, respecto a los límites para metales pesados en agua residual en cuerpos de agua superficial establecidos en la NOM-001-Semarnat-2021 (SEMARNAT, 2022), encontramos que los sitios de monitoreo RA3 y RZ1 rebasaron los límites permitidos para arsénico (0.2 mg/L) y mientras que los sitios RA3, RA1 y RCOT rebasaron el índice de plomo (0.2 mg/L).

**Tabla 11.** Concentraciones promedio de metales en muestras de agua superficial de la CAA.

	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	As	Ag	Cd	Sb	Ba	Ti	Pb	Hg	
SLRS-6	mgL-1	0	0	0	0.002	0.002	0.085	0.085	0	0	0.001	0.001	0.024	0.024	0.002	0.002	0.001
LD.	mgL-1	0	0	0	0	0	0.001	0.001	0	0	0	0	0	0	0	0	0.009
<b>RA1</b>	mgL-1	0.007	0.002	0.002	0.279	0.279	0.623	0.623	0	0	0.006	0.006	0.001	0.001	0.268	<b>0.263</b>	<L.D.
<b>RA3</b>	mgL-1	0.007	0.004	0.004	0.173	0.245	0.455	0.381	0	<b>0.249</b>	0.251	0.003	0.002	0.01	0.216	<b>0.208</b>	0.0014
<b>RZ1</b>	mgL-1	0.007	0.003	0.001	0.108	0.441	0.435	0.101	0	<b>0.258</b>	0.259	0.002	0.005	0.006	0.11	0.108	<L.D.
<b>RA5</b>	mgL-1	0.007	0.003	0.002	0.102	0.221	0.446	0.653	0	0.036	0.088	0.002	0	0.002	0.162	0.16	<L.D.
<b>RZ2</b>	mgL-1	0.008	0.003	0.001	0.122	0.24	0.283	0.164	0	0.068	0.07	0.003	0.008	0.009	0.143	0.142	<L.D.
<b>RA7</b>	mgL-1	0.008	0.005	0.022	0.072	0.122	0.235	0.33	0	0.137	0.139	0.002	0.004	0.025	0.214	0.193	<L.D.
<b>RCOT</b>	mgL-1	0.009	0.005	0.002	0.08	0.053	0.135	0.11	0	0.045	0.048	0.003	0.006	0.008	0.236	<b>0.295</b>	<L.D.
<b>RAMG</b>	mgL-1	0.005	0.003	0.001	0.081	0.081	0.17	0.339	0	0.036	0.087	0.001	0.002	0.008	0.05	0.049	<L.D.
<b>RAOA</b>	mgL-1	0.007	0.004	0.008	0.005	0.005	0.038	0.039	0.001	0.012	0.013	0.001	0.003	0.01	0.082	0.082	<L.D.

Nota. LD es la abreviatura de Límite de Detección; SLRS-6, es el estándar de referencia de agua de río certificado para evaluar metales traza y otros constituyentes. Los valores marcados con color rojo son valores por arriba del límite permisible establecido en la NOM-001-SEMARNAT-2021.

### 3.4. Análisis de componentes principales (ACP)

Con la finalidad de determinar cuáles fueron los parámetros fisicoquímicos con mayor varianza e identificar patrones subyacentes de los datos evaluados en cada sitio de monitoreo, se aplicó el Análisis de Componentes Principales.

Primero se confirmó la idoneidad de los datos para el análisis de componentes principales mediante las pruebas de Kaiser-Mayer-Olkin (KMO) y de esfericidad de Barlett. La prueba KMO emitió un valor de adecuación de muestreo de **0.712** (Tabla 12), indicando un ajuste satisfactorio para realizar el análisis de componentes principales. Por su parte, la prueba de esfericidad de Barlett indicó un valor de significancia de **0.00**, confirmando que existen correlaciones significativas entre las variables de estudio y respaldando la idoneidad de la estructura para realizar el análisis factorial (Tabla 12).

**Tabla 12.** Prueba de KMO y Barlett

<b>Medida de adecuación muestral KMO</b>		0.712
Chi-cuadrado aproximado		741.052
<b>Prueba de esfericidad de Barlett</b>	Gl.	21
	Sig.	0.00

El ACP se aplicó a los datos obtenidos de los quince sitios de muestreo y se consideró que para obtener una mejor interpretación de los datos en la matriz de correlaciones y de factores, se aplicó el método de centroide rotado Varimax, con lo cual se garantizó encontrar una estructura de factores más significativa al resaltar las relaciones más fuertes entre las variables.

Los resultados arrojados por el ACP (Tabla 13) señalaron que los primeros dos autovalores o factores son considerados como significativos, debido a que la suma de ambos explica conjuntamente el 82.107 % de la varianza total de los datos, por lo que se seleccionaron estos dos factores para reducir la dimensionalidad del problema de 7 a 2 componentes principales.

**Tabla 13.** *Varianza total explicada*

Componente	Autovalores iniciales			Sumas de cargas al cuadrado de la extracción		
	Total	% de varianza	% acumulado	Total	% de varianza	% acumulado
1	4.520	64.568	64.568	4.520	64.568	64.568
2	1.228	17.539	82.107	1.228	17.539	82.107
3	0.633	9.045	91.152			
4	0.369	5.277	96.428			
5	0.249	3.562	99.990			
6	0.001	0.009	99.999			
7	0.000	0.001	100.000			

Método de extracción: análisis de componentes principales.

Las cargas factoriales de los parámetros fisicoquímicos por cada componente con rotación se muestran en la Tabla 14 y la Figura 18. El CP1 constituye el 64.57 % de la varianza total y está asociado con el pH, la conductividad eléctrica, sólidos totales disueltos y la salinidad, dichas variables mantienen una correlación fuerte positiva entre ellas (Tabla 14). El CP2 integra el 17.54 % de la varianza total y lo conforma la temperatura, el ORP y el oxígeno disuelto, manteniendo estas dos últimas variables una correlación fuerte negativa con la temperatura (Tabla 14).

La Figura 19 muestra el comportamiento que siguen los parámetros fisicoquímicos de cada sitio de muestreo dentro del ACP. Como se puede observar, hacia el primer cuadrante se encuentran los sitios RA1, RA2, TRA2 y TRA3, los cuales se ubican en la zona baja de la cuenca (cercanos a la Presa Valsequillo, sitio donde descargan sus aguas los ríos Atoyac y Zahuapan), y registran los valores más altos de temperatura, ORP, pH, CE, TDS y salinidad.

Por su parte, en el segundo cuadrante se ubican los sitios RA5, TRZ1, RA6 y RZ2, los cuales presentaron valores similares de parámetros fisicoquímicos y se caracterizan por posicionarse geográficamente antes de la confluencia entre los ríos Atoyac y Zahuapan.

En el tercer cuadrante se ubicaron los sitios RAOA y RAMG, sitios que presentaron valores de parámetros fisicoquímicos dentro del rango de la buena calidad del agua (zona alta de la cuenca). Los sitios RA7, RZ1, RZ3 y RA3 que se distribuyen entre el tercer y cuarto cuadrante, presentan una tendencia similar de ORP. Y, por último, el sitio RCOT se ubica en el cuarto cuadrante, diferenciándose del resto de los sitios, por su alto valor de pH (8.31), además de tener altas concentraciones de CE, TDS y salinidad.

**Tabla 14.** *Matriz de componente rotado*

Variables	Componente	
	1	2
Temperatura	0.230	0.791
Potencial de Hidrógeno	0.885	0.052
Potencial de Oxidación-Reducción	-0.163	-0.858
Oxígeno Disuelto	-0.235	-0.814
Conductividad Eléctrica	0.853	0.495
Sólidos Disueltos Totales	0.867	0.460
Salinidad	0.875	0.443

Método de extracción: análisis de componentes principales.

Método de rotación: Varimax con normalización Kaiser.<sup>a</sup>

*a. La rotación ha convergido en 3 iteraciones.*

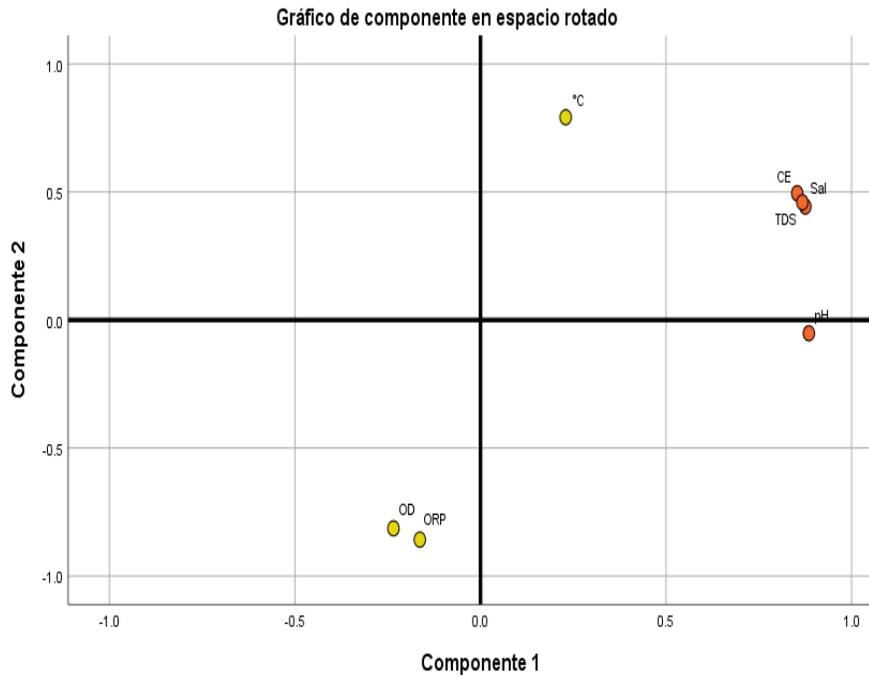


Figura 18. Distribución de las variables fisicoquímicas de acuerdo con el análisis de componentes principales.

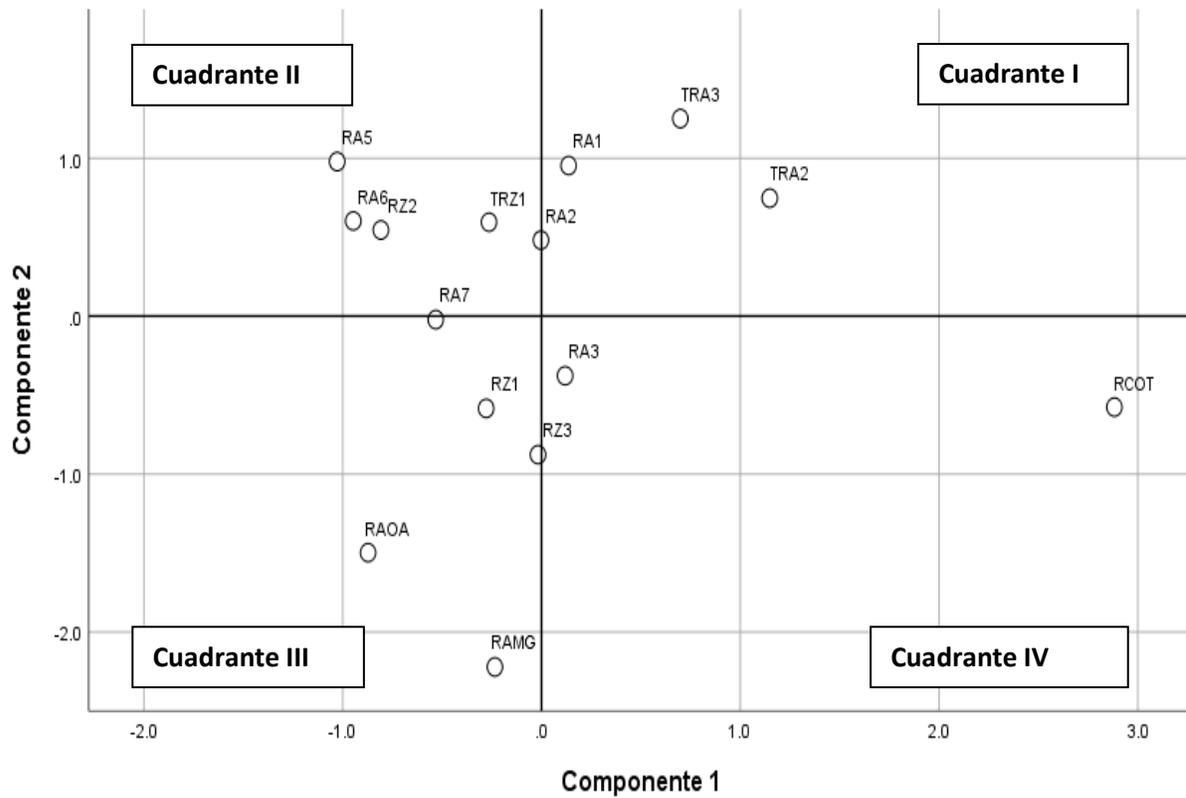
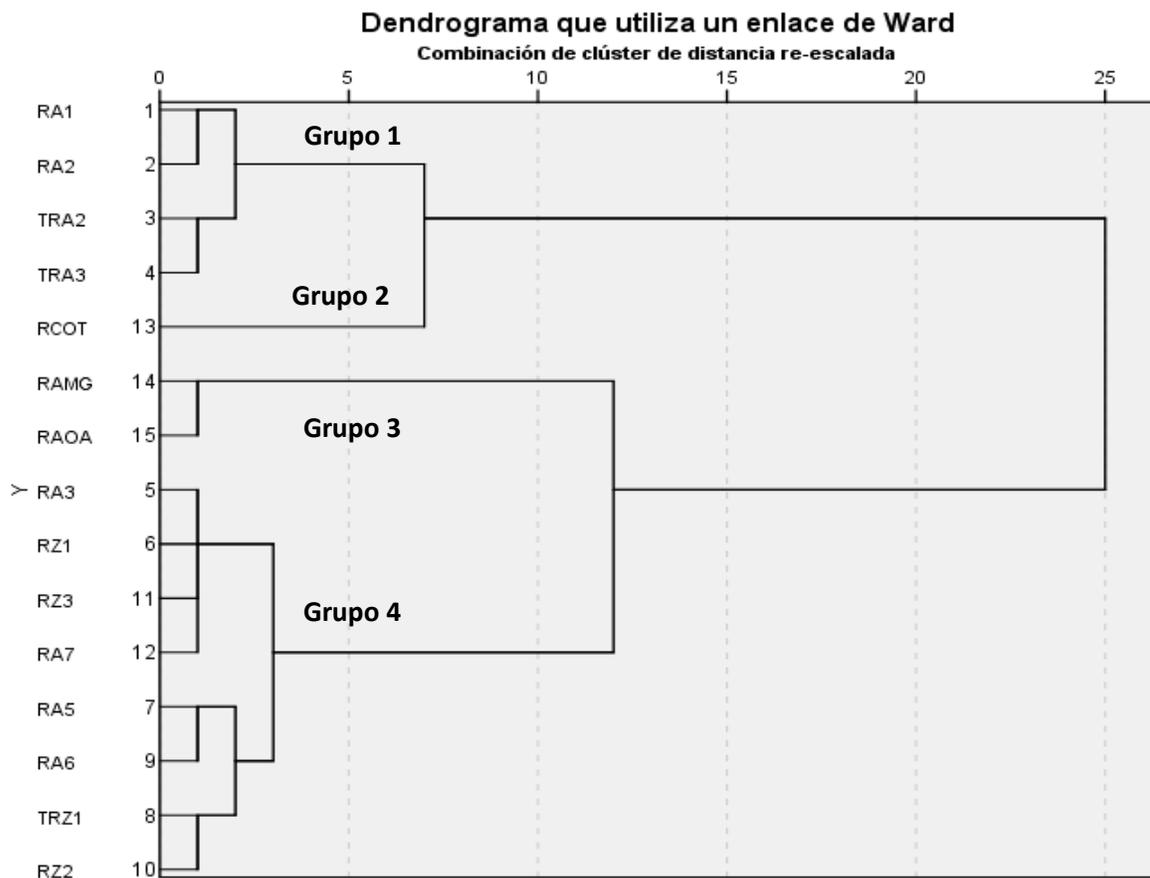


Figura 19. Distribución de los sitios de muestreo de acuerdo con los factores predominantes en cada componente.

### 3.4.3. Análisis de conglomerados jerárquicos

El análisis de conglomerados jerárquicos fue aplicado para identificar asociaciones entre el comportamiento de los sitios de monitoreo. En el Anexo 9 se muestra la matriz de proximidades o matriz de distancia (distancia euclidiana al cuadrado), la cual representa que tan parecidos son los sitios de monitoreo respecto a la distancia que existe entre ellos. Asimismo, se obtuvo la representación gráfica del dendrograma (Figura 20), el cual se compone de una primera columna en la que se identifican los casos (sitios de estudio), y una primera fila que identifica las distancias (el software SPSS transforma las medidas de distancia a una escala de 0 a 25).



**Figura 20.** Conglomerado jerárquico de los sitios de monitoreo en la cuenca Atoyac - Zahuapan, en relación con los parámetros fisicoquímicos evaluados.

Teniendo en cuenta que a menor distancia los conglomerados son más homogéneos, se decidió establecer el proceso de análisis en la distancia 5, obteniendo así cuatro grupos o

clusters: Grupo 1, Grupo 2, Grupo 3 y Grupo 4. El Grupo 1 se sitúa a la izquierda del gráfico y fue el primero en formarse debido a que posee la menor distancia, está formado por dos subgrupos que incluyen a los sitios: RA1, RA2, TRA2 Y TRA3.

El Grupo 2 exhibe al sitio RCOT como un elemento aislado, pero que refleja un alto grado de similitud derivado de sus características fisicoquímicas con las estaciones del Grupo 1. Por su parte el Grupo 3 encontró patrones de similitud entre los sitios de monitoreo RAMG y RAOA. Finalmente, el Grupo 4 que se conforma de tres subgrupos y está integrado por los sitios RA3, RZ1, RZ3, RA7, RA5, RA6, TRZ1 y RZ2. La Tabla 15 muestra la estructura del dendrograma organizada en grupos y subgrupos.

**Tabla 15.** *Grupos resultantes del análisis de conglomerados jerárquicos.*

<b>Grupos</b>	<b>Subgrupos</b>	<b>Sitios de estudio</b>
Grupo 1	Grupo 1-A	RA1, RA2
	Grupo 1-B	TRA2, TRA3
Grupo 2		RCOT
Grupo 3		RA-MG, RA-OA
Grupo 4	Grupo 4-A	RA3, RZ1, RZ3, RA7
	Grupo 4-B	RA5, RA6
	Grupo 4-C	TRZ1, RZ2

Los grupos constituidos cumplen patrones que reflejan el estado de la calidad del agua de acuerdo con la ubicación de los sitios de monitoreo dentro de la cuenca; la Tabla 16 resume los valores promedio de los parámetros fisicoquímicos de cada grupo formado.

Dicho lo anterior, el Grupo 1 incluye sitios de muestreo ubicados en la parte baja de la cuenca y presenta los valores más altos de temperatura y de ORP; el Grupo 3 muestra dos sitios de monitoreo que se caracterizan por estar en la parte alta y al noroeste de la cuenca (donde nace el río Atoyac), este grupo presenta buenas condiciones de OD. Por su parte el Grupo 4 encontró similitudes entre ocho sitios de estudio, los cuales se ubican en la parte central de la cuenca y coinciden con las zonas urbanas, con excepción del sitio TRZ1 que se localiza al noroeste de la cuenca (donde nace el río Zahuapan). Por último, el Grupo 2 muestra de manera aislada al sitio RCOT, el cual corresponde al Río Cotzala, afluente tributario que desemboca en el Río Atoyac en su parte alta, el cual presentó los niveles más altos de contaminación en comparación con el resto de los grupos.

