



BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA



INSTITUTO DE CIENCIAS

POSGRADO EN CIENCIAS AMBIENTALES

“La Tierra no es de nosotros, nosotros somos de la tierra”

EVALUACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN EN RÍOS URBANOS EN EL ÁREA METROPOLITANA DE PUEBLA.

TESIS

Que para obtener el grado de:

DOCTORA EN CIENCIAS AMBIENTALES

Presenta

ANA CRISTINA COVARRUBIAS LÓPEZ

Directora de tesis:
Dra. Anabella Handal Silva



Diciembre 2023



BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA



INSTITUTO DE CIENCIAS

POSGRADO EN CIENCIAS AMBIENTALES

“La tierra no es de nosotros, nosotros somos de la tierra”

EVALUACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN EN RÍOS URBANOS EN EL ÁREA METROPOLITANA DE PUEBLA.

TESIS

Que para obtener el grado de:

DOCTORA EN CIENCIAS AMBIENTALES

Presenta

ANA CRISTINA COVARRUBIAS LÓPEZ

Comité Tutorial:

Directora	Dra. Anabella Handal Silva
Co-Directora	Dra. Wendy Argelia García Suastegui
Tutora	Dra. Fabiola Avelino Flores
Integrante Comité Tutorial	Dr. Fernando Hernández Aldana †
Integrante Comité Tutorial	Dr. Pedro Rafael Valencia Quintana
Integrante Comité Tutorial	Dr. Aarón Méndez Bermúdez

Diciembre 2023

DEDICATORIA

A Dios

Por haberme permitido llegar hasta esta etapa de mi vida, no abandonarme a pesar de haberme alejado y aun así darme la fortaleza para superar los obstáculos que se me han presentado.

A mi Madre

*La Sra. Araceli López, por todo su esfuerzo y sacrificio, por sus palabras y por siempre estar conmigo aun en los peores momentos.
Gracias por ser el mejor ejemplo de resiliencia y fortaleza.*

A mi Padre

El Sr. José Alfredo Covarrubias porque a pesar de nuestras diferencias siempre ha sido una de mis inspiraciones para salir adelante.

A Fredy y Ari que son los que me inspiran a ser mejor cada día y para los que quiero ser ejemplo de superación y disciplina.

El Señor es mi roca, mi amparo, mi libertador;
es mi Dios, el peñasco en que me refugio.
Es mi escudo, el poder que me salva,
¡mi más alto escondite!
Salmo 18:2

AGRADECIMIENTOS

*Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca de Doctorado otorgada para cursar mis estudios de posgrado.
CVU: 781617*

Se agradece a la Vicerrectoría de Investigación y Estudios de Posgrado por el apoyo otorgado para la conclusión de esta tesis dentro del Eje IV. Modelo de Investigación abierta y compartida. Objetivo 13. Formar recursos humanos que impacten positivamente el contexto social y científico como consecuencia de su accionar en una comunidad para lograr una educación desarrolladora de la transformación. Indicador establecido en el Plan de Desarrollo Institucional 2021-2025.

A la Vicerrectoria de Investigación y Estudios de Posgrado de la BUAP por el apoyo financiero otorgado al proyecto de tesis de Doctorado.

Al Posgrado en Ciencias Ambientales del Instituto de Ciencias de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla de quienes siempre recibí apoyo incondicional.

Al Departamento de Biología y Toxicología de la Reproducción del Instituto de Ciencias de la BUAP, por el apoyo constante brindado al proyecto de tesis.

A la Dra. Anabella Handal Silva, y a la Dra. Wendy Argelia García Suastegui por el interés mostrado en la realización de esta tesis y por brindarme su confianza y apoyo.

A mi comité tutorial:

Dra. Fabiola Avelino Flores

Dr. Aaron Méndez Bermúdez

Dr. Rafael Valencia Quintana

Dr. Fernando Hernández Aldana †

por sus acertadas críticas, sugerencias y apoyo para la elaboración de esta tesis.

ÍNDICE

CAPÍTULO 1. GENERALIDADES.....	11
1.1 Introducción.....	11
1.2 Planteamiento del problema.....	12
1.3 Justificación.....	13
1.4 Preguntas de investigación.....	14
1.5 Objetivos.....	14
1.5.1 Objetivo general.....	14
1.5.2 Objetivos particulares.....	14
1.6 Hipótesis.....	14
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO.....	15
2.1 Contaminación de los ecosistemas hídricos en México.....	15
2.2 Desarrollo industrial en la cuenca del río Atoyac en el ÁMP.....	17
2.3 Contaminación del río Atoyac en en Área Metropolitana de Puebla (ÁMP).....	20
2.4 Mecanismos y evaluación de la toxicidad.....	22
2.4.1 Citotoxicidad.....	24
2.4.2 Ciclo celular.....	24
2.5 Sistema radicular.....	25
2.5.1 Toxicidad en los sistemas vegetales.....	25
2.5.2 <i>Allium cepa</i>	26
2.5.3 La raíz como sistema de ensayo.....	27
CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA.....	28
3.1 Generalidades.....	28
3.2 Caracterización física del río Atoyac y sus tributarios.....	28
3.3 Listado de datos de fuentes contaminantes de las industrias en las zonas de estudio.....	28
3.3.1 Estimación de la densidad industrial en las zonas de estudio.....	29
3.4 Caracterización fisicoquímica del agua del río Atoyac y sus tributarios.....	29

3.6 Análisis del efecto citotóxico inducido por el agua en las zonas de estudio en <i>Allium cepa</i> .	31
3.6.1 Análisis de citotoxicidad.	32
3.7 Análisis estadístico.	33
CAPITULO 4. RESULTADOS.	34
4.1 Zonas de estudio.	34
4.1.1 Zonas de muestreo.	35
4.2 Inventario de fuentes contaminantes industriales en las zonas de estudio.	41
4.3 Estimación de la densidad industrial en las zonas de estudio.	58
4.4 Caracterización de parámetros fisicoquímicos en las zonas de estudio.	58
4.4.1 Concentración promedio de metales pesados, arsénico y cianuro.	60
4.4.2 Identificación de compuestos orgánicos volátiles (COVs).	61
4.5. Análisis del efecto citotóxico en <i>Allium cepa</i> inducido por el agua de cada una de las zonas de estudio.	62
4.5.1 Análisis del número y longitud de las raíces de <i>Allium cepa</i> expuestas a aguas residuales de las zonas de estudio.	62
4.5.2 Índices mitótico (IM) e interfásico (II).	65
4.6 Correlaciones de parámetros fisicoquímicos, metales pesados y COVs en relación al IM.	67
CAPÍTULO 5. DISCUSIÓN.	71
CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES.	80
REFERENCIAS.	83
ANEXOS.	101

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Modelo experimental para analizar el efecto citotóxico en <i>Allium cepa</i>	32
Figura 2. Cuenca hidrológica del río Atoyac y tributarios en el Área Metropolitana de Puebla (ÁMP).....	35
Figura 3. Localización geográfica de la Z1: Represa Covadonga.. ..	36
Figura 4. Represa Covadonga (Z1) en época de lluvias (a y b) y en época de estiaje (c). ...	36
Figura 5. Localización geográfica de la Z2: río Rabanillo.. ..	37
Figura 6. Calzada Zavaleta, río Rabanillo (Z2) (a) y punto de muestreo en época de estiaje (b).	38
Figura 7. Localización geográfica de la Z3: río Zapatero.	39
Figura 8. Río Zapatero en la colonia Concepción la Cruz (a) y acumulación de basura (b)..	40
Figura 9. Localización geográfica de la Z4: presa Echeverría.. ..	40
Figura 10. Presa Echeverría (a) y punto de muestreo (b).	41
Figura 11. Distribución de la industria en la Z1: represa Covadonga.....	42
Figura 12. Distribución de la industria en la Z2: río Rabanillo - Prieto.....	43
Figura 13. Distribución de la industria en la Z3: río Zapatero.....	46
Figura 14. Distribución de la industria en la Z4: presa Echeverría.. ..	49
Figura 15. Distribución de la industria en el ÁMP.....	51
Figura 16. Efecto de la exposición a 120 horas a diferentes concentraciones de agua residual en el número de raíces de <i>Allium cepa</i>	64
Figura 17. Efecto de la exposición a 120 horas a diferentes concentraciones de agua residual en la longitud de las raíces de <i>Allium cepa</i>	64
Figura 18. Efecto del agua residual sobre los II e IM de células meristemáticas de raíz de <i>Allium cepa</i>	66

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Listado de las industrias ubicadas en la represa Covadonga en el ÁMP.	42
Tabla 2. Listado de las industrias ubicadas en el río Rabanillo en el ÁMP.	44
Tabla 3. Listado de las industrias ubicadas en el río Zapatero en el ÁMP.	47
Tabla 4. Listado de las industrias ubicadas en la presa Echeverría en el río Atoyac en el ÁMP.	50
Tabla 5. Listado de las industrias ubicadas en el río Atoyac en el ÁMP.	52
Tabla 6. Total de industrias en ubicadas en las zonas de estudio.	56
Tabla 7. Características de las zonas de estudio.....	57
Tabla 8. Densidad industrial de cada una de las zonas de estudio.....	58
Tabla 9. Parámetros fisicoquímicos del agua en las zonas de estudio.	59
Tabla 10. Concentraciones promedio de metales pesados, arsénico y cianuro en las zonas de estudio.....	60
Tabla 11. Concentración de compuestos orgánicos volátiles (COVs).	61
Tabla 12. Inhibición del crecimiento de la raíz de <i>Allium cepa</i> a diferentes concentraciones en los ríos urbanos deL ÁMP.	63
Tabla 13. Cambios en el índice mitótico de las células meristemáticas en la raíz de <i>Allium cepa</i> a diferentes concentraciones en los ríos urbanos del ÁMP.....	65
Tabla 14. Matriz de correlación de los parámetros de calidad del agua residual e índice mitótico de la represa de Covadonga.	67
Tabla 15. Matriz de correlación de los parámetros de calidad del agua residual e índice mitótico del río Rabanillo.	68
Tabla 16. Matriz de correlación de los parámetros de calidad del agua residual e índice mitótico del río Zapatero.	69
Tabla 17. Matriz de correlación de los parámetros de calidad del agua residual e índice mitótico de la presa Echeverría.....	69
Tabla 18. Matriz de correlación de los parámetros de calidad del agua residual e índice mitótico de las cuatro zonas de estudio.	70

ABREVIATURAS

As	Arsénico
ÁMP	Área Metropolitana de Puebla
ÁMPT	Área Metropolitana de Puebla y Tlaxcala
Cd	Cadmio
CE	Conductividad Eléctrica
COVs	Compuestos Orgánicos Volátiles
CECA	Criterios Ecológicos de la Calidad del Agua
DBO ₅	Demanda Bioquímica de Oxígeno a cinco días
DQO	Demanda Química de Oxígeno
CONAGUA	Comisión Nacional del Agua
CONAPO	Comisión Nacional de la Población
Cr	Cromo
Cu	Cobre
DENUE	Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas
DI	Densidad industrial
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura
IA	Índice Anafásico
IM	Índice Mitótico
IMe	Índice Metafásico
IMTA	Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
INEGI	Instituto Nacional de Estadística y Geografía
IP	Índice Profásico
IT	Índice Telofásico
LMP	Límites Máximos Permisibles
Ni	Níquel
NOMs	Normas Oficiales Mexicanas

OD	Oxígeno Disuelto
OMS	Organización Mundial de la Salud
Pb	Plomo
pH	Potencial Hidrógeno
T °C	Temperatura en grados Celsius
Turb	Turbidez
UNF	Unidades Nefelométricas de turbidez

CAPÍTULO 1. GENERALIDADES

1.1 Introducción.

Las Ciencias Ambientales son una ciencia que estudia y analiza las relaciones de causa y efecto resultantes del mal uso de los recursos naturales, brindando respuestas para un cambio consistente con un futuro sostenible (Guachalla & Ascarrunz, 2003; Wright & Boorse, 2010); en estas se integran conocimientos de disciplinas muy diversas como Ecología, Toxicología, Química, Biología y Fisiología, entre otras (Repetto, 2009). La Toxicología, estudia los riesgos para la salud derivados de la exposición a sustancias químicas tóxicas (Ballantyne *et al.*, 2009; Greim & Snyder, 2018), xenobióticos liberados al ambiente, muchos de los cuales son producto de actividades antropogénicas, como la agricultura y la industria, las cuales repercuten sobre el ambiente y viceversa.

Como consecuencia del desarrollo industrial, agrícola y demográfico que en las últimas décadas ha ocurrido en México y concretamente en el Área Metropolitana de Puebla (ÁMP) en el estado de Puebla, se ha incrementado la contaminación ambiental, alterando la calidad del agua, del suelo y del aire. Un claro ejemplo es el río Atoyac que ha sufrido una fuerte degradación histórica y social, desde la época Colonial. Desde entonces, la industria se ha ido expandiendo hacia el norte, instalando distintos procesos productivos, como el textil, automotriz y metalúrgico (Arellano-Aguilar *et al.*, 2015; Zamora-Almazán, 2019). El río Atoyac ha sido utilizado como colector de los residuos municipales e industriales, alterando la composición química de sus aguas, e incrementando la carga contaminante, dificultando la vida en muchas zonas, que han sido asociadas con efectos adversos a la salud humana, tales como transformaciones celulares relacionadas no solo con citotoxicidad, sino también con daños a nivel cromosómico, cáncer y anomalías en la reproducción (IMTA, 2005; Pérez-Castresana *et al.* 2018, 2019; Rodríguez-Tapia *et al.*, 2012). La presión humana que se ejerce sobre la zona es muy alta, ya que el río atraviesa la cuarta área metropolitana más poblada, la Área Metropolitana de Puebla-Tlaxcala (ÁMPT) de México (~ 3 millones de habitantes), donde se localizan cientos de industrias de diferentes giros como la metalúrgica, metalmecánica, petroquímica, automotriz y textil, entre otras, que contribuyen a su contaminación junto con las actividades domésticas (Handal-Silva *et al.*, 2017; IMTA, 2005; INEGI, 2019; Loreto-López, 2012; Mendoza, 2014; Montero *et al.*, 2006; Pérez-Castresana *et al.* 2018, 2019; Rodríguez-Tapia *et al.*, 2012).

La toxicidad del río ha sido demostrada en varias investigaciones mediante modelos experimentales como: bacterias, crustáceos y peces; se ha expuesto el proceso de degradación ambiental y se han evidenciado los efectos negativos de la exposición de estos organismos, a distintos compuestos orgánicos e inorgánicos diluidos en el agua del río Atoyac (Bravo-Inclán *et al.*, 2009; García-Nieto *et al.*, 2011; Sandoval-Villasana *et al.*, 2009).

Por lo anterior, el objetivo del presente estudio es, evaluar el efecto de la contaminación del agua de los ríos urbanos que atraviesan el ÁMP, empleando a la cebolla (*Allium cepa*) como modelo vegetal en la realización de bioensayos, para contribuir a la comprensión del problema ambiental de manera interdisciplinaria.

1.2 Planteamiento del problema.

El río Atoyac en el ÁMP representa una alcantarilla abierta con concentraciones de oxígeno muy bajas, debido a la elevada carga de aguas residuales y a que gran parte de la población, la industria y los centros urbanos se concentran a lo largo del cauce. En esta situación, los procesos naturales de descomposición y dispersión de los contaminantes no se producen, lo que se traduce en una acumulación de materia orgánica e inorgánica en los cauces de los ríos generando focos de infección, por la presencia de elevadas concentraciones de bacterias coliformes que ponen en riesgo la salud de los seres vivos. Esto se debe a que las plantas de tratamiento de aguas residuales en la región no están habilitadas para el tratamiento de aguas residuales industriales, sino para aguas de origen doméstico. En algunas zonas de los ríos que desembocan al Atoyac, las aguas residuales industriales no se separan de las domésticas, y las primeras no pueden ser tratadas adecuadamente por su carácter industrial antes de ser vertidas a las redes de alcantarillado.

Por lo antes expuesto es de vital importancia llevar a cabo la identificación de fuentes industriales de contaminación en el ÁMP, analizar la calidad del agua del río Atoyac y sus tributarios y evaluar los efectos citotóxicos del agua residual como indicador del impacto en la salud del ecosistema del ÁMP.

1.3 Justificación.

La contaminación del río Atoyac y sus tributarios en el AMP es un problema político, económico, social y ambiental complejo y poco estudiado.

Según un informe de Riesgo Sanitario realizado por la CONAGUA (2008), más de dos millones de personas en los estados de Puebla y Tlaxcala se encuentran en alto riesgo de exposición por la inhalación de vapores y partículas suspendidas en el aire, así como la ingestión de alimentos y agua contaminada por habitar en un radio de dos kilómetros del río o de las descargas de aguas residuales. Las poblaciones que viven a unos metros del río y/o de los canales abiertos son las más vulnerables a la inhalación de compuestos tóxicos volátiles, como el cloruro de metileno y el cloroformo (Sandoval-Villasana *et al.*, 2009).

Se han realizado estudios en el río Atoyac evaluando parámetros físicos, químicos, microbiológicos y toxicológicos (Bravo-Inclán *et al.*, 2015; Martínez-Tavera *et al.*, 2017; Pérez-Castresana *et al.*, 2018 y 2019; Rodríguez-Espinosa *et al.*, 2018; Sandoval-Villasana *et al.*, 2009), sin embargo, estudios relacionados con el impacto de la contaminación en los ríos tributarios del Atoyac (Rabanillo y Zapatero) y en las represas Covadonga y Echeverría, en el AMP, que permitan identificar el efecto tóxico que producen algunas sustancias, son limitados e incluso en lo que se refiere a los tributarios del río Atoyac existe poca o nula información sobre la evaluación de los parámetros antes mencionados.

Está bien establecido que la contaminación afecta la calidad de vida en diversos aspectos (económicos, físicos, entre otros). Además de los efectos directos para la salud, el sutil peligro de los contaminantes radica en el hecho de que pueden ser mutagénicos o tóxicos y causar varias afecciones humanas como cáncer y enfermedades cardiovasculares (Martí-Valls *et al.*, 2011).

Para poder analizar la problemática ambiental en el AMP es necesario investigar el origen de la contaminación sus causas y determinar sus efectos. Por tal motivo se generó una base de datos de la industria, se analizó la calidad del agua con base en factores físicos, químicos, presencia de metales pesados y compuestos orgánicos volátiles, según las Normas Oficiales Mexicanas (NOMs). Se Identificó el efecto citotóxico del agua en *A. cepa*. Los resultados se asociaron con factores sociales y ambientales.

La cuenca del río Atoyac es fundamental para el desarrollo social y económico de la región. Solamente gestionada de manera eficiente y equitativa se podrá lograr un equilibrio entre la salud de los ecosistemas acuáticos y las necesidades humanas.

Por lo anterior, estudios como la presente investigación contribuirán a la comprensión del problema ambiental de la contaminación del río Atoyac y sus tributarios en el ÁMP, lo cual permitirá analizar de manera interdisciplinaria la problemática ambiental en la zona.

1.4 Preguntas de investigación.

1. ¿Cuáles son las principales fuentes industriales de contaminación del agua en el ÁMP?
2. ¿Cuál será el efecto citotóxico del agua en las zonas de estudio del ÁMP en *Allium cepa*?

1.5 Objetivos.

1.5.1 Objetivo general.

Evaluar el efecto de la contaminación del agua del río Atoyac y sus tributarios en el Área Metropolitana de Puebla.

1.5.2 Objetivos particulares.

1. Describir las características físicas del río Atoyac y sus tributarios.
2. Elaborar un listado de fuentes contaminantes de las industrias en las zonas de estudio.
3. Estimar la densidad industrial en las zonas de estudio.
4. Caracterizar fisicoquímicamente el agua del río Atoyac y sus tributarios.
5. Determinar la concentración de metales pesados y COVs.
6. Analizar el efecto citotóxico inducido por el agua en las zonas de estudio en *Allium cepa*.
7. Analizar la problemática ambiental por la contaminación del agua de los ríos urbanos en el ÁMP asociada a factores económicos y sociales.

1.6 Hipótesis.

El agua del río Atoyac y sus tributarios contienen sustancias de origen industrial, capaces de inducir daños citotóxicos en el biomodelo *Allium cepa*, lo que representa un riesgo a la salud humana y del ecosistema.

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO.