**Tabla 16.** Promedios de las variables fisicoquímicos analizados por los grupos resultantes del ACJ.

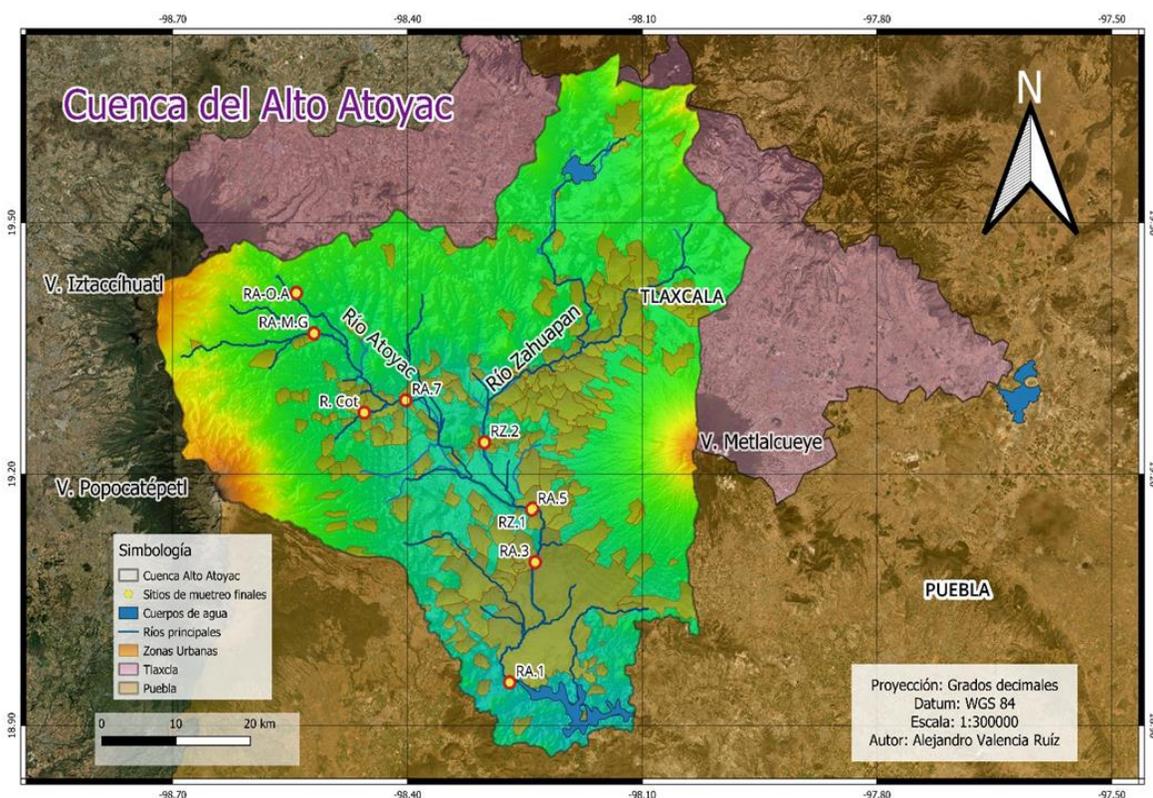
Ward Method	Media						
	Temperatura	Potencial de Hidrógeno	Oxido-Reducción	Oxígeno Disuelto	Conductividad Eléctrica	Sólidos Totales Disueltos	Salinidad
G1	22.69	7.89	-474.79	.00	1326.33	691.49	.694
G2	19.77	8.31	-203.63	.00	2197.00	1219.33	1.26
G3	17.26	7.54	-9.60	2.39	157.33	92.66	.09
G4	19.31	7.43	-230.92	.127	754.05	422.48	.417
Total	19.97	7.63	-264.62	.387	923.29	503.37	.503

Al considerar una mayor distancia de re-escala (nivel de distancia 12), podemos observar que el Grupo 3 y el Grupo 4 se unen formando un nuevo clúster (Figura 21). Dicha unión integra a los sitios de la parte alta de la cuenca con los de la parte media (a un grado medio de similitud), exhibiendo que, en el proceso natural de drenaje en la cuenca, la calidad del agua comienza a ser alterada a razón de encontrarse con centros urbanos. De igual manera, se observa que a un nivel de re-escala 6, se combinan los Grupos 1 y 2; estos grupos se caracterizan por estar integrados por sitios ‘receptores’ que integran las aguas finales de diversos afluentes.

**Tabla 17.** Sitios considerados para pertenecer a una red de monitoreo permanente de la calidad del agua en la CAA.

Grupos	Subgrupos	Sitios de estudio	Ubicación geográfica (UTM)	
			Este (X)	Norte (Y)
Grupo 1	Grupo 1-A	RA1	576920.6988	2095608.025
Grupo 2		RCOT	557244.1917	2131167.598
Grupo 3		RA-OA	548086.6403	2146949.523
		RA-MG	550472.5113	2141610.7
		RA3	580291.0835	2111513.999
Grupo 4	Grupo 4-A	RZ1	579938.8284	2118600.798
		RA7	562810.7979	2132811.964
	Grupo 4-B	RA5	579770.0771	2118446.37
		Grupo 4-C	RZ2	573395.8368

Con base en los resultados obtenidos en las pruebas de estadística multivariada (Análisis de componentes principales y Conglomerados jerárquicos), podemos observar que los sitios seleccionados durante el estudio prospectivo proporcionan un alto grado de representatividad del estado de los ríos, ya que se puede observar qué factores (variables fisicoquímicas) influyen en mayor o menor medida en cada sitio de estudio, además de conocer su grado de similitud en cuanto a calidad del agua. En tal sentido, se seleccionaron nueve sitios de monitoreo en función de sus características y resultados, los cuales planteamos, deben ser considerados para incorporarse a una red de sitios de monitoreo de la calidad del agua de los ríos Atoyac y Zahuapan. Dichos sitios se muestran en la Tabla 17 y Figura 21.



**Figura 21.** Macrolocalización de los sitios considerados para la red de monitoreo de la calidad del agua en la CAA. Elaboración propia.

#### IV. DISCUSIÓN

Bajo el propósito de diseñar una red de estaciones de monitoreo que tenga injerencia en la gestión hídrica y en la evaluación de la calidad del agua de los ríos Atoyac y Zahuapan y que

dé certidumbre a las comunidades involucradas, resulta esencial incorporar la experiencia y resultados de todas las instituciones que han estudiado dicho fenómeno, además de conocer la situación actual de las competencias técnicas de carácter ambiental (laboratorios técnicos) que existen dentro de la zona de estudio. Lo anterior permitirá establecer un sistema de vigilancia ambiental, cuya fortaleza sea el trabajo colaborativo entre instituciones y el intercambio de información técnica y confiable (Martínez de Escobar y Laines, 2012).

Dado que en la actualidad no existen trabajos que evalúen el estado de las capacidades técnicas analíticas que actúan dentro de la zona de estudio, nos dimos a la tarea de integrar un directorio, tomando como referencia el estudio de Martínez de Escobar y Laines del (2012), con la finalidad de generar un antecedente que reconozca la competencia técnica en la región y permita en un futuro integrar modelos de planeación estratégica y redes de apoyo para mantener una red de monitoreo pública- privada (Martínez de Escobar y Laines, 2012). Resulta necesario mencionar, que el alcance de esta investigación no permitió conocer a profundidad el propósito de cada uno de los laboratorios pertenecientes a las diferentes instituciones públicas o gubernamentales, por lo que se contabilizaron de manera general como organismos que por sus características pueden ser capaces de emitir análisis y juicios sobre las condiciones fisicoquímicas del agua.

El presente trabajo identificó 37 laboratorios analíticos dentro de los Estados de Puebla y Tlaxcala que poseen los elementos necesarios para generar información sobre la calidad del agua (conocimientos teóricos, técnicas analíticas, operación de equipos, preparación y toma de muestras, validación de métodos e interpretación de resultados). Lo anterior refleja que en la actualidad dentro de la cuenca se poseen los recursos en términos de conocimiento y tecnología para participar en la integración de un sistema de vigilancia ambiental.

La investigación señaló que existen 22 empresas privadas que ofertan su trabajo dentro de la región, lo que sugiere que hay el suficiente potencial para generar colaboraciones entre el sector público y privado en términos de implementación de estrategias de monitoreo y

gestión de la calidad del agua. Así pues, se encontró que son 11 los laboratorios (10 en Puebla y 1 en Tlaxcala) que se encuentran acreditados por la EMA bajo la norma NMX-EC-17025-IMNC-2018 (EMA, 2022) y dos laboratorios aprobados por la EMA que se ubican en el estado de Puebla, pero que no aparecen en el listado oficial de la CONAGUA (2020). Estos laboratorios resultan importantes dentro de la injerencia en materia de agua para dicho estado, ya que son organismos que trabajan de manera conjunta con el gobierno estatal: *'Laboratorio de calidad del agua y monitoreo de la Comisión Nacional del Agua, Dirección Local Puebla'* y *'Concesiones Integrales, S.A. de C.V.'* (empresa paraestatal que otorga el servicio de agua, drenaje y saneamiento en Puebla).

Puesto a que no sólo se verificó el listado de laboratorios aprobados por la EMA, sino que también se revisaron las técnicas bajo las que cada laboratorio está acreditado, podemos afirmar que en su conjunto dichos laboratorios son capaces de llevar a cabo pruebas analíticas para medir 122 parámetros diferentes. Dichas pruebas están alineadas a las normativas nacionales y en algunos casos están bajo estándares internacionales como los de la EPA, lo que representa un alto nivel de competencia y rigor en los procedimientos de monitoreo ambiental en la región. En definitiva, esta capacidad de análisis (parámetros fisicoquímicos *in situ* y pruebas analíticas en laboratorio) puede responder de manera adecuada a los mecanismos necesarios para evaluar la calidad del agua de los ríos, ya que en la actualidad la CONAGUA a través de la RENAMECA analiza 46 parámetros bajo pruebas analíticas de acuerdo con la Declaratoria Oficial (DOF, 2011). En este sentido, podemos concluir que en su conjunto las entidades que poseen los recursos técnicos y analíticos son capaces de aportar la información necesaria para integrar un registro de parámetros fisicoquímicos y contaminantes del agua del río, con lo que se podrían identificar tendencias de cambio y, por ende, integrar un sistema de vigilancia ambiental a largo plazo.

En cuanto a instituciones de carácter académico, se identificaron a 15 universidades (13 en Puebla y dos en Tlaxcala), las cuales son fundamentales para promover la investigación científica y tecnológica del agua (oferta académica, laboratorios para la docencia e investigación y en algunos casos de institutos de investigación), ya sea con fines de colaboración o económicos interrelacionados. Asimismo, dentro del sector gubernamental

existen dos entidades que cuentan con laboratorios analíticos de carácter ambiental. En su conjunto, las instituciones de carácter público y académico representan un fuerte soporte institucional, destacando la participación de las entidades académicas como espacios neutrales y abiertos al diálogo en pro de impulsar la investigación y la educación en torno a la situación socioambiental que se vive en la cuenca.

Es necesario hacer énfasis en que existe una distribución desigual de las capacidades analíticas, debido a que en el estado de Puebla se ubican el 86.5% de las instituciones evaluadas en este estudio (32 entidades), mientras que en Tlaxcala se ubica el 13.5 % (cinco entidades). La disparidad entre la distribución de las capacidades analíticas refleja las diferencias entre la superficie territorial (Puebla 34,290 km<sup>2</sup> y Tlaxcala 4062 km<sup>2</sup>), el número de población (Puebla 6,583,278 habitantes y Tlaxcala 1,286,462 habitantes) y los modelos de desarrollo económico que sigue cada estado. Lo anterior propicia que se disponga de manera diferente de los recursos económicos para el fortalecimiento y desarrollo de instituciones académicas, centros de investigación y organismos gubernamentales de índole ambiental, así como prioridades políticas en el ámbito ambiental. De tal manera, resulta lógico que en el estado de Puebla existan mayores facilidades para la generación de empresas que oferten análisis ambientales y captación de recursos humanos en esta área, al ser uno de los estados de México con mayor crecimiento económico (Secretaría de Economía, 2022).

Finalmente, la limitación principal de este ejercicio se encuentra en la dependencia de servidores web para ubicar a la mayor cantidad de organismos con capacidades analíticas para evaluar las condiciones de la calidad del agua. Si bien la búsqueda en la base de datos de la CONAGUA y de la EMA arroja resultados precisos y fiables, los datos sobre el resto de las entidades privadas, en su mayoría empresas consultoras ambientales o gestores prestadores de servicio, queda sujeta a la interpretación cuidadosa de la información encontrada en sus sitios web, debido a que los servicios que ofrecen no se encuentran formalmente ante la EMA. Así y para complementar esta información, resulta pertinente realizar un estudio más detallado para validar el estado actual de las entidades académicas y de las empresas privadas que no están acreditadas por la EMA y en su defecto incorporar

o eliminar a las entidades que hagan falta. Esta información es de gran relevancia considerando las necesidades de vigilancia ambiental en la zona afectada por la contaminación de los cuerpos de agua subterráneos y superficiales de la cuenca.

El evaluar los distintos parámetros fisicoquímicos es un procedimiento crucial para poder emitir un juicio sobre la calidad del agua y monitorear la salud de un ecosistema. En vista de ello, la presente tesis se enfocó en reunir información sobre la calidad del agua de los ríos Atoyac y Zahuapan, revisar las zonas en donde se han llevado a cabo muestreos y a través de un levantamiento prospectivo y de verificación en campo, determinar los sitios de monitoreo más propicios para recomendar una red de estaciones de monitoreo permanente.

Existen diversos antecedentes en donde se ha evaluado la calidad del agua en la cuenca y que se caracterizan por responder a los objetivos propios de cada investigación (metodología y alcance), los cuales, en su mayoría no están orientados a establecer un sistema de monitoreo representativo a largo plazo y que permita entender la dinámica de los ríos y sus tendencias de cambio. En consecuencia, hasta el momento no existe una propuesta de monitoreo que concilie y de certidumbre a las comunidades afectadas por la contaminación y que han denunciado el avance del deterioro. Cabe mencionar que el presente trabajo coincide con la reciente publicación del '*Primer informe estratégico del CONAHCYT para la comprensión de la problemática socio ambiental de la Cuenca Alta del Atoyac*' en donde se recomienda implementar una red de vigilancia ambiental a largo plazo (CONAHCYT, 2023).

Considerando lo anterior y sustentándolo bajo los métodos descritos para elaborar una red de monitoreo, las cuales precisan del reconocimiento espacial de la zona de estudio (Moreno *et al.*, 2008), se realizaron recorridos en los ríos Atoyac y Zahuapan y se colectaron datos *in situ* de las variables fisicoquímicas de 15 sitios, de acuerdo con la capacidad técnica del equipo de monitoreo ambiental. Dado que se trató de un estudio prospectivo y de reconocimiento, los parámetros fisicoquímicos considerados (pH, conductividad eléctrica, sólidos disueltos totales, salinidad, temperatura, potencial de óxido reducción y oxígeno

disuelto) resultaron idóneos para evaluar de manera general el estado actual de los ríos, y hacer inferencias sobre los procesos que influyen en la calidad del agua. Según Becq (1994), el seguimiento de los parámetros fisicoquímicos *in situ* o variables de calidad de efectos agregados, resulta óptimo para entender el comportamiento de un cuerpo de agua y simplificar los procesos de monitoreo.

Cabe resaltar que los datos obtenidos en este estudio fueron resultado de una valoración *in situ*, la cual representa las condiciones fisicoquímicas del agua en tiempo de estiaje; asimismo, permitieron verificar en campo el comportamiento de los resultados reportados en los diferentes estudios históricos que se consultaron en este trabajo. Dichos resultados mostraron una variedad de condiciones a lo largo de la cuenca, la cual está sujeta a la influencia fisiográfica, la geología y la influencia del desarrollo urbano e industrial. Un claro ejemplo de lo anterior se observó en los resultados obtenidos en los sitios RAOA y RAMG (zona alta del río Atoyac), los cuales presentan aparentemente una condición libre de contaminantes urbano-industriales, idea que se argumenta por los valores de los parámetros fisicoquímicos evaluados en dichos sitios (Tabla 7), mientras que los resultados obtenidos en los sitios de la zona baja de la cuenca como el sitio RA5, reflejan malas condiciones en su calidad del agua (Tabla 7), ya que posiblemente sus parámetros fisicoquímicos se vean influenciados por la incorporación de las aguas residuales procedentes de la zona urbana e industrial que ahí se concentra (Mora *et al.*, 2021; CONAGUA y SEMARNAT, 2023).

De acuerdo con los resultados de las condiciones fisicoquímicas del agua, el estudio arrojó que la temperatura varía de acuerdo con las zonas de influencia antropogénica (Tabla 7 y Anexo 5), teniendo ésta valores más altos en la zona de influencia de los asentamientos urbanos e industriales (dentro de la zona media y baja de la cuenca se ubica la zona metropolitana Puebla - Tlaxcala). Es probable que los cambios térmicos también respondan a los cambios altitudinales. La cuenca alta del río Atoyac se caracteriza por tener un clima semifrío subhúmedo con temperaturas que van de 10 °C a 14 °C (temperatura promedio anual), condiciones abióticas que afectan la capacidad calorífica del agua, así como que geográficamente dicha zona no forma parte de la zona metropolitana (INEGI, 2019). Por su

parte, la cuenca media y la baja presentan un clima templado subhúmedo, con temperaturas que van de 14 °C a 16 °C (temperatura promedio anual) (INEGI, 2019); estas zonas de la cuenca reciben en mayor medida la descarga de aguas residuales derivadas de los procesos industriales y urbanos (ver Anexo 3), lo que altera los patrones térmicos del agua de los ríos. Cabe considerar que la zona metropolitana de Tlaxcala-Puebla además de concentrar los principales asentamientos urbanos, también concentra las actividades industriales (Secretaría de Economía, 2022). En este sentido, Martínez (2016) señala que el incremento de la temperatura puede deberse a la influencia de la radiación térmica de la zona urbana (ver Anexo 5) y también al vertimiento de descargas de agua residual con alto grado de materia orgánica, así como a los procesamientos industriales que generan altas temperaturas en las descargas. Si bien, en este estudio se pudo observar un aumento en la temperatura del agua superficial de los sitios muestreados, dichas temperaturas no rebasan la meta de 35 °C establecida para este parámetro en la Declaratoria de clasificación de los ríos Atoyac y sus afluentes (DOF, 2011).

En el caso del oxígeno disuelto, los resultados muestran que 11 de 15 sitios de muestreo presentaron condiciones anóxicas (0 mg/L de OD), mientras que el resto de las estaciones reportaron concentraciones de OD por debajo del límite de 5mg/L requerido para la protección de la vida acuática (condiciones de hipoxia), según la Ley Federal de Derechos en materia de Aguas Nacionales (CONAGUA, 2022). Dentro de los sitios que presentaron concentraciones de OD, el sitio de muestreo RAOA presentó flora y fauna acuática, dicha estación se ubica en la parte alta del río Atoyac, al noroeste de la cuenca; zona que se caracteriza por no tener actividad industrial y baja actividad antrópica.

Dentro del flujo del río Zahuapan las estaciones RZ1 y RZ3 presentaron bajas concentraciones de OD (0.89 mg/L y 0.14 mg/L respectivamente), valores que se ubican en el rango de concentración de OD reportada por la Comisión Estatal del Agua del Estado de Tlaxcala (2012, citada por Muñoz *et al.*, 2015) para el río Zahuapan (0 a 2.5 mg/L). La ubicación de las estaciones anteriores corresponde a la zona media de la cuenca, sitios en donde existe influencia de zonas urbanas e industriales (CONAHCYT *et al.*, 2023).

Al igual que muestran los reportes del Bravo *et al.* (2015), Pérez *et al.* (2018) y Mora *et al.* (2021), nuestros resultados verifican las condiciones anóxicas que prevalecen en el río Atoyac (Tabla 7). Las consecuencias de la prevalencia de ambientes anóxicos es la pérdida de las condiciones para sostener la vida acuática, mantener los ciclos biogeoquímicos necesarios para los procesos de biodegradación de nutrientes y la asimilación de la materia orgánica (Manahan, 2007).

En relación con el potencial de óxido-reducción, los resultados mostraron que en 14 de 15 estaciones de muestreo los valores fueron negativos, lo que indica ambientes reductores (Wetzel, 2001; Ibáñez *et al.*, 2013). Como se ha señalado en estudios previos, este comportamiento es derivado de procesos anaeróbicos asociados a la acumulación de materia orgánica e inorgánica en el río (Martínez *et al.*, 2017). Dichos ambientes promueven la descomposición de materia orgánica por bacterias anaerobias y alteran la solubilidad de ciertos iones, lo que a su vez favorece la producción de iones ferrosos ( $\text{Fe}^{2+}$ ), sulfuro de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{S}$ ), amonio ( $\text{NH}_4^+$ ),  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$  y otras sustancias producidas por efectos de la descomposición de materia orgánica, que en altas concentraciones pueden llegar a ser tóxicos (Wetzel, 2001; Ibáñez, 2013; Flores, 2017) y que además promueven la emisión de compuestos orgánicos volátiles.

Únicamente en el sitio RAMG se observó un ORP positivo, indicando tendencias hacia la oxidación, por lo que podemos inferir que al ser uno de los sitios más conservados (mejores condiciones de calidad del agua, cobertura de vegetación riparia y macrófitas, y presencia de fauna acuática como anfibios y reptiles) y a la fisiografía de la zona, existen las condiciones para el intercambio de oxígeno (atmósfera – agua).

Un caso importante para considerar, lo encontramos en el sitio RAOA, el cual también es un sitio con buenas condiciones de calidad del agua, a pesar de presentar un valor relativamente bajo de oxígeno disuelto (2.21 mg/L). Sin embargo, también se registró un valor de ORP negativo (-38.77 mV). En este sentido, dicho sitio de monitoreo coexiste con un criadero de truchas que se ubica a menos de un kilómetro río arriba, lo que podría reflejar que la incorporación de materia orgánica derivada de los desechos orgánicos de las

truchas está promoviendo el consumo de oxígeno en el sistema y generando condiciones reductoras. Como factor de calidad del agua, se indica que el ORP en un cuerpo de agua dulce debe oscilar entre 200 y 300 mV, mientras que en una descarga de tipo industrial debe encontrarse entre 1 y 20 mV (Alley *et al.*, 2000 citados por Soledad, 2013).

De igual manera los niveles de pH encontrados en todos los sitios muestreados tuvieron una tendencia hacia la alcalinidad, lo cual coincide con los diversos reportes analizados para este trabajo (Martinez *et al.*, 2017). De la misma manera, hay que considerar a los procesos naturales como factores que alteran el pH del agua, ya que la disolución de minerales como silicatos y carbonatos provenientes de la geología dominante de la zona (roca ígnea extrusiva del periodo neógeno y suelos aluviales del periodo cuaternario, respectivamente), también son responsables de que el agua de los ríos Atoyac y Zahuapan, sean alcalinos (Mora *et al.*, 2021). Como indicador de calidad del agua, el pH registrado en todos los sitios se encuentra dentro del rango establecido en la NOM-001-SEMARNAT-2021 (SEMARNAT, 2022), la cual establece un intervalo de entre 6 a 9 pH.

Dentro de los resultados obtenidos, el sitio RCOT registró el valor más alto de pH 8.3; dicho sitio se localiza al noroeste de la cuenca del río Atoyac, zona en donde existe una amplia red industrial de industria textil que descarga sus aguas residuales en afluentes como el río Cotzala (CONAHCYT *et al.*, 2023). De igual manera, se reportó en el 'Informe diagnóstico del Río Atoyac' (CONAGUA y SEMARNAT, 2023) que algunos sitios de monitoreo de la RENAMECA que se ubican al noreste de la cuenca (Zona 3 de acuerdo con la zonificación de la CONAGUA) presentaron valores de pH >8.5, mostrando como ejemplo el caso del río Xochiac (afluente del río Atoyac). Por otro lado, el trabajo de Mora *et al.* (2021) también confirma que, en esta zona de la cuenca, a la que ellos nombraron 'Zona 2: Río Atoyac', presenta altos valores de alcalinidad, registrando un máximo de pH 8.7.

En nuestro estudio, encontramos que los valores de pH tienden a aumentar conforme se supera la zona de confluencia de los ríos Atoyac y Zahuapan y se hacen más cercanos a la 'Presa Valsequillo'. Tal es el caso de los sitios TRA3, TRA2, RA2 y RA1, los cuales en promedio tuvieron valores de pH 7.89 y que se asemejan a lo reportado en el trabajo de Martinez *et*

*al.*, (2017), en donde se establece que en la zona de confluencia de los ríos Atoyac y Zahuapan los valores de pH varían entre pH 8.02 a 8.21 en temporada de estiaje y pH 7.67 a 7.89 en temporada de lluvias y se reafirma que el pH es influenciado tanto por la geología como por la incorporación del agua residual industrial, particularmente de la textil que predomina en la zona.

En cuanto a la conductividad eléctrica (CE) y la salinidad, los resultados que obtuvimos nos indican la presencia de una gran cantidad de iones disueltos en el agua de la zona después de la confluencia del río Atoyac (sitios TRA3, TRA2, RA2 y RA1), ya que la CE promedio registrada fue de 1314.58  $\mu\text{S cm}^{-1}$ , resultado que concuerda con el valor promedio reportado por Mora *et al.* (2021) para la misma zona de estudio: 1360  $\mu\text{S cm}^{-1}$ .

De igual manera, los sólidos disueltos totales (TDS) también reflejaron la presencia de sales disueltas en el agua (sólidos de naturaleza inorgánica) y de partículas arrastradas por la corriente del río, las cuales corresponden a materia orgánica disuelta (Flores, 2017). En cinco estaciones de muestreo (RA1, TRA2, TRA3, TRZ1 y RCOT) se registraron concentraciones de TDS por arriba del límite máximo de 500 ppm en cuerpos de agua establecido por la Ley Federal de Derechos (CONAGUA, 2022), destacando que dichos sitios también mostraron las concentraciones más altas de CE y la salinidad. Al contrastar estos resultados con los publicados en el '*Informe diagnóstico de la calidad del agua del río Atoyac y sus afluentes*' (CONAGUA y SEMARNAT, 2023), pudimos identificar que la ubicación de tres sitios que monitoreamos aguas abajo y que presentaron altos niveles de TDS (sitios RA1, TRA2 y TRA3), se ubican dentro de las zonas '*zonas 4, 5 y 6*' de la red de monitoreo de la CONAGUA, y en donde dicha institución reconoce un alto grado de contaminación por este parámetro. Las zonas en cuestión se ubican desde la confluencia de los ríos Atoyac y Zahuapan hasta la presa Manuel Ávila Camacho (Valsequillo). No obstante, también los reportes emitidos por grupos académicos (2010 a 2020) reconocen los altos valores de este parámetro fisicoquímico en temporada de estiaje para la misma zona, la cual está altamente impactada por la incorporación de efluentes industriales y domésticos Mora *et al.* (2021).

En resumen la condición en la que se encuentra el agua de los ríos Atoyac y Zahuapan bajo el análisis de parámetros fisicoquímicos, nos permitió interpretar como estos cambian conforme ocurren los procesos de intercambio naturales y antropogénicos, constatando que estos últimos han generado cambios sustanciales en la calidad del agua debido a la incorporación de aguas residuales al río de tipo doméstico e industrial, proceso que afecta a la idoneidad del agua requerida por los sistemas ecológicos y para los posibles usos humanos (Flores, 2017). En general, los sitios que se ubican en la confluencia de los ríos y aguas abajo hasta llegar a la presa 'Valsequillo', presentaron los niveles más altos de CE, ORP (condiciones reductoras), pH, TDS y temperatura.

Los resultados de los parámetros fisicoquímicos evaluados en los sedimentos mostraron que en general el pH de los sedimentos tiene una ligera tendencia hacia la acidez. Asimismo, la temperatura en el sedimento es ligeramente mayor a la encontrada en el agua, lo cual resulta normal al considerar las diferencias entre capacidad calorífica del agua y el suelo, aunado al horario en que se tomó el parámetro y los procesos de descomposición orgánica que ocurren en los sedimentos (Ibáñez, 2017).

El conocer las características fisicoquímicas de los sedimentos de los ríos Atoyac y Zahuapan contribuye a conocer la calidad ambiental del ecosistema, ya que el sedimento tiende a ser sensible ante los cambios en el ambiente y retienen información de los procesos de deposición de materiales derivados de factores exógenos y endógenos, lo cual permite a indagar sobre la influencia de dichos materiales en la calidad del agua (Zabaleta *et al.*, 2021). Resulta importante señalar que, para sumar más valor a la información encontrada en los sedimentos, es necesario añadir mediciones *in situ* como la conductividad eléctrica y posteriormente pruebas analíticas como: materia orgánica [% MO], contenido de elementos metálicos, etc.

En cuanto a las mediciones físicas realizadas en la morfología de los cauces, los datos exhiben que los sitios seleccionados tienen una amplia cobertura espacial y altitudinal, además de que el recorrido en campo se realizó siguiendo el flujo de drenaje la cuenca (de las zonas altas a la zona más baja), lo que permitió constatar el cambio de las cualidades

fisicoquímicas del agua en los ríos como efecto de la influencia humana. En resumen, la profundidad promedio en los distintos puntos de monitoreo fue de 71.86 cm ( $89.7 \pm 81.1$  cm en el río Atoyac y  $45.3 \pm 16.3$  cm en el río Zahuapan), mientras que el ancho promedio del cauce fue de 14.68 m ( $14.7 \pm 8.2$  m en el río Atoyac y  $14.6 \pm 7.7$  m en el río Zahuapan).

En cuanto a la turbidez, ésta se midió mediante la aplicación para teléfonos inteligentes HydroColor: Water Quality App (Leeuw, 2018), aplicación que ha tenido buena aceptación para estimar y predecir la turbidez de cuerpos de agua y que funciona bajo los principios de la reflectancia de la teledetección, utilizando la cámara del teléfono como radiómetro de tres bandas (canales RGB) (The University of Maine, 2014; Leeuw y Boss, 2018). Debido al sesgo que generó la calibración de la aplicación en los datos obtenidos, no podemos confirmar la exactitud de estos. Probar en campo la capacidad de la teledetección para evaluar la turbidez del agua, nos dejó como aprendizaje que el uso de la tecnología puede no ser tan precisa y debe compararse con los métodos de muestreo tradicionales *in situ*, con la finalidad de obtener resultados más precisos.

De manera general, podemos constatar que la mayoría de los sitios de muestreo presentaron baja transparencia en el agua, siendo los sitios aguas abajo de la confluencia entre los ríos Atoyac y Zahuapan, los que, a simple vista, denotaban una mayor concentración de partículas en suspensión. De acuerdo con Mora *et al.* (2021), dicha zona temporada de secas la cuenca presenta un rango de 44.4 – 68.9 NTU (Unidad de Turbidez Nefelométrica por sus siglas en inglés), mientras que la zona después de la confluencia presentó un rango de entre 107 a 168 NTU.

Por su parte, no fue posible medir el flujo de corriente en los sitios de muestreo, debido a que no se contaba con el equipo necesario para medir dicho parámetro. Contar con datos sobre el flujo de corriente resulta importante para el monitoreo ambiental, ya que sus variaciones nos ayudan a entender el caudal ecológico del sistema, concepto que hace referencia a la cantidad de agua que permite mantener las funciones hidrológicas y ecológicas de los afluentes (Izquierdo y Madroño, 2013). En términos de calidad del agua, el caudal ecológico interviene en los ciclos biogeoquímicos, incluyendo la descomposición

de la materia orgánica, además de que ayuda a diluir contaminantes (Molina *et al.*, 2022), por lo que al contar con dicha información podríamos analizar teóricamente y comprobar en campo si existen procesos de atenuación natural de la contaminación, así como para calcular el transporte de nutrientes y sedimentos, lo cual está vinculado con la calidad del agua y tiene un impacto significativo en la salud del ecosistema. No obstante, en el caso del río Atoyac por las condiciones de contaminación que han prevalecido a lo largo de años de deterioro ambiental (CNDH, 2017; Mora *et al.*, 2021) y por los datos obtenidos en este trabajo, podemos confirmar que el río no presenta las condiciones para mantener un caudal ecológico aceptable en gran parte del cauce.

Con la finalidad de reconocer a los agroquímicos como agentes de contaminación del agua de los ríos Atoyac y Zahuapan, se evaluó la presencia de plaguicidas organofosforados en los sedimentos aledaños a las aguas superficiales, ya que dichos compuestos traen consigo efectos adversos sobre la biota y la salud humana (Bilal *et al.*, 2019), además de que algunos poseen propiedades hidrofílicas que les permiten infiltrarse en los suelos hasta llegar a los acuíferos (Syafudin *et al.*, 2021 citado por Mora *et al.*, 2021). Los resultados indicaron una alta presencia del compuesto *monocrotophos*, el cual se registró en seis de los ocho sitios en donde se colectó sedimento. Dicho plaguicida está catalogado como altamente tóxico por la Organización Mundial de la Salud (OMS) y regulado por el Convenio de Rotterdam (Bejarano, 2017; Arellano y Rendón, 2018). Debido a su alta capacidad de solubilidad en agua y su baja sorción en los suelos, el *monocrotophos* (MCP) es un plaguicida capaz de filtrarse al agua subterránea (Singh *et al.*, 2021).

Los sitios RA3, RA2 y RA1 mostraron la mayor concentración de dicho plaguicida, y se ubican después de la confluencia de los ríos Atoyac y Zahuapan (zona baja de la cuenca), lo que indica que los niveles de contaminación por plaguicidas en la cuenca aumentan aguas abajo en función al flujo altitudinal del río, es decir que su presencia aumenta conforme el río pasa por los terrenos agrícolas periurbanos (Mora *et al.*, 2021) y que son incorporados al lecho del río y a sus aguas superficiales a través del escurrimiento superficial, la lixiviación del suelo y derrames accidentales (Bilal *et al.*, 2019). En este sentido, cabe mencionar que gran parte de la agricultura de temporal que se realiza en la CAA, se encuentra en el extremo

oriente de la cuenca, mientras que en la parte central de la cuenca se desarrolla agricultura por riego sobre terrenos planos y lomeríos, dirigiéndose hasta el extremo sur (Zona baja de la cuenca) (INEGI, 2019). De acuerdo con lo reportado por Hernández *et al.*, (2019), en la CAA existe un amplio rango de plaguicidas organoclorados y organofosforados en las zonas 2 y 3 de acuerdo con la clasificación de Mora *et al.* (2021), dichas zonas se ubican al noroeste de la cuenca (donde nace el río Atoyac) y a la zona de confluencia entre los ríos Atoyac y Zahuapan (respectivamente), lo cual concuerda con la ubicación de las zonas de agrícolas descritas por el INEGI (2019).

Resulta importante aclarar, que es muy escasa la información sobre el comportamiento de los plaguicidas en sedimento dentro de la Cuenca Alta del río Atoyac (CAA), por lo que concluimos que hace falta dar seguimiento a este estudio a razón de integrar un antecedente más sólido y que permita generar un registro histórico, situación que ayudará a entender cómo el uso de plaguicidas y agroquímicos en las tierras agrícolas periurbanas a los ríos Atoyac y Zahuapan. Asimismo, la SEMARNAT (2019, citada por Mora *et al.*, 2021), señala que los plaguicidas encontrados en las aguas del río Atoyac no necesariamente son derivados de la aplicación agrícola, sino que también son compuestos que se utilizan en la agroindustria.

Respecto a la contaminación por metales pesados, los resultados obtenidos de muestras de agua superficial mostraron concentraciones superiores a 100 µg/L de cobalto (Co), níquel (Ni), cobre (Cu), titanio (Ti) y plomo (Pb). Si bien, los valores promedio de estos metales no superan los límites máximos permitidos (LMP) de la NOM-001-Semarnat-2021 (SEMARNAT, 2022), encontramos que en casos particulares como en los de los sitios RA3 y RZ1, sí se rebasaron los límites permitidos para el arsénico (0.2 mg/L), mientras que los sitios RA3, RA1 y RCOT rebasaron el LMP para el plomo (0.2 mg/L), destacando que dichos sitios se encuentran cercanos a la zona de confluencia entre los ríos Atoyac y Zahuapan, con excepción del sitio RCOT el cual se encuentra al noroeste del río Atoyac. En contraste, Mora *et al.* (2021) reportaron que los niveles promedio de arsénico en el agua de la cuenca alcanza un valor de 0.00396 mg/L, resultado muy por debajo de la concentración promedio de arsénico en agua registrado en el presente trabajo (promedio de 0.076 mg/L) tanto en

las estaciones de muestreo del río Atoyac como del río Zahuapan. De igual forma, nuestros resultados difieren de los reportes de la CONAGUA y SEMARNAT (2023) que reportaron niveles de arsénico por debajo de 0.05 mg/L.

Por otro lado, se ha reportado que los niveles de plomo registrados en agua durante la temporada de sequías para todas las zonas de la cuenca, no supera los 0.03 mg/L (Pérez *et al.*, 2018; Mora *et al.*, 2021). Sin embargo, nuestros resultados indican concentraciones promedio de plomo mayores a 0.03 mg/L (concentración promedio de todos los sitios de muestreo de 0.137 mg/L), lo que supera el LMP de protección a la vida acuática de 0.03 mg/L establecido en la Ley Federal de Derechos (CONAGUA, 2022).

En el caso del cobre, éste se encontró en ocho de nueve sitios muestreados (RAMG, RA7, RA5, RA3, RA1, RZ1, RZ2 y RCOT), presentando una concentración promedio de 0.257 mg/L y que se encuentra por arriba del límite máximo permisible (0.05 mg/L) de acuerdo con la Ley Federal de Derechos (CONAGUA, 2022). Con base en resultados de concentración de cobre en muestras de agua reportados por Pérez *et al.* (2018), cuyo valor promedio fue de 0.067 mg/L, podemos establecer que en este estudio dichos niveles fueron rebasados, siendo los sitios RA1 y RA5, los que alcanzaron las concentraciones más altas (0.623 mg/L y 0.653 mg/L respectivamente). Mora *et al.* (2021) señala que la presencia de metales como el Cu, Pb, Cr, Cd y Hg en la zona correspondiente con confluencia de los ríos Atoyac y Zahuapan derivan de las actividades industriales, consecuencia del procesamiento de minerales y producción de piezas metálicas (Pérez *et al.*, 2018), cuyas aguas residuales se incorporan al cauce del río. Asimismo, Mora *et al.* (2021) también reporta que la presencia de metales como Cr, Zn, Cd y Pb puede proceder de agroquímicos, como fungicidas y fertilizantes inorgánicos y fosfatados.

De acuerdo con los resultados del ACP, el primer componente (CP1) presentó cargas positivas fuertes entre el pH, la conductividad eléctrica (CE), los sólidos totales disueltos (TDS) y la salinidad (Tabla 14). Esta interacción ejerce una enorme influencia en la calidad del agua, ya que dichos parámetros están involucrados en proceso de mineralización, los cuales podrían estar influenciados por la geología del área estudiada o la incorporación de

contaminantes derivados de las aguas residuales de origen industrial, doméstico o agrícola (Martinez *et al.*, 2017).

Por su parte, el segundo componente (CP2) presentó una carga fuerte positiva asociada a la temperatura, parámetro que se ve influenciado en la zona media y baja de la cuenca por la incorporación de aguas residuales cálidas procedentes de las zonas industriales (Martinez *et al.*, 2017). Asimismo, el CP2 presentó una carga negativa fuerte asociada al oxígeno disuelto y al potencial de óxido-reducción (Tabla 14), lo que nos indica que dichas variables están influenciadas por un mismo factor: la falta de oxígeno. Sin embargo, dichas variables no influyen en el CP2 debido a que la mayoría de los sitios de monitoreo presentaron condiciones de anoxia y REDOX negativo, es decir, dichos parámetros muestran poca variabilidad. De acuerdo con los resultados obtenidos por Martinez *et al.* (2017), la asociación negativa del oxígeno y el ORP en el análisis de componentes principales se debe a la alta demanda bioquímica de oxígeno (DBO<sub>5</sub>) y la presencia de contaminantes orgánicos que durante la descomposición consumen el oxígeno.

Dentro de los patrones que se encontraron en los grupos definidos por el análisis de conglomerados jerárquicos, el *Grupo 1* representó a las estaciones de monitoreo con las mayores tendencias de contaminación (RA1, RA2, TRA2 Y TRA3); destaca que estos sitios se ubican en la desembocadura del río Atoyac muy cerca de la presa 'Valsequillo' o Zona 6 de acuerdo con el informe diagnóstico de la calidad del agua del río Atoyac y sus afluentes (CONAGUA y SEMARNAT, 2023), zona que presenta las condiciones REDOX negativo más bajas (-474.79 mV) y la mayor temperatura (22.69 °C), de acuerdo con Martínez *et al.* (2017). Los altos índices de potencial REDOX negativo constituyen sitios de acumulación de contaminantes; en general y de acuerdo con los resultados de la REMECA, esta zona se encuentra altamente contaminada (CONAGUA Y SEMARNAT, 2023).

Por su parte, el *Grupo 2* está representado por el sitio de monitoreo RCOT, el cual se ubica en la confluencia del río Cotzala con el río Atoyac, al noroeste de la cuenca. Informes emitidos por la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA, 2018), señalan que este río tributario recibe las descargas residuales de industrias textiles (talleres de

lavado y desteñido), ubicadas en los municipios de San Salvador El Verde, San Felipe Teotlancingo y San Martín Texmelucan en Puebla. Lo cual confirma la presencia de iones disueltos en altas concentraciones como resultado de las descargas textiles, las cuales son ricas en tintas y álcalis (sales iónicas formadas por iones metálicos) que pueden aumentar el pH del agua (Martinez *et al.*, 2017)

El *Grupo 3* integró a los dos sitios más cercanos a las serranías de donde nace el río Atoyac (RAOA y RAMG), además los valores reflejan los rangos más adecuados de calidad del agua para la protección de la vida acuática y riego agrícola acorde a la Ley Federal de Derechos en Materia de Aguas Nacionales (CONAGUA, 2022). La ubicación de ambos sitios se encuentra en la Zona 1 establecida por la RENAMECA para la CAA (CONAGUA y SEMARNAT, 2023); sin embargo, estos sitios se encuentran más al norte de la estación testigo establecida en la RENAMECA (Clave: DLPUE1992M1, antes de Tlahuapan, Puebla). Es necesario exponer que el sitio RAOA, se encuentra bajo una creciente presión antrópica debido a que ahí se lleva a cabo la práctica de la acuicultura de truchas, y el cual es un factor puede influir en la reducción de del oxígeno disuelto en el agua, debido a la incorporación de materia orgánica (compuestos nitrogenados, heces, alimento remanente, etc.), la cual precisa de oxígeno para llevar a cabo sus procesos de descomposición.

Por último, el *Grupo 4* integra a ocho sitios de muestreo, los cuales incluyen sitios río arriba antes de la confluencia del río Atoyac y Zahuapan y después de ésta. Cabe mencionar que en este grupo se encuentran los cuatro sitios monitoreados en el río Zahuapan. No obstante, este grupo se subdivide en tres: *Grupo 4-A*, *Grupo 4-B* y *Grupo 4-C*.

El *Grupo 4-A*, incluye a los sitios RA7, RA3, RZ1 y RZ3, los cuales presentan cierto grado de similitud en sus características fisicoquímicas a pesar de que su distribución geográfica es distinta; el *Grupo 4-B*, vinculó a los sitios RA5 y RA6, los cuales dan seguimiento al gradiente altitudinal del río Atoyac (2184 y 2201 msnm, respectivamente) y se ubican en la llanura aluvial (cuenca central) (CONAHCYT *et al.*, 2023) ; el *Grupo 4-C*, reunió a los sitios TRZ1 (refresquera Apizaco fuera del cauce principal del río Zahuapan) y RZ2 (Zona 5: Confluencia

río Zahuapan - río Atoyac) (CONAGUA y SEMARNAT, 2023), los cuales presentan condiciones de similitud como resultado de que siguen al gradiente altitudinal del río.