2.1 Contaminación de los ecosistemas hídricos en México.

La contaminación del agua es cualquier cambio físico, químico o biológico que altere su composición y que puede afectar adversamente a los seres vivos (Alrousan *et al.*, 2009; FAO, 2020; OMS, 2017; Rodríguez-Momroy & Durán-de-Bazúa, 2006). En los últimos 50 años, las actividades humanas han provocado la contaminación de los recursos hídricos a niveles históricos. Se estima que más de 2, 500 millones de personas en todo el mundo viven sin un sistema adecuado de saneamiento y que cada día, 2 millones de toneladas de aguas residuales y de otros efluentes se vierten hacia los cuerpos de agua de todo el mundo. Este problema es más grave en países en vías de desarrollo, en los que más del 90% de los desechos no tratados y el 70% de los desechos industriales sin tratar se vierten en aguas superficiales (FAO, 2020).

En México disponemos aproximadamente del 0.1% del total de agua dulce disponible en el mundo y anualmente se reciben aproximadamente 1 449 471 millones de m³ de agua por precipitación. Se estima que el 72.1% se evapotranspira y regresa a la atmósfera, el 21.4% escurre hacia los ríos y arroyos, y el 6.4% se filtra naturalmente en el subsuelo para recargar los acuíferos (CONAGUA, 2018). Aproximadamente 42 ríos principales fluyen en tres vertientes: occidental o del océano Pacífico, oriental o del océano Atlántico (Golfo de México y Mar Caribe) o interior, cuyos ríos desembocan en lagunas interiores (INEGI, 1995). Forman una red hidrográfica de 633 000 km de longitud y de acuerdo con la CONAGUA, (2018) en éstos fluye el 87% del escurrimiento superficial y sus cuencas cubren el 65% de la superficie territorial. Se ha reportado que seis de cada diez ríos principales están muy contaminados, entre los que se encuentran: Balsas, Santiago, Pánuco, Grijalva, Papaloapan, Coatzacoalcos y Tonalá.

Entre los contaminantes de las aguas superficiales se encuentran los nutrientes orgánicos, los agentes infecciosos, los tóxicos tanto orgánicos como inorgánicos, los sedimentos y el calor. Entre éstos, podemos mencionar metales pesados (plomo, mercurio, cadmio, cobre), arsénico, sales de nitratos, cloruros, sulfatos y carbonatos, así como compuestos orgánicos volátiles (COVs) como el benceno, tolueno, xileno, etc., muchos de los cuales no son biodegradables o se degradan lentamente, se magnifican biológicamente y son

carcinogénicos en humanos (Aquino-Moreno *et al.*, 2015; Bustillo *et al.*, 2020; Elías *et al.*, 2012; Tchounwou *et al.*, 2012; U.S. EPA, 2020; Valencia-Quintana *et al.*, 2009).

La calidad del agua es un factor importante para la salud pública y en los ecosistemas. El 80% de las enfermedades reportadas en los países en desarrollo están relacionadas con el consumo de agua contaminada (Ayala-Rodríguez, 2009). Se evaluó midiendo diversas variables físicas, químicas y biológicas. Los parámetros físico-químicos (pH, oxígeno disuelto, demanda bioquímica de oxígeno y demanda química de oxígeno), dan información extensa del tipo de contaminantes y sus propiedades químicas y físicas, sin aportar información acerca de su influencia o efectos en la vida acuática. Los métodos biológicos pueden aportar esta información, sin embargo, no señalan los contaminantes responsables, por lo que es adecuado utilizar ambos métodos en la evaluación de la calidad del recurso hídrico (Orozco-Barrenetxea *et al.*, 2003; Samboni-Ruiz *et al.*, 2007).

Los efectos más visibles de la pérdida de la calidad del agua son los cambios en la salud de los ecosistemas acuáticos, la biodiversidad y la belleza del paisaje (Mendoza-Cariño *et al.*, 2014). González & Hernández (2009), encontraron que la calidad del agua del Río Santiago no es apta para el consumo humano, ni para uso agrícola porque contienen plomo, mercurio, cromo, cobalto, arsénico, coliformes fecales, así como benceno y furano (sustancias cancerígenas) provenientes de descargas industriales, mismas que han rebasado los límites permitidos por los índices de calidad del agua. Además, la cantidad de materia orgánica vertida al río rebasa su capacidad de autodepuración, lo que ha causado la disminución de oxígeno disuelto poniendo en riesgo la biota del ecosistema, (McCulligh *et al.*, 2007). Lorenzo-Márquez *et al.* (2016), cuantificaron las concentraciones de metales pesados (Cd, Cr, Mn y Pb) en el pez invasor *Pterygoplichthys* spp. y estimaron el riesgo por exposición infantil en las subcuencas Grijalva y Usumacinta de Chiapas y Tabasco. El Mn y Cr presentaron concentraciones mayores en los tejidos musculares del pez respecto al Pb y al Cd, sin embargo, estas no representaron un riesgo mayor por una ingesta crónica.

Los contaminantes más recurrentes son algunos metales potencialmente tóxicos como el Hg, Pb, Cr, Cd y otros compuestos nocivos como el tolueno y el benceno, e hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP), entre otros (ATSDR, 2000, 2002, 2005b; Brito *et al.*, 2015; González-Macías *et al.*, 2007; Greenpeace, 2012). En el Río Coatzacoalcos se analizaron las concentraciones de contaminantes orgánicos persistentes (COPs) como diclorodifeniltricloroetano (DDT), hexaclorociclohexano (HCH), bifenilos policlorados (PCB),

que representan un riesgo potencial para la salud humana, y pueden causar efectos reproductores y daños genéticos (Espinosa-Reyes *et al.*, 2013).

2.2 Desarrollo industrial en la cuenca del río Atoyac en el AMP.

Durante la Colonia, el agua del río, permitió la expansión de la agricultura, de la ganadería y de la industria textil, por otra parte, comenzaron a trabajar molinos de trigo, casas de tenería o curtiduría y posteriormente algodonerías que se ubicaron en las riberas de los ríos Atoyac y Alseseca (Rosas-Salas, 2013; Salas-Quintanal & Rivermar, 2015). Desde el siglo XVI, la producción agrícola local y la edificación de la ciudad de Puebla, se sustentó y relacionó directamente con la cuenca del Alto Balsas, especialmente con el Río San Francisco. En los siglos XVII, XVIII y XIX se incrementó la actividad industrial, principalmente la textil, caracterizada por fábricas de hilado, tejido y estampado de algodón. (Cortés-Hernández, 2021; Galicia-Hernández, 2015; Handal-Silva *et al.*, 2017; Rosas-Salas, 2013). En sus inicios esta industria no contaminaba, porque el agua de los ríos era utilizada solo como fuerza mecánica para mover molinos y los vertidos de aguas residuales eran escasos y no excedían su capacidad de autodepuración (Handal-Silva *et al.*, 2017; Salazar-Exaire, 2006).

Entre 1965 y 1975, la industria manufacturera experimentó importantes cambios estructurales impulsados por los gobiernos estatal y federal como la instalación de grandes empresas extranjeras en los sectores de maquinaria metalúrgica, química y automotriz con tecnologías modernas (Ventura, 2006). La introducción de altos aranceles para la importación de productos, así como, las condonaciones fiscales, impulsaron la instalación de corredores industriales con empresas textiles (Salas-Quintanal & Rivermar, 2015; Velasco-Santos, 2014). Desde finales del siglo XX, se produjeron grandes cambios a lo largo del Atoyac. El rápido crecimiento de la industria y las ciudades, el incremento de la población y la consolidación del modelo económico y político capitalista, así como los patrones de consumo irracionales que inciden directamente en el deterioro recursos naturales (Rosas-Salas, 2013; Salas-Quintanal & Rivermar, 2015), propiciaron el establecimiento de grandes áreas industriales como el Fraccionamiento Industrial Resurrección, los Parques Industriales 5 de Mayo y Puebla 2000, así como la construcción de obras de infraestructura como la Autopista México-Puebla, y el entubamiento del Río San Francisco en la década de los sesenta, modificando de manera importante los ecosistemas y la ciudad de Puebla. Esta situación incidió directamente en la

degradación del ambiente que, a su vez, forma parte integral de la dinámica social, económica y política.

En el sistema económico y político actual, la destrucción en la naturaleza es el resultado de las contradicciones económicas, culturales, políticas y sociales generadas por los procesos de industrialización (Escobar, 1999; Velasco-Santos, 2014).

En México, se han elaborado un conjunto de NOMs que establecen el “límite máximo permitido” de una descarga de agua residual, estos límites aceptables de sustancias contaminantes en una descarga de agua residual a un sistema de drenaje municipal, decretan los índices de la calidad del agua para consumo humano (Navarro-González *et al.*, 2004; Salas-Quintanal & Rivermar, 2015). Sin embargo, las NOMs solo contemplan sustancias individuales y no de las mezclas de éstas, ya que individualmente pueden no ser riesgosas, pero en combinación pueden resultar ser tóxicas y perjudiciales para la biota y el ser humano; por otro lado, los compuestos orgánicos volátiles (como el cloroformo y el cloruro de vinilo, hallados en el Atoyac) se consideran residuos peligrosos en otras normas, pero no se consideran en esta norma. Es decir, solo se regulan parámetros físicos, algunos metales y actualmente la toxicidad. Además, la contaminación biológica y química no está contemplada (Bravo-Inclán *et al.*, 2015; Salas-Quintanal & Rivermar, 2015; Sandoval-Villasana *et al.*, 2009).

Debido al alto grado de urbanización alcanzado en el área (1970-2020), la contaminación en el Atoyac ha aumentado considerablemente debido al desarrollo de la ciudad de San Martín Texmelucan, el establecimiento del complejo Petroquímico Independencia (PEMEX), el corredor industrial Quetzalcóatl en la localidad de San Baltazar Temexcalac, la instalación de industrias del giro textil, de alimentos, metalúrgica, de químicos aromáticos, de recubrimientos y lozas y ladrillos, el Parque Industrial Huejotzingo, ubicado sobre la carretera federal México-Puebla, con industrias especializadas en los sectores del plástico, procesamiento de metales, textil, refrescos y farmacéutico, así como el establecimiento de pequeñas lavanderías clandestinas de mezclilla, que vierten directamente sus aguas residuales en los ríos o desagües municipales sin tratamiento, provenientes principalmente del estado de Tlaxcala. Debido a la gran cantidad de productos tóxicos vertidos, y las múltiples reacciones que pueden surgir de la combinación entre éstos, se han generado serios problemas de contaminación del agua, del suelo y del aire (Salas-Quintanal & Rivermar, 2015; Velasco-Santos, 2014).

El ÁMP es actualmente la quinta región más poblada de México con una población de 2,732,568 habitantes, ubicando al estado como la quinta entidad federativa más grande del

país (Díaz-Luna, 2018; INEGI, 2015). En los últimos treinta y cinco años el AMP se ha caracterizado por un proceso de expansión territorial marcado por diferencias en las condiciones de vida entre las zonas residenciales y los de vivienda social y popular. La zona de mayor plusvalía, conocida como Angelópolis, conformada por territorios de los municipios de Puebla y San Andrés Cholula, ha sido en los últimos años foco no sólo de inversión privada sino también de inversión pública, beneficiando a quienes tienen mayor poder adquisitivo (Díaz-Luna, 2018).

Hoy en día, la cuenca del Alto Atoyac es la que tiene la mayor concentración de industrias en la región del Balsas. Por consiguiente, el río se utiliza como drenaje de las aguas industriales y municipales. Se han instalados plantas de tratamiento tanto en alcantarillados industriales como municipales. Sin embargo, estas son escasas y solo algunas están en pleno funcionamiento, al menos en el estado de Puebla hay 138 plantas tratadoras de aguas residuales (PTAR), de las cuales solo 17 funcionan y, en la cuenca del Atoyac solo funcionan 26, y llevan a cabo tratamientos primarios (sedimentación, flotación, coagulación – floculación y filtración) (Llaven-Anzures, 2019; Salas-Quintanal & Rivermar, 2015).

Por todo lo anterior, el impacto ambiental en los ríos, comenzó con la modernización de la industria, con la nueva tecnología hidráulica y química, cuyos desechos alteraron el proceso natural de autodepuración en la cuenca, esta situación aunada al incremento poblacional y de infraestructura, así como, la laxa aplicación de las NOMs son los responsables de la situación actual que se vive en la cuenca Alta del Balsas y concretamente en el AMP (Handal-Silva *et al.*, 2017; Rosas-Salas, 2013).

Está claro que los problemas ambientales relacionados con la contaminación del río Atoyac están asociados al desarrollo económico y social durante décadas. El actual sistema productivo en la región ha conducido a una situación de crisis. Hasta ahora, las soluciones han sido parciales: innovación tecnológica, sanciones, aplicación de regulaciones, impuestos a quienes contaminan y subsidios a quienes elaboren productos amigables con el ambiente. Pero la mayor causa del deterioro es un modelo de producción y consumo insostenible donde la pobreza y la degradación de los recursos naturales están estrechamente interrelacionados (Llaven-Anzures, 2019; Salas-Quintanal & Rivermar, 2015; Velasco-Santos, 2014).

Por consiguiente, el problema de la contaminación del Atoyac, no se puede resolver sin una visión integral y amplia, para lo cual es necesario cambiar verdaderamente las conductas y actitudes del hombre hacia la naturaleza; para lograr un desarrollo sostenible. El problema

fundamental reside en el consumo irracional de los recursos naturales y la generación de grandes cantidades de residuos.

Por todo lo expuesto y la complejidad del problema en el AMP, se debe revisar el manejo del agua de una manera integral: suministro, saneamiento, aguas residuales y drenaje urbano, todo esto sin perder de vista la planificación urbana.

2.3 Contaminación del río Atoyac en el Área Metropolitana de Puebla (AMP).

El río Atoyac presenta en la actualidad un fuerte deterioro en la calidad de sus aguas; asociado al desarrollo antropogénico del AMP. El Atoyac recorre aproximadamente 80% del Área Metropolitana Puebla-Tlaxcala (ÁMPT) del Alto Balsas, (IMTA, 2005; Rodríguez & Morales, 2014). Esta es la cuarta zona metropolitana más poblada del país, la cual está constituida por 8 municipios del estado de Puebla y 32 pertenecientes a Tlaxcala, dentro de los cuales se ubican las 81 localidades con fusión urbanística que conforman el Área Metropolitana (AMP-Tlaxcala. XII Censo General de Población y Vivienda 2000, INEGI).

Antes de ingresar a la Ciudad de Puebla, al río Atoyac se le incorpora la corriente proveniente del río Zahuapan (afluente del Atoyac), en cuya área de influencia habitan alrededor del 59 % de los habitantes de Tlaxcala (Muñoz-Nava *et al.*, 2012). Este río recorre 6 municipios de interés en este estudio, que forman parte del AMP y son: Cuautlancingo, Coronango, San Pedro Cholula, San Andrés Cholula, Ocoyucan y Puebla, que en su conjunto comprende el 33.6% (2,212,002 habitantes) de la población total del Estado poblano en un territorio que representa menos del 2.54% (870.81 km²) de la superficie de la entidad federativa. Trae consigo una gran cantidad de contaminantes provenientes del estado de Tlaxcala de tres corredores industriales, del Complejo Petroquímico Independencia y de más de 30 empresas de maquila de mezclilla (Estrada-Rivera *et al.*, 2022; Handal-Silva *et al.*, 2017; INEGI, 2021; Rodríguez & Morales, 2014; Ventura-Rodríguez; 2006).

El AMP, además de tener la mayor densidad poblacional (97%), también cuenta con 14 zonas industriales que incluyen fábricas de diferentes giros (Casiano-Flores *et al.*, 2016; IMTA, 2005; Martínez *et al.*, 2017), se descargan efluentes de tres macroplantas de tratamiento y aguas de parques industriales de Cuautlancingo y Camino a San Lorenzo del arroyo Atenco y del Río San Francisco (Carabarán, 2000; IMTA, 2005; Rosas-Salas, 2013; Salazar-Exaire, 2010).

El río entra al municipio de Puebla proveniente del estado de Tlaxcala, en la Represa

Covadonga ubicada en la Colonia Ignacio Agrícola Zaragoza donde constituye un sistema de canalización de agua para la irrigación de cultivos y generación de energía eléctrica (INEGI, 2019; Pérez-Castresana *et al.*, 2018).

El río Atoyac en el ÁMP, a la altura de la Represa Covadonga, recibe las descargas provenientes del estado de Tlaxcala transportadas por el río Zahuapan y se les unen las descargas de los ríos Rabanillo, Zapatero y San Francisco. El agua de estos ríos se caracteriza por contener altos volúmenes de contaminación orgánica e inorgánica provenientes de descargas industriales, asentamientos humanos y agricultura (Bravo-Inclán *et al.*, 2015; Pérez-Castresana *et al.*, 2018, 2019), provenientes de 14 zonas industriales de diferentes giros: textil, automotriz, de plásticos, de impresión, de alimentos, metalúrgica, etc. (IMTA, 2005; INEGI, 2019; Loreto-López, 2012; Martínez-Tavera *et al.*, 2017; Mendoza, 2014; Pérez-Castresana *et al.*, 2018).

El agua del río Atoyac a la altura de la presa Derivadora se desvía a través de un túnel que cruza la cordillera del Tenzón y en temporada de lluvias llega a la cuenca del río Nexapa. El río continúa fluyendo y se embalsa en la presa Manuel Ávila Camacho, Valsequillo, cuyas aguas se utilizan para regar cultivos en la región de Tecamachalco.

Según la declaración de clasificación de los Ríos Atoyac, Xochiac o Hueyapan (2011), el 70% de las aguas residuales corresponden a aguas municipales y el 30% son aguas residuales industriales. Se considera que el gasto medio diario de aguas residuales aportado al río Atoyac antes de su ingreso a la presa Manuel Ávila Camacho es de aproximadamente 4,830 litros por segundo. Se estima que el Atoyac aporta a la Presa Valsequillo 69 ton/día de contaminantes, el río Zahuapan 8 ton/día, el Río San Francisco 21.5 ton/día y 28 ton/día aportadas por el río Alseseca (DOF, 2011).

El río Atoyac recibe como tributarios los ríos Atenco y Rabanillo (que transporta descargas de industria textil); parte del caudal del arroyo es conducido a una planta de tratamiento (San Francisco). También recibe las descargas de los ríos San Francisco y Zapatero que recogen grandes cantidades de basura y contaminantes que se acumulan en la presa Derivadora Echeverría. Por lo que, en el transcurso de más de 25 km (ÁMP), todos los contaminantes que transporta el Atoyac, desde San Martín Texmelucan y Tlaxcala, se concentran en la presa Derivadora, para luego dirigirse al sistema de riego Atlixco-Izúcar de Matamoros hacia Santa Clara de Ocoyucan y el resto se dirige hacia la presa de Valsequillo.

Lo anterior refleja el grado de contaminación del Atoyac dentro del ÁMP y la intensa

competencia por el agua que existe entre los diferentes sectores; afectando a más de 2.7 millones de habitantes de 22 municipios de la ciudad de Puebla por donde circula el río (Leal-Juárez, 2016); del mismo modo, se observa el abandono, la degradación y el cambio de uso de suelo de muchas extensiones de campos de cultivo; la tendencia de la producción agrícola y alimentaria están disminuyendo años tras año en la zona, mientras que se registra un crecimiento del consumo de agua (López-Zamora & Montalvo-Vargas, 2015).

Saldaña-Fabela *et al.* (2006), investigaron las descargas de fuentes puntuales al Río Atoyac; registrando 522 de las cuales, 168 son industriales y 132 municipales. De 48 descargas industriales que equivalen a 6,340 m³/d, 18 sobrepasaron lo establecido en la NOM-001-SEMARNAT-2017 (DBO₅, SST, NT, SS y metales pesados). Las restantes presentaron altos niveles de toxicidad desde 2 hasta 1,165 UT. Bravo-Inclán *et al.* (2015), realizaron un monitoreo de la calidad del agua del río Atoyac desde Tlahuapan hasta la presa Echeverría y concluyeron que los ríos Atenco y Xopanac contienen altos valores de DBO₅, DQO y nutrientes por lo que es importante implementar un programa de control y vigilancia de descargas municipales e industriales.

En el municipio de Puebla desde 1985 a 2019, se registró una explosión urbana (poblacional e industrial), incrementándose de 260 mil a 2.5 millones de habitantes en una superficie territorial de 2,392 km² (SEDESOL-CONAPO-INEGI, 2010; Urbano de Tlaxcala, 2013; Zambrano, 2019).