En resumen, el ACJ clasificó los sitios de monitoreo y los agrupó en cuatro clústeres de acuerdo con el grado de correlación de las características fisicoquímicas presentes en el agua. Lo que a su vez mostró una tendencia de agrupamiento de acuerdo con la fisiografía y el gradiente de drenaje de la cuenca, y que reafirma que en la CAA existen cuatro zonas de influencia para la calidad del agua, tal y cómo se ha identificado en la literatura existente (Mora *et al.*, 2021; CONAGUA y SEMARNAT, 2023): **a)** Zona 1, río Zahuapan (antes de la confluencia con el río Atoyac); **b)** Zona 2, río Atoyac (antes de la confluencia con el río Zahuapan); **c)** Zona 3, zona de confluencia de los ríos Atoyac-Zahuapan (hasta la desembocadura de la presa Valsequillo); **d)** Zona 4, presa de Valsequillo.

La teoría del análisis de conglomerados jerárquicos (adaptándola a nuestro caso de estudio) señala que los sitios de monitoreo que posean una mayor distancia de agrupamiento serán aquellos que tengan un menor grado de correlación con los demás, dando a entender que dichos sitios son los menos relevantes para la red de monitoreo. No obstante, como señala Flores (2017) no sería correcto establecer que dichos sitios son menos relevantes debido a que presentan una mayor distancia de agrupamiento, sino que se les debe prestar una particular atención para entender los procesos que influyen y así poder discernir si van a ser considerados dentro de una red de sitios de monitoreo.

Considerando que el ACJ nos otorga una visión sobre las similitudes y diferencia de los parámetros fisicoquímicos en distintos puntos de la cuenca, y sumado a la valoración de los sitios en campo, podemos establecer que los sitios resumidos en la Tabla 15, cumplen con los criterios de representatividad de la zona de estudio en cuestión:

- a) **Grupo 1:** el sitio **RA1** es el último punto en donde pasa el río antes de desembocar en la presa 'Valsequillo'. De acuerdo con el ACJ, este grupo era el más homogéneo en cuanto a sus propiedades fisicoquímicas, por lo que resulta adecuada la selección de un único sitio como referencia de la zona.

- b) **Grupo 2:** dado a que el sitio **RCOT** presentó los valores más altos en cuanto a parámetros como: pH, REDOX negativo, conductividad, TDS y salinidad, aunado a los antecedentes reportados por la PROFEPA (2018), resulta conveniente integrar a este sitio a una red de monitoreo permanente, ya que puede actuar como sitio de referencia positivo (espacio de memoria) de descargas residuales de tipo industrial (textil).
- c) **Grupo 3:** integrar los sitios **RAOA** y **RAMG** a una red de monitoreo permanente nos permitirá tener un patrón de referencia en cuanto a variables fisicoquímicas, ya que son sitios que presentan buenas condiciones ecológicas y no hay una alta presión antrópica, con lo que se podrá contrastar el estado de la calidad del agua en la cuenca, además de detectar las primeras alteraciones en el agua y su avance en el río Atoyac. Asimismo, garantizan accesibilidad para la realización de un monitoreo continuo.
- d) **Grupo 4:** los sitios **RA7**, **RA5** y **RA3** representan zonas clave dentro del gradiente hidrológico del río Atoyac. El sitio RA7 se ubica después de la confluencia del río Atoyac (en su zona alta) con el río Cotzala (uno de los tributarios más contaminados); por su parte el sitio RA5 se localiza después de los aportes de los ríos Xochiac y Xopanac, dos tributarios del río Atoyac con altos índices de contaminación (CONAGUA y SEMARNAT, 2023); además se localiza antes de la confluencia de los ríos Atoyac y Zahuapan, por lo que dicho sitio permite analizar la influencia de las industrias del noroeste de la zona metropolitana Puebla – Tlaxcala. Por su parte el sitio RA3 se ubica después de la confluencia más relevante de la cuenca (río Atoyac y río Zahuapan), cuyas aguas atraviesan la zona metropolitana (zona con mayor desarrollo industrial). Por último, los sitios pertenecientes al río Zahuapan **RZ2** y **RZ1**, nos ofrecen una perspectiva del comportamiento de dicho río antes de unirse con el río Atoyac, considerando que del lado este y noreste de la cuenca se ubica el desarrollo urbano del estado de Tlaxcala.

Finalmente, resulta preciso mencionar que los sitios establecidos en este ejercicio se ubican dentro de las zonas de clasificación del río emitidas por la CONAGUA, y los resultados

obtenidos en la valoración *in situ*, coinciden y reflejan un comportamiento similar a los registros históricos, lo que nos permite establecer que con menos estaciones de monitoreo tenemos una buena representatividad de las distintas zonas que inciden en el comportamiento del río.

## V. CONCLUSIONES

- El presente estudio identificó a las instituciones que son capaces de responder a la demanda de pruebas analíticas, infraestructura y personal técnico especializado para cubrir el monitoreo de la calidad del agua en el río Atoyac, denotando que el estado de Puebla tiene una mayor capacidad analítica que el Estado de Tlaxcala.
- El estudio prospectivo permitió valorar el estado actual de los ríos Atoyac y Zahuapan, así como corroborar la ubicación de los sitios seleccionados en el análisis remoto y validarlos bajo los criterios que se establecieron en el presente trabajo. En este sentido, los sitios seleccionados son representativos de acuerdo con el gradiente altitudinal de la cuenca y se distribuyen dentro de las zonas de estudio establecidas por la CONAGUA en su red de monitoreo.
- Los resultados obtenidos de los parámetros fisicoquímicos de los sitios muestreados corroboraron las tendencias de contaminación que han sido reportadas por grupos académicos independientes y por la CONAGUA en los ríos Atoyac y Zahuapan. Además, brindan información reciente y confirman que las condiciones del río se mantienen como un cuerpo de agua fuertemente contaminado.
- Los análisis de estadística multivariada (análisis de componentes principales y análisis de conglomerados jerárquicos) se aplicaron satisfactoriamente y los resultados obtenidos demostraron que, con los parámetros fisicoquímicos medidos con equipos básicos de monitoreo ambiental (temperatura, oxígeno disuelto, pH, conductividad, salinidad, sólidos disueltos totales y potencial de óxido-reducción) se puede obtener la información suficiente para conocer el grado de similitud o diferencia entre cada sitio de estudio, lo que resultó en la identificación de cuatro

grupos que comparten características de calidad del agua, de acuerdo con la zona de la cuenca en donde fue evaluado el río.

- Los resultados obtenidos para la concentración de metales en agua muestran un incremento en comparación con los antecedentes registrados tanto por la CONAGUA, como por otros grupos de investigación independientes.
- Los niveles de plaguicidas organofosforados evaluados en sedimentos mostraron una tendencia a concentrarse cercanos a las zonas agrícolas periurbanas, sin embargo, no podemos garantizar que su presencia en estas zonas se deba a su uso en la agricultura, ya que estudios realizados de plaguicidas organofosforados en muestras de agua en el río Atoyac y sus afluentes, sugieren que la agroindustria incorpora estos compuestos en sus aguas residuales. Debido a que la información sobre las concentraciones de plaguicidas y agroquímicos en la cuenca es escasa, no nos fue posible establecer criterios de comparación entre los plaguicidas organofosforados analizados.
- Bajo los análisis realizados consideramos que los nueve sitios seleccionados (RA1, RCOT, RAMG, RAOA, RA7, RA5 y RA3), representan fielmente a las zonas de interés, ya que permiten visualizar a los factores antropogénicos y naturales que inciden en la calidad del agua. De esta manera, la investigación aporta una metodología replicable y que ha sido utilizada en distintos trabajos para el análisis de la calidad del agua, por lo que la incorporación de los sitios seleccionados ofrecen implicaciones significativas para la gestión y la conservación de la cuenca como lo demanda el “Primer informe estratégico del CONAHCYT para la comprensión de la problemática socioambiental de la Cuenca Alta del Atoyac, y recomendaciones para su atención integral (CONAHCYT, 2023).
- Finalmente, a partir de los resultados de este trabajo se proponen nueve estaciones de monitoreo de calidad de agua superficial que permitirán dar seguimiento de las condiciones ambientales del río Atoyac a largo plazo.

## VI. RECOMENDACIONES

- Realizar con mayor profundidad el estudio de las capacidades analíticas en los estados de Puebla y Tlaxcala, ya que resulta pertinente darle seguimiento a dicha información para validar el estado actual de las entidades académicas y de las empresas privadas que no están acreditadas por la EMA y en su defecto incorporar o eliminar del directorio a las entidades que hagan falta.
- Establecer una metodología de reconocimiento real de las instituciones que realizan procedimientos analíticos como sugiere Martínez de Escobar y Laines (2012). En donde se realicen entrevistas al personal administrativo y técnico, y se verifiquen físicamente a las instalaciones a fin de tener evidencia tangible sobre la existencia de dicha institución o en su defecto verificar si es que implementan las técnicas analíticas con fines de evaluación ambiental.
- Realizar un estudio que abarque un ciclo anual de monitoreo de las estaciones definidas en el presente trabajo para evaluar el comportamiento fisicoquímico del agua en los sitios de monitoreo establecidos y confirmar su representatividad como sitios prioritarios. Cabe mencionar que al cierre de este trabajo se está llevando a cabo dicho monitoreo confirmatorio.
- Evaluar a los sitios de monitoreo propuestos bajo el criterio de otros análisis estadísticos (Flores, 2017), tales como: análisis de correlación-regresión, el análisis determinante, el análisis de series de tiempo y de intervalos de muestreo, con la finalidad de que se tenga un análisis estadístico completo y que, dé certeza a las instituciones involucradas, la legitimidad de los sitios seleccionados.
- Fundamentar en base a los registros históricos que se tienen de la calidad del agua, la frecuencia de muestreo, con la finalidad de que la información obtenida sea significativa, considerando que el criterio de temporada evitará la pérdida de información relevante sobre la calidad del agua.
- Conciliar de manera oportuna y justificada la incorporación de otros sitios de monitoreo, así como la incorporación de otros parámetros a monitorear (demanda bioquímica de oxígeno, demanda química de oxígeno, toxicidad, etc.) con la intención de que el registro histórico no tenga sesgos por falta de información.

- Incorporar colecta de muestras de sedimento a lo largo de la red de monitoreo establecida, para ampliar el conocimiento de los procesos de contaminación que se tienen en la cuenca.

## VII. REFERENCIAS

- Alcocer, J. (2007). El agua epicontinental de México. *Ciencia*, 58(3), 26-35. Obtenido de [https://www.amc.edu.mx/revistaciencia/images/revista/58\\_3/PDF/05-548.pdf](https://www.amc.edu.mx/revistaciencia/images/revista/58_3/PDF/05-548.pdf)
- Arellano Aguilar , O., & Rendón von Osten, J. (2018). *La Huella de los Plaguicidas en México*. GREENPEACE. Obtenido de [https://www.greenpeace.org/static/planet4-mexico-stateless/2018/11/30b49459-30b49459-plaguicidas\\_en\\_agua\\_ok\\_em.pdf](https://www.greenpeace.org/static/planet4-mexico-stateless/2018/11/30b49459-30b49459-plaguicidas_en_agua_ok_em.pdf)
- Arellano Aguilar, O. (s.f.). *Revisión bibliográfica de contaminantes encontrados en la Cuenca Alta del Río Atoyac (2010 - 2020)*. Material no publicado .
- Arellano Aguilar, O., Betancourt Lozano, M., Aguilar Zárata , G., & Ponce de Leon Hill, C. (2017). Agrochemical loading in drains and rivers and its connection with pollution in coastal lagoons of the Mexican Pacific. *Environmental Monitoring Assessment*, 189(270). Obtenido de <https://doi.org/10.1007/s10661-017-5981-8>
- Arrollo Crivelli, G. (2017). *Monitoreo participativo de la calidad ecológica del Río Magdalena, CDMX, México*. [Tesis de Licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México].
- Becq, D. (1994). Designing automatic water quality monitoring stations for lakes and rivers. *Proceedings of OCEAN'S*, 1, 469-474. doi:10.1109/OCEANS.1994.363853.
- Bejarano González F. (Ed). (2017). *Los Plaguicidas Altamente Peligrosos en México*. Red de Acción sobre Plaguicidas y Alternativas en México, A.A. (RAPAM).
- Bilal, M., Iqbal, H. M., & Barceló, D. (2019). Persistence of pesticides-based contaminants in the environment and their effective degradation using laccase-assisted biocatalytic systems. *Science of The Total Environment*, 695. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.133896>
- Boyacioglu, H. (2006). Surface water quality assessment using factor analysis. *Water S.A.*, 32(3), 389-393. doi:10.4314/wsa.v32i3.5264
- Bravo Inclán, L., Sánchez Chávez, J., Izurieta Dávila , J., & Tomasini Ortiz, A. (2015). *Evaluación toxicológica del río Atoyac, Pue., y su relación con los parámetros fisicoquímicos*. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua . Morelos: IMTA. Obtenido de <http://www.amica.com.mx/issn/archivos/183.pdf>
- Comisión Nacional de los Derechos Humanos. (2017). *Recomendación No. 10/17*. Ciudad de México: Comisión Nacional de los Derechos Humanos México. Obtenido de [https://www.cndh.org.mx/sites/default/files/doc/Recomendaciones/2017/Rec\\_2017\\_010.pdf](https://www.cndh.org.mx/sites/default/files/doc/Recomendaciones/2017/Rec_2017_010.pdf)

- Comisión Nacional de los Derechos Humanos. (2019). *Estudio sobre protección de río, lagos y acuíferos desde la perspectiva de los derechos humanos*. Ciudad de México: Comisión Nacional de los Derechos Humanos. Obtenido de [https://www.cndh.org.mx/sites/default/files/doc/Informes/Especiales/ESTUDIO\\_RIOS\\_LAGOS\\_ACUIFEROS.pdf](https://www.cndh.org.mx/sites/default/files/doc/Informes/Especiales/ESTUDIO_RIOS_LAGOS_ACUIFEROS.pdf)
- Comisión Nacional del Agua . (2023). *Calidad del agua en México*. Obtenido de <https://www.gob.mx/conagua/articulos/calidad-del-agua>
- Comisión Nacional del Agua. (24 de julio de 2020). *Directorio de laboratorios acreditados por la Entidad Mexicana de Acreditación*. Obtenido de <https://www.gob.mx/conagua/acciones-y-programas/directorio-58403>
- Comisión Nacional del Agua. (2022). *Ley Federal de Derechos. Disposiciones Aplicables en Materia de Aguas Nacionales*. Comisión Nacional del Agua, Ciudad de México. Obtenido de <https://www.gob.mx/conagua/documentos/ley-federal-de-derechos-2022>
- Comisión Nacional del Agua, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2020). *Indicadores de la calidad del agua superficial y subterránea, Red Nacional de Medición de la Clada del Agua (RENAMECA)*. Obtenido de <https://files.conagua.gob.mx/lca20/Contenido/Documentos/PresentaciondeIndicadoresdeCalidaddelAgua.pdf>
- Comisión Nacional del Agua, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2023). *Diagnóstico de la calidad del agua del Río Atoyac y sus afluentes*. Obtenido de [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/859857/2.\\_Diagn\\_stico\\_de\\_la\\_Calidad\\_del\\_Agua\\_del\\_r\\_o\\_Atoyac\\_y\\_sus\\_Afluentes.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/859857/2._Diagn_stico_de_la_Calidad_del_Agua_del_r_o_Atoyac_y_sus_Afluentes.pdf)
- Comisión Nacional del Agua, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2023). *Diagnóstico de la calidad del agua del Río Zahuapan y sus afluentes*. Obtenido de [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/859858/3.\\_Diagn\\_stico\\_de\\_la\\_Calidad\\_del\\_Agua\\_del\\_r\\_o\\_Zahuapan\\_y\\_sus\\_Afluentes.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/859858/3._Diagn_stico_de_la_Calidad_del_Agua_del_r_o_Zahuapan_y_sus_Afluentes.pdf)
- CONAHCYT, IIMA, IBERO PUEBLA. (2023). *SIG Cuenca Alto Atoyac*. doi:<https://geoinformatica.mx/webappcca/capas>
- Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnologías. (2023). *Primer informe estategico de CONAHCYT para la comprensión de la problemática socioambiental de la Cuenca Alta del Atoyac, recomendaciones para su atención integral*. Gobierno de México.
- Diario Oficial de la Federación (DOF). (2011). Declaratoria de clasificación de los ríos Atoyac y Xochiac o Hueyapan, y sus afluentes. *Diario Oficial de la Federación*. Obtenido de [https://dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5199672&fecha=06/07/2011#gsc.tab=0](https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5199672&fecha=06/07/2011#gsc.tab=0)
- Entidad Mexicana de Acreditación. (2022). *Laboratorios de ensayo acreditados* . Obtenido de <https://catalogo.consultaema.mx:75/busqueda-laboratorios-de-ensayo>

- Espinosa García, A. C. (2014). Presentación. (F. J. González Villarreal, Ed.) *Impluvium Calidad del agua (octubre - diciembre)*, 3, págs. 2-4. Obtenido de <http://www.agua.unam.mx/assets/pdfs/impluvium/numero03.pdf>
- Flores Takahashi, J. S. (2017). Análisis de una red de monitoreo de calidad de agua en la cuenca del río Jequetepeque mediante análisis multivariado. (*Tesis para obtener el grado de Magister en Getión de los Recursos Hídricos*). Pontificia Universidad Católica Del Perú, Lima, Perú.
- GeoComunes. (s.f). *Industrialización y resistencia en el Valle de Puebla*. Obtenido de [https://geocomunes.org/Analisis\\_PDF/Puebla%20lectura.pdf](https://geocomunes.org/Analisis_PDF/Puebla%20lectura.pdf)
- Gil Marin, J. A. (2020). Modelo de calidad del agua subterránea mediante el uso combinado del análisis de componentes principales (ACP) y regresiones lineales múltiples (RLM) Caso de estudio: acuífero de Maturín, Monagas, Venezuela. *REVISTA DEL LABORATORIO TECNOLÓGICO DEL URUGUAY*(20), 67,88. doi:<https://doi.org/10.12461/20.02>
- González Villareal, F. J., Vázquez Herrera, E., Aguilar Amilpa, E., & Arriaga Medina, J. A. (2022). *Perspectivas del agua en México. Propuestas hacia la seguridad hídrica*. Ciudad de México: Red del Agua UNAM, CERSHI, UNESCO Y Agua Capital. Obtenido de [http://www.agua.unam.mx/assets/pdfs/Perspectivas\\_AguaenMexico2022.pdf](http://www.agua.unam.mx/assets/pdfs/Perspectivas_AguaenMexico2022.pdf)
- Grajales Porras, A., & Welti Chanes , C. (2003). *Estructura y dinámica demográfica de la zona conurbada Puebla-Tlaxcala : una visión comparativa, 1970-2000*. Puebla: nstituto de Ciencias Sociales y Humanidades, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla : Programa Latinoamericano de Actividades en Población, Instituto de Investigaciones Sociales, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Harmancioglu, N. B., Fistikoglu, O., Ozkul, S. D., Singh, V. P., & Alpaslan, N. (1999). *Water Quality Monitoring Network Design* (1st Edition ed.). Springer.
- Hernández Ramírez, A., Martínez Talavera, E., Rodríguez Espinosa , P., Mendoza Pérez, J., Tabla Hernández, J., Escobedo Urías, D., . . . Sujitha, S. (2019). Detection, provenance and associated environmental risks of water quality pollutants during anomaly events in River Atoyac, Central Mexico: A real-time monitoring approach. *Science of The Total Environment*, 669, 1019-1032. doi:10.1016/j.scitotenv.2019.03.138
- Ibáñez Cornejo, J., Hernández Esparza , M., Doria Serrano, M., Fregoso Infante, A., & Mohan Singh, M. (2013). *Química ambiental*. México: McGraw Hill Interamericana.
- Ibarrarán Viniegra, M., Saldaña Vázquez, R., & Pérez García, T. (2022). El costo de la contaminación en la Cuenca del Alto Atoyac: una revisión sistemática de literatura. *Regiones y Desarrollo Sustentable*, 22(43), 1-23. Obtenido de <http://coltlax.edu.mx/openj/index.php/ReyDS/article/view/255/pdf>
- Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática. (1986). *Síntesis Geográfica de Tlaxcala*. México: INEGI.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. (2019). *Informe técnico de la Cuenca hidrológica Alto Atoyac*. México: INEGI.

- Izquierdo Santacruz, M., & Madroñero Palacios, S. (2013). Régimen de caudal ecológico, herramienta de gestión para conservar la biota acuática. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 23(2), 77-94.
- Leeuw, T. (2018). *Hydrocolor: Water Quality App [Aplicación móvil]*. Google Play. Obtenido de <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.h2optics.hydrocolor&hl=es&gl=US>
- Leeuw, T., & Boss, E. (2018). The HydroColor App: Above Water Measurements of Remote Sensing Reflectance and Turbidity Using a Smartphone Camera. *Sensors*, 1(18), 256. Obtenido de <https://doi.org/10.3390/s18010256>
- López Vargas, R., Mendéz Serrano, A., Albores Medina, A., Oropeza Hernández, F., Hernández Cadena, L., Mercado Calderón, F., . . . Montero Montoya, R. (2018). Oxidative stress index is increased in children exposed to industrial discharges and is inversely correlated with metabolite excretion of voc. *Environ. Mol. Mutagen*(59), 639-652. Obtenido de <https://doi.org/10.1002/em.22207>
- Luna Nemecio, J. (2021). Conflictos socioambientales por la defensa del agua en México: un meta-análisis cartográfico conceptual. *Universidad y Sociedad*, 13(4), 398-412. Obtenido de <http://scielo.sld.cu/pdf/rus/v13n4/2218-3620-rus-13-04-398.pdf>
- Manahan, S. E. (2007). Contaminación del agua. En M. d. Durán Domínguez de Bazúa, *Introducción a la Química Ambiental* (1ra ed., págs. 162-163). UNAM; REVERTÉ S.A. DE. C.V.
- Martínez de Escobar Fernández, A., & Laines Canepa, J. (2012). *Modelo de Planeación Estratégico para el fortalecimiento de una red de laboratorios con capacidades ambientales en Tabasco, México*. Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla. Obtenido de <https://upaep.mx/micrositios/coloquios/coloquio2013/memorias/Mesa%201%20PEyDT/Modelo%20de%20Planeaci%C3%B3n%20Estrat%C3%A9gica%20para%20el%20fortalecimiento%20de%20una%20red%20de%20laboratorios%20con%20capacidades%20ambientales%20en%20Tabasco,%20M%C3%A9xi>
- Martínez Talavera, E. (2016). Variación espacio-temporal de la calidad del agua del Río Atoyac (2013-2014), Puebla. México. (Tesis Doctoral). Instituto Politécnico Nacional, México D.F.
- Martínez Talavera, E., Rodríguez Espinoza, P., Shruti, V., Sujitha, S., Muñoz Sevilla, N., & Morales García, S. (2017). Monitoring the seasonal dynamics of physicochemical parameters from Atoyac River basin (Puebla), Central Mexico: multivariate approach. *Environ Earth Sci*, 76(95). doi:<https://doi.org/10.1007/s12665-017-6406-2>
- Molina, C., Montecinos, A., Calani, L., Quispe, R., Molina Carpio, J., Espinoza, D., . . . Pouilly, M. (2022). Caudal ecológico, una herramienta de desarrollo integral: proyecto FERRIA. *Ecología en Bolivia*, 57(2), 51-56. Obtenido de <http://www.scielo.org.bo/pdf/reb/v57n2/2075-5023-reb-57-02-51.pdf>
- Mora, A., García Gamboa, M., Sánchez Luna, M., Gloria García, L., Cervantes Avilés, P., & Mahlkecht, J. (2021). A review of the current environmental status and human health implications of one of the most polluted rivers of Mexico: The Atoyac River, Puebla. *Science of The Total Environment*, 782. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146788>

- Moreno Tovar , A. A., Toro Botero, M., & Carvajal, L. F. (2008). Revisión de criterios y metodologías de diseño de redes para el monitoreo de la calidad del agua en ríos. *Avances en Recursos Hidráulicos*(18), 57-68. Obtenido de <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=145012856006>
- Muñoz, H., Orozco, S., Vera, A., Suárez, J., García, E., Neria, M., & Jiménez, J. (2015). Relación entre el oxígeno disuelto, precipitación pluvial, temperatura: río Zahuapan, Tlaxcala, México. *Tecnología y Ciencias del Agua*, VI(5), 59-74. Obtenido de [https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2007-24222015000500005](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222015000500005)
- Pérez Castresana, G., Tamariz Flores, V., Hernández Aldana , F., Castelán Vega, R., Morán Perales, J. L., García Suastegui, W. A., . . . Handal Silva, A. (2018). Atoyac River Pollution in the Metropolitan Area of Puebla, México. *Water*, 10(267). doi:<https://doi.org/10.3390/w10030267>
- Pérez Catresana, G., Castañeda Roldán, E., García Suastegui, W. A., Morán Perales, J. L., Cruz Montalvo, A., & Handal Silva, A. (2019). Evaluation of Health Risks due to Heavy Metals in a Rural Population Exposed to Atoyac River Pollution in Puebla, Mexico. *Water*, 11(2), 1-14. Obtenido de <https://doi.org/10.3390/w11020277>
- Procuraduría Federal de Protección al Ambiente . (septiembre de 08 de 2018). *PROFEPA INVESTIGA VERTIDO DE AGUAS RESIDUALES EN RÍO COTZALA, AFLUENTE DEL RÍO ATOYAC, PUEBLA*. doi:<https://www.gob.mx/profepa/prensa/profepa-investiga-vertido-de-aguas-residuales-en-rio-cotzala-afluente-del-rio-atoyac-puebla>
- Ramírez Varela, A., & López Santos , J. D. (2018). ¡Luchamos por un Atoyac con Vida! La lucha contra la contaminación del Río Atoyac y los daños a la salud que origina en el sur de Tlaxcala, México. *Bajo el Volcán*, 18(28), 95-108. Obtenido de <https://www.redalyc.org/journal/286/28659183007/>
- Ramírez Varela, A., & López Santos, J. (2018). ¡Luchamos por un Atoyac con Vida! La lucha contra la contaminación del Río Atoyac y los daños a la salud que origina en el sur de Tlaxcala, México. *Bajo el Volcán*, 18(28), 95-108. Obtenido de <https://www.redalyc.org/journal/286/28659183007/>
- Ruiz Caicedo, J. A. (1998). ¿En qué consiste una red de monitoreo ambiental de ríos? *Tecnura*, 2(3), 14-18. doi:<https://doi.org/10.14483/22487638.6044>
- Sanders, T. G., Ward, R. C., Loftis, J. C., Steele, T. D., Adrian, D. D., & Yevjevich, V. (1983). *Design of Networks for Monitoring Water Quality*. Littleton, Colorado: Water Resources Publications.
- Secretaría de Economía. (2022). *DATA MÉXICO: Puebla-Tlaxcala*. Obtenido de <https://www.economia.gob.mx/datamexico/es/profile/geo/puebla-tlaxcala>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Ambientales . (21 de enero de 2020). *Iniciará Semarnat elaboración de programas de restauración ecológica en seis regiones del país*. Obtenido de <https://www.gob.mx/semarnat/prensa/iniciara-semarnat-elaboracion-de-programas-de-restauracion-ecologica-en-seis-regiones-del-pais?idiom=es-MX>

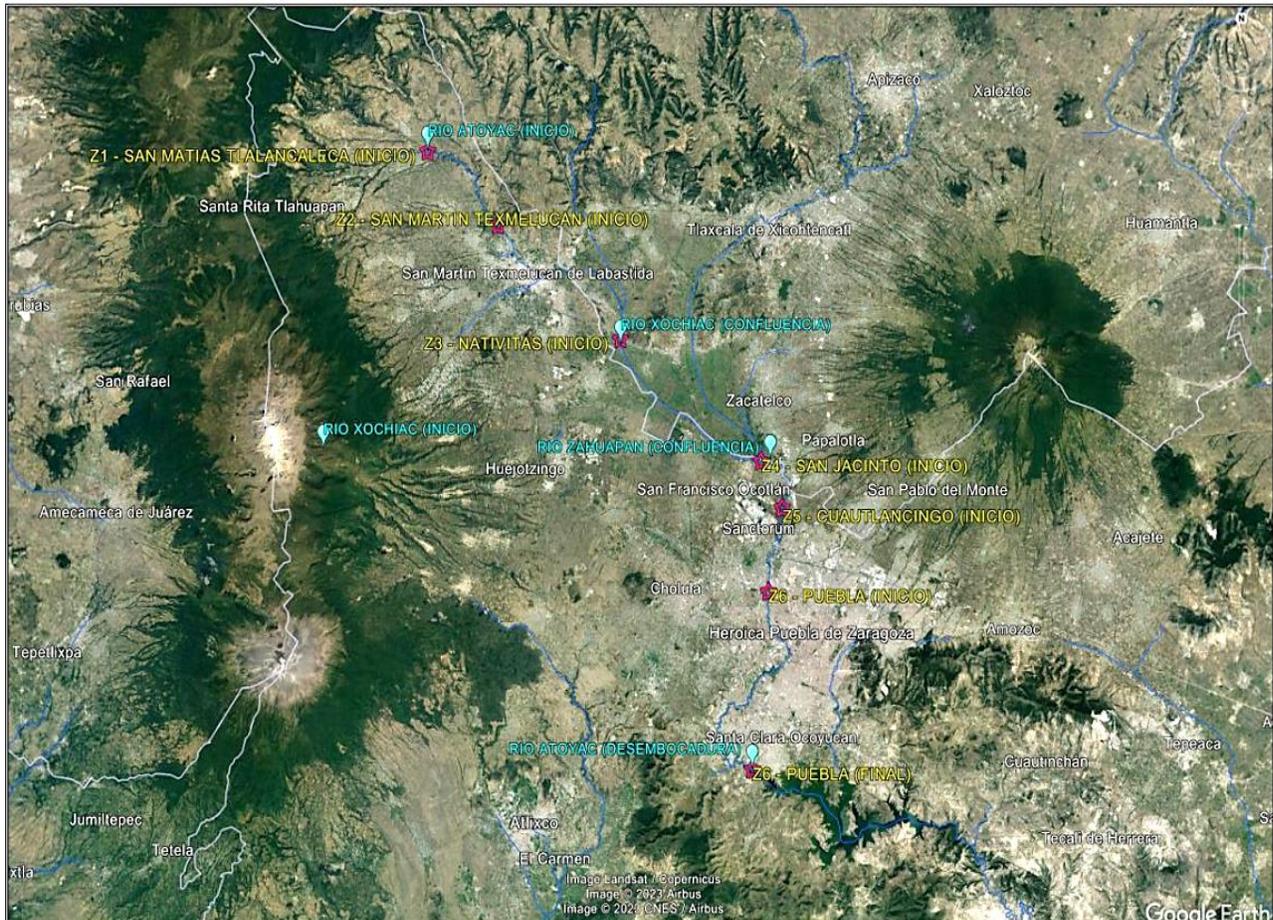
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales . (2015). *Red nacional de monitoreo de la calidad del agua*. Obtenido de Compendio de estadísticas ambientales 2015: [https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/compendio\\_2015/dgeiawf.semarnat.gob.mx\\_8080/ibi\\_apps/WFServletd553.html](https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/compendio_2015/dgeiawf.semarnat.gob.mx_8080/ibi_apps/WFServletd553.html)
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales . (2020). *Consulta Temática*. Obtenido de Red nacional de monitoreo de la calidad del agua: [http://dgeiawf.semarnat.gob.mx:8080/ibi\\_apps/WFServlet?IBIF\\_ex=D3\\_R\\_AGUA05\\_03&IBIC\\_user=dgeia\\_mce&IBIC\\_pass=dgeia\\_mce#:~:text=Actualmente%20los%20principales%20objetivos%20de,de%20los%20cuerpos%20de%20agua](http://dgeiawf.semarnat.gob.mx:8080/ibi_apps/WFServlet?IBIF_ex=D3_R_AGUA05_03&IBIC_user=dgeia_mce&IBIC_pass=dgeia_mce#:~:text=Actualmente%20los%20principales%20objetivos%20de,de%20los%20cuerpos%20de%20agua).
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2022, 11 de marzo). *Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-2021, Que establece los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación*. Diario Oficial de la Federación. Obtenido de [https://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5645374&fecha=11/03/2022#gsc.tab=0](https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5645374&fecha=11/03/2022#gsc.tab=0)
- Singh, S., Vijay, K., Ramesh, K., Abdul Basit, W., Jatinder Pal, K. G., Vinod Kumar, G., . . . Praveen C., R. (2021). Toxicity and detoxification of monocrotophos from ecosystem using different approaches: A review. *Chemosphere*, 275. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130051>
- Soledad Solis, A. (2013). *Alteraciones en el desarrollo embrionario del pez cebrá por exposición a muestras del Río Atoyac y descargas industriales [Tesis de grado, Universidad Nacional Autónoma de México]*. Repositorio institucional UNAM.
- Stansfield, B. (2001). Effects of sampling frequency and laboratory detection limits on the determination of time series water quality trends. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research*, 35, 1071-1075. Obtenido de <https://doi.org/10.1080/00288330.2001.9517064>
- The University of Maine. (18 de marzo de 2014). *Maine In-situ Sound & Color Lab, School of Marine Sciences*. *HydroColor*. Obtenido de <https://misclab.umeoce.maine.edu/research/HydroColor.php>
- United States Environmental Protection Agency . (28 de febrero de 2024). *Water Quality Criteria* . Obtenido de <https://www.epa.gov/wqc>
- Velazco Santos, P. (2018). *Ríos de contradicción: Contaminación, ecología política y sujetos rurales en Nativitas, Tlaxcala*. México: Instituto de Investigaciones Antropológicas - UNAM.
- Wetzel, R. G. (2001). *Limnology: Lake and River Ecosystems (3 ed.)*. Elsevier.
- Zabaleta de la Cruz, L., Ñique Alvarez, M., & Levano Crisóstomo, J. (2021). Caracterización físico-química de los sedimentos del humedal laguna bella en la selva de Huánuco, Perú. *Ecología Aplicada*, 20(2), 161-167. Obtenido de <https://dx.doi.org/10.21704/rea.v20i2.1806>

Zamora Almazan, M. J. (2019). *Factores de vulnerabilidad socioambiental en relación con fuentes de contaminación Puebla-Tlaxcala [Tesis de Maestría, Universidad Nacional Autónoma de México]*. Repositorio institucional UNAM.

## VIII. ANEXOS

Anexo 1. Zonificación de la red de monitoreo de la RENAMECA en el río Atoyac y Zahuapan para el estudio y la regulación de descargas de aguas residuales.

### a) Zonas en que se dividió el río Atoyac y sus afluentes para su estudio y regulación (DOF, 2011)



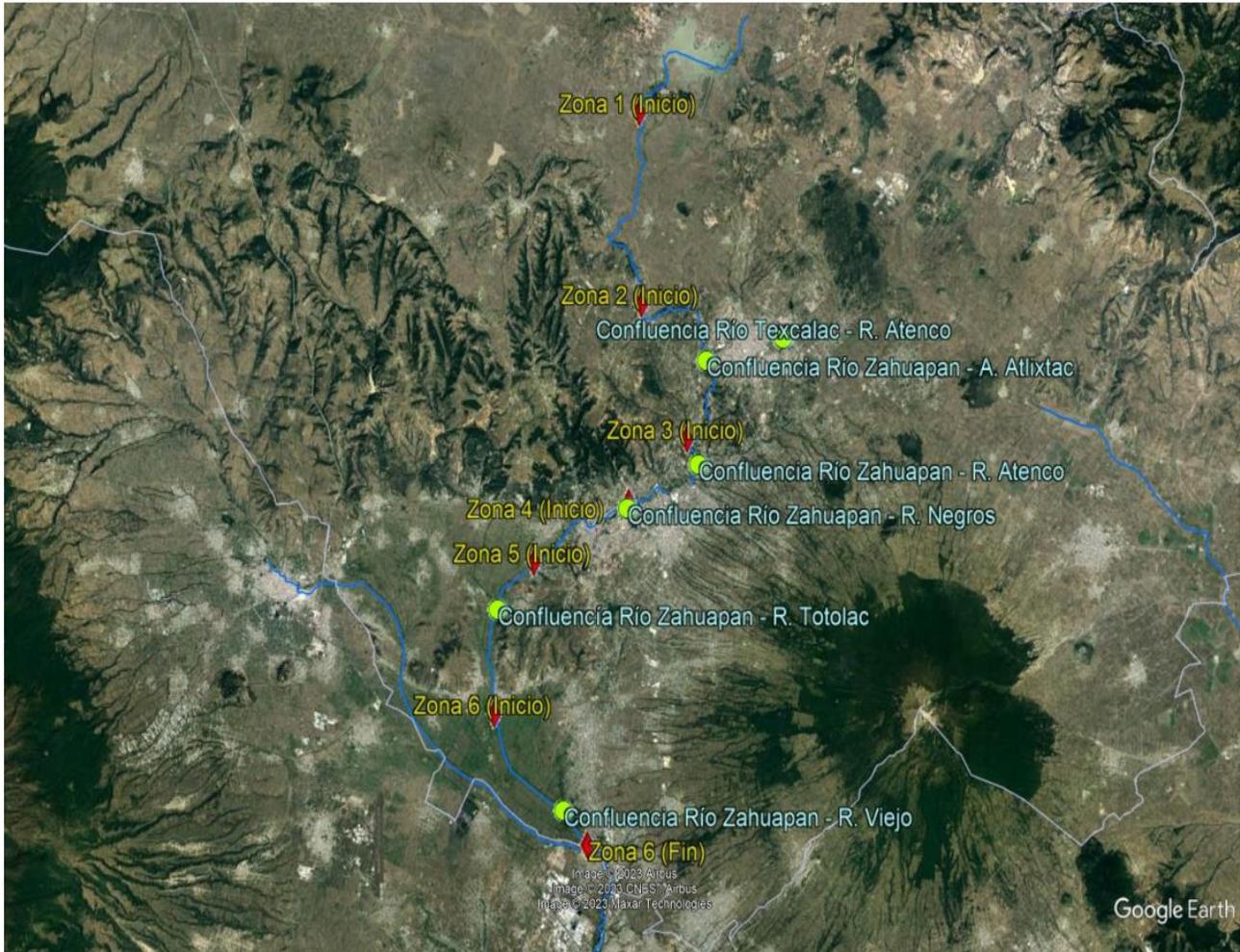
Adaptado de: 'Zonas en que se dividió el río Atoyac y sus afluentes para el estudio y la regulación de descargas de aguas residuales' [Mapa]. Fuente. CONAGUA y SEMARNAT (2023).

No. Zona /Nombre	Delimitación	Características
1 San Matías Tlalancaleca	1.4 km aguas arriba de la descarga municipal Santa Rita Tlahuapan hasta antes del río Atotonilco.	Longitud de la zona 12.90 km. Recibe 0.63 toneladas al día de materia orgánica medida como demanda bioquímica de oxígeno. Caudal de 273 L/s.

2	San Martín Texmelucan	Antes del río Atotonilco hasta antes de la confluencia del río Xochiac.	<p>Longitud de la zona 17.75 km. Confluencia del río Atotonilco y barranca Cruztitla por la margen izquierda y de los ríos Chiquito y Cotzala por la margen derecha. Recibe las aguas residuales de San Martín Texmelucan y el colector Industrial Quetzalcóatl. Recibe 12.91 toneladas al día de materia orgánica medida como demanda bioquímica de oxígeno. Caudal de 704 L/s.</p>
3	Nativitas	Antes de la confluencia del río Xochiac hasta la estación hidrométrica San Jacinto, antes de la confluencia del río Zahuapan.	<p>Longitud de la zona 16.73 km. Confluencia por la margen derecha de los ríos Xochiac, Xopanac y Tlapalac. Recibe las aguas residuales del colector industrial El Carmen. Recibe 12.81 toneladas al día de materia orgánica medida como demanda bioquímica de oxígeno. Caudal de 1,872 L/s.</p>
4	San Jacinto	Desde la estación hidrométrica San Jacinto antes de la confluencia del río Zahuapan hasta 1.70 km después de la barranca Atlapitz.	<p>Longitud de la zona 5.51 km. Confluencia del río Zahuapan y de las barrancas Tenexac y Atlapitz por la margen izquierda. Recibe las aguas residuales del colector Panzacola. Recibe 3.74 toneladas al día de materia orgánica medida como demanda bioquímica de oxígeno. Caudal de 2,208 L/s</p>

5	Cautlancingo	1.70 km después de la barranca Atlapitz hasta Puente México.	<p>Longitud de la zona 8.21 km. Recibe las aguas residuales de la planta de tratamiento Barranca del Conde de la ciudad de Puebla que incluye los colectores 5 de Mayo y del Parque Industrial Camino a San Lorenzo. Recibe 7.95 toneladas al día de materia orgánica medida como demanda bioquímica de oxígeno. Caudal de 2,985 L/s</p>
6	Puebla	Desde Puente México hasta la presa Manuel Ávila Camacho (Valsequillo).	<p>Longitud de la zona 23.87 km. Confluencia del arroyo Atenco por la margen derecha y del río San Francisco por la margen izquierda. Recibe las aguas residuales de las plantas de tratamiento San Francisco y Atoyac Sur de la ciudad de Puebla. Incluye las aguas residuales del Parque Industrial Cautlancingo. Recibe 28.36 toneladas al día de materia orgánica medida como demanda bioquímica de oxígeno. Caudal de 3,883 L/s.</p>

b) Zonas en que se dividió el río Zahuapan y sus afluentes para su estudio y regulación (DOF, 2011)



Adaptado de: 'Zonas en que se dividió el río Zahuapan y sus afluentes para el estudio y la regulación de descargas de aguas residuales' [Mapa]. Fuente. CONAGUA y SEMARNAT (2023).