2.4 Mecanismos y evaluación de la toxicidad.

La Toxicología es la ciencia *“que identifica, estudia y describe la dosis, el tipo, la frecuencia, la gravedad, la reversibilidad y, generalmente, los mecanismos de acción que producen los xenobióticos que dañan el organismo”*. También estudia los efectos nocivos de los agentes químicos, biológicos y físicos en los sistemas biológicos y determina la magnitud del daño en función de la exposición (Teitelbaum, 2009).

De igual manera, también describe los efectos de las interacciones entre sustancias y organismos vivos, ya que se refiere al estudio de los mecanismos de ingreso, transformación y excreción de los sustancias tóxicas, asociados a la exposición a agentes físicos y químicos que ingresan al ambiente, así como el estudio de los mecanismos a nivel molecular y celular de los procesos de desintoxicación y de daños inducidos que alteran la estructura y respuesta de los organismos vivos (Camelo-Martínez, 2013; Peña *et al.*, 2001; Repetto, 2009).

Una sustancia tóxica es cualquier agente físico, químico o biológico, que después de producirse puede entrar en contacto o ser absorbido por un organismo vivo en dosis suficientes, para tener un efecto adverso directo o indirecto sobre el organismo (Roldán, 2016). El aumento en las actividades antropogénicas ha facilitado la aparición de una variedad de sustancias químicas para numerosas actividades generando contaminantes en el agua, aire y suelo que pueden inducir daños a la salud de la población y del medio ambiente a través de un proceso conocido como toxicidad (Repetto, 2009).

Por lo que la toxicidad es el efecto nocivo que se produce en humanos, animales, plantas o microorganismos mediante la acción de un material, sustancia o una mezcla de estos. Este efecto negativo puede manifestarse de diversas formas, incluidos cambios morfológicos, histológicos, fisiológicos y bioquímicos, modificaciones del comportamiento, cambios en la reproducción, daño genético o incluso la muerte (Posada & Arroyave, 2006).

La liberación de sustancias tóxicas en los ecosistemas acuáticos genera una diversidad de reacciones complejas en los organismos que necesitan ser evaluadas. Para ello se han utilizado los bioensayos, que son técnicas para evaluar los efectos tóxicos agudos o crónicos de muestras ambientales de sustancias químicas conocidas y de composición incierta. Estas pruebas de toxicidad miden los efectos de uno o más contaminantes en una especie, incluida la exposición de organismos de prueba a concentraciones de sustancias tóxicas que van en aumento, con el objetivo de identificar cambios en ellas durante un periodo de tiempo (Silva, 2007). Los cambios evaluados pueden ser respuestas funcionales o fisiológicas, que ocurren a nivel celular o molecular. Estos cambios se denominan biomarcadores, que son parámetros que proveen información sobre el estado normal o patológico de individuos o poblaciones expuestas a un ambiente contaminado (Arango, 2012).

Los agentes físicos, químicos o biológicos pueden dañar no sólo al ADN, sino también a todos los componentes celulares asociados con la función y el comportamiento de los cromosomas dentro de las células. Ejemplos de estos últimos son las proteínas implicadas en la reparación, condensación y descondensación del ADN en los cromosomas, u otras estructuras como el huso mitótico, que intervienen en la distribución de los cromosomas durante el ciclo celular. Este daño puede ser de tipo mutagénico, carcinogénico y/o teratogénico (Bonciu *et al.*, 2018; Elías *et al.*, 2012; González-Borroto, 2006; Kirsch-Volders *et al.*, 2003).

Por lo anterior, en las últimas décadas la cuenca hidrológica del río Atoyac en el ÁMP ha captado la atención de la academia, la sociedad civil y el gobierno. Es un tema ambiental,

económico y social que preocupa dado que los recursos naturales de la zona se perciben como patrimonio ambiental de la ciudad de Puebla y que se encuentra constantemente amenazado por la expansión urbana descontrolada y el alto grado de contaminación puntual y difusa. En este sentido resulta de vital importancia el conocimiento científico actualizado sobre la evaluación toxicológica de la cuenca Río Atoyac en el ÁMP.

2.4.1 Citotoxicidad.

La citotoxicidad es definida como el efecto adverso o alteración de las estructuras y/o propiedades necesarias para la supervivencia, proliferación y/o función celular, incluyendo, entre otras cosas, la integridad de la membrana plasmática y el citoesqueleto, el metabolismo, la síntesis y la degradación de los componentes celulares, la regulación iónica y la división celular, específicamente en el análisis de la mitosis, ya que es donde se producen las alteraciones morfológicas de las células, como resultado de agentes físicos, químicos y biológicos (López, 2014).

El índice mitótico (IM) es un biomarcador muy usual en toxicología para evaluar la citotoxicidad. Algunos cambios inducidos por xenobióticos se deben a interacciones inespecíficas en al menos uno de los procesos o estructuras esenciales de la célula, a lo que se denomina citotoxicidad basal (López, 2009).

2.4.2 Ciclo celular.

El ciclo celular corresponde a una serie de eventos por los que pasa la vida de una célula durante su desarrollo y división. Las células pueden encontrarse en dos estados distintos: el estado de interfase y el estado de mitosis o fase M. Inicia con las células inactivas (fase G0), la cual debe ser estimulada por factores de crecimiento para ingresar al ciclo celular, lo que comienza con la primera fase de crecimiento (fase G1), en la que se produce la síntesis de ADN (fase S). Al final de G1, hay un punto de restricción (R) donde se repara el ADN si está dañado. De lo contrario, el ciclo continúa. Una vez que los cromosomas se han replicado, la célula entra en la segunda fase de crecimiento (fase G2). En este punto, está lista para dividirse en dos células hijas durante la mitosis (fase M). Esta fase M se divide en una serie de pasos discretos, comenzando con la profase, luego pasando por la metafase, la anafase, la telofase y finalmente el proceso de citocinesis que divide la célula en dos células iguales (Fragoso *et al.*, 2014; Laguna-Cruz *et al.*, 2014).

La mitosis inicia con la ruptura de la membrana nuclear, luego la condensación de la cromatina, posteriormente la ubicación de los cromosomas en el plano ecuatorial, después la separación de las cromátidas y finalmente división del núcleo y el citoplasma lo que da origen a dos células hijas (Garza-Aguilar *et al.*, 2014)

El ciclo celular es controlado por un grupo de proteínas llamadas ciclinas. Existen varios puntos de control a lo largo del ciclo celular, siendo los más importantes las transiciones G1/S, G2/M y en la metafase/anafase de la mitosis (Garza-Aguilar *et al.*, 2014; Peralta-Zaragoza *et al.*, 1997). Durante la mitosis, en la transición de metafase a anafase, la célula se asegura de que todos los cromosomas estén alineados con el plano ecuatorial de la célula. Luego las cromátidas hermanas se separan formando dos células genéticamente idénticas (Vázquez-Ramos & Sánchez, 2003). Las quinasas (cinasas) dependientes de ciclinas (Cdk) son enzimas que regulan el correcto desarrollo del ciclo celular, actuando como quinasas para otras proteínas controladoras del ciclo celular, y marcando la transición de una fase del ciclo a la siguiente. El punto G2/M, que ocurre antes de la división celular, debe evitarse si existe algún daño previo durante G1, S o G2, debido a esto, existiría una activación de las cinasas y fosforilación de proteínas que controlan la condensación cromosómica, la destrucción de la envoltura nuclear y el ensamblaje del huso mitótico (Laguna-Cruz *et al.*, 2014).

2.5 Sistema radicular.

El sistema radicular de las plantas es el responsable de satisfacer distintas necesidades como anclar el sustrato, absorber y transportar los recursos del suelo (agua y nutrientes esenciales) y almacenarlos. La estructura de la raíz determina la cantidad de suelo disponible para la extracción de agua y nutrientes, y la función de los transportadores en la membrana celular de la raíz representa un proceso fisiológico altamente regulado y controlado por la actividad genética e influenciado por múltiples factores ambientales.

2.5.1 Toxicidad en los sistemas vegetales.

El uso de plantas para el monitoreo de posibles sustancias citotóxicas y genotóxicas ha sido señalado y validado por varias agencias como el "Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA)", la "Organización Mundial de la Salud (OMS)" y la "Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA por sus siglas en inglés)" (Ma *et al.*, 1995).

Las plantas constituyen un material adecuado para monitoreo ambiental de sitios contaminados. La contaminación obstaculiza el desarrollo y la supervivencia de muchas especies de plantas, ya que la presencia de sustancias tóxicas en el suelo, el agua y el aire altera los procesos de vida de las plantas. Si bien cualquier especie vegetal puede reproducirse y crecer dentro del rango de concentraciones de sustancias tóxicas presentes en el medio ambiente (Farrago, 1999), cuando la concentración de tóxicos aumenta por encima del umbral de tolerancia de la especie, los efectos de toxicidad se vuelven más pronunciados, resultando en cambios fisiológicos, efectos negativos en el crecimiento y estructura de las plantas, e incluso la muerte (Baker & Walker, 1989).

Cuando las raíces de una planta están bien hidratadas, se estimula el crecimiento celular, lo que permite las raíces de la planta se elonguen. Sin embargo, cuando la hidratación se produce en presencia de sustancias tóxicas, se puede inhibir la división celular en el meristemo de la raíz retrasando el proceso mitótico o destruyendo las células. Por tanto, este tipo de alteración dificulta el correcto desarrollo radicular. Este efecto se puede determinar indirectamente comparando el número de raíces y la longitud de las raíces de las plantas expuestas a contaminantes con plantas que no han sido expuestas (López-Sardi *et al.*, 2016).

2.5.2 *Allium cepa*.

La cebolla (*Allium cepa*) es una planta vascular que ha sido utilizada para estudios fisiológicos y citogenéticos desde las primeras décadas del siglo XX. Otras especies del género *Allium* incluyen *A. sativum*, *A. fistulosum*, *A. carinatum*, *A. cepa* var. *Proliferum*, aunque no tan frecuentemente utilizadas en estudios de mutagénesis como *A. cepa*. Se han desarrollado protocolos de estudio de indicadores citológicos y citogenéticos mediante la exposición de raíces adventicias obtenidas de bulbos o semillas (Andrioli, 2011).

Las pruebas de *Allium* son útiles para realizar estudios sobre el agua, ya sea para consumo humano, embalses urbanos, aguas superficiales o subterráneas, descargas de aguas residuales u otras (Escobedo-Paredes *et al.*, 2020). Actualmente se conocen los parámetros del desarrollo celular de *Allium cepa*, lo que la convierte en un excelente modelo biológico para detectar variaciones de sus índices (Rodríguez-Soto *et al.*, 2018). Al exponer los bulbos de “cebolla” a la hidratación, se estimula el crecimiento de los meristemos de la raíz; sin embargo, cuando los bulbos se exponen a sustancias tóxicas, la división celular de los meristemos de la

raíz se puede prevenir retrasando el proceso mitótico o alterando las células para suprimir (Correa-Martins *et al.*, 2016).

Las alteraciones en la división celular suelen ir acompañadas de un crecimiento radicular más lento, especialmente alteraciones en el desarrollo normal del tejido meristemático de las raíces, que pueden verificarse mediante diagnóstico microscópico para determinar el índice mitótico (IM) y el índice de anomalías cromosómicas presentes (Kumari *et al.*, 2009) *A. cepa* presenta pocos cromosomas ($2n=16$) lo que es útil para evaluar posibles daños y/o cambios cromosómicos durante el ciclo de división celular (Correa *et al.*, 2016; Rodríguez *et al.*, 2018).

2.5.3 La raíz como sistema de ensayo.

Las células del meristemo de la raíz se han convertido en un sistema de prueba, ya que son un tejido proliferante, que permite analizar los efectos de sustancias potencialmente genotóxicas. Las raíces que emergen de la base del bulbo son de tipo adventicia y tienen zonas diferenciales. En la punta del ápice se encuentra la caliptra, una capa delgada de células esclerosadas y no proliferantes, inmediatamente están las células meristemáticas, que experimentan una división celular activa y proporcionan un sustrato para realizar evaluaciones de genotoxicidad. Otra característica importante del uso de raíces en la evaluación de la toxicidad de agentes es la dinámica de formación de estructuras microtubulares presentes en las células de las plantas superiores. En las plantas, los microtúbulos desempeñan funciones importantes en la morfogénesis y división celular. En las células meristemáticas, existen cuatro organizaciones principales de microtúbulos asociados con la función de cada fase. Durante la interfase, los microtúbulos se organizan en estructuras paralelas orientados perpendicularmente al eje de expansión celular y controlan la deposición de celulosa. Al inicio de la mitosis, estos microtúbulos se organizan en un anillo llamado banda preprofásica (BPP) que rodea el núcleo celular, donde definen el plano de división y determinan la ubicación de la placa celular formada durante la citocinesis (Andrioli, 2011; Mineyuki *et al.*, 1988). Luego, la BPP es reemplazada por la formación del huso mitótico (HM) que, después de unirse con el cinetocoro de los centrómeros permite la división de las respectivas cromátides a dos polos distribuyendo la información genética en las células hijas (Yu *et al.*, 2000).

CAPITULO 3. METODOLOGÍA

3.1 Generalidades.

Este trabajo de investigación se realizó en el río Atoyac y sus tributarios en el ÁMP en el período comprendido de agosto del 2019 a agosto del 2023. Las investigaciones se realizaron con la colaboración de las siguientes dependencias e instituciones: Departamento de Biología y Toxicología de la Reproducción, el Laboratorio de Química Ambiental del Centro de Química, el Laboratorio de Patogenicidad Microbiana del Instituto de Ciencias del Centro de Investigaciones en Ciencias Microbiológicas del ICUAP, el Laboratorio de Toxicología Genómica y Química Ambiental de la Universidad Autónoma de Tlaxcala y en el Institute for Research on Cancer and Aging, Nice, (IRCAN) de Francia.

3.2 Caracterización física del río Atoyac y sus tributarios.

Durante el 2019 se realizaron exploraciones y visitas de campo previas a las zonas de estudio, se tomaron fotografías y se registraron las coordenadas geográficas.

Lo anterior, nos permitió seleccionar las zonas de estudio, así como, determinar los puntos de muestreo donde se realizó la toma de muestras de agua. En cada una de las zonas de estudio, se investigaron las características sociales, económicas y ambientales. Para tal fin se consultaron las siguientes fuentes de información: Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas (DENUE, 2019), Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), Comisión Nacional de la Población (CONAPO), Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), entre otras fuentes de información.

3.3 Listado de datos de fuentes contaminantes de las industrias en las zonas de estudio.

Se elaboró el inventario de las fuentes industriales que posiblemente contribuyen a la contaminación del río Atoyac y sus tributarios en el ÁMP, para lo cual se utilizó la información del DENUE del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2019 que ofrece los datos de identificación, ubicación, actividad económica y tamaño de unidades económicas activas en el territorio nacional (INEGI, 2019). La información del DENUE se actualiza cada cinco años de manera automática y se publica en el sitio web del INEGI, mediante un sistema que permite

visualizar los establecimientos que están georreferenciados en la cartografía digital y en imágenes satelitales.

Con ayuda del DENU, se identificaron aquellas empresas con actividades industriales y que generan desechos contaminantes, ubicadas en las zonas de estudio o cercanas a ellas. Con esta información, se elaboraron tablas para cada zona de estudio, así como mapas representativos de la localización de las industrias. En cada tabla se incluyeron los municipios recorridos por el río, nombre de la industria, la dirección fiscal, coordenadas geográficas, ubicación de las industrias con respecto a los ríos, tipo o giro de la industria (actividad que realizan), el tipo de contaminantes que generan y que probablemente se descarguen a los ríos, de manera directa o indirecta.

3.3.1 Estimación de la densidad industrial en las zonas de estudio.

La densidad industrial (DI) se calculó tomando como base la información reportada por el DENU (2021), mediante la siguiente fórmula:

$$DI = \frac{N}{A} \quad (\text{Fórmula 1})$$

Donde DI es la densidad industrial.

N representa el número de industrias establecidas en cada municipio.

A representa el área de cada municipio en km².

La densidad poblacional (DP) se calculó tomando como base la información reportada por el INEGI (2021), mediante la siguiente fórmula:

$$DP = \frac{H}{A} \quad (\text{Fórmula 1})$$

Donde DP es la densidad industrial.

H representa el número de industrias establecidas en cada municipio.

A representa el área de cada municipio en km².

3.4 Caracterización fisicoquímica del agua del río Atoyac y sus tributarios.

En cada zona, se tomaron 500 mL por muestra de agua por triplicado a diferentes horas del día (8, 11 y 14 horas), las diferentes muestras de agua fueron tomadas en cada zona y posteriormente fueron mezcladas en el laboratorio para obtener una muestra compuesta de

cada zona de estudio. En cada zona se midió por triplicado la temperatura del agua superficial y del ambiente, el oxígeno disuelto mediante el kit HI 3810 Dissolve Oxygen, aplicando el método de titulación, el pH y la conductividad se cuantificaron mediante el medidor portátil de temperatura y conductividad PC18.

En el laboratorio, se llevó a cabo el análisis de: DQO, DBO_5 , turbidez (Turb), color, conductividad, metales pesados (Cr, Cd, Cu, Pb y Ni), un metaloide (As) y Cianuros (CN), el volumen total por triplicado de cada muestra por estación de muestreo fue de 1,500 mL. Las muestras se almacenaron en frascos de polietileno de cuello ancho y se mantuvieron en frío (4°C) para su posterior análisis.

La DQO se midió con un kit Spectroquant de rango 25-1,500 mg/L. La prueba se basa en el método de la determinación del cromo III y la oxidación del ácido cromosulfúrico, y comprende una serie de celdas de reacción, en las cuales se colocaron 3 mL de muestra. La muestra se añadió cuidadosamente por las paredes del tubo, luego se tapó y agitó vigorosamente. Después de realizar este paso para cada muestra, éstas se colocaron en un termoreactor a 148°C por 2 hrs para posteriormente dejarse enfriar en la gradilla del kit por 10 min. Finalmente, las mediciones se realizaron utilizando un fotómetro Nova 60 Spectroquant Merck.

Las mediciones de Turb y color se llevaron a cabo en el fotómetro Nova 60 Spectroquant. El método consistió en transferir 10 mL de la muestra, sin ningún tipo de tratamiento ni filtrado, se colocó en una celda de medición rectangular con un espesor de 50 mm, para luego colocarla en el fotómetro seleccionando los números 113 y 139 respectivamente.

Para medir la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO_5) se utilizó un incubador OxiTop Control OC 100, equipada con 12 botellas ámbar de 500 mL provistas de un sistema de medición manométrica de presión, en cada una de las tapas. Se midieron los cambios en la presión parcial del oxígeno como resultado del consumo en la oxidación biológica de la materia orgánica, se añadió un inhibidor del proceso de nitrificación para absorber el CO_2 producido por las tabletas de KOH del sistema. Este método respiratorio permite medir directamente el consumo de oxígeno por parte de los microorganismos en un recipiente cerrado en condiciones de temperatura y agitación constante (60 rpm). El periodo de incubación fue de 5 días a 20°C . El volumen de muestra añadido en la botella de incubación fue de 250 mL. Esto se determinó con base en los valores de la DQO medidos en un ensayo preliminar con agua del río Atoyac, los cuales sirvieron de referencia tomando en cuenta las concentraciones de oxígeno registradas. Luego las muestras de agua se colocaron en sus respectivas botellas incubadoras,

a las que se les añadió un agitador magnético, el KOH y una gota del inhibidor de la nitrificación. Finalmente, se colocaron las “tapas-sensores”, para iniciar el ciclo de medición. Las mediciones se registraron diariamente durante 5 días.

3.5 Determinación de metales pesados, arsénico cianuro y COVs.

Para la determinación de metales (Cr, Cd, Cu, Ni y Pb), As y CN se utilizaron diferentes kits/ pruebas (Spectroquant) por el método fotométrico.

Para analizar los compuestos orgánicos volátiles (COVs), se utilizó el método establecido en la Norma Mexicana NMX-AA-103-SCFI-2006. Los COVs se determinaron por Cromatografía de Gases acoplado a un espectrómetro de masas en Productos de Extracción de Constituyentes Tóxicos (PECT) – Método de prueba.

Los compuestos analizados mediante este método deben tener un punto de ebullición inferior a 200°C y ser insolubles o poco solubles en agua. La matriz a la que se le aplica este método es el extracto obtenido del Procedimiento de Extracción para Constituyentes Tóxicos (PECT).