No. Zona /Nombre		Delimitación	Características
1	Atlangatepec	Desde la cortina de la presa Atlangatepec, hasta 8 km antes de la confluencia del arroyo Atlixnac.	Longitud de la zona 15 km. Caudal de 70 L/s

2	Atlixnac	Inicia 8 km antes de la confluencia con el arroyo Atlixnac, hasta 2 km antes de la confluencia del río Atipac o Atenco o Apizaco.	Longitud de la zona 15 km. Confluencia del arroyo Atlixnac por la margen izquierda. Recibe 6.79 toneladas/día de materia orgánica medida como demanda química de oxígeno. Caudal de 638 L/s.
3	Apizaco	Inicia 2 km antes de la confluencia del río Atipac o Atenco o Apizaco, hasta antes de la confluencia del río Los Negros.	Longitud de la zona 8 km. Confluencia del río Atipac o Atenco o Apizaco y del arroyo Dos Arroyos por la margen izquierda. Recibe 22.43 toneladas/día de materia orgánica medida como demanda química de oxígeno. Caudal de 1,025 L/s.
4	Los Negros	Desde antes de la confluencia del río Los Negros hasta 4 km antes de la confluencia del río Totolac.	Longitud de la zona 8 km. Confluencia del río Los Negros por la margen izquierda. Recibe 11.47 toneladas /día de materia orgánica medida como demanda química de oxígeno. Caudal de 1,262 L/s.
5	Totolac	Desde 4 km antes de la confluencia del río Totolac hasta 4 km antes de la presa Santa Agueda.	Longitud de la zona 10 km. Confluencia del río Totolac por la margen derecha. Recibe 9.13 toneladas/día de materia orgánica medida como demanda química de oxígeno. Caudal de 1,277 L/s.
6	Viejo	Desde 4 km antes de la presa Santa Agueda hasta la confluencia con el río Atoyac.	Longitud de la zona 10 km. Confluencia del río Viejo por la margen izquierda. Recibe 9.3 toneladas/día de materia orgánica medida como demanda química de oxígeno. Caudal de 222 L/s.

Anexo 2. Parámetros de calidad del agua evaluados por la CONAGUA

<b>Parámetros de calidad del agua</b>	
Grasas y aceites	Nitrógeno amoniacal
Materia flotante	Fenoles
Sólidos sedimentables	Fierro
Sólidos suspendidos totales	Benceno
Demanda bioquímica de oxígeno (5 días)	Tolueno
Nitrógeno total	Xilenos
Fósforo total	Etilbenceno
Potencial de hidrógeno	Sólidos disueltos totales
Arsénico	Cloruros
Cadmio	Sulfuros
Cobre	Aluminio
Cromo	Manganeso
Mercurio	Cloruro de metilo
Níquel	Cloroformo
Plomo	Cloruro de vinilo
Zinc	1,2 Diclorobenceno
Cianuros	1,3 Diclorobenceno
Coliformes fecales	1,4 Diclorobenceno
Huevos de helminto	1,2 Dicloroetano
Sustancias activas al azul de metileno (SAAM)	Tetracloroetileno
Demanda química de oxígeno	Bis 2 (etil hexil) ftalato
Sulfatos	Dietil ftalato
Color	Nitrobenceno
	Toxicidad aguda (Vibrio fischeri y Daphnia magna)

Nota. Parámetros regulados en la Declaratoria de Clasificación de los ríos Atoyac y Xochiac o Hueyapan y sus afluentes (DOF, 2011). Fuente. DOF (2011); CONAGUA y SEMARNAT (2023).

### Anexo 3. Zonificación del corredor industrial y la zona urbana en la Cuenca del Alto Atoyac



Adaptado de: 'Industrialización y resistencia en el Valle de Puebla' [Mapa]. Fuente. GeoComunes (sf). Recuperado de: [https://geocomunes.org/Analisis\\_PDF/Puebla%20lectura.pdf](https://geocomunes.org/Analisis_PDF/Puebla%20lectura.pdf)

Anexo 4. Relación de sitios visitados en la campaña de campo

Sitios de estudio				UTM			
ID	Edo.	Clave	P.F-Q	Este (X)	Norte (Y)	Zona	Banda
1	Puebla	RA1	Si	576920.699	2095608.03	14	Q
2	Puebla	RA2	Si	581176.997	2103427.51	14	Q
3	Puebla	TRA3	Si	585484.853	2103096.49	14	Q
4	Puebla	TRA2	Si	578466.617	2104878.95	14	Q
5	Puebla	RA3	Si	580291.083	2111514	14	Q
6	Puebla	RA4	No	581232.642	2117991.7	14	Q
7	Tlaxcala	RZ1	Si	579938.828	2118600.8	14	Q
8	Tlaxcala	RA5	Si	579770.077	2118446.37	14	Q
9	Tlaxcala	TRZ1	Si	592612.562	2147519.19	14	Q
10	Tlaxcala	RA6	Si	567236.986	2127672.94	14	Q
11	Tlaxcala	RZ2	Si	573395.837	2127303.19	14	Q
12	Tlaxcala	RZ3	Si	579601.414	2136369.54	14	Q
13	Tlaxcala	RA7	Si	562810.798	2132811.96	14	Q
14	Tlaxcala	TRA1	No	565977.058	2134572.16	14	Q
15	Tlaxcala	Canal-TNM	No	564742.982	2135274.72	14	Q
16	Tlaxcala	Canal-TP	No	563552.42	2135242.86	14	Q
17	Puebla	RCOT	Si	557244.192	2131167.6	14	Q
18	Puebla	RA9	No	557666.813	2134132.06	14	Q
19	Puebla	RA11	No	553210.517	2137066.25	14	Q
20	Puebla	RAMG	Si	550472.511	2141610.7	14	Q
21	Puebla	RAOA	Si	548086.64	2146949.52	14	Q

Anexo 5. Listado de pruebas analíticas y parámetros de monitoreo ambiental que se realizan en los diferentes laboratorios públicos y privados que se ubican en la CAA

<b>Parámetro</b>	<b>Prueba -Técnica Analítica</b>	<b>Norma y/o Método de Referencia</b>
Absorción UV		SM 5910 B
Acidez	Análisis de agua - Determinación de acidez y alcalinidad en aguas naturales, residuales y residuales tratadas (alcalinidad total, alcalinidad a la fenoftaleína, Carbonatos, Bicarbonatos, Hidroxilos, Acidez Total).	NMX-AA-036-SCFI-2001
aerobias	Cuenta total mesofílicas anaerobias y aerobias.	Método estándar APHA AWWA Sección 9215 B-1998 20a Edición
Alcalinidad	Análisis de agua - Determinación de acidez y alcalinidad en aguas naturales, residuales y residuales tratadas (alcalinidad total, alcalinidad a la fenolftaleína, Carbonatos, Bicarbonatos, Hidroxilos, Acidez Total).	NMX-AA-036-SCFI-2001
Aluminio	Análisis de agua - Medición de metales por absorción atómica en aguas naturales, potables, residuales y residuales tratadas - método de prueba	NMX-AA-051-SCFI-2016
Arsénico	Análisis de agua - Medición de metales por absorción atómica en aguas naturales, potables, residuales y residuales tratadas - método de prueba	NMX-AA-051-SCFI-2016
Bario	Análisis de agua - Medición de metales por absorción atómica en aguas naturales, potables, residuales y residuales tratadas - método de prueba	NMX-AA-051-SCFI-2016
Bicarbonatos	Análisis de agua - Determinación de acidez y alcalinidad en aguas naturales, residuales y residuales tratadas (alcalinidad total, alcalinidad a la fenolftaleína, Carbonatos, Bicarbonatos, Hidroxilos, Acidez Total).	NMX-AA-036-SCFI-2001
Boro	Análisis de agua- Determinación de boro en aguas naturales, residuales y residuales tratadas.	NMX-AA-063-SCFI-2001
Bromuros	Análisis de agua - Determinación de aniones inorgánicos por cromatografía de iones.	EPA 300.0-1993
Cadmio	Análisis de agua - Medición de metales por absorción atómica en aguas naturales, potables, residuales y residuales tratadas - método de prueba	NMX-AA-051-SCFI-2016
Calcio	Aniones inorgánicos	EPA 300.7 1986
Carbono Orgánico Total	COT	EPA 415.3-2009

Carbonatos	Análisis de agua - Determinación de acidez y alcalinidad en aguas naturales, residuales y residuales tratadas (alcalinidad total, alcalinidad a la fenolftaleína, Carbonatos, Bicarbonatos, Hidroxilos, Acidez Total).	NMX-AA-036-SCFI-2001
Cianuros	Análisis de agua – Determinación de cianuros totales en aguas naturales, residuales y residuales tratadas.	NMX-AA-058-SCFI-2001
Cianuros Totales	Análisis de agua – Determinación de cianuros totales en aguas naturales, residuales y residuales tratadas.	NMX-AA-058-SCFI-2001
Clorofila y Feopigmentos	Determinación de clorofila A, B, C y Feopigmentos	Standard Methods 10200 H 20th Edition 1998
Cloruros	Análisis de agua- Determinación de cloruros totales en aguas naturales, residuales y residuales tratadas.	NMX-AA-073-SCFI-2001
Cloruros	Análisis de agua - Determinación de aniones inorgánicos por cromatografía de iones.	EPA 300.0-1993
CO2	Determinación de carbón orgánico total	Method EPA 415.1 1974
Cobre	Análisis de agua - Medición de metales por absorción atómica en aguas naturales, potables, residuales y residuales tratadas - método de prueba	NMX-AA-051-SCFI-2016
Coliformes Fecales	Calidad del agua- Determinación de número más probable (nmp) de Coliformes Totales, Coliformes Fecales (termotolerantes) y <i>Escherichia Coli</i> presuntiva.	NMX-AA-042-SCFI-2015
Coliformes Fecales en agua de alberca	Apéndice Normativo B. Requisitos sanitarios y calidad del agua que deben cumplir las albercas. Determinación de coliformes fecales en aguas de alberca.	NOM-245SSA1-2010
Coliformes Totales	Calidad del agua- Determinación de número más probable (nmp) de Coliformes Totales, Coliformes Fecales (termotolerantes) y <i>Escherichia Coli</i> presuntiva.	NMX-AA-042-SCFI-2015
Color	Análisis de agua - Determinación de color platino cobalto en aguas naturales, residuales y residuales tratadas	NMX-AA-045-SCFI-2001
Color	COLOR	SM 2120B 1989
Color Platino Cobalto	Análisis de agua- Determinación de color platino cobalto en aguas naturales, residuales y residuales tratadas.	NMX-AA-045-SCFI-2001
Compuestos orgánicos Absorbibles	Determinación de Compuestos orgánicos Absorbibles (AOX)	ISO 9562:2004
COV's	Determinación de Compuestos Orgánicos Volátiles por Cromatografía de Gases - Espectrometría de Masas	EPA 8260D-2018

COSV's	Determinación de Compuestos Orgánicos Semivolátiles por Cromatografía de Gases - Espectrometría de Masas. Bifenilos Policlorados (PCBs)	EPA 8270D-2007
COSV's	Determinación de Compuestos Orgánicos Semivolátiles por Cromatografía de Gases - Espectrometría de Masas.	EPA 8270E-2018
Cloro residual		Standard Methods 4500-CL G. DPH Colorimetric method
Conductividad	Análisis de agua-medición de la conductividad eléctrica en aguas naturales, residuales y residuales tratadas. - Método de prueba.	NMX-AA-093-SCFI-2018
Cromo	Análisis de agua - Medición de metales por absorción atómica en aguas naturales, potables, residuales y residuales tratadas - método de prueba	NMX-AA-051-SCFI-2016
Cromo Hexavalente	Cromo Hexavalente	NMX-AA-044-SCFI-2014
Cuenta Estándar	Cuenta total mesofílicas anaerobias y aerobias.	Método estándar APHA AWWA Sección 9215 B-1998 20a Edición
Cuenta Estándar	Recuento Heterótrofo de placa – Método de placa fluida.	STD METHODS 9215-B-1989 9215 Recuento Heterótrofo de placa-Método de placa fluida
DBO5	Análisis de agua- Determinación de la demanda bioquímica de oxígeno en aguas naturales, residuales (DBO5) y residuales tratadas.	NMX-AA-028-SCFI-2001
DQO	Análisis de agua- Determinación de la demanda química de oxígeno en aguas naturales, potables, residuales y residuales tratadas.	NMX-AA-030/2-SCFI-2011
DQO	Análisis de agua- Medición de la demanda química de oxígeno en aguas naturales, residuales y residuales tratadas. - Parte 1-Método de reflujo abierto.	NMX-AA-030/1-SCFI-2012
DQO	Análisis de agua- Medición de la demanda química de oxígeno en aguas naturales, residuales y residuales tratadas. - Parte 2-Método de tubo sellado a pequeña escala.	NMX-AA-120-SCFI-2016 Apéndice Normativo II
Dureza de Calcio	Dureza de Calcio	STD METHODS 3500-Ca-D-1989 3500-Ca Calcio-Método titulométrico de EDTA
Dureza de Calcio	Dureza de Calcio dureza de Magnesio Calcio Magnesio	Método titulométrico ALPHA AWWA Sección 3500-Ca-B, Mg-B Ed. 21st
Dureza Total	Análisis de agua - Determinación de dureza total en aguas naturales, residuales y residuales tratadas. - Método de prueba	NMX-AA-072-SCFI-2001

Escherichia Coli	Calidad del agua- Determinación de número más probable (nmp) de Coliformes Totales, Coliformes Fecales (termotolerantes) y <i>Escherichia Coli</i> presuntiva.	NMX-AA-042-SCFI-2015
Enterococos Fecales	Determinación de Enterococos Fecales	
Fenoles Totales	Análisis de agua – Determinación de fenoles totales en aguas naturales, potables, residuales y residuales tratadas.	NMX-AA-050-SCFI-2001
Hierro	Análisis de agua - Medición de metales por absorción atómica en aguas naturales, potables, residuales y residuales tratadas - método de prueba	NMX-AA-051-SCFI-2016
Hierro	Determinación de hierro	STD METH 3500-Fe-D
Fluoruros	Análisis de agua - Determinación de aniones inorgánicos por cromatografía de iones.	EPA 300.0-1993
Fluoruros	Análisis de agua – Determinación de fluoruros en aguas naturales, residuales y residuales tratadas.	NMX-AA-077-SCFI-2001
Fósforo en Aguas Salinas	Fósforo en aguas salinas	EPA-365.3
Fósforo Total	Análisis de agua - Determinación de Fósforo total en aguas naturales, residuales y residuales tratadas. Método de Prueba	NMX-AA-029-SCFI-2001
Fósforo Total y Fósforo reactivo total	Determinación de Fósforo Total y Fósforo reactivo total	EPA 365.1 1993
Grasas y Aceites	Medición de grasas y aceites recuperables en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - método de prueba	NMX-AA-005-SCFI-2013
Hidrocarburos fracción ligera	Detección de hidrocarburos de fracción ligera por Cromatografía de Gases con detector de ionización de flama	EPA 8015C 2007
Hidrocarburos fracción media	Detección de hidrocarburos de fracción media por Cromatografía de Gases con detector de ionización de flama	EPA 8015C 2007
Hidrocarburos fracción pesada	Detección de hidrocarburos de fracción pesada. Material extractable con n-hexano (HEM-grasas y aceites) y material extractable con n-hexano tratado con sílica gel (SGTHEM, material no polar) por extracción y gravimetría.	EPA 16648-2010
Hidroxilos	Análisis de agua - Determinación de acidez y alcalinidad en aguas naturales, residuales y residuales tratadas (alcalinidad total, alcalinidad a la	NMX-AA-036-SCFI-2001

	fenolftaleína, Carbonatos, Bicarbonatos, Hidroxilos, Acidez Total).	
Hierro	Hierro	SM 3500-Fe-D-1989
Hongos	Hongos y Levaduras	Método de vertido en placa Determinación de Hongos y Levaduras Método estándar APHA AWWA Sección 9610 A-B 1998 20a Edición
Huevos de Helminto	Análisis de agua - Medición del número de huevos de Helminto en aguas residuales y residuales tratadas por observación microscópica.	NMX-AA-113-SCFI-2012
Ion Sulfato	medición ion sulfato	NMX-AA-074-SCFI-2014
Levaduras	Hongos y Levaduras	Método de vertido en placa Determinación de Hongos y Levaduras Método estándar APHA AWWA Sección 9610 A-B 1998 20a Edición
Magnesio	Aniones inorgánicos	EPA 300.7 1986
Manganeso	Análisis de agua - Medición de metales por absorción atómica en aguas naturales, potables, residuales y residuales tratadas - método de prueba	NMX-AA-051-SCFI-2016
Materia Flotante	Análisis de agua- Determinación de materia flotante en aguas residuales y residuales tratadas.	NMX-AA-006-SCFI-2010
Mercurio	Análisis de agua - Medición de metales por absorción atómica en aguas naturales, potables, residuales y residuales tratadas - método de prueba	NMX-AA-051-SCFI-2016
mesofílicas anaerobias	Cuenta total mesofílicas anaerobias y aerobias.	Método estándar APHA AWWA Sección 9215 B-1998 20a Edición
Muestreo	Muestreo de agua natural, superficial, pozo y tanque de almacenamiento.	PTA-AGUA Método interno 1
Muestreo de agua de alberca	Requisitos sanitarios y calidad del agua que deben cumplir las albercas. Muestreo en aguas de alberca. Anexo 7.	NOM-245SSA1-2010
Muestreo	Aguas residuales muestreo.	NMX-AA-003-1980
Muestreo	Cuerpos receptores - Muestreo	NMX-AA-014-1980
Níquel	Análisis de agua - Medición de metales por absorción atómica en aguas naturales, potables, residuales y residuales tratadas - método de prueba	NMX-AA-051-SCFI-2016
N-NH3		SM 4500/-NH3F PHENATE METHOD
Nitratos	Análisis de aguas- Determinación de nitratos en aguas naturales, potables, residuales y residuales tratadas.	NMX-AA-079-SCFI-2001
Nitritos	Análisis de Agua – Medición de Nitrógeno de Nitritos en Aguas	NMX-AA-099-SCFI-2021

	Naturales, Residuales, Residuales Tratadas y Marinas – Método de Prueba	
Nitritos	Protección al ambiente – Calidad del agua - Determinación de nitrógeno de nitritos en aguas naturales, potables, residuales y residuales tratadas.	NMX-AA-099-SCFI-2006
Nitrógeno Amoniacal	Análisis de agua - Medición de nitrógeno total Kjeldahl en aguas naturales, residuales y residuales tratadas.	NMX-AA-026-SCFI-2010
Nitrógeno Amoniacal		EPA 350.1 1993
Nitrógeno Kjeldahl	Análisis de agua - Medición de nitrógeno total Kjeldahl en aguas naturales, residuales y residuales tratadas.	NMX-AA-026-SCFI-2010
Nitrógeno Orgánico	Análisis de agua - Medición de nitrógeno total Kjeldahl en aguas naturales, residuales y residuales tratadas.	NMX-AA-026-SCFI-2010
Nitrógeno Total Kjeldahl		EPA 351.2 1993
N Total	Determinación de N total por Método de Persulfato	SM 4500 -N C
Nitrógeno de nitratos/Nitrógen o de nitritos	Determinación de Nitrógeno de nitratos/Nitrógeno de nitritos	EPA 353.2 1993
Ortofosfatos	Análisis de agua - Determinación de Fósforo total en aguas naturales, residuales y residuales tratadas. Método de Prueba	NMX-AA-029-SCFI-2001
Oxígeno Disuelto	Análisis de agua- Determinación de oxígeno disuelto en aguas naturales, residuales y residuales tratadas.	NMX-AA-012-SCFI-2001
pH	Análisis de agua- Medición de PH en aguas naturales, residuales y residuales tratadas Método de prueba.	NMX-AA-008-SCFI-2016
Plata	Análisis de agua - Medición de metales por absorción atómica en aguas naturales, potables, residuales y residuales tratadas - método de prueba	NMX-AA-051-SCFI-2016
Plomo	Análisis de agua - Medición de metales por absorción atómica en aguas naturales, potables, residuales y residuales tratadas - método de prueba	NMX-AA-051-SCFI-2016
Potasio	Análisis de agua - Medición de metales por absorción atómica en aguas naturales, potables, residuales y residuales tratadas - método de prueba	NMX-AA-051-SCFI-2016
Potasio	Aniones inorgánicos	EPA 300.7 1986
Potasio	Potasio	MS 3500-K-D-1989
Potencial Redox	REDOX	SM 2580 método A

SAAM	Análisis de aguas-Determinación de sustancias activas al azul de metileno (SAAM) en aguas naturales, potables, residuales y residuales tratadas.	NMX-AA-039-SCFI-2001
Salmonella	Procedimiento de Salmonella.	STD Methods 9260 D 1998
Salinidad	Salinidad	SM 20th 2520b-1998
Selenio	Análisis de agua - Medición de metales por absorción atómica en aguas naturales, potables, residuales y residuales tratadas - método de prueba	NMX-AA-051-SCFI-2016
Shigella	Procedimiento de Shigella	STD Methods 9260 E 1998
Shigella	Procedimiento de Salmonella.	STD Methods 9260 D 1998
Silica	SiO <sub>2</sub>	NMX-AA-075-1982
Silice	Análisis de agua – Determinación de Sílice.	NMX-AA-075-1982
Silice	Método interno para la detección de sílice	PE-10-002-31-1
Sodio	Análisis de agua - Medición de metales por absorción atómica en aguas naturales, potables, residuales y residuales tratadas - método de prueba	NMX-AA-051-SCFI-2016
Sodio	Aniones inorgánicos	EPA 300.7 1986
Sodio	Sodio	SM 3500-Na-D-1989
Sólidos Disueltos Totales	Sólidos y Sales Disueltas	NMX-AA-034-SCFI-2015
Sólidos Sedimentables	Análisis de agua- Medición de sólidos sedimentables en aguas naturales, residuales y residuales tratadas.	NMX-AA-004-SCFI-2013
Sólidos Suspendidos Totales	Sólidos y Sales Disueltas	NMX-AA-034-SCFI-2015
Sólidos Totales	Sólidos y Sales Disueltas	NMX-AA-034-SCFI-2015
Sólidos y Sales Disueltas	Sólidos y Sales Disueltas	NMX-AA-034-SCFI-2015
SST	SST Residuos No Filtrables para aguas potables, superficiales salinas, residuales y desechos industriales	EPA 160.2
Sulfatos	Análisis de agua - Determinación de aniones inorgánicos por cromatografía de iones.	EPA 300.0-1993
Sulfatos	medición ion sulfato	NMX-AA-074-SCFI-2014
Sulfuros	Análisis de agua – Determinación de sulfuros.	NMX-AA-084-1982
Temperatura (°C)	Análisis de agua – Medición de la temperatura en aguas naturales, residuales y residuales tratadas.	NMX-AA-007-SCFI-2013
Toxicidad Daphnia Magna	Análisis de agua - Determinación de Toxicidad Daphnia Magna	NX-AA-087-SCFI-2010
Toxicidad aguda	Evaluación de Toxicidad Aguda con Vibrio fischeri	NX-AA-112-SCFI-2017

Turbiedad	Análisis de agua- Determinación de turbiedad en aguas naturales, residuales y residuales tratadas.	NMX-AA-038-SCFI-2001
Vibrio cholerae	Vibrio Cholerae.	Método estándar APHA AWWA Sección 9260 H-1998 20a Edición
Yodo	Determinación de Yodo	SM 4500-I B 22Th Edition 2012
Zinc	Análisis de agua - Medición de metales por absorción atómica en aguas naturales, potables, residuales y residuales tratadas - método de prueba	NMX-AA-051-SCFI-2016

Anexo 6. Directorio de entidades con capacidad analítica en la CAA.

Laboratorios y Auditores Ambientales dedicados a medir la Calidad del Agua en Puebla										
ID	Estado	Municipio	Servicio	Nombre	Giro de la Empresa	Condición	Domicilio	Correo Electrónico	Teléfono(s)	Sitio Web
1	Puebla	Puebla	Privado	Central de Negocios Partner, S.A. DE C.V. (LABORATORIO)	Laboratorio acreditado por la Entidad Mexicana de Acreditación (EMA) y aprobado por la Conagua	Activo  *No hay mucha información	1a cerrada 5 de Mayo No. 33, Col. San Pablo Xochimehuacan, C.P.72014, Puebla, Puebla	<a href="mailto:productospartner@hotmail.com">productospartner@hotmail.com</a>	(222) 288 8367	
2	Puebla	Puebla	Privado	Concesiones Integrales, S.A. de C.V.	Laboratorio acreditado por la Entidad Mexicana de Acreditación (EMA) y aprobado por la Conagua	Activo	Paricutin No. 21, Col. Malinzi C.P. 72210, Puebla	<a href="mailto:atencion.clientes@aguapuebla.mx">atencion.clientes@aguapuebla.mx</a>	(222) 211 70 70	<a href="https://www.aguapuebla.mx/">https://www.aguapuebla.mx/</a>

3	Puebla	Puebla	Público	CONAGUA. Dirección Local Puebla. Laboratorio de Calidad del Agua y Monitoreo	<b>Laboratorio acreditado por la Entidad Mexicana de Acreditación (EMA) y aprobado por la Conagua</b>	Activo	Boulevard México 68 No. 5020, Col. México 68, C.P. 72303, Puebla			
4	Puebla	Puebla	Privado	Ingeniería de Control Ambiental y Saneamiento, S.A. de C.V. Laboratorio de Calidad Ambiental	<b>Laboratorio acreditado por la Entidad Mexicana de Acreditación (EMA) y aprobado por la Conagua</b>	Activo	14 Ote No. 4017, Col. América Sur, C.P.72340, Puebla, Puebla	<a href="mailto:ventas@icays.com">ventas@icays.com</a>	(222) 236 7747 (222) 236 7759 (222) 756 9803 al 6	<a href="https://www.icays.net/">https://www.icays.net/</a>
5	Puebla	Puebla	Privado	Intema, S.A. de C.V.	<b>Laboratorio acreditado por la Entidad Mexicana de Acreditación (EMA) y aprobado por la Conagua</b>	Activo	31 sur No. 2707, Col. Santa Cruz los Ángeles, C.P.72400, Puebla, Puebla	intema@intema.com.mx laboratorio@intema.com.mx	(800) 227 65 00 (222) 230 36 11 (222) 230 17 75	<a href="http://www.intema.com.mx/">http://www.intema.com.mx/</a>

6	Puebla	Puebla	Privado	" <b>LACAMA</b> " Laboratorio de Análisis de Calidad del Agua y Medio Ambiente, S.A. de C.V. Laboratorio Labacama, S.A. de C.V.	<b>LABORATORIO acreditado por la Entidad Mexicana de Acreditación (EMA) y aprobado por la Conagua</b>	Activo	Calle 10 Sur No. 7301, Col. Loma Linda, C.P.72477, Puebla, Puebla	<a href="mailto:cotizaciones@lacama.com">cotizaciones@lacama.com</a>	(222) 2456972 (222) 7555014 (222) 7983040 (222) 7555005 Cel. 222 2121004	<a href="http://lacama.com.mx/">http://lacama.com.mx/</a>
7	Puebla	Puebla	Privado	" <b>Lab Bio Indu</b> " Laboratorio de Análisis Químicos Alimentos y Aguas Bio-Indu, S.C.	<b>Laboratorio acreditado por la Entidad Mexicana de Acreditación (EMA) y aprobado por la Conagua</b>	Activo	39 poniente No. 928, Col. Gabriel Pastor 1a Sección, C.P.72420, Puebla, Puebla	<a href="mailto:calidad@bioindu.mx">calidad@bioindu.mx</a>	(222)2408988 EXT. 104 (222)2400555 Cel.4680389	<a href="http://bioindu.mx/">http://bioindu.mx/</a>
8	Puebla	Puebla	Privado	Sistemas de Ingeniería Ambiental, S.A. de C.V.	<b>Laboratorio acreditado por la Entidad Mexicana de Acreditación (EMA) y aprobado por la Conagua</b>	Activo <b>*Tienen sucursales en Veracruz y Tamaulipas</b>	<b>Matriz:</b> Priv. 25 A Sur No. 1121, Altos Col. La Paz "A", C.P.72160, Puebla, Puebla. <b>Oficina Central:</b> 11 Poniente No. 2702-5 C.P. 72160 Puebla, Pue.		(222) 7094111 (222) 231 0595 / 230 2999 Ext. 123-124	<a href="http://www.siasa.com.mx">www.siasa.com.mx</a>

9	Puebla	Cuatlancingo	Privado	Volkswagen de México S.A. de C.V. Laboratorio de Tratamiento de Aguas	<b>Laboratorio acreditado por la Entidad Mexicana de Acreditación (EMA) y aprobado por la Conagua</b>	Activo  <b>*No hay mucha información</b>	Autopista México-Puebla No. Km 116, Col. México-Puebla, C.P.72761, Cuatlancingo, Puebla	<a href="mailto:ricardo.loanza@vw.com.mx">ricardo.loanza@vw.com.mx</a>	(222) 230 9476	
10	Puebla	Puebla	Privado	Welfare Ecología Industrial S.A. de C. V	<b>Laboratorio acreditado por la Entidad Mexicana de Acreditación (EMA) y aprobado por la Conagua</b>	Activo	Sto. Tomás de Aquino No. 8315, Puebla, Pue. C.P. 72595		<a href="tel:(222)2137100">(222) 213 7100</a>	<a href="http://welfare-ecologia.com.mx/">http://welfare-ecologia.com.mx/</a>
11	Puebla	Puebla	Privado	"INGEMALab" Laboratorio De Ingeniería En Medio Ambiente Y Riesgo Ambiental S.A De C.V.	<b>Laboratorio acreditado por la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente como</b>	Activo	Circuito Juan Pablo II No. 505, Plaza Comercial América Local 36 Colonia Residencial	<a href="mailto:gerencia@ingema-lab.com.mx">gerencia@ingema-lab.com.mx</a>	(222) 6 86 48 30	<a href="https://www.ingema-lab.com.mx/">https://www.ingema-lab.com.mx/</a>

					<b>laboratorio en materia del ruido</b>		Bulevares, C.P. 72440			
12	Puebla	Puebla	Privado	"Arizmendi Ingeniería Ambiental S.A. de C.V."	<b>CONSULTORÍA</b>	Activo	Cto Juan Pablo II 505, Residencial Bulevares, C.P.72440 Puebla, Pue.		(222) 5 74 93 60 (222) 5 21 02 10	<a href="https://www.arizmendiconsultores.com/">https://www.arizmendiconsultores.com/</a>
13	Puebla	Puebla	Privado	"Proinsa" Proyectos de Ingeniería y Sistemas Ambientales S.A de C. V	<b>CONSULTORÍA</b> El Monitoreo y análisis de aguas residuales se hace bajo el registro de la Entidad Mexicana de Acreditamiento (EMA).	Activo	Calle: Brasil 2237, Las Hadas Mundial 86 C.P.72070 Puebla, Pue.	<a href="mailto:contacto@proinsa-mexico.com.mx">contacto@proinsa-mexico.com.mx</a>	(222) 2 48 73 30 (222) 1 55 34 38	<a href="https://proinsa-mexico.com.mx">https://proinsa-mexico.com.mx</a>
14	Puebla	Puebla	Privado	"GESAMBI" Gestión Ambiental Seguridad e Higiene	<b>CONSULTORÍA</b> El análisis de aguas residuales se hace bajo el registro de la Entidad Mexicana de Acreditamiento (EMA).	Activo	12 Sur No. 11167-2, Residencial del Parque, C.P. 72590, Puebla, Pue.	<a href="mailto:info@gesambi.com.mx">info@gesambi.com.mx</a>	(222) 290-4202	<a href="https://www.gesambi.com.mx/">https://www.gesambi.com.mx/</a>
15	Puebla	Puebla	Privado	"EPA" Ecología y Protección Ambiental	<b>CONSULTORÍA</b>	Activo	Av. La Troje 2473 Col. Camino Real, C.P. 72595, Puebla, Pue.	<a href="mailto:consultoriaambiental@epamex.com">consultoriaambiental@epamex.com</a>	(222) 4 04 67 94 (222) 4 04 67 95	<a href="http://www.epamex.com">http://www.epamex.com</a>

16	Puebla	Puebla	Privado	"Teamb" Alternativa Aplicada Ambiental	<b>CONSULTORÍA</b> Aguas residuales y Tratabilidad / Gestión Ambiental El Monitoreo y análisis de aguas residuales se hace bajo el registro de la Entidad Mexicana de Acreditamiento (EMA)	Activo	Calle Josefa Ortíz de Domínguez 124, San Felipe Hueyotlipan, 72030 Puebla, Pue.	<a href="mailto:contacto@teamb.com.mx">contacto@teamb.com.mx</a>	(222) 8 87 68 20	<a href="https://teamb.com.mx/">https://teamb.com.mx/</a>
17	Puebla	Puebla	Privado	"Querkus: un ambiente seguro"	<b>CONSULTORÍA</b> El Monitoreo y análisis de aguas residuales se hace bajo el registro de la Entidad Mexicana de Acreditamiento (EMA)	Activo	3 Pte. 2925 int 3 Col. La Paz. Puebla. Puebla.	<a href="mailto:asesoria@querkus.com.mx">asesoria@querkus.com.mx</a>	(222) 7 34 62 46	<a href="https://querkus.com.mx/">https://querkus.com.mx/</a>
18	Puebla	Puebla	Privado	Azul y Verde Ambiental S.A. de C. V	<b>CONSULTORÍA</b>	Activo	14 Sur 11508-24 Héroes, Puebla, Puebla.	<a href="mailto:amrroy@azulyverdeambiental.com">amrroy@azulyverdeambiental.com</a>	(222) 3 68 24 03	<a href="http://azulyverdeambiental.com/">http://azulyverdeambiental.com/</a>
19	Puebla	Puebla	Privado	Grupo ECOSE	<b>CONSULTORÍA</b>	Activo	19 Poniente 1508 int 3, Col. Santiago entre 15 y 17 sur CP 72410 Puebla Puebla.	<a href="mailto:ventas@ecose.com.mx">ventas@ecose.com.mx</a>	(222) 2 31 02 76 (222) 2 32 27 52	<a href="http://ecose.com.mx/">http://ecose.com.mx/</a>
20	Puebla	Puebla	Privado	Tecnológico de Monterrey Campus Puebla: Bioingeniería y Procesos Químicos; Investigación: Ciencia y Tecnología del Agua	<b>Academia, investigación y vinculación</b>	Activo	Atlixcáyotl 5718, Reserva Territorial Atlixcáyotl, 72453 Heroica	<a href="mailto:jurgen@tec.mx">jurgen@tec.mx</a>		<a href="https://tec.mx/es/puebla">https://tec.mx/es/puebla</a>

							Puebla de Zaragoza, Pue.			
21	Puebla	San Andrés Cholula	Privado	<p><b>*Universidad de las Américas Puebla</b> Escuela de Ingeniería Laboratorio de Calidad del Agua</p> <p><b>*Consultores UDLAP</b></p>	<p><b>Academia, Investigación, Desarrollo Y consultoría (ingeniería, etc.)</b></p>	Activo	<p>Universidad de las Américas Puebla. Ex Hacienda Sta. Catarina Mártir S/N. San Andrés Cholula, Puebla. C.P. 72810.</p>	<p><a href="mailto:udlap.consultores@udlap.mx">udlap.consultores@udlap.mx</a></p>	<p>(222) 229 2000 ext. 2032 (222)-229-2713</p>	<p><a href="https://www.udlap.mx/investigacion/">https://www.udlap.mx/investigacion/</a> <a href="https://consultores.udlap.mx/">https://consultores.udlap.mx/</a></p>
22	Puebla	San Andrés Cholula	Privado	<p><b>*Universidad Iberoamericana Puebla</b> Instituto de Investigaciones en Medio Ambiente</p>	<p><b>Instituto de Investigaciones en Medio Ambiente</b></p>	Activo	<p>Bld. del Niño Poblano No. 2901, Colonia Reserva Territorial Atlixcáyotl, San Andrés Cholula, Pue. C. P. 72820</p>		<p>(222) 372 3000 (222) 229 0700</p>	<p><a href="https://www.iberopuebla.mx/ima/">https://www.iberopuebla.mx/ima/</a></p>

23	Puebla	Puebla	Privado	<b>Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla</b> Departamento de Consultoría Estratégica	<b>Academia, Investigación y consultoría</b>	Activo	UPAEP. 21 sur 1103 Barrio Santiago C.P. 72410, Puebla, México	<a href="mailto:rosario.viveros@upaep.mx">rosario.viveros@upaep.mx</a>	(222) 229 94 00 extensión 7680  (222) 32 44 367	<a href="https://www.upaep.mx/consultoria-estrategica">https://www.upaep.mx/consultoria-estrategica</a>
24	Puebla	Puebla	Público	<b>Benemérita Universidad Autónoma de Puebla</b> Instituto de Ciencias Centro de Investigaciones en Ciencias Microbiológicas	<b>Academia, Investigación, Desarrollo y consultoría</b>	Activo	Edificio IC11 Segundo piso  Ciudad Universitaria Colonia Jardines de San Manuel C.P. 72570 Puebla, Pue., México.		(222) 229 55 00 ext. 2520	<a href="https://icuap.buap.mx/servicios/catalogo">https://icuap.buap.mx/servicios/catalogo</a> <a href="https://icuap.buap.mx/Centro-de-Investigaciones-en-Ciencias-Microbiologicas">https://icuap.buap.mx/Centro-de-Investigaciones-en-Ciencias-Microbiologicas</a>
25	Puebla	Puebla	Público	<b>Benemérita Universidad Autónoma de Puebla</b> Instituto de Ciencias Centro de Investigaciones en Dispositivos Semiconductores	<b>Investigación, Desarrollo y consultoría</b>	Activo	Edificio IC6 Ciudad Universitaria, Jardines de San Manuel C.P. 72570 Puebla, Pue.		(222) 229 55 00 ext. 5528	<a href="https://icuap.buap.mx/servicios/catalogo">https://icuap.buap.mx/servicios/catalogo</a>

26	Puebla	Puebla	Público	<b>Benemérita Universidad Autónoma de Puebla</b> Instituto de Ciencias Departamento de Biología y Toxicología de la Reproducción	<b>Investigación, Desarrollo y consultoría</b>	Activo	Edificio IC4 Ciudad Universitaria, Jardines de San Manuel C.P. 72570 Puebla, Pue.	(222) 229 55 00 ext. 7160	<a href="https://icuap.buap.mx/servicios/catalogo">https://icuap.buap.mx/servicios/catalogo</a> <a href="https://icuap.buap.mx/Departamento-de-Biologia-y-Toxicologia-de-la-Reproduccion">https://icuap.buap.mx/Departamento-de-Biologia-y-Toxicologia-de-la-Reproduccion</a>
27	Puebla	Puebla	Público	<b>Benemérita Universidad Autónoma de Puebla</b> Instituto de Ciencias Departamento Universitario para el Desarrollo Sustentable	<b>Investigación, Desarrollo y consultoría</b>	Activo	Edificio IC2 Ciudad Universitaria, Jardines de San Manuel C.P. 72570 Puebla, Pue.	(222) 229 55 00 ext. 2568	<a href="https://icuap.buap.mx/servicios/catalogo">https://icuap.buap.mx/servicios/catalogo</a>

28	Puebla	Puebla	Público	<b>Benemérita Universidad Autónoma de Puebla</b> Instituto de Ciencias Departamento de Investigación en Ciencias Agrícolas	<b>Investigación, Desarrollo y consultoría</b>	Activo	Edificio IC4 Ciudad Universitaria, Jardines de San Manuel C.P. 72570 Puebla, Pue.		(222) 229 55 00 ext. 7357	<a href="https://icuatp.uap.mx/servicios/catalogo">https://icuatp.uap.mx/servicios/catalogo</a> <a href="https://icuatp.uap.mx/Departamento-de-Investigacion-en-Ciencias-Agricolas">https://icuatp.uap.mx/Departamento-de-Investigacion-en-Ciencias-Agricolas</a>
29	Puebla	Puebla	Público	<b>Benemérita Universidad Autónoma de Puebla</b> Instituto de Ciencias Centro de Química	<b>Investigación, Desarrollo y consultoría</b>	Activo	Edificio IC9 Ciudad Universitaria, Jardines de San Manuel C.P. 72570 Puebla, Pue.		(222) 229 55 00 ext. 7296	<a href="https://icuatp.uap.mx/servicios/catalogo">https://icuatp.uap.mx/servicios/catalogo</a> <a href="https://icuatp.uap.mx/centro-de-quimica-del-icuatp">https://icuatp.uap.mx/centro-de-quimica-del-icuatp</a>

30	Puebla	Puebla	Público	<b>*Universidad Politécnica Metropolitana de Puebla</b> Líneas y Proyectos de Investigación en Ingeniería en Biotecnología	<b>Academia, Investigación, Desarrollo y consultoría</b>	Activo	Universidad Politécnica Metropolitana de Puebla Popocatepetl s/n, Reserva Territorial Atlixcáyotl, Tres Cerritos, 72480 Puebla, Pue.	<a href="mailto:info@metropoli.edu.mx">info@metropoli.edu.mx</a>	(222) 582 5222	<a href="http://metropoli.edu.mx/lineas-y-proyectos-de-investigacion/">http://metropoli.edu.mx/lineas-y-proyectos-de-investigacion/</a>
31	Puebla	Puebla	Público	<b>*Universidad Tecnológica de Puebla</b> Laboratorio Ambiental	<b>Academia</b>	Activo	Universidad Tecnológica de Puebla Edificio de Docencia No.4 Antiguo Camino a la Resurrección No. 1002-A Zona Industrial Puebla Oriente, Puebla	<a href="mailto:jaime.luna@utpuebla.edu.mx">jaime.luna@utpuebla.edu.mx</a>	(222) 309 88 64	<a href="http://www.utpuebla.edu.mx/ambiental/laboratorios.html">http://www.utpuebla.edu.mx/ambiental/laboratorios.html</a>

32	Puebla	Puebla	Público	Colegio de Postgraduados	<b>Academia, investigación y vinculación</b>	Activo	Km. 125.5 carretera federal México- Puebla (Boulevard Forjadores de Puebla), C.P. 72760			<a href="https://www.colpos.mx/cp/campus-puebla/campus-puebla-1">https://www.colpos.mx/cp/campus-puebla/campus-puebla-1</a>
----	--------	--------	---------	--------------------------	--	--------	--	--	--	---