3.6 Análisis del efecto citotóxico inducido por el agua en las zonas de estudio en *Allium cepa*.

Para el análisis de los efectos citotóxicos, fueron expuestos bulbos de cebolla (*Allium cepa*) durante 120 hrs (tratamiento agudo) a diferentes concentraciones (25, 50 y 100%) del agua residual (AR) de las diferentes zonas de estudio (4), con recambio de agua cada 24 hrs. Como testigo negativo, los bulbos fueron expuestos a agua potable (para beber). Los experimentos se realizaron por triplicado (Figura 1).

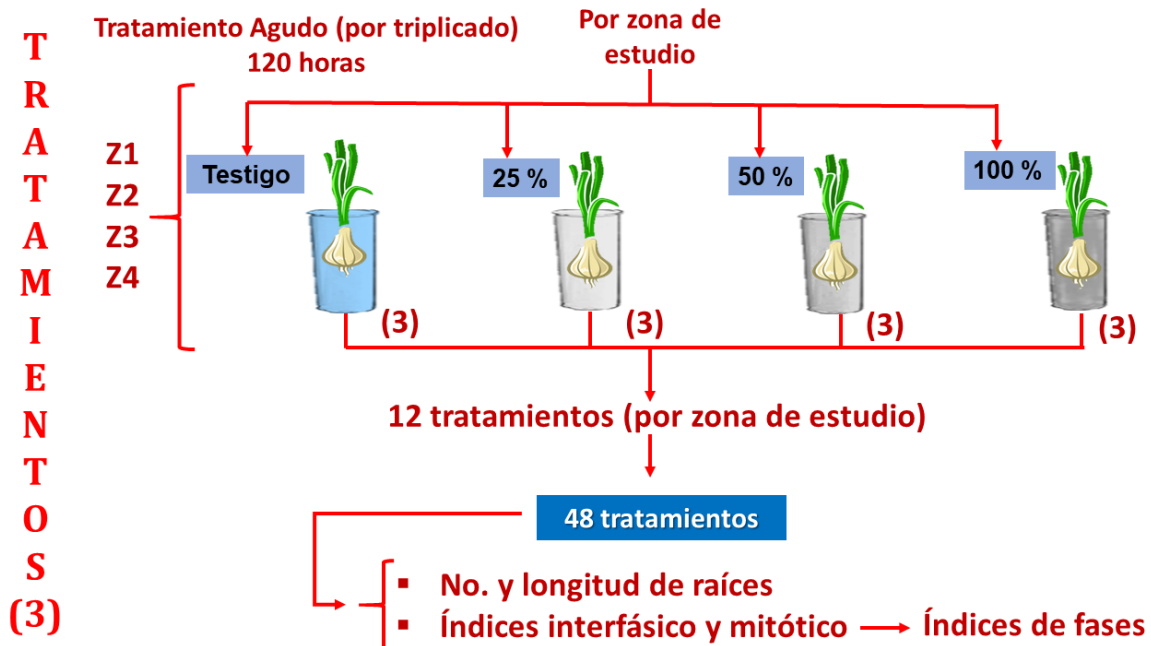


Figura 1. Modelo experimental para analizar el efecto citotóxico en *Allium cepa*.

Al final del tratamiento agudo, se contabilizaron el número de raíces en cada bulbo.

3.6.1 Análisis de citotoxicidad.

De cada bulbo se seleccionaron tres raíces, cortando 2 mm del meristemo apical y se fijaron en una solución de etanol-ácido acético (3:1) durante 24 horas. Se deshidrataron en etanol 70% (v/v) durante 15 min, posteriormente se hidrolizan en HCl 5N durante 30 min. Para eliminar el exceso de HCl y poder teñir las células, se decantó el HCl y se lavó 3 veces con agua destilada. La tinción se realizó con aceto-orceína por 40 min, y por último se agregaron unas gotas de ácido acético al 45% (v/v) con la finalidad de eliminar el exceso de colorante, se aplastó el tejido en monocapa y se montaron con resina para hacer las laminillas permanentes. Posteriormente se observaron con ayuda del microscopio binocular LEICA CME y el microscopio estereoscópico CARL ZEISS. Para evaluar los efectos citotóxicos se determinaron

los índices mitóticos (IM), interfásico (II) y de fase (IP, IMe, IA, IT), en un total de 1,000 células por laminilla y se comparan con el grupo testigo (Berrocal *et al.*, 2013). Para tal efecto se utilizaron las siguientes fórmulas:

$$\text{Índice mitótico} = \frac{\text{No. de células en división mitótica}}{\text{No. total de células observadas}} * 100$$

$$\text{Índice interfásico} = \frac{\text{No. de células en interfase}}{\text{No. total de células observadas}} * 100$$

$$\text{Índice de fases} = \frac{\text{No. de células en determinada fase}}{\text{No. total de células en mitosis}} * 100$$

3.7 Análisis estadístico.

Los datos cuantitativos se analizaron mediante el método ANOVA para comparar múltiples grupos en una variable cuantitativa. Los resultados se expresaron como la media \pm error estándar de la media. Los porcentajes promedio de los IM, II y de fases (IP, IMe, IA, IT) de *Allium cepa* encontrados a diferentes concentraciones de los tratamientos agudos fueron sometidos a la prueba de ANOVA y Tukey, $p \leq 0.05$. Se realizó la matriz de correlación y se determinó calculando los coeficientes de correlación de Pearson con una significación $p \leq 0,05$. Los tratamientos estadísticos de los datos se realizaron con el programa Minitab 19.

CAPITULO 4. RESULTADOS.

4.1 Zonas de estudio.

La presente investigación se llevó a cabo en el río Atoyac y sus principales tributarios. El río Atoyac es un río urbano perteneciente a la cuenca del Alto Atoyac, subcuenca del Río Balsas ubicado en el Valle de Tlaxcala-Puebla en la Región Hidrológico-Administrativa IV Balsas (CONAGUA, 2010; DOF, 2010; INEGI, 2016). Se forma por el derretimiento del volcán Iztaccíhuatl, en el estado de Puebla, a una altitud de 3,250 msnm; tiene una longitud de 84.97 km, una sección transversal entre los 15 y 60 m, y una profundidad de 1 a 3 m. En su descenso, la corriente atraviesa las zonas metropolitanas de Tlaxcala (ZMT, 22 km) y Puebla (ÁMP, 62 km) donde se embalsa en la presa de Valsequillo (DOF, 2011; Martínez *et al.*, 2017; Pérez-Castresana *et al.*, 2018; Rodríguez-Tapia *et al.*, 2012).

El ÁMP, es atravesada en toda su longitud por el río Atoyac (25 km) y sus principales afluentes son: Rabanillo (5.21 km), Zapatero (7.42 km) y San Francisco (15.55 km). La subcuenca del río Alto Atoyac tiene un clima predominantemente templado subhúmedo (78.3 %) con lluvias en verano; en segundo lugar, con un 21.4 %, en las regiones altas el clima es semifrío subhúmedo y una zona pequeña (0.26 %) de clima frío. La precipitación anual en esta región es baja (812 mm) y la evaporación promedio anual es bastante alta (1,427.00 mm). El uso de suelo de la subcuenca es agrícola (63.6%), seguido de una superficie baja de bosque (22.0%) y de pastizal (4.95%); por último, la zona urbana representa el 7.6 % (Bravo-Inclán *et al.*, 2015; IMTA, 2005).

Diversos investigadores han estudiado el agua del río Atoyac como referente del desarrollo demográfico, económico, social, cultural, político y territorial de la ciudad de Puebla durante diferentes periodos de la historia (Galicia-Hernández, 2015). Puebla está ubicada en medio de un fértil valle regado por los ríos San Francisco, Alseseca, Rabanillo, Zapatero y Atoyac, en su recorrido se une con el Zahuapan, en el límite entre los municipios de Papalotla de Xicohténcatl y Cuautlancingo, en los estados de Tlaxcala y Puebla que pertenecen a la cuenca del Alto Balsas (Handal-Silva *et al.*, 2017). El río San Francisco tuvo un gran impacto en la vida de la colonia en Puebla debido a su proximidad, a la estructura urbana y la calidad/cantidad de las aguas que influyeron directamente en la dinámica socioeconómica y en la organización espacial de la ciudad y contribuyeron al desarrollo local, regional, nacional e internacional

(Galicia-Hernández, 2015; Handal-Silva *et al.*, 2017; Rosas-Salas, 2013; Pérez-Castresana *et al.*, 2018 y 2019).

4.1.1 Zonas de muestreo.

La represa Covadonga es la primera zona de estudio (Z1) (Figuras 2 y 3).

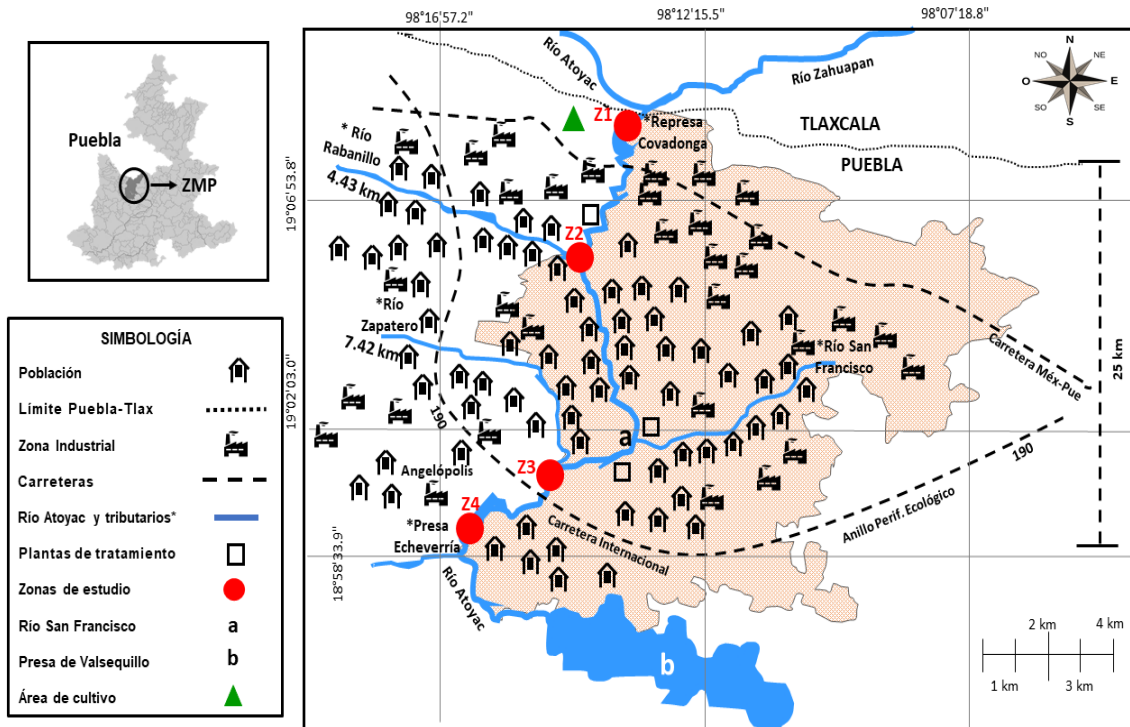


Figura 2. Cuenca hidrológica del río Atoyac y tributarios en el Área Metropolitana de Puebla (ÁMP). Fuentes: Map Application Server, Google Maps. Elaboración de Covarrubias-López, A.C., 2019.

Es el lugar donde confluyen los ríos Atoyac y Zahuapan provenientes de Tlaxcala, en la región noroeste del municipio de Puebla, entre los límites de Puebla y Tlaxcala (Bravo-Inclán *et al.*, 2015; Rosas-Salas, 2013). Se localiza en la colonia Agrícola Ignacio Zaragoza en la localidad de San Lorenzo Almecatla, Cuautlancingo que tiene una población de 137,451 habitantes en el municipio de Cuautlancingo, con un clima templado subhúmedo con lluvias en verano y un grado de marginación y rezago social muy bajo (INEGI, 2009c; 2021; SEDESOL, 2013a, b). La represa tiene un ancho de 54 m aproximadamente y se observa gran cantidad de vegetación de pastizal (INEGI, 2009c; 2021) y algunos cultivos de maíz, ganado vacuno pastando en época de lluvia (Figura 4 a, b y c), en época de estiaje el volumen de agua en la represa disminuye sensiblemente (Figura 4c).

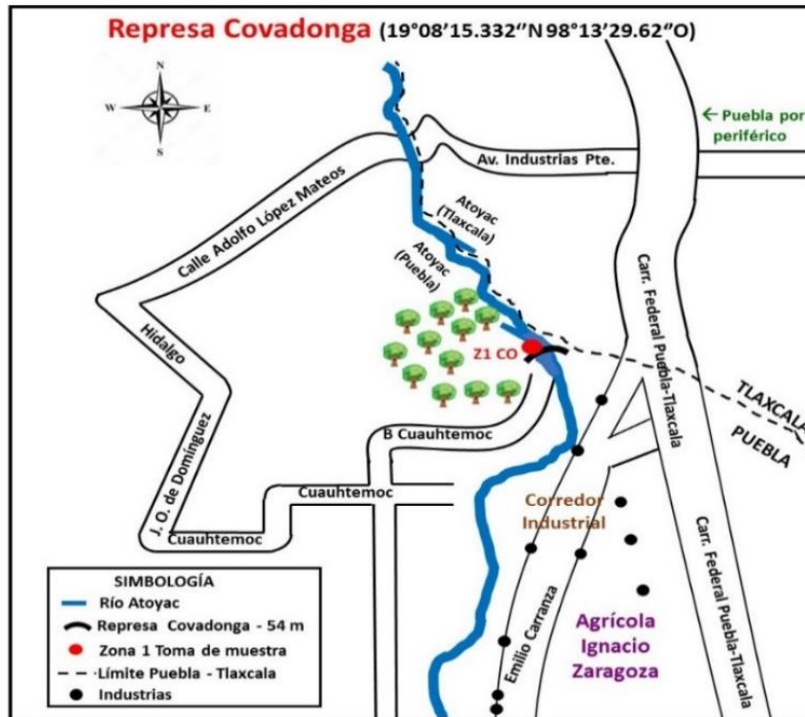


Figura 3. Localización geográfica de la Z1: Represa Covadonga. Elaboración Covarrubias-López, A.C. 2019. Fuentes: Map Application Server, Google Maps.



Figura 4. Represa Covadonga (Z1) en época de lluvias (a y b) y en época de estiaje (c).

A partir del cauce del río Atoyac, se desarrolló en el año de 1897 un corredor industrial dentro de los límites de los estados de Puebla y Tlaxcala, corredor que compartía la mecanización del hilado y tejido de algodón, el aprovechamiento de los ríos para generar energía y la integración económica con la ciudad de Puebla (Rosas-Salas, 2013).

Al este de la represa en el estado de Puebla, se reciben las descargas de aguas residuales de un fraccionamiento industrial en Puebla, que tiene empresas de diferentes giros: textil, plásticos, químicos, automotriz y alimentaria, entre otros. La importancia de esta zona es que es el lugar donde se concentran todos los contaminantes de los ríos Atoyac y Zahuapan y sus afluentes provenientes del estado de Tlaxcala.

La segunda zona de muestreo es el río Rabanillo (Z2) (Figuras 2 y 5), localizado al noroeste del municipio de San Pedro Cholula, tiene una longitud aproximada de 5.21 km y a la altura de la carretera Periférico-Ecológico y el Boulevard Forjadores de Puebla toma el nombre de Río Prieto, tiene una longitud de 8.26 km y ancho de 6.93 m ubicado en el municipio Santa María Coronango (Figura 6a y 6b).

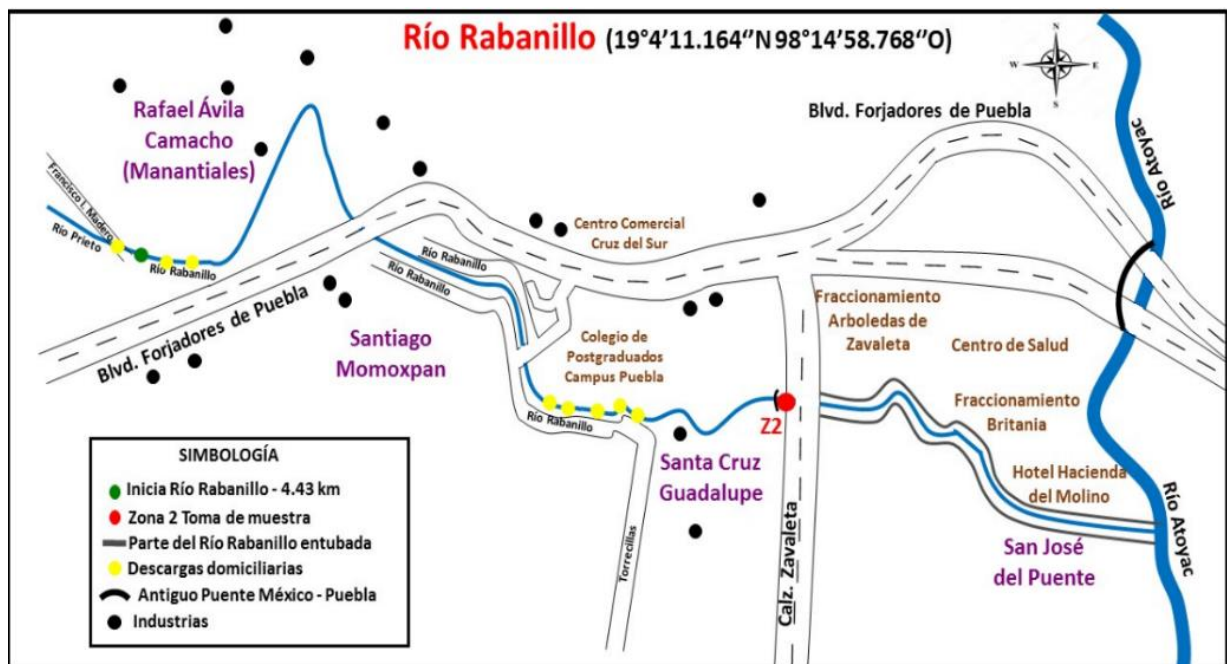


Figura 5. Localización geográfica de la Z2: río Rabanillo. Elaboración Covarrubias-López, A.C. 2019. Fuentes: Map Application Server, Google Maps.



Figura 6. Calzada Zavaleta, río Rabanillo (Z2) (a) y punto de muestreo en época de estiaje (b).

Este río atraviesa las localidades: Puebla, la Trinidad Chiautenco, San Juan Cuautlancingo, San Diego Los Sauces, Ampliación Fuerte de Guadalupe, Fuerte de Guadalupe, El Lucero en el municipio de Cuautlancingo; Cholula de Rivadavia, Santiago Momoxpan en el municipio de San Pedro Cholula y Santa María Coronango, con una población de 322,704 habitantes aproximadamente (INEGI, 2021).

El tipo de vegetación que predomina en Rabanillo es el pastizal y prevalece la zona urbana, un clima templado subhúmedo con lluvias en verano, un grado de marginación bajo y un grado de rezago muy bajo (INEGI, 2009c; 2021; SEDESOL, 2013a, b).

La importancia de esta zona es que recibe descargas de aguas residuales domiciliarias e industriales y se encuentra en una zona urbana densamente poblada.

La tercera zona de estudio es el río Zapatero (Z3) (Figuras 2 y 7), se ubica al sureste de la Universidad de las Américas Puebla (UDLAP), recorriendo el oriente del municipio de San Andrés Cholula, hasta unirse al río Atoyac entre los límites de los municipios de San Andrés Cholula y Puebla con una población de 154,448 habitantes (INEGI, 2021). En el municipio de San Andrés Cholula predomina la agricultura de secano y riego, el clima es subhúmedo con lluvias en verano, el grado de marginación es bajo y un grado de rezago muy bajo (INEGI, 2009a; 2021; SEDESOL, 2013c).

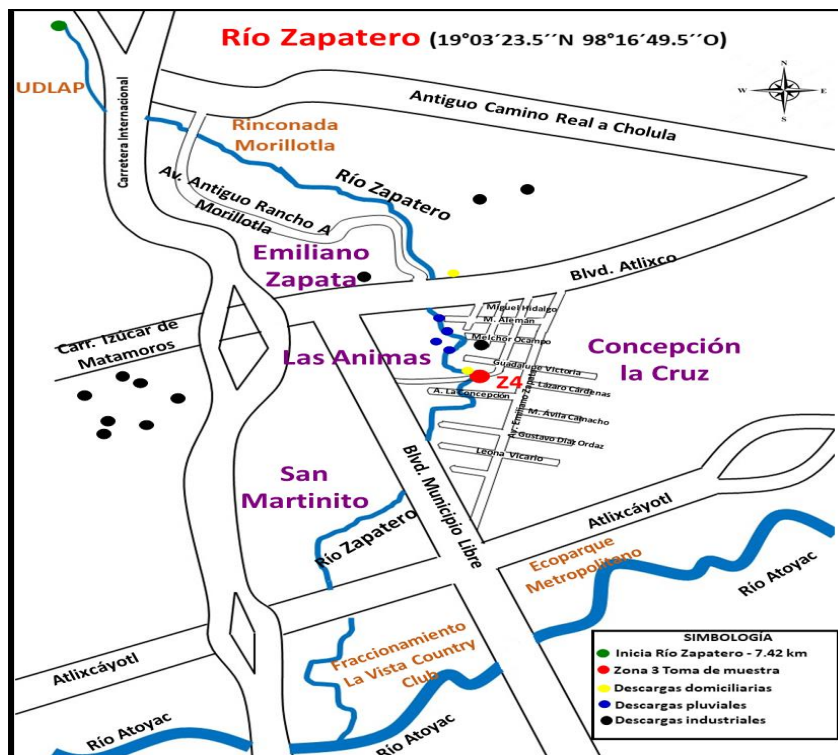


Figura 7. Localización geográfica de la Z3: río Zapatero. Elaboración Covarrubias-López, A.C. 2019. Fuentes: Map Application Server, Google Maps.

El río tiene una longitud de 7.42 km y ancho aproximado de 4.37 m (Figura 8a), atraviesa parte del municipio de San Andrés Cholula en la localidad de San Bernardino Tlaxcalancingo y San Andrés Cholula; en Puebla. Este río recorre el fraccionamiento la Vista Country Club, residencial ubicado en Angelópolis, la zona urbana de mayor plusvalía y exclusividad. Las características del agua del río y de la zona se resumen en la Tabla 5.

En la colonia Concepción la Cruz se observa gran cantidad de basura, desechos de construcción, llantas, plásticos, entre otros, se observan descargas pluviales y municipales (Figura 8b).

La importancia de esta zona es que se encuentra en una zona urbana densamente poblada y recorre el fraccionamiento la Vista Country Club, es un residencial ubicado en Angelópolis, en la zona urbana de mayor plusvalía y exclusividad del municipio de San Andrés Cholula, por lo que su acceso es restringido.

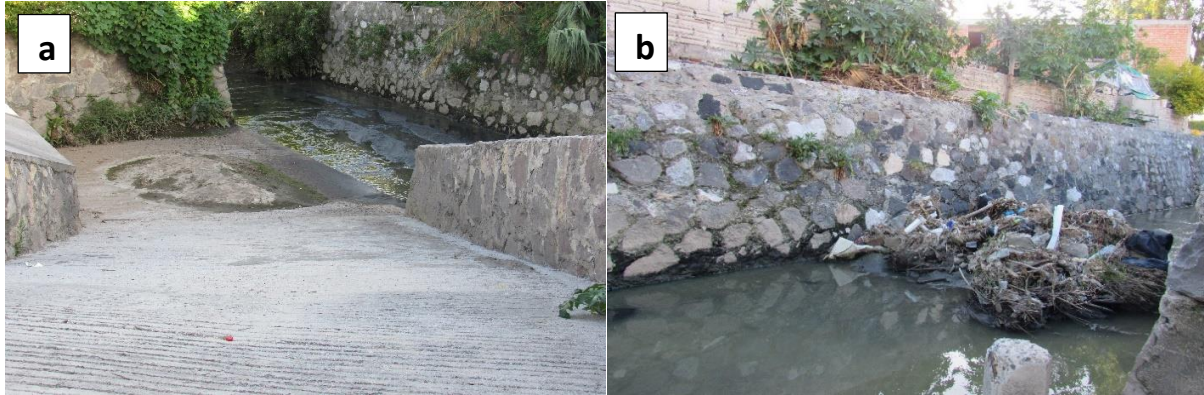


Figura 8. Río Zapatero en la colonia Concepción la Cruz (a) y acumulación de basura (b).

La presa Echeverría es la cuarta zona de estudio (Z4) (Figuras 2 y 9), se eligió esta zona porque representa la sección final del ÁMP y se encuentra en una zona urbana, donde parte del caudal del río Atoyac es desviado, de manera artificial, hacia la población de Emilio Portes Gil (EPG) (zona centro-occidental de Ocoyucan). Los habitantes de EPG dependen del agua contaminada del río Atoyac para el riego agrícola de sus cultivos debido a la falta de fuentes alternativas de agua y al suministro limitado de agua potable (Pérez-Castresana *et al.*, 2018).

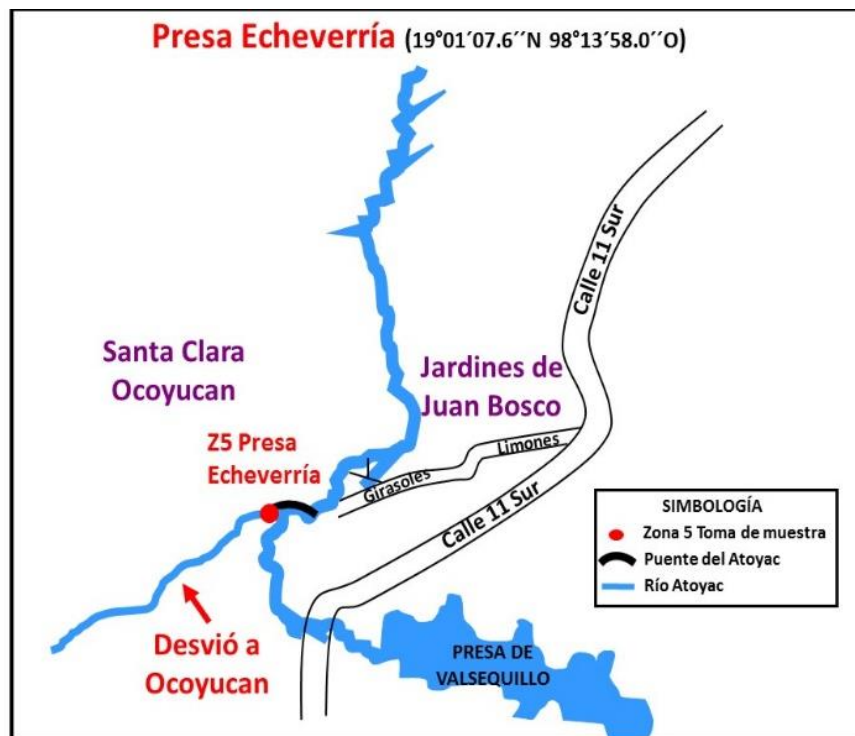


Figura 9. Localización geográfica de la Z4: presa Echeverría. Elaboración Covarrubias-López, A.C. 2019. Fuentes: Map Application Server, Google Maps.

El acceso a la presa es a través de la Colonia Jardines de Juan Bosco, ubicada en el municipio

de Puebla (que pertenece a la cuarta sección de San Ramón), donde se encuentra el “Puente del Atoyac” (Figura 10a), por lo que ambos municipios tienen una población de 1,734,850 habitantes; en esta zona la calle es de terracería, lo que dificulta su acceso y aún más en época de lluvia; el punto de muestreo se ubica al iniciar el desvío del río Atoyac hacia EPG antes de la compuerta (Figura 10b). El tipo de vegetación que predomina en esta zona es pastizal y bosque, con un grado de marginación y rezago muy bajo, y un clima templado subhúmedo con lluvias en verano (INEGI, 2009d;2021; SEDESOL, 2013d).



Figura 10. Presa Echeverría (a) y punto de muestreo (b).

El puente Atoyac tiene aproximadamente 76 m de longitud por 1 m de ancho. Por debajo del puente se puede observar una gran cantidad de basura (llantas, bolsas de plásticos, ramas y escombros) y espuma en la superficie en cualquier época del año, especialmente en temporada de lluvias.

4.2 Inventario de fuentes contaminantes industriales en las zonas de estudio.

En la figura 11, 12, 13 y 14 se identificaron mediante tachuelas azules toda la industria contaminante y con tachuelas rojas aquellas unidades económicas tales como: panaderías, tortillerías, salones de belleza, etc.

En el estado de Puebla, la represa Covadonga (Figura 11) en la localidad de San Lorenzo Almecatla, en el municipio de Cuautlancingo, recibe descargas de aguas residuales de 28 industrias de diferentes giros industriales como: metalúrgica, automotriz, construcción (cemento), textil, y metal-mecánica (Tabla 1). En esta zona, la industria metalúrgica es la que tiene el mayor número de industrias (Tabla 1). Las características del agua del río y de la zona se resumen en la Tabla 7.



Figura 11. Distribución de la industria en la Z1: represa Covadonga. Elaboración Covarrubias-López, A.C. Fuentes: DENUE-INEGI, 2021.

Tabla 1. Listado de las industrias ubicadas en la represa Covadonga en el ÁMP.

Represa Covadonga en el ÁMP						
T	Municipio	Tipo de industria	Desechos industriales	No. de industria	¹ Cont. de interés	Total industrias
	Cuautlancingo	Metalúrgica	fenoles y cresoles, amoníaco, de arsénico y sulfuros, benceno, tolueno, xileno y metales pesados.	14	Metales pesados	28
		Automotriz	Metales pesados	6	Metales pesados	
		Textil	Detergentes, peróxidos de hidrogeno o cloro, sosa y colorantes	2	Peróxidos de hidrogeno o cloro, sosa	
		² Construcción (C)	Sólidos suspendidos (potasio y sulfato), partículas de polvo, sílice, aluminio, hierro y oxido de calcio.	4	Sólidos suspendidos, hierro	
		Metal-mecánica	Metales pesados	2	Metales pesados	
Total	1	5	19	28	7	28

Nota: ¹Contaminantes de interés; ²Construcción (Cemento).

La segunda zona de muestreo es el río Rabanillo (Z2) (Figura 12). El río Rabanillo recibe descargas de aguas residuales industriales, municipales y comercios. En la zona existen un total 1898 de las cuales 1326 industrias corresponden a la construcción de ladrillo, seguido de 233 y 75 industrias dedicadas a la metalúrgica y construcción de cemento, 74 industrias metal-mecánica, el resto son dedicadas a la industria del plástico, alimentaria, automotriz, textil, alfarería y vidrio, química, papel y cartón, pinturas, entre otros.

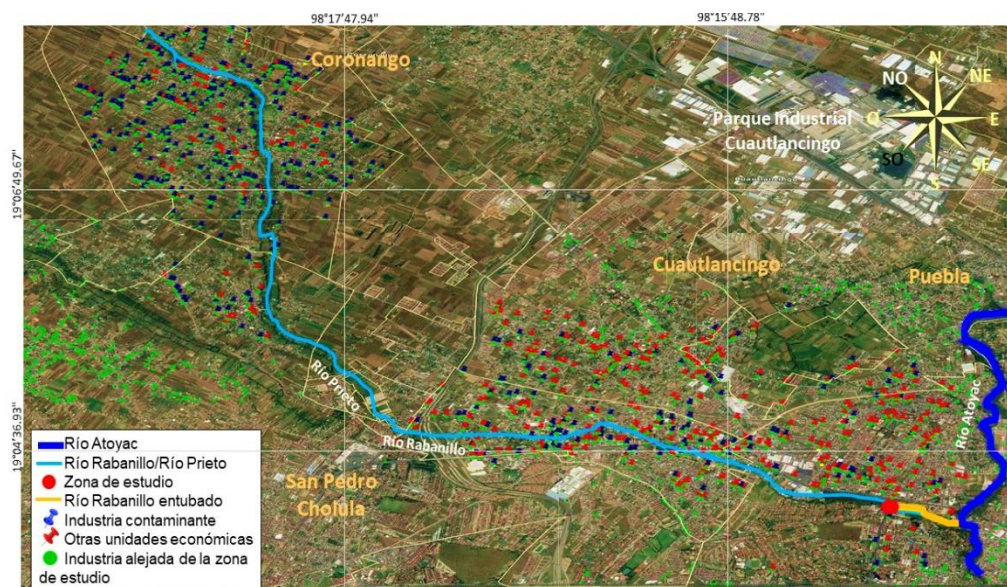


Figura 12. Distribución de la industria en la Z2: río Rabanillo - Prieto. Elaboración Covarrubias-López, A.C. Fuentes: DENUE-INEGI, 2021.

Se identificaron un total de 32 tipos de posibles desechos industriales, principalmente de aquellas industrias que generan: partículas de óxidos de nitrógeno (NOx), COVs, hidrocarburos aromáticos, dioxinas, furanos, benceno, bifenilos poli clorados provenientes de la industria de la construcción de ladrillos y 8 contaminantes de interés entre los que destacan los metales pesados (Cirtina *et al.*, 2016; Berumen-Rodríguez *et al.*, 2021; Habashi, 2012, Tabla 2).

Las características del agua del río y de la zona se resumen en la Tabla 7.

Tabla 2. Listado de las industrias ubicadas en el río Rabanillo en el ÁMP.

RÍO RABANILLO						
T	Municipio	Tipo de industria	Desechos industriales	No. de industrias	Contaminantes de interés	Total de industrias
	PUEBLA	Metalúrgica	Fenoles y cresoles, amoníaco, de arsénico y sulfuros, benceno, tolueno, xileno y metales pesados.	12	Metales pesados	30
		Metal-mecánica	Metales pesados	11	Metales pesados	
		Pintura	Tolueno, etanol, acetato de etilo (COVs)	1	COVs	
		Textil	Detergentes, peróxidos de hidrogeno o cloro, sosa y colorantes.	2	Sosa, peróxido de hidrogeno, cloro	
		Alimentaria	Sólidos suspendidos	2	Sólidos suspendidos	
		Química	Metales pesados, solventes, cloro.	1	Metales pesados	
		Otros¹	Sólidos en suspensión, metales pesados, grasas, compuestos de boro y fibra orgánica.	1	Metales pesados, sólidos en suspensión	
	CUAUTLANCINGO	Metalúrgica	Fenoles y cresoles, amoníaco, de arsénico y sulfuros, benceno, tolueno, xileno y metales pesados.	89	Metales pesados	205
		Metal-mecánica	Metales pesados	22	Metales pesados	
		Plástico	Partículas de polietileno y polipropileno	27	-	
		Textil	Colorantes, sosa, cloro y peróxidos	9	sosa	
		Alimentaria	Sólidos suspendidos	10		
		Química	Metales pesados, solventes, cloro.	2	Metales pesados	
		²Construcción (C)	Sólidos suspendidos (potasio y sulfato), partículas de polvo, sílice, aluminio, hierro y oxido de calcio.	7	Sólidos suspendidos, hierro	
		³Construcción (L)	Partículas de óxidos de nitrógeno (NOx), COVs, hidrocarburos aromáticos, dioxinas, furanos, benceno, bifenilos poli clorados	3	benceno	
		Automotriz	Metales pesados	26	Metales pesados	
		Cartón	Sólidos en suspensión, metales pesados, grasas.	6	Sólidos en suspensión y materia orgánica	
		Pintura	Tolueno, etanol, acetato de etilo (COVs)	2	COVs	
		Vidrio	Compuestos de boro y fibra orgánica	2	Materia orgánica	

	SAN PEDRO CHOLULA	Metalúrgica	Fenoles y cresoles, amoníaco, de arsénico y sulfuros, benceno, tolueno, xileno y metales pesados.	117	Metales pesados	1354	
		Metal-mecánica	Metales pesados	41	Metales pesados		
		Pintura	Tolueno, etanol, acetato de etilo (COVs)	1	Tolueno		
		Textil	Detergentes, peróxidos de hidrogeno o cloro, sosa, colorantes, ácidos (acrílicos) y suavizantes	15	peróxidos de hidrogeno o cloro, sosa		
		Alimentaria	Sólidos suspendidos	25	Sólidos suspendidos		
		Construcción (C)	Sólidos suspendidos (potasio y sulfato), partículas de polvo, sílice, aluminio, hierro y oxido de calcio.	56	Sólidos suspendidos, hierro		
		Plástico	Partículas de polietileno y polipropileno	10	-		
		Papel y cartón	Sólidos en suspensión, metales pesados, grasas.	7	Metales pesados		
		Alfarería y vidrio	Compuestos de boro y fibra orgánica	21	Materia orgánica		
		Automotriz	Metales pesados	3	Metales pesados		
		Construcción (L)	Partículas de óxidos de nitrógeno (NOx), COVs, hidrocarburos aromáticos, dioxinas, furanos, benceno, bifenilos poli clorados	1044	benceno		
		Química	Metales pesados, solventes, cloro.	11	Metales pesados		
	Otros¹	Grasas	3	Grasas			
	CORONANGO	Metalúrgica	Fenoles y cresoles, amoníaco, de arsénico y sulfuros, benceno, tolueno, xileno y metales pesados.	15	Metales pesados	309	
		Química	Metales pesados, solventes, cloro.	1	Metales pesados		
		Alimentaria	Sólidos suspendidos	2	Sólidos suspendidos		
		Construcción (C)	Sólidos suspendidos (potasio y sulfato), partículas de polvo, sílice, aluminio, hierro y oxido de calcio.	12	Sólidos suspendidos, hierro		
			Construcción (L)	Partículas de óxidos de nitrógeno (NOx), COVs, hidrocarburos aromáticos, dioxinas, furanos, benceno, bifenilos poli clorados	279	benceno	
	Total	4	10	32	1898	8	1898

Notas: ¹Otros (Alfarería y vidrio); ²Construcción (Cemento); ³Construcción (Ladrillo).

La tercera zona de estudio es el río Zapatero (Z3) (Figura 13). Se registran un total de 248 industrias de las cuales 135 corresponden a la metalúrgica, 31 construcción (cemento), el resto de las industrias son: metalmecánica, alimentaria, alfarería y vidrio, plástico, automotriz, textil, entre otros (INEGI, 2019, Tabla 3).

Los posibles contaminantes que generan la industria, de acuerdo a su giro, en la zona fueron: fenoles, cresoles, amoníaco, arsénico, sulfuros, benceno, tolueno, xileno, metales pesados, sólidos suspendidos (potasio y sulfato), partículas de polvo, sílice, aluminio, hierro y óxido de calcio provenientes en su mayoría de la industria metalúrgica y de construcción (cemento), donde se consideró a los metales pesados como contaminantes de interés (Berumen-Rodríguez *et al.*, 2021; Habashi, 2012). Las características del agua del río y de la zona se resumen en la Tabla 7.

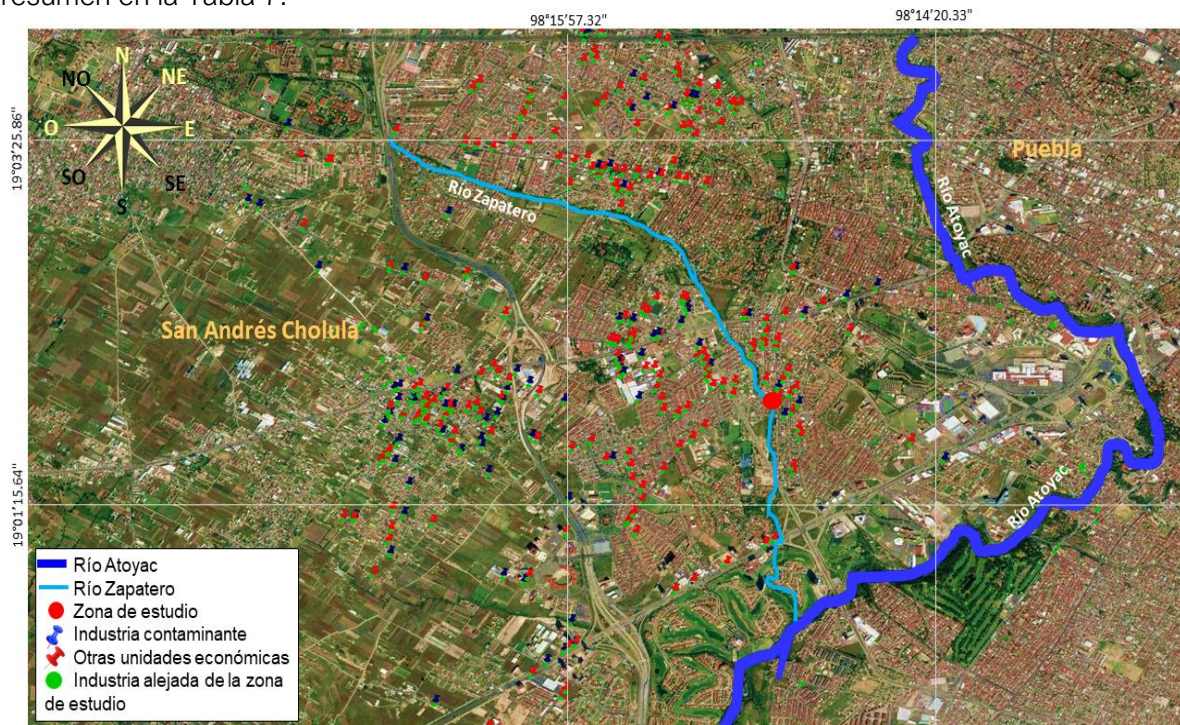


Figura 13. Distribución de la industria en la Z3: río Zapatero. Elaboración Covarrubias-López, A.C. Fuentes: DENUE-INEGI, 2021.