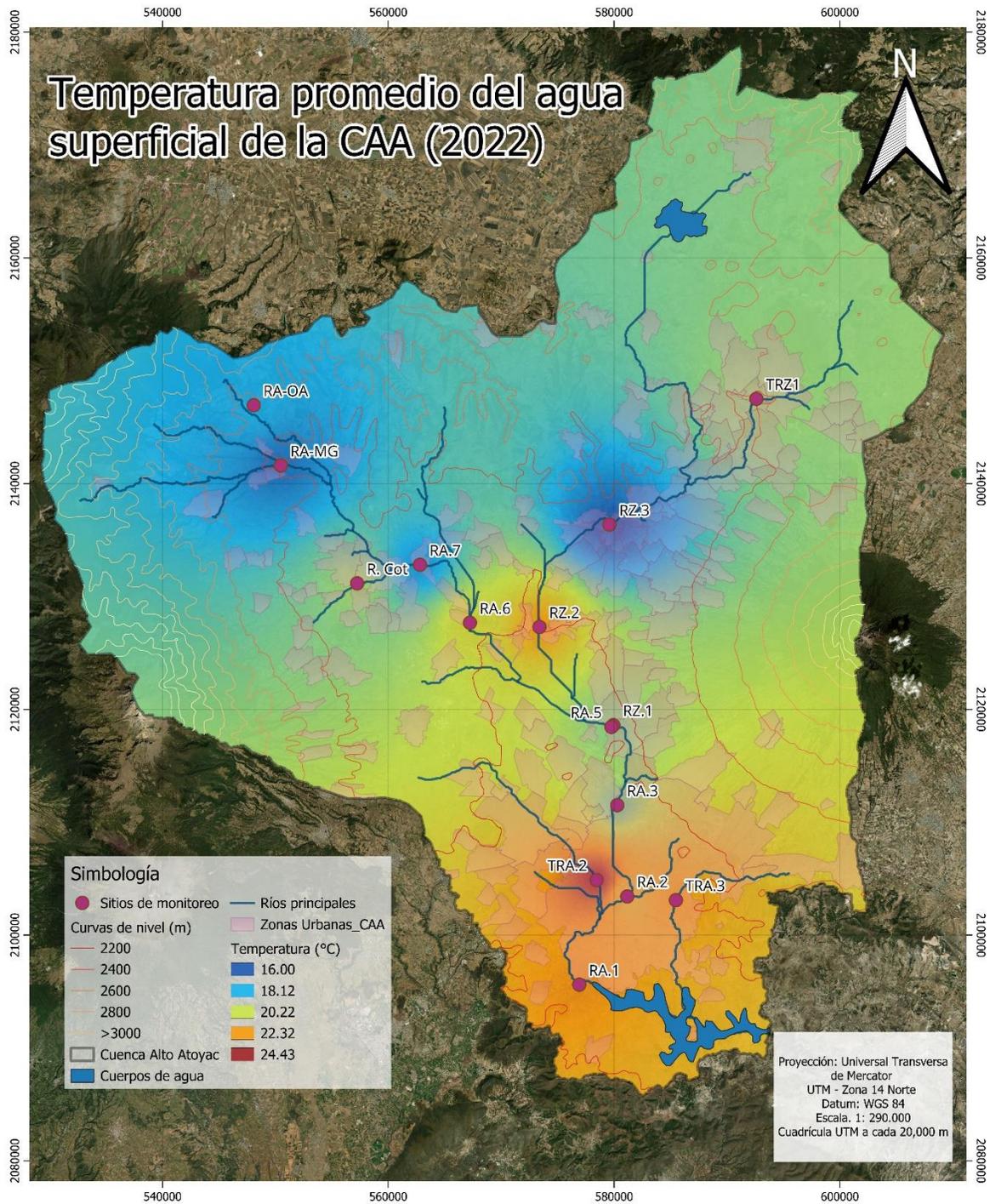
**Laboratorios y Auditores Ambientales dedicados a medir la Calidad del Agua en Tlaxcala**

ID	Estado	Municipio	Servicio	Nombre	Acreditación	Condición	Domicilio	Correo Electrónico	Teléfono(s)	Sitio Web
1	Tlaxcala	Papalotla de Xicohténcatl	Privado	Corporativo Ambiental División Agua S.A. de C.V.	<b>LABORATORIO</b> acreditado por la Entidad Mexicana de Acreditación (EMA) y aprobado por la Conagua	Activo	Calle Crescenciano Berruecos No.31 3era. Sección Barrio Xilotzingo, Papalotla de Xicohténcatl Tlaxcala C.P. 90790	<a href="mailto:contacto@corporativoagua.com">contacto@corporativoagua.com</a> <a href="mailto:muestreo@corporativoagua.com">muestreo@corporativoagua.com</a> <a href="mailto:laboratorio@corporativoagua.com">laboratorio@corporativoagua.com</a>	(222) 4 05 80 70 (222) 2 95 72 41	<a href="http://corporativoagua.com">http://corporativoagua.com</a>

	Tlaxcala	Papalotla de Xicohténcatl	Privado	<b>Sistemas de Ingeniería y Control Ambiental S.C.</b>	<b>Consultoría</b> Acreditación la Entidad Mexicana de Acreditamiento (EMA).	Activo	Av. Constitución No. 17, Col. Panzacola, Papalotla de Xicohténcatl, Tlaxcala, c.p. 90796			
3	Tlaxcala	Ixtacuixtla	Público	<b>Universidad Autónoma de Tlaxcala</b> Centro de Investigación en Genética y Ambiente Laboratorio de Toxicología y Química Ambiental	<b>Academia e Investigación</b>	Activo	Km 10.5 Autopista Tlaxcala-San Martín Ixtacuixtla, Tlax. C.P. 90120	<a href="mailto:poscigya@gmail.com">poscigya@gmail.com</a>	(248) 48 15 500	<a href="https://cigya.uatx.mx/">https://cigya.uatx.mx/</a>

4	Tlaxcala	Tetlatlahuca	Público	<b>Centro de Investigación en Biotecnología Aplicada - IPN</b>	<b>Academia, Investigación, Desarrollo y Consultoría</b> Laboratorios acreditado por la Entidad Mexicana de Acreditación (EMA)	Activo	CIBA-IPN. Ex-Hacienda San Juan Molino Carretera Estatal Tecuexcomac-Tepetitla Km 1.5, Tlaxcala C.P. 90700		(248) 48 707-65 y 66 Área de vinculación: 55-57296300 Ext.: 87829 y 87819	<a href="https://www.cibatlaxcala.ipn.mx/">https://www.cibatlaxcala.ipn.mx/</a> <a href="https://www.cibatlaxcala.ipn.mx/vinculacion/servicios/factibilidad.html">https://www.cibatlaxcala.ipn.mx/vinculacion/servicios/factibilidad.html</a>
5	Tlaxcala	Tlaxcala	Público	<b>Centro de Investigación y de Innovación del Estado de Tlaxcala</b> Laboratorio de Pruebas Ambientales	<b>LABORATORIO</b> acreditado por la Entidad Mexicana de Acreditación (EMA) y aprobado por la Conagua	Activo	Xicothéncatl Tlaxcala MX, Calle 1 de Mayo No. 22, Centro, 90000 Tlaxcala de Xicothéncatl, Tlax.	<a href="mailto:marlene.andrade@ciga.edu.mx">marlene.andrade@ciga.edu.mx</a>	(246) 246 0003	<a href="https://citlax.mx/servicios">https://citlax.mx/servicios</a>

Anexo 7. Gradiente de temperatura del agua superficial de los sitios de muestreo



Elaboración propia.

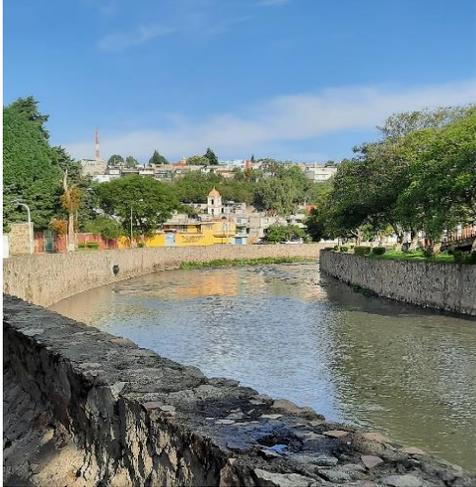
Anexo 8. Descripción general de los sitios considerados en el estudio prospectivo

Sitio	Descripción		Foto
	General	Ambiental	
RA1	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Acceso al sitio por debajo del puente</li> <li>• Olor muy fuerte (caño)</li> <li>• Río cercano a la zona urbana</li> <li>• Paso peatonal al margen del río</li> <li>• Escuela primaria cercana al sitio</li> <li>• Cercano a pozo de agua subterránea</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sedimento fino</li> <li>• Vegetación abundante al margen del río</li> <li>• Alta presencia de carrizo y sauces</li> <li>• Presencia de aves e insectos</li> <li>• Agua color gris/negro</li> </ul>	
RA2	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ciclovía al margen del río</li> <li>• Paso constante de peatones</li> <li>• Aledaño a la zona urbana</li> <li>• Olor a drenaje</li> <li>• Descargas domésticas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vegetación abundante</li> <li>• Agua color café oscuro</li> <li>• Flujo de cauce: constante</li> </ul>	
TRA3	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Difícil acceso para muestrear</li> <li>• Zona habitacional aledaña</li> <li>• Descargas domésticas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Río somero (poca profundidad)</li> <li>• Flujo de cauce: lento</li> <li>• Agua color verde/café</li> <li>• Flora abundante</li> </ul>	

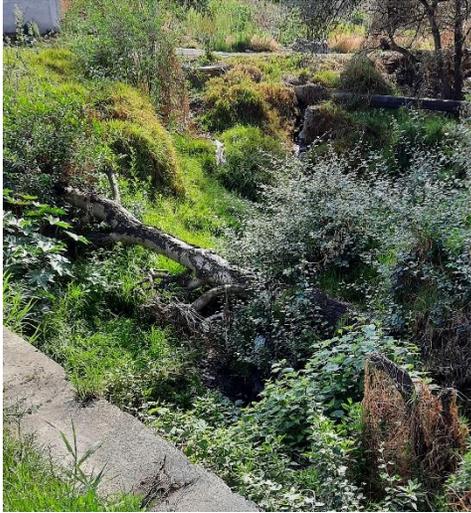
		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alta presencia de carrizo</li> <li>• 40% de visibilidad</li> </ul>	
TRA2	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Difícil acceso para muestrear</li> <li>• Zonas residencial muy cercanas al río</li> <li>• Paso obligatorio para los vecinos de la zona</li> <li>• El olor es moderado en el puente; el olor se incrementa al acercarse al desagüe (olor muy intenso)</li> <li>• Presencia de taller textil (cercano al desagüe)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vegetación inducida por los vecinos: plátanos, magueyes, pastos y flores ornamentales</li> <li>• Vegetación natural: carrizo y sauces</li> <li>• Agua color verde en el puente</li> <li>• Agua color café rojizo en el desagüe</li> </ul>	
RA3	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Acceso por debajo del puente vehicular</li> <li>• Cercano a planta de tratamiento</li> <li>• Cercano a zona residencial y escolar</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vegetación riparia abundante: higuera, carrizo, sauces, etc.</li> <li>• Sedimentos finos</li> <li>• Flujo de cauce: constante</li> </ul>	

	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cercano a zona cultural</li> <li>• Cercano a una zona restringida con invernaderos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Poca profundidad</li> <li>• Muchas partículas disueltas en el agua</li> <li>• Agua color gris claro</li> </ul>	
RA4	<ul style="list-style-type: none"> <li>• No se tomó en cuenta para el muestreo</li> <li>• Sitio cercano a la Ex Fábrica de textiles “El Valor”</li> <li>• Difícil acceso</li> <li>• Olor intenso y penetrante (alta carga de químicos)</li> <li>• Cascada de más de tres metros de caída</li> <li>• Río en medio de zona semiurbana</li> <li>• Fábrica de etiquetas textiles</li> <li>• Zona en crecimiento</li> <li>• Zonas con vocación agrícola circundantes (milpas de maíz)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Afluente de la presa Tenexac</li> <li>• Vegetación abundante: sauces</li> <li>• Agua con color azul marino/verde</li> </ul>	
RZ1	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cercano a estación hidrométrica</li> <li>• Sitio detrás de la fábrica “El Valor”</li> <li>• Zonas de cultivo cercanas al río</li> <li>• Zonas de propiedad privada</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sitio antes de la confluencia con el río Atoyac</li> <li>• Abundante vegetación ribereña: sauces, higuera, maleza, etc.</li> <li>• Presencia de aves e insectos</li> </ul>	

	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Zonas con ganado cercanas al río</li> <li>• Olor ameno</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Agua color gris (ratón)</li> </ul>	
RA5	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Olor muy fuerte e intenso</li> <li>• Los químicos causan picazón en los ojos</li> <li>• Paso de gente</li> <li>• Pastoreo de animales en la zona</li> <li>• El agua del río recibe las aguas tratadas de la 'Eastman' (industria química)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vegetación abundante</li> <li>• No hay carrizo</li> <li>• Sedimento fino color negro</li> <li>• Diferencia de color entre las aguas del río Atoyac y Río Zahuapan</li> <li>• Agua color gris/negro</li> </ul>	
TRZ1	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Zonas de cultivo al lado del río</li> <li>• Embotellador a de Coca-Cola</li> <li>• Mucha basura</li> <li>• Muchas tuberías de desagüe de Coca-Cola</li> <li>• Río tributario a la laguna de "El Ojito"</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Abundante vegetación: álamos, aile, capulín y tepozán</li> <li>• Pastos inducidos</li> <li>• Presencia de aves</li> <li>• No hay carrizos</li> <li>• Sedimento fino: limo y mucha materia orgánica (tierra negra)</li> <li>• Agua color verde/café</li> </ul>	
RA6	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Difícil acceso al margen del río</li> <li>• Sobre el puente "Temanyecac"</li> <li>• Presencia de mucha basura</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vegetación abundante: higuera</li> <li>• Agua color gris/negro</li> <li>• Río poco profundo</li> <li>• Olor ameno</li> </ul>	

	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Planta de agua residual en obra negra (abandonada)</li> <li>• Paso constante de personas</li> <li>• Paso vehicular</li> <li>• Ductos de hidrocarburos (zona de huachicol)</li> <li>• Cerca de la planta de producción de "Palaquimia Tlaxcala"</li> </ul>		
RZ2	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Camino de grava alledaño</li> <li>• Cerca de una central eléctrica</li> <li>• Zonas habitacionales alledañas al río</li> <li>• Pequeñas milpas a lado del río</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vegetación abundante: higuera, álamos, sauces</li> <li>• Agua color verde/café</li> <li>• Flujo de cauce: constante</li> <li>• Profundidad: baja</li> </ul>	
RZ3	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Corredor turístico</li> <li>• Parques y comercios en la rivera</li> <li>• No presenta olor</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Agua sin carga de sedimentos</li> <li>• Abundante vegetación inducida</li> <li>• Muchas palomas</li> <li>• Río poco profundo</li> <li>• Río con abundante grava en su lecho</li> </ul>	

RA7	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sitio a lado de puente vehicular</li> <li>• Paso de peatones</li> <li>• Paso vehicular</li> <li>• Bajo del puente hay dos manantiales entubados que descargan su agua en el río</li> <li>• Casas a lado del río</li> <li>• A 500 m del punto hay un desagüe industrial</li> <li>• Drenajes clandestinos</li> <li>• Olor ameno</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vegetación abundante: pirul, sauces, pastos</li> <li>• Agua con carga de partículas suspendidas</li> <li>• Agua color gris</li> <li>• Se vio un lagarto escorpión</li> <li>• Río poco profundo</li> <li>• Gravas en el lecho del río</li> </ul>	
TRA1	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Humedal comunitario</li> <li>• Terrenos agrícolas aledaños al sitio</li> <li>• El humedal recibe aguas tratadas de San Martín Texmelucan</li> <li>• Sitio cercado</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lenteja de agua</li> <li>• Presencia de vegetación inducida</li> <li>• Presencia de abejas</li> </ul>	
Canal -TNM	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fuente difusa del Río Atoyac</li> <li>• Cerca del Instituto Tecnológico del Altiplano</li> <li>• Zona industrial de</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Infraestructura hidráulica para canalizar el río</li> <li>• Canales sin flujo de agua</li> <li>• Agua estancada</li> </ul>	

	<p>San Gabriel Popocatepla</p>		
<p>Canal -TP</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Canal Tepetitla</li> <li>• Canal profundo (3.48 m)</li> <li>• Zonas urbanas aledañas</li> <li>• Zonas de cultivo a pequeña esca aledañas al canal</li> <li>• Zonas industriales cercanas al canal</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Agua estancada</li> </ul>	

RCOT	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sitio ubicado a lado de un puente vehicular</li> <li>• Cercano a la carretera "San Salvador el Verde" y al camino AL Moral</li> <li>• Canal pequeño</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vegetación abundante: sauces, pastos, etc.</li> <li>• Agua con alta carga de colorante azul</li> <li>• Agua color azul turquesa</li> <li>• Sedimentos color negro, con presencia de colorante</li> <li>• Flujo de agua constante</li> <li>• Poca profundidad</li> </ul>	
RA9	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cercano a la carretera Federal México-Puebla</li> <li>• Difícil acceso al río</li> <li>• El río atraviesa las colonias aledañas</li> <li>• Puente histórico de paso de ferrocarril</li> <li>• Sitio de paso peatonal</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• El río recibe descargas domésticas</li> <li>• Agua color gris claro</li> <li>• Flora abundante</li> </ul>	

<p>RA11</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Olor fuerte a drenaje</li> <li>• Olor a solventes</li> <li>• Dificil acceso al cauce</li> <li>• El puente está muy arriba del río</li> <li>• Sobre el puente hay un canal</li> <li>• El agua del canal está limpia</li> <li>• Río al margen de la comunidad</li> <li>• Descarga continua de aguas domésticas</li> <li>• Basura al margen del río</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Agua de color azul marino</li> <li>• Vegetación abundante</li> </ul>	
-------------	--	---	--

<p>RAM G</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sin daño antrópico aparente</li> <li>• Fácil acceso al sitio de muestreo</li> <li>• Fácil acceso vehicular</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vegetación abundante: fresnos, eucalipto, pirul, sauces</li> <li>• Flujo del cauce: constante</li> <li>• Río poco profundo</li> <li>• Presencia de insectos</li> <li>• Presencia de aves</li> <li>• Agua prístina</li> </ul>	
<p>RAOA</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Zona de crianza de truchas</li> <li>• Zona recreativa</li> <li>• Fácil acceso vehicular</li> <li>• Fácil acceso al sitio de muestreo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Agua prístina</li> <li>• Agua inolora</li> <li>• Vegetación abundante</li> <li>• Abundante presencia de fauna: aves, insectos, ranas, culebras de agua, truchas salvajes</li> <li>• Flujo de agua: constante</li> </ul>	

Anexo 9. Análisis de clúster jerárquico: matriz de proximidades

Matriz de proximidades

Distancia euclídea al cuadrado

Caso	1:RA1	2:RA2	3: TRA2	4: TRA3	5:RA3	6: RZ1	7:RA5	8: TRZ1	9:RA6	10: RZ2	11: RZ3	12:RA7	13: RCOT	14: RAMG	15: RAOA
1:RA1	<b>.000</b>	1.156	2.786	2.902	6.906	10.182	6.098	6.563	6.583	9.814	14.224	10.785	19.199	31.858	28.292
2:RA2	1.156	<b>.000</b>	5.915	6.425	2.540	5.002	4.294	4.748	3.125	5.976	7.883	6.016	21.451	22.878	19.825
3: TRA2	2.786	5.915	<b>.000</b>	1.657	12.920	18.728	14.596	11.335	16.115	18.872	21.468	18.672	9.124	43.704	42.224
4: TRA3	2.902	6.425	1.657	<b>.000</b>	14.437	18.741	14.591	9.905	14.644	14.848	24.887	19.202	13.132	46.306	42.635
5:RA3	6.906	2.540	12.920	14.437	<b>.000</b>	1.875	6.825	5.435	3.211	4.952	2.313	3.043	23.948	14.699	13.196
6: RZ1	10.182	5.002	18.728	18.741	1.875	<b>.000</b>	6.888	6.089	2.703	3.831	3.213	2.995	32.596	7.920	5.931
7:RA5	6.098	4.294	14.596	14.591	6.825	6.888	<b>.000</b>	4.073	2.024	7.245	8.119	3.654	36.537	22.741	17.730
8: TRZ1	6.563	4.748	11.335	9.905	5.435	6.089	4.073	<b>.000</b>	3.395	3.776	7.717	2.594	23.142	24.699	20.836
9:RA6	6.583	3.125	16.115	14.644	3.211	2.703	2.024	3.395	<b>.000</b>	2.083	5.753	2.214	35.544	17.540	12.590
10: RZ2	9.814	5.976	18.872	14.848	4.952	3.831	7.245	3.776	2.083	<b>.000</b>	9.206	4.438	34.409	20.610	15.169
11: RZ3	14.224	7.883	21.468	24.887	2.313	3.213	8.119	7.717	5.753	9.206	<b>.000</b>	2.053	31.422	10.928	10.572
12:RA7	10.785	6.016	18.672	19.202	3.043	2.995	3.654	2.594	2.214	4.438	2.053	<b>.000</b>	31.890	15.268	12.360
13: RCOT	19.199	21.451	9.124	13.132	23.948	32.596	36.537	23.142	35.544	34.409	31.422	31.890	<b>.000</b>	57.678	60.920
14: RAMG	31.858	22.878	43.704	46.306	14.699	7.920	22.741	24.699	17.540	20.610	10.928	15.268	57.678	<b>.000</b>	1.235
15: RAOA	28.292	19.825	42.224	42.635	13.196	5.931	17.730	20.836	12.590	15.169	10.572	12.360	60.920	1.235	<b>.000</b>