Tabla 3. Listado de las industrias ubicadas en el río Zapatero en el ÁMP.

RÍO ZAPATERO						
T	Municipio	Tipo de industria	Desechos industriales	No. de industrias	Contaminantes de interés	Total de industrias
SAN ANDRÉS CHOLULA		Metalúrgica	Fenoles y cresoles, amoníaco, de arsénico y sulfuros, benceno, tolueno, xileno y metales pesados	128	Metales pesados	236
		² Construcción (C)	Sólidos suspendidos (potasio y sulfato), partículas de polvo, sílice, aluminio, hierro y oxido de calcio	30	Sólidos suspendidos, hierro	
		Metalmecánica		21		
		Farmacéutica	Partículas suspendidas, antibióticos, analgésicos contaminantes emergentes.	3	-	
		Textil	Detergentes, peróxidos de hidrogeno o cloro, hidróxido de sodio y colorantes	4	peróxidos de hidrogeno o cloro, sosa	
		Otros ¹	Grasas	1	Grasas	
		Química	Grasas y aceites, hidróxido de sodio	2	Metales pesados	
		Plástico	Partículas de polietileno y polipropileno	6	-	
		Pintura	Tolueno, etanol, acetato de etilo (COVs)	1	Tolueno	
		Alimentaria	Sólidos suspendidos, grasas y aceites	18	Sólidos suspendidos	
		Alfarería y vidrio	Compuestos de boro y fibra orgánica	10	Materia orgánica	
		Papel y cartón	Sólidos en suspensión, metales pesados, grasas.	3	Metales pesados	
		Automotriz	Metales pesados	6	Metales pesados	
		³ Construcción (L)	Partículas de óxidos de nitrógeno (NOx), COVs, hidrocarburos aromáticos, dioxinas, furanos, benceno, bifenilos policlорados	3	Benceno, COVs	
		PUEBLA		Metalúrgica	Fenoles y cresoles, amoníaco, de arsénico y sulfuros, benceno, tolueno, xileno y metales pesados	
² Construcción (C)	Sólidos suspendidos (potasio y sulfato), partículas de polvo, sílice, aluminio, hierro y oxido de calcio			1	Sólidos suspendidos, hierro	

		Química	Grasas y aceites, hidróxido de sodio	2	Metales pesados	
		Pintura	Tolueno, etanol, acetato de etilo (COVs)	1	Tolueno	
		Otros¹	Polímeros plásticos, aceites, conservantes y microplásticos.	1	-	
Total	2	10	33	248	7	248

Notas: ¹Otros (aceites y cosmética); ²Construcción (Cemento); ³Construcción (Ladrillo).

La cuarta zona de estudio es la presa Echeverría (Z4) (Figura 14). Se registran un total de 52 industrias de las cuales 23 corresponden a la metalúrgica, 8 textiles, el resto de industrias son: plástico, construcción (cemento), minería, alimentaria, química, cartón y automotriz (INEGI, 2019, Tabla 4).

Los posibles contaminantes que generan la industria, de acuerdo a su giro, en la zona fueron: fenoles, cresoles, amoníaco, arsénico, sulfuros, benceno, tolueno, xileno, detergentes, peróxido de hidrógeno o cloro, hidróxido de sodio y colorantes provenientes en su mayoría de la industria metalúrgica y textil, donde se consideró a los metales pesados y al peróxido de hidrógeno como contaminantes de interés (Berumen-Rodríguez *et al.*, 2021; Habashi, 2012). Las características del agua del río y de la zona se resumen en la Tabla 7.

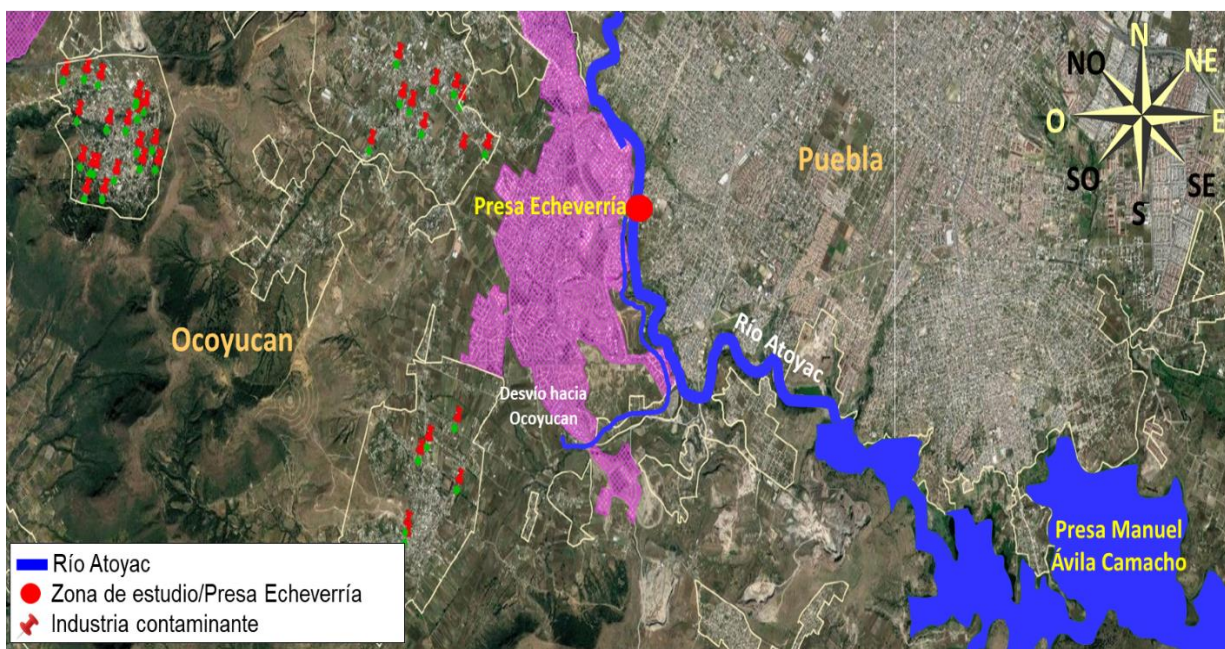


Figura 14. Distribución de la industria en la Z4: presa Echeverría. Elaboración Covarrubias-López, A.C. Fuentes: DENUE-INEGI, 2021.

Tabla 4. Listado de las industrias ubicadas en la presa Echeverría en el río Atoyac en el ÁMP.

MP.

RÍO ATOYAC						
T	Municipio	Tipo de industria	Desechos industriales	No. de industrias	Contaminantes de interés	Total de industrias por municipio
	OCOYUCAN	Metalúrgica	Fenoles y cresoles, amoníaco, de arsénico y sulfuros, benceno, tolueno, xileno y metales pesados	23	Metales pesados	52
		Textil	Detergentes, peróxidos de hidrogeno o cloro, hidróxido de sodio y colorantes	8	peróxidos de hidrogeno o cloro, sosa	
		Alimentaria	Sólidos suspendidos, grasas y aceites	3	Sólidos suspendidos	
		Plástico	Partículas de polietileno y polipropileno	7	-	
		¹Construcción(C)	Sólidos suspendidos (potasio y sulfato), partículas de polvo, sílice, aluminio, hierro y oxido de calcio, partículas de óxidos de nitrógeno (NOx), COVs, hidrocarburos aromáticos, dioxinas, furanos, benceno, bifenilos poli clorados	5	Sólidos suspendidos, hierro y benceno	
		Automotriz	Metales pesados	1	Metales pesados	
		Cartón	Sólidos en suspensión, metales pesados, grasas	1	Metales pesados	
		Química	Grasas y aceites, hidróxido de sodio, metales pesados	1	Metales pesados	
		Minería	Sólidos suspendidos, metales pesados	3	Sólidos suspendidos, metales pesados	
Total	1	9	24	52	6	52

Nota: ²Construcción (Cemento).

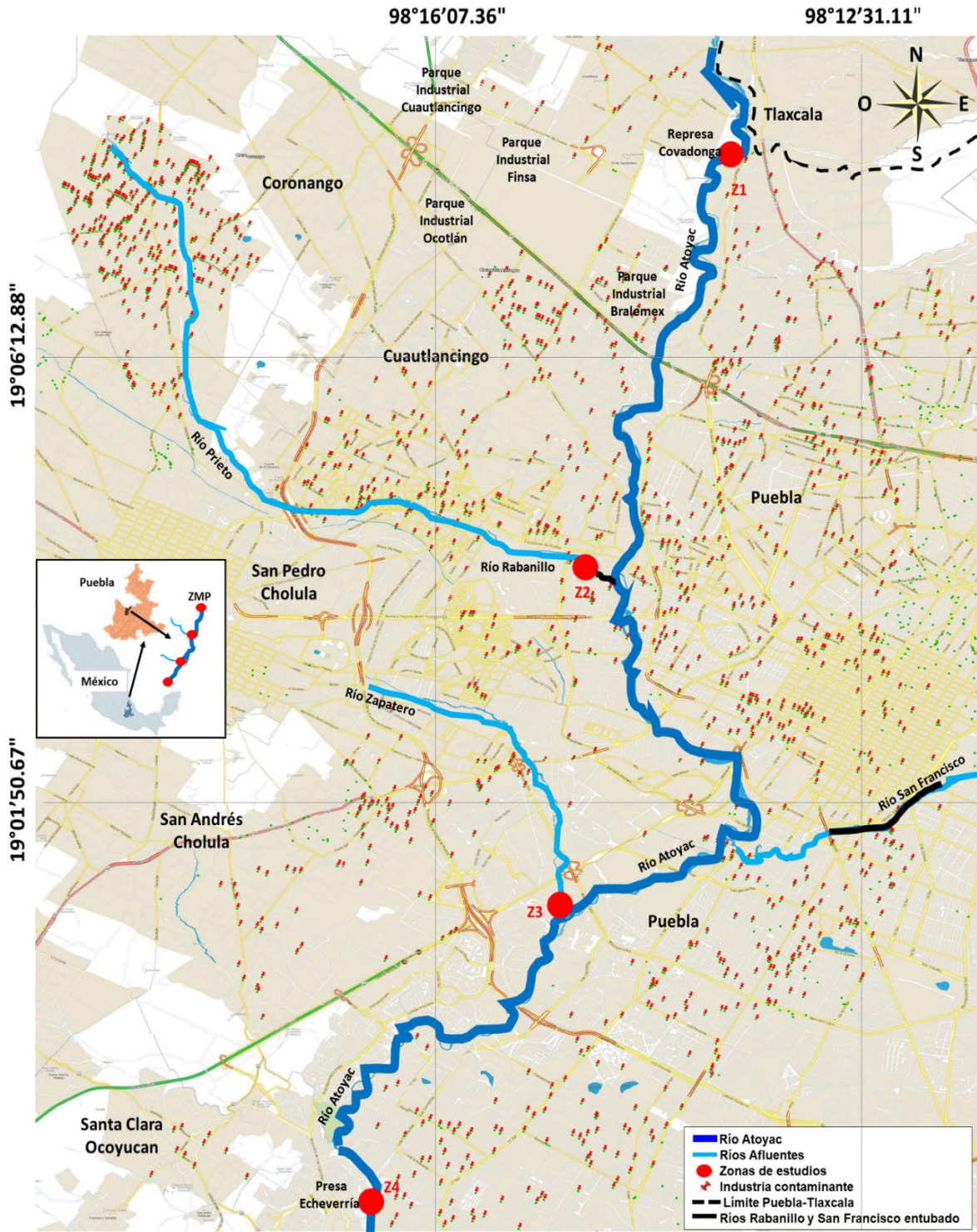


Figura 15. Distribución de la industria en el AMP. Elaboración Covarrubias-López, A.C. Fuentes: DENEU-INEGI, 2021.

Tabla 5. Listado de las industrias ubicadas en el río Atoyac en el MP.

RÍO ATOYAC						
T	Municipio	Tipo de industria	Desechos industriales	No. de industrias	Contaminantes de interés	Total de industrias por municipio
	PUEBLA	Minería	Sólidos suspendidos, metales pesados	87	Sólidos suspendidos, metales pesados	2213
		Papel y Cartón	Sólidos en suspensión, metales pesados, grasas	43	Metales pesados	
		Automotriz	Metales pesados	20	Metales pesados	
		Farmacéutica	Partículas suspendidas, antibióticos, analgésicos contaminantes emergentes.	11	---	
		¹ Construcción (L)	Partículas de óxidos de nitrógeno (NOx), COVs, hidrocarburos aromáticos, dioxinas, furanos, benceno, bifenilos políclorados	7	Benceno, COVs	
		Siderúrgica	Metales pesados	2	Metales pesados	
		Pintura	Tolueno, etanol, acetato de etilo (COVs)	16	Tolueno	
		Alimentaria	Sólidos suspendidos, grasas y aceites	189	Sólidos suspendidos	
		Otros**	Polímeros plásticos, aceites, conservantes, microplásticos, sólidos suspendidos, materia orgánica y nutrientes	7	Sólidos suspendidos/materia orgánica	
		Química	Grasas y aceites, hidróxido de sodio, metales pesados	47	Metales pesados	
		Alfarería y vidrio	Sólidos en suspensión, metales pesados, grasas, compuestos de boro y fibra orgánica	159	Sólidos en suspensión, metales pesados	
		² Construcción(C)	Sólidos suspendidos (potasio y sulfato), partículas de polvo, sílice, aluminio, hierro y óxido de calcio, partículas de óxidos de nitrógeno (NOx), COVs,	89	Sólidos suspendidos, hierro y benceno	

			hidrocarburos aromáticos, dioxinas, furanos, benceno, bifenilos polí clorados			
		Textil	Detergentes, peróxidos de hidrogeno o cloro, hidróxido de sodio y colorantes	185	peróxidos de hidrogeno o cloro, sosa	
		Plástico	Partículas de polietileno y polipropileno	94	-	
		Metal-mecánica	Metales pesados	286	Metales pesados	
		Metalúrgica	Fenoles y cresoles, amoníaco, de arsénico y sulfuros, benceno, tolueno, xileno y metales pesados	971	Metales pesados	
	SAN PEDRO CHOLULA	Alimentaria	Sólidos suspendidos, grasas y aceites	1	Sólidos suspendidos	57
		²Construcción (C)	Sólidos suspendidos (potasio y sulfato), partículas de polvo, sílice, aluminio, hierro y oxido de calcio, partículas de óxidos de nitrógeno (NOx), COVs, hidrocarburos aromáticos, dioxinas, furanos, benceno, bifenilos polí clorados	9	Sólidos suspendidos, hierro y benceno	
		Metalúrgica	Fenoles y cresoles, amoníaco, de arsénico y sulfuros, benceno, tolueno, xileno y metales pesados	16	Metales pesados	
		Automotriz	Metales pesados	1	Metales pesados	
		¹Construcción (L)	Partículas de óxidos de nitrógeno (NOx), COVs, hidrocarburos aromáticos, dioxinas, furanos, benceno, bifenilos polí clorados	30	Benceno, COVs	
	SAN ANDRÉS CHOLULA	²Construcción (C)	Sólidos suspendidos (potasio y sulfato), partículas de polvo, sílice, aluminio, hierro y oxido de calcio, partículas de óxidos de nitrógeno (NOx), COVs, hidrocarburos aromáticos, dioxinas, furanos, benceno, bifenilos polí clorados	1	Sólidos suspendidos, hierro y benceno	4

		Metalúrgica	Fenoles y cresoles, amoníaco, de arsénico y sulfuros, benceno, tolueno, xileno y metales pesados	3	Metales pesados	
Total	3	16	40	2274	6	2274

Nota: ¹Construcción (Cemento); ²Construcción (Cemento).

En la Tabla 5 y figura 15 se observa que en el municipio de Puebla se registra la mayor cantidad de industrias, 2213 de diferentes giros donde la metalúrgica y metal-mecánica fueron las más comunes, seguido de San Pedro Cholula con 57 industrias principalmente del giro de la construcción (ladrillo), por último, San Andrés Cholula con 4 respectivamente donde la metalúrgica fue la más común (INEGI, 2019).

El número total de industrias ubicadas en el ÁMP son 4,500 (Tabla 6). Entre las que destacan por su mayor presencia los giros: de construcción (ladrillo y cemento), metalúrgico, metal-mecánico, alimentario, textil, alfarería y vidrio, plástico, minería, química, automotriz, papel y cartón, farmacéutica, pintura, otros (adhesivos, curtiduría, petroquímica y cosmética) y siderúrgica. Se destaca la presencia de fenoles, cresoles, amoníaco, arsénico y sulfuros, benceno, tolueno, xileno, metales pesados (Tablas 1-5), partículas de óxidos de nitrógeno (NOx), compuestos orgánicos volátiles (COVs), hidrocarburos aromáticos, dioxinas, furanos y bifenilos policlorados provenientes de este tipo de industrias (Apaza, 2012; Bermúdez-Errázuriz & Salazar-Cuellar, 2019; Cagiao-Villar *et al.*, 2010; Chen *et al.*, 2015; Habashi, 2012; Silva *et al.*, 2018).

Tabla 6. Total de industrias en ubicadas en las zonas de estudio.

Zonas de estudio	Municipio	Total de industrias por municipio	Número de industrias
Represa Covadonga	Cuatlancingo	28	28
Río Rabanillo	Cuatlancingo	205	1898
	Coronango	309	
	San Pedro Cholula	1354	
	Puebla	30	
Río Zapatero	San Andrés Cholula	248	248
Presa Echeverría	Ocoyucan	52	52
Río Atoyac	Puebla	2213	2274
	San Andrés Cholula	4	
	San Pedro Cholula	57	
Total	6	4500	4500

Tabla 7. Características de las zonas de estudio.

Zonas de estudio	⁵ Coords.	⁶ Caracts. del agua	Población	Tipos de industrias	⁶ Caracts. del río en la década 80's	⁶ Caracts. del río en 2020	Usos del agua
Z1 Represa Covadonga	19°08'15.3"N 98°13'29.6"O	Color del agua café oscuro y en secciones del río color rosa/morado, sin olor.	137,435 habitantes	metalúrgica, textil, automotriz, construcción (cemento) y metalmecánica.	Generación de energía hidroeléctrica ¹ .	Sirve de brebaje al ganado, zona urbana. Región, donde inicia el cinturón industrial Bralam	Irrigación de cultivos y generación de energía eléctrica
Z2 Río Rabanillo	19°4'11.1"N 98°14'58.7"O	Color del agua café oscuro/café verdoso; con basura, olores fétidos y espuma, hasta su desembocadura al río Atoyac.	322,704 habitantes	Construcción (cemento y ladrillo), metalúrgica, metalmecánica, textil, alimentaria, etc.	Desechos domésticos.	Descargas municipales e industriales, parte del río esta entubado desde la Calzada Zavaleta hasta confluir con el Atoyac (750 m).	Las aguas residuales industriales y municipales son vertidas al río.
Z3 Río Zapatero	19°01'48.0"N 98°15'06.3"O	Color del agua café oscuro, gran cantidad de basura y olor fétido muy fuerte hasta su desembocadura al río Atoyac	154,448 habitantes	Metalúrgica, construcción (cemento), plástico, química, etc.	Desechos domésticos.	Zona urbana densamente poblada, el río recorre zonas residenciales.	Las aguas residuales industriales y municipales son vertidas al río.
Z4 Presa Echeverría	19°01'07.6"N 98°13'58.0"O	Color del agua café oscuro/negro, con basura, olor fétido.	42,669 habitantes	Recibe las aguas residuales de todo el municipio de Puebla.	El agua de la represa se utilizaba para generar energía hidroeléctrica ³ .	Sección final del ÁMP, desviado de manera artificial hacia el municipio de Ocoyucan, Puebla.	Irrigación de cultivos en la población de Emilio Portes Gil (Santa Clara Ocoyucan) ⁴ .

Notas: ¹Rosas-Salas, 2013; ²Galicia-Hernandez, 2015; ³Pagan-Santini, 2016; ⁴Pérez-Castresana *et al.*, 2018.

⁵Coords = Coordenadas, ⁶Caracts = Características.

4.3 Estimación de la densidad industrial en las zonas de estudio.

El impacto que tiene las 4,500 industrias en el ÁMP sobre el ambiente y los recursos naturales, concretamente sobre el recurso hídrico, es significativo no solo por el aumento de la producción sino también porque se concentra en sectores con alto impacto ambiental. Dos indicadores de este efecto son la densidad industrial (DI) y poblacional (DP). En la tabla 8 se presentan los valores obtenidos para la DI y DP de acuerdo a la fórmula 1 y 2 (sección 3.3.1). La mayor DI fue en el municipio de San Pedro Cholula con 18.34, seguido de Coronango con 8.38, Cuautlancingo con 6.11, Puebla con 4.21, San Andrés Cholula con 3.79 y Ocoyucan con 0.43 industrias/km². En cuanto a la DP, Cuautlancingo es el municipios que tuvo la mayor DP con 3607.21 habitantes/km². Por lo que los municipios que recorre el río Rabanillo (Z2) son los que tienen las mayores densidades industriales y poblacional (San Pedro Cholula, Coronango y Cuautlancingo). La DI y DP como veremos más adelante, se encuentra asociada al impacto en la calidad del agua.

Tabla 8. Densidad industrial de cada una de las zonas de estudio.

Factores	Cuautlancingo Z1, Z2	Coronango Z2	San Pedro Cholula Z2	San Andrés Cholula Z3	Puebla Z4	Ocoyucan Z4
Área (km ²)	38.1	36.85	76.9	63.2	535.3	119.8
No. de industrias	233	309	1411	240	2255	52
No. de habitantes	137,435	46,836	138,433	154,448	1,692,181	42,669
Densidad industrial (No. de industrias/km ²)	6.11	8.38	18.34	3.79	4.21	0.43
Densidad poblacional (No. de habitantes/km ²)	3607.21	1270.99	1800.16	2443.79	3161.18	356.16

4.4 Caracterización de parámetros fisicoquímicos en las zonas de estudio.

El censo industrial demostró que en el ÁMP existe alrededor de 4,500 industrias coexistiendo con 2,212,002 habitantes que vierten sus desechos a los ríos Rabanillo, Zapatero y Atoyac, por lo que es de esperarse que la calidad del agua se encuentre alterada y no sea apta para su uso, al aplicarse adecuadamente las NOMs como la NOM-001-SEMARNAT-2021. Los resultados de los análisis fisicoquímicos se presentan en la Tabla 9.

Tabla 9. Parámetros fisicoquímicos del agua en las zonas de estudio.

Parámetros	Zonas de estudio				⁵ NOM-001-SEMARNAT-2021	⁶ CECA		Declaratoria de los ríos Atoyac y Xochiac	Análisis estadísticos	
	Z1 Represa Covadonga	Z2 Río Rabanillo	Z3 Río Zapatero	Z4 Presa Echeverría		¹ Ríos y arroyos	² Vida acuática		³ Riego agríc.	⁴ Meta 2012-2015
	Media/DS	Media/DS	Media/DS	Media/DS					Valor p	Diferencias
T (°C)	15.14 ± 1.04	13.97 ± 2.68	11.94 ± 2.67	14.40 ± 3.50	35	-	-	<35	0.592	---
pH	^{1,3,4} 9.50 ± 0.06	^{1,3,4} 9.45 ± 0.04	^{1,3,4} 9.32 ± 0.29	7.17 ± 0.11	6.5 – 8.5			4.5 – 9.0	0.000 *	Z4 ≠ Z1, Z2, Z3
O ₂ (mg/L)	² 0.68 ± 0.08	² 1.86 ± 1.64	² 1.98 ± 1.52	² 0.39 ± 0.05	-	5.0	-	-	0.268	---
DBO ₅ (mg/L)	⁴ 111 ± 2.65	⁴ 129.33 ± 5.51	⁴ 138.33 ± 4.50	⁴ 135 ± 1.00	-	-	-	39.6	0.000 *	Z1 ≠ Z2, Z3, Z4
DQO (mg/L)	⁴ 124.7 ± 18.01	⁴ 414.6 ± 51.93	⁴ 406.7 ± 66.27	⁴ 198 ± 3.00	180			93.9	0.000 *	Z1, Z4 ≠ Z2, Z3
Turb (UNF)	139.7 ± 2.52	250.33 ± 6.02	176.33 ± 3.51	100 ± 0.09	-	-	-	-	0.000 *	Z2 ≠ Z1 ≠ Z3 ≠ Z4
CE (mS)	³ 1.75 ± 0.07	³ 1.79 ± 0.123	³ 2.54 ± 0.735	³ 0.46 ± 0.04	-	-	0.001	-	0.001 *	Z4 ≠ Z1, Z2, Z3

Notas: ⁵NOM-001-SEMARNAT-2021 Límites máximos permisibles de contaminantes en descargas de aguas residuales a aguas y bienes nacionales. ⁶CECA - Criterios ecológicos para la calidad del agua (CE-CCA-001-1989). ³Riego agríc. – Riego agrícola. Estadísticas descriptivas y valores p de la prueba ANOVA entre sitios de muestreo; Río Rabanillo, Río Zapatero, Represa Covadonga y Presa Echeverría. *Correlación significativa entre sitios de muestreo: p < 0.05

La temperatura, en las cuatro zonas de estudio, se encuentra dentro de los límites máximos permisibles (LMP) del NOM-001-SEMARNAT-2021 y la Declaratoria Atoyac-Xochiac y no presentan diferencias significativas entre las zonas.

Los valores de pH para las Z1, Z2 y Z3 oscilan entre 9.32 y 9.5 y se encuentran fuera de los LMP del NOM-001-SEMARNAT-2021 y los Criterios Ecológicos de Calidad del Agua (CECA), sin embargo, la Z4 tiene un pH de 7.17, el cual se encuentra dentro de los LMP y presenta diferencias significativas con respecto a las Z1, Z2, y Z3.

Los valores de oxígeno disuelto (OD), son semejantes en las diferentes zonas y se encuentran por debajo de los LMP de los CECA y no presentan diferencias significativas.

La Demanda Bioquímica de oxígeno (DBO₅), rebasa los LMP en las Z1, Z2, Z3 y Z4 según la Declaratoria Atoyac–Xochiac; la Z1 presentó diferencias significativas con respecto a las Z2, Z3, y Z4.

La Demanda Química de Oxígeno (DQO) en la Z1 se encuentra dentro de los LMP del NOM-001-SEMARNAT-2021, sin embargo, rebasan la Declaratoria Atoyac–Xochiac. La Z2, Z3 y Z4 rebasan los LMP de la NOM-001 y la Declaratoria Atoyac – Xochiac y se observaron diferencias significativas en las Z1 y Z4.

4.4.1 Concentración promedio de metales pesados, arsénico y cianuro.

Los resultados de las concentraciones de metales pesados, arsénico y cianuro en las zonas de estudio y se presentan en la Tabla 10.

Tabla 10. Concentraciones promedio de metales pesados, arsénico y cianuro en las zonas de estudio.

	Zonas de estudio				¹ NOM-001-SEMARNAT-2021	² CECA		Declaración de clasificación de los ríos Atoyac y Xochiac o Hueyapan, y sus afluentes.	Análisis estadísticos			
	Z1 Represa Covadonga	Z2 Río Rabanillo	Z3 Río Zapatero	Z4 Presa Echeverría		¹ Ríos y arroyos	² Vida acuática		³ Riego agríc.	⁴ Meta 2012-2015	ANOVA	Prueba Tukey
	Media/DS	Media/DS	Media/DS	Media/DS							p-Value	Diferencias
As (mg/L)	0	0.01 ± 0.012	0	⁴ 0.90 ± 0.06	0.3	0.01		0.05	0.000 *	Z4 ≠ Z1, Z2, Z3		
CN (mg/L)	^{2,3,4} 0.043 ± 0.031	^{2,3,4} 0.06 ± 0.002	^{2,3,4} 0.05 ± 0.002	^{2,3,4} 1.70 ± 0.10	2	0.001	0.02	0.01	0.000 *	Z4 ≠ Z1, Z2, Z3		
Cd (mg/L)	^{2,3,4} 0.20 ± 0.004	^{2,3,4} 0.25 ± 0.019	^{2,3,4} 0.24 ± 0.01	^{1,2,3,4} 0.50 ± 0.07	0.3	0.0009	0.01	0.004	0.000 *	Z4 ≠ Z1, Z2, Z3		
Cu (mg/L)	^{2,4} 0.28 ± 0.010	^{2,4} 1.13 ± 0.096	^{2,4} 0.81 ± 0.02	^{2,3,4} 4.20 ± 0.23	5	0.003	-	0.06	0.000 *	Z4 ≠ Z1, Z2, Z3; Z2 ≠ Z1, Z3, Z4; Z1, Z3 ≠ Z2, Z4		
Cr (mg/L)	^{2,4} 0.20 ± 0.006	^{2,4} 0.43 ± 0.119	^{2,4} 0.52 ± 0.09	^{2,4} 0.70 ± 0.03	1.25	0.05	1.0	0.05	0.000 *	Z4 ≠ Z1, Z2, Z3; Z2 ≠ Z1, Z3, Z4; Z1, Z3 ≠ Z2, Z4		
Ni (mg/L)	² 0.19 ± 0.015	² 0.27 ± 0.115	^{2,3} 0.26 ± 0.08	^{2,3,4} 2.30 ± 0.16	3	0.008	0.2	0.60	0.000 *	Z4 ≠ Z1, Z2, Z3		
Pb (mg/L)	^{1,2,4} 1.92 ± 0.171	^{1,2,4} 2.59 ± 0.083	^{1,2,4} 1.73 ± 0.12	^{1,2,4} 0.85 ± 0.09	0.3	0.006	5.0	0.03	0.000 *	Z1, Z3 ≠ Z2, Z4; Z2 ≠ Z1, Z3, Z4; Z4 ≠ Z1, Z2, Z3		

Notas: ¹NOM-001-SEMARNAT-2021 Límites máximos permisibles de contaminantes en descargas de aguas residuales a aguas y bienes nacionales. ²CE Criterios ecológicos para la calidad del agua (CE-CCA-001-1989). ³Riego agríc. - Riego agrícola. Estadísticas descriptivas y valores p de la prueba ANOVA entre sitios de muestreo; Río Rabanillo, Río Zapatero, Represa Covadonga y Presa Echeverría. *Correlación significativa entre sitios de muestreo: p < 0.05

En la Tabla 10, se observan los promedios de las concentraciones obtenidas en el agua de cinco metales pesados presentes en las zonas de estudio: cadmio (Cd), cobre (Cu), cromo (Cr), níquel (Ni), plomo (Pb), un metaloide arsénico (As) y cianuros (CN).

En la Z4 el As rebasó los LMP de la Declaratoria. En las Z1, Z2, Z3 y Z4 el Cd y Cn rebasaron los LMP de los CE y los de la Declaratoria, esta última zona también rebasó los LMP de la NOM-001, la Z4 presentó diferencias significativas. En las Z1, Z2, Z3 y Z4 el Ni excedió los LMP de los CE para vida acuática, el Cu y Cr rebasaron los LMP de los CE para vida acuática y de la Declaratoria, la Z4 además excedió los LMP de Ni y Cu de los CE para riego agrícola. En las cuatro zonas de estudio el Pb rebasó los LMP del NOM-001-SEMARNAT-2021, CECA y la

Declaratoria. Los valores obtenidos de As, Cd, Cn y Ni en la Z4 tuvieron diferencias significativas y las concentraciones de Cu, Cr y Pb en las Z1, Z2 y Z4 presentaron diferencias significativas.

4.4.2 Identificación de compuestos orgánicos volátiles (COVs).

En la Tabla 11 se presentan los valores de los compuestos orgánicos volátiles (COVs) determinados en el agua de las diferentes zonas de estudio.

Tabla 11. Concentración de compuestos orgánicos volátiles (COVs).

COVs ¹ (µg/L)	Zonas de estudio				² LMP ³ NMX-AA-103-SCFI-2006 (µg/L)	Regulaciones nacionales de agua potable (NPDWR-EPA) MCGL (µg/L)
	Z1 Represa Covadonga (µg/L)	Z2 Río Rabanillo (µg/L)	Z3 Río Zapatero (µg/L)	Z4 Presa Echeverría (µg/L)		
Benceno	0.03	0.04	0.03	+1.17	0.03	---
Clorobenceno	0.03	0.03	0.03	+2.02	0.03	100
Cloroformo	0.06	+0.07	0.06	+0.10	0.04	100
Cloruro de vinilo	0.06	+0.07	0.06	0.05	0.04	---
1,4-Diclorobenceno	0.05	+0.09	0.05	+0.36	0.04	---
1,2-Dicloroetano	0.02	0.02	0.02	+1.32	0.02	---
1,1-Dicloroetileno	0.04	0.04	0.04	+0.59	0.03	7
Hexaclorobenceno	---	---	---	---	---	---
Hexaclorobutadieno	0.009	+0.013	0.009	0.09	0.010	---
Metil Etil Cetona	---	---	---	---	---	---
Piridina	---	---	---	---	---	---
Tetracloroetileno	0.07	0.07	0.07	+0.12	0.05	---
Tetracloruro de carbono	0.04	0.04	0.04	+0.32	0.02	---
Tricloroetileno	+0.08	+0.08	+0.08	+2.32	0.02	---

Notas: +Valores que superan los LMP de la NOM.

¹µg/L - microgramos por litro. ²Límite Máximo Permissible (LMP). ³NMX-AA-103-SCFI-2006 Residuos-Determinación de compuestos orgánicos volátiles por cromografía de gases acoplado a un espectrofotómetro de masas en productos de extracción de constituyentes tóxicos (PECT) método de prueba.

Las concentraciones de COVs obtenidos en la Z1 y Z3 son muy cercanos a los LMP establecidos en la NMX-AA-103-SCFI-2006 (Tabla 11). En las Z2 y Z4 los COVs como el cloroformo, el cloruro de vinilo, el 1-4 diclorobenceno, el hexaclorobutadieno, y el tricloroetileno, sobrepasan los LMP establecidos en la NMX-AA; y la Z4 también excedió los LMP para el benceno, cloroformo, 1,2-dicloroetano, 1,1-dicloroetileno, tetracloroetileno y tetracloruro de carbono, el resto de los compuestos se encuentran dentro de los LMP.

4.5. Análisis del efecto citotóxico en *Allium cepa* inducido por el agua de cada una de las zonas de estudio.

El ciclo celular es una serie de mecanismos por los que transcurre la vida de una célula, dando como resultado que la célula crezca y se divida en dos células hijas (Rodríguez-Gómez *et al.*, 2014). Existen mecanismos de control que limitan la división celular bajo ciertas condiciones internas y/o externas, evitando así, la división celular. Debido a la mala calidad del agua en el ÁMP, se decidió investigar las posibles alteraciones tanto fisiológicas como morfológicas en células vegetales. Por lo anterior, se evaluó la citotoxicidad en el biomodelo *Allium cepa* para identificar si se presentan alteraciones durante el ciclo celular al entrar en contacto con el agua de cada una de las zonas de estudio.

4.5.1 Análisis del número y longitud de las raíces de *Allium cepa* expuestas a aguas residuales de las zonas de estudio.

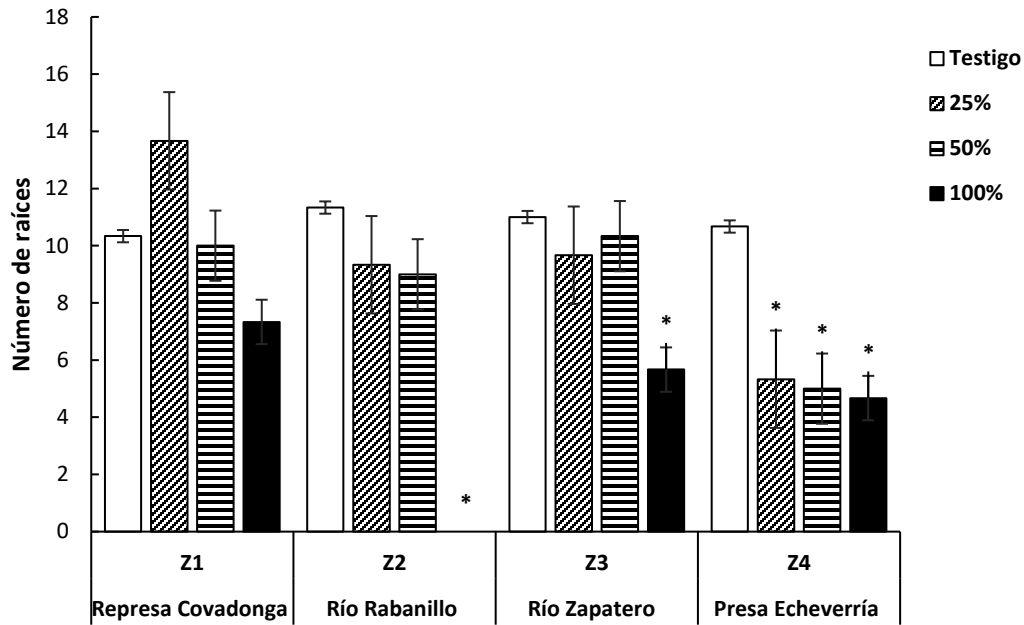
Una vez realizados los bioensayos por triplicado con *Allium cepa* sembrado en diferentes concentraciones del agua (25, 50 y 100%) procedente de las diferentes zonas de estudio, se analizó el comportamiento de las raíces en tratamiento agudo a 120 hrs. En la Tabla 12 y figuras 16 y 17 se presentan los promedios del número y de la longitud de las raíces de *Allium cepa* expuestas.

Tabla 12. Inhibición del crecimiento de la raíz de *Allium cepa* a diferentes concentraciones en los ríos urbanos del ÁMP.

Zonas de estudio	Tratamiento	Número de raíces Media ± DS	Long. de raíces (cm) Media ± DS	Análisis estadísticos					
				1% IC		ANOVA p - Value		Prueba Tukey Diferencias	
				No. raíces	Long. raíces	No. raíces	Long. raíces	No. raíces	Long. raíces
Represa Covadonga	Testigo	10.33 ± 2.08	2.34 ± 0.70	---	---	0.300	*0.032	---	50% ≠ 100%
	25 %	13.67 ± 1.53	2.44 ± 0.26	9.68	---				
	50 %	10.00 ± 2.00	2.91 ± 0.94	3.23	---				
	100 %	7.33 ± 5.03	1.10 ± 0.10	29.03	53.06				
Río Rabanillo	Testigo	11.33 ± 2.31	2.30 ± 0.35	---	---	*0.000	*0.000	100% ≠ Testigo	25%, 50%, 100%, ≠ Testigo
	25 %	9.33 ± 2.52	1.53 ± 0.35	17.65	33.24				
	50 %	9.00 ± 1.00	1.50 ± 0.25	20.59	34.54				
	100 %	---	---	100	100				
Río Zapatero	Testigo	11.00 ± 1.00	2.35 ± 0.35	---	---	*0.007	*0.029	100% ≠ Testigo	50% ≠ 100%
	25 %	9.67 ± 0.58	2.30 ± 0.36	12.12	2.13				
	50 %	10.33 ± 2.08	2.29 ± 0.36	6.06	2.55				
	100 %	5.67 ± 1.53	1.50 ± 0.36	48.48	36.17				
Presa Echeverría	Testigo	10.67 ± 2.08	2.34 ± 0.69	---	---	*0.013	0.441	25%, 50%, 100%, ≠ Testigo	---
	25 %	5.33 ± 1.53	2.30 ± 1.21	50	1.92				
	50 %	5.00 ± 2.65	1.79 ± 0.57	53.13	23.81				
	100 %	4.67 ± 2.52	1.21 ± 1.05	56.25	48.33				

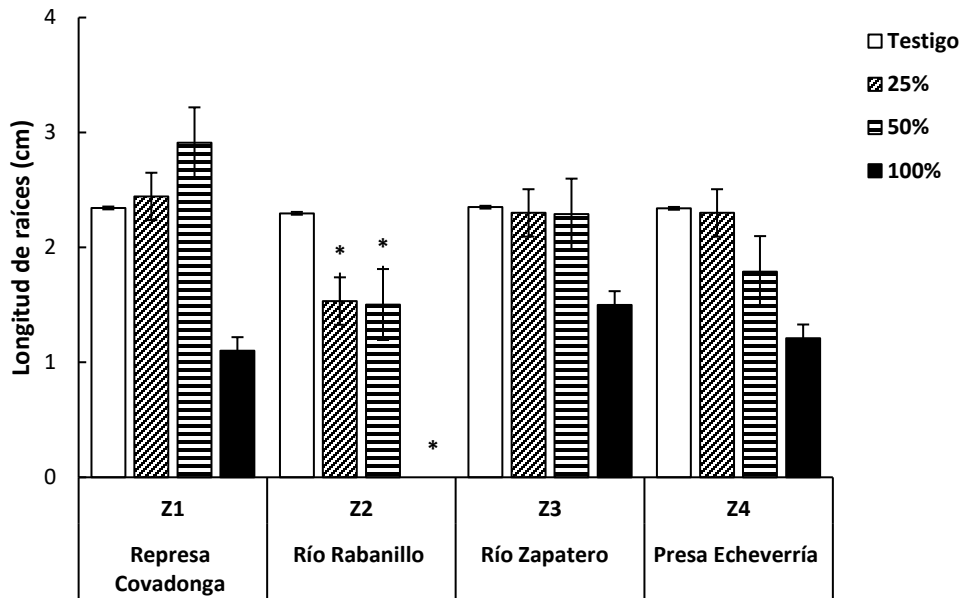
Notas: 1% IC Porcentaje de inhibición del crecimiento. Estadística descriptiva y valores p de la prueba ANOVA entre sitios de muestreo; río Rabanillo, río Zapatero, represa Covadonga y presa Echeverría. *Correlación significativa entre sitios de muestreo: p < 0.05

En las cuatro zonas de estudio se observó, que el número de raíces y su longitud en los diferentes tratamientos, fue menor en comparación con el grupo testigo, excepto en la represa Covadonga (Z1) en el tratamiento al 25% en el número de raíces y al 50% en el número y longitud de raíces, sin embargo, estas diferencias no fueron significativas. Las diferencias fueron significativas en la concentración al 100% en la longitud de raíces. El río Rabanillo presentó diferencias significativas en las concentraciones del 25 y 50% para el número de raíces y al 100% para el número y longitud de raíces, ya que no se observó crecimiento de raíces en esta última concentración. El río Zapatero tuvo diferencias significativas en el tratamiento al 100% en el número y longitud de raíces. En la presa Echeverría se observaron diferencias significativas en las concentraciones del 25, 50 y 100% en el número de raíces (Tabla 12, figuras 16 y 17).



Notas: Estadísticos descriptivos y valores p de la prueba ANOVA entre lugares de muestreo; río Rabanillo, río Zapatero, presa de Covadonga y presa de Echeverría. *Correlación significativa entre sitios de muestreo: $p < 0.05$ (prueba de Tukey).

Figura 16. Número de raíces de *Allium cepa* en diferentes concentraciones en ríos urbanos del ÁMP.



Notas: Estadísticos descriptivos y valores p de la prueba ANOVA entre lugares de muestreo; río Rabanillo, río Zapatero, presa de Covadonga y presa de Echeverría. *Correlación significativa entre sitios de muestreo: $p < 0.05$ (prueba de Tukey).

Figura 17. Longitud de la raíz de *Allium cepa* a diferentes concentraciones en los ríos urbanos del ÁMP.

4.5.2 Índices mitótico (IM) e interfásico (II).

En la Tabla 13 y figura 18 se presentan los porcentajes del índice mitótico (IM), índice interfásico (II) e índice de fases en las zonas de estudio.

Tabla 13. Cambios en el índice mitótico de las células meristemáticas en la raíz de *Allium cepa* a diferentes concentraciones en los ríos urbanos del ÁMP.

Zona de estudio	Tratamiento	II \pm DS*	IM \pm DS**	Índice de fase (%) \pm DS			
				Profase	Metafase	Anafase	Telofase
Represa Covadonga Z1	Testigo	23.13 \pm 3.4	76.87 \pm 3.4	87.53 \pm 5.8	3.20 \pm 1.5	6.38 \pm 3.3	2.89 \pm 1.5
	25 %	21.33 \pm 5.5	78.67 \pm 5.5	94.87 \pm 2.2	0.38 \pm 0.2	2.95 \pm 1.3	1.81 \pm 0.8
	50 %	20.03 \pm 3.7	79.97 \pm 4.1	94.71 \pm 3	1.83 \pm 1.7	2.15 \pm 0.6	1.31 \pm 0.6
	100 %	65.87 \pm 6.8*	34.13 \pm 6.8*	99.09 \pm 1*	0.20 \pm 0.4	0.62 \pm 0.8*	0.08 \pm 0.1*
Río Rabanillo Z2	Testigo	23.13 \pm 3.4	76.87 \pm 3.4	87.53 \pm 5.8	3.20 \pm 1.5	6.38 \pm 3.3	2.89 \pm 1.5
	25 %	26.90 \pm 1.5	73.10 \pm 1.5	95.79 \pm 2.4*	1.23 \pm 0.5	1.45 \pm 0.7*	1.53 \pm 1.3
	50 %	58.17 \pm 5.5*	41.83 \pm 5.5*	99.28 \pm 0.45*	0.37 \pm 0.6*	0.36 \pm 0.4*	0.00*
	100 %	0.00*	0.00*	0.00*	0.00*	0.00*	0.00*
Río Zapatero Z3	Testigo	23.13 \pm 3.4	76.87 \pm 3.4	87.53 \pm 5.8	3.20 \pm 1.5	6.38 \pm 3.3	2.89 \pm 1.5
	25 %	33.60 \pm 9.8	66.40 \pm 9.8	99.18 \pm 0.7*	0.28 \pm 0.3*	0.48 \pm 0.4*	0.06 \pm 0.1*
	50 %	43.33 \pm 4.3*	56.67 \pm 4.3*	98.93 \pm 0.5*	0.19 \pm 0.2*	0.40 \pm 0.3*	0.48 \pm 0.3*
	100 %	80.80 \pm 6.1*	19.20 \pm 6.1*	99.49 \pm 0.9*	0.13 \pm 0.2*	0.26 \pm 0.4*	0.13 \pm 0.2*
Presa Echeverría Z4	Testigo	24.53 \pm 1	75.47 \pm 1	96.46 \pm 1.44	1.24 \pm 0.5	0.76 \pm 0.6	1.55 \pm 0.7
	25 %	27.27 \pm 3.7	72.73 \pm 3.7	93.73 \pm 4.6	0.91 \pm 0.1	2.26 \pm 1.4	3.09 \pm 3.2
	50 %	51.97 \pm 6.4*	48.03 \pm 6.4*	95 \pm 1.8	1.91 \pm 1.2	1.18 \pm 0.4	1.91 \pm 0.5
	100 %	71.20 \pm 3*	28.80 \pm 3*	97.93 \pm 0.9	0.8 \pm 0.4	0.49 \pm 0.5	0.78 \pm 0.4

Notas: Los índices se determinaron al contabilizar un promedio de 1000 células de *Allium cepa* por triplicado en cada concentración en cada zona de estudio. *Correlación significativa entre sitios de muestreo: $p < 0.05$ (prueba de Tukey). II: Índice interfásico. IM: Índice mitótico. DS: Desviación estándar. El tratamiento 100% en Z2 no presentó desarrollo radicular.

En cada una de las zonas de estudio, se observó que el índice mitótico (IM) disminuyó, en la medida en que se incrementaba la dilución del agua residual, excepto en la represa Covadonga (Z1), en las concentraciones del 25 y 50%, ya que el IM incrementó ligeramente en relación al grupo testigo, sin embargo, estas diferencias no fueron significativas. Siendo las concentraciones del 100% (34.13% \pm 6.8) en Covadonga, del 50% (41.83% \pm 5.5; 56.67% \pm 4.3; 48.03% \pm 6.4) y 100% (no hubo crecimiento de raíz, 19.20% \pm 6.1; 28.80% \pm 3) en Rabanillo (Z2), Zapatero (Z3) y Echeverría (Z4) significativas en comparación con al grupo testigo.

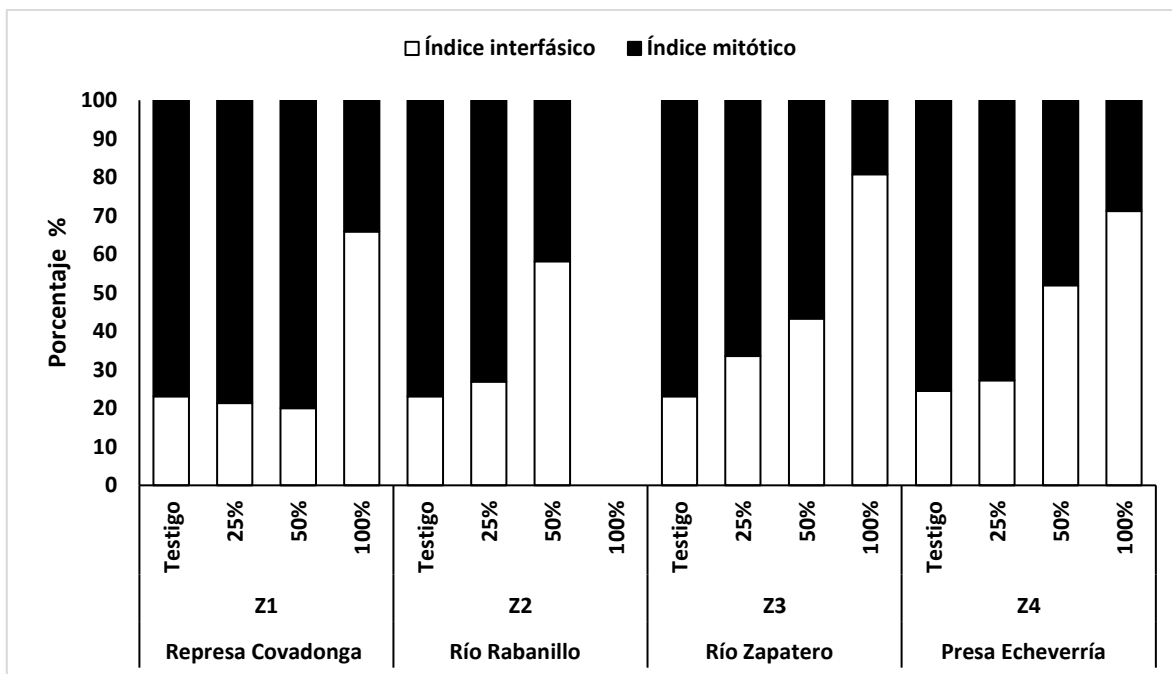


Figura 18. Efecto del agua residual sobre los II e IM de células meristemáticas de raíz de *Allium cepa*.

En la represa Covadonga, Zapatero y Echeverría, el índice interfásico incremento, en la medida en que se incrementaba la dilución del agua residual, excepto en las concentraciones del 25 y 50% en Covadonga, donde se observaron disminuciones del II en relación al grupo testigo, sin embargo, estas diferencias no fueron significativas. Las concentraciones del 100% ($65.87\% \pm 6.8$) en Covadonga (Z1), del 50% ($58.17\% \pm 5.5$; $43.33\% \pm 4.3$; $51.97\% \pm 6.4$) y 100% (no hubo crecimiento de raíz, $80.80\% \pm 6.1$; $71.20\% \pm 3$) en Rabanillo (Z2), Zapatero (Z3) y Echeverría (Z4) significativas en comparación con al grupo testigo (Tabla 13).

En las cuatro zonas de estudio, en las concentraciones del 25, 50 y 100% el mayor porcentaje de células en división se identificó en el estadio de profase (Tabla 13), excepto en Rabanillo (Z2) en la concentración del 100%. En las cuatro zonas de estudio, en todas las concentraciones, se presentó disminución del IMe, IA e IT en comparación con su correspondiente grupo testigo, excepto en la Presa Echeverría (Z4) en la dilución del 25 y 50% donde hubo un ligero incremento de todas las fases respecto al testigo (Tabla 13), sin embargo, estas no fueron significativas. El mayor incremento del IP se observó en la concentración del 100% en la Z3 con un incremento del 13.66% respecto al grupo testigo. El IMe mostró una tendencia a disminuir en cada tratamiento de las zonas de muestreo con respecto a la concentración de los tratamientos. La mayor disminución se observó en los tratamientos del 50 y 100% en la Z2 y Z3 con una disminución del 88.44%, 100%, 94.07% y 95.94% con

respecto al grupo testigo. En cuanto a los índices de anafase y telofase, se observaron variaciones significativas, principalmente en las concentraciones del 50 y 100% con respecto al grupo testigo, a excepción de la Z4.

4.6 Correlaciones de parámetros fisicoquímicos, metales pesados y COVs en relación al IM.

Se correlacionaron los valores de 15 parámetros fisicoquímicos, metales pasados y COVs en relación al efecto citotóxico generado en el tejido meristemático de *Allium Cepa*, en cada una de las cuatro zonas de muestreo, en la concentración 100%, ya que esta, representa la concentración real de la muestra de agua residual. Los resultados demostraron que el mayor efecto antimitótico en las raíces de *Allium cepa* está relacionado con el incremento de metales pesados y COVs.

En la tabla 14, se observó que, en la Z1, represa Covadonga, existe una alta correlación positiva entre el DQO y las variables Cu y el Pb ya que a medida que se incrementan estas dos últimas variables, aumenta la cantidad de materia orgánica en el agua, registrando correlaciones significativas. Además, existe una notable correlación negativa entre la DQO, Turb, el Cu, Cr, Pb, 1,4 DB, 1,2 DE y el Cd en relación con la frecuencia en que las células se dividen, sin embargo, solo el Cd registró una correlación significativa.

Tabla 14. Matriz de correlación de los parámetros de calidad del agua residual e índice mitótico de la represa de Covadonga.

	O ₂	DBO ₅	DQO	Turb	Cd	Cu	Cr	Ni	Pb	B	CB	CF	1,4 DB	1,2 DE	TE
DBO₅	0.990														
DQO	0.357	0.220													
Turb	0.217	0.075	0.989												
Cd	-0.577	-0.454	-0.969	-0.923											
Cu	-0.327	-0.189	*0.999	-0.993	0.961										
Cr	-0.756	-0.655	-0.882	-0.803	0.971	0.866									
Ni	-0.786	-0.866	0.297	0.434	-0.052	-0.327	0.189								
Pb	0.350	0.212	*1.000	0.990	-0.967	*-1.000	-0.878	0.305							
B	-0.564	-0.676	0.570	0.684	-0.350	-0.596	-0.115	0.954	0.577						
CB	0.982	0.945	0.528	0.397	-0.721	-0.500	-0.866	-0.655	0.520	-0.397					
CF	-0.454	-0.577	0.670	0.771	-0.466	-0.693	-0.240	0.908	0.676	0.992	-0.277				
1,4 DB	0.484	0.354	0.990	0.959	-0.994	-0.985	-0.939	0.161	0.989	0.450	0.640	0.560			
1,2 DE	0.756	0.655	0.882	0.803	-0.971	-0.866	-1.000	-0.189	0.878	0.115	0.866	0.240	0.939		
TE	0.973	0.996	0.133	-0.013	-0.373	-0.101	-0.585	-0.907	0.125	-0.738	0.912	-0.647	0.270	0.585	
IM	0.461	0.329	0.994	0.966	*-0.991	-0.989	-0.929	0.187	0.993	0.473	0.620	0.582	1.000	0.929	0.244

Matriz de correlaciones: Coeficiente de pearson. *Correlación significativa: p<0,05. IM: índice mitótico, DBO₅: demanda biológica de oxígeno, DQO: demanda química de oxígeno, Turb: turbidez, B: benceno, CB: clorobenceno, CF: cloroformo, 1,4 DB: 1,4 diclorobenceno, 1,2 DE: 1,2-dicloroetano, TE: tricloroetileno.

En la tabla 15, observamos que, la Z2, río Rabanillo, presentó una alta correlación negativa entre la disminución del O₂ en el agua y el incremento del Cd y TE y fue significativa. También hubo una elevada correlación positiva entre el incremento de DQO y el CF con respecto al incremento de la turbidez y fue significativa. También hubo una correlación negativa y fue significativa entre el incremento del O₂, Pb, CB y TE y la disminución del IM de las células en división.

Tabla 15. Matriz de correlación de los parámetros de calidad del agua residual e índice mitótico del río Rabanillo.

	O ₂	DBO ₅	DQO	Turb	Cd	Cu	Cr	Ni	Pb	B	CB	CF	1,4 DB	1,2 DE	TE
DBO₅	0.887														
DQO	-0.137	0.336													
Turb	0.087	0.537	*0.975												
Cd	*-0.999	0.903	-0.101	0.122											
Cu	-0.141	-0.583	-0.961	-0.998	-0.176										
Cr	-0.434	0.031	0.952	0.860	-0.401	-0.831									
Ni	-0.897	*1.000	-0.315	-0.518	-0.912	0.564	-0.009								
Pb	0.906	0.607	-0.544	-0.344	0.890	0.292	-0.775	-0.625							
B	-0.914	*0.998	-0.277	-0.483	-0.928	0.531	0.031	0.999	-0.656						
CB	-0.994	-0.932	0.027	-0.196	*-0.997	0.250	0.332	0.940	-0.853	0.953					
CF	-0.106	-0.553	-0.971	*1.000	-0.141	*0.999	-0.850	0.534	0.326	0.500	0.215				
1,4 DB	-0.837	-0.490	0.656	0.472	-0.817	-0.423	0.856	0.510	-0.990	0.543	0.772	-0.455			
1,2 DE	0.016	0.476	0.988	*0.997	0.052	-0.992	0.894	-0.456	-0.410	-0.420	-0.126	-0.996	0.533		
TE	*-0.997	-0.846	0.217	-0.005	-0.993	0.060	0.506	0.858	-0.937	0.878	*0.982	0.024	0.879	0.066	
IM	-0.998	-0.856	0.200	-0.023	-0.995	0.078	0.490	0.867	*-0.931	0.886	*-0.985	0.042	0.870	0.048	*-1.000

Matriz de correlaciones: Coeficiente de pearson. *Correlación significativa: p<0,05. IM: índice mitótico, DBO₅: demanda biológica de oxígeno, DQO: demanda química de oxígeno, Turb: turbidez, B: benceno, CB: clorobenceno, CF: cloroformo, 1,4 DB: 1,4 diclorobenceno, 1,2 DE: 1,2-dicloroetano, TE: tricloroetileno.

En la tabla 16, se observó que, en la Z3, río Zapatero, se presentaron altas correlaciones negativas entre la disminución del O₂ y el incremento del Pb y CF, las cuales fueron significativas. Adicionalmente existió una elevada correlación positiva entre el incremento de la DQO y la turbidez y fue significativa. Hubo una notable correlación negativa entre el incremento del Ni y TE y la disminución en que las células se dividen y fue significativa.

Tabla 16. Matriz de correlación de los parámetros de calidad del agua residual e índice mitótico del río Zapatero.

	O ₂	DBO ₅	DQO	Turb	Cd	Cu	Cr	Ni	Pb	B	CB	CF	1,4 DB	1,2 DE	TE
DBO ₅	0.674														
DQO	-0.090	0.675													
Turb	0.660	*1.000	0.688												
Cd	-0.884	-0.941	-0.385	-0.935											
Cu	0.847	0.178	-0.606	0.160	-0.500										
Cr	-0.982	-0.800	-0.097	-0.789	0.956	-0.732									
Ni	0.453	0.964	0.847	0.969	-0.817	-0.091	-0.611								
Pb	*-0.997	-0.729	0.013	-0.717	0.918	-0.803	0.994	-0.521							
B	0.545	0.987	0.786	0.990	-0.874	0.016	-0.692	0.994	-0.608						
CB	0.001	-0.738	-0.996	-0.750	0.466	0.533	0.186	-0.891	0.076	-0.838					
CF	*-0.999	-0.712	0.037	-0.700	0.908	-0.817	0.991	-0.500	1.000	-0.589	0.052				
1,4 DB	0.518	-0.282	-0.898	-0.300	-0.059	0.894	-0.350	-0.528	-0.451	-0.434	0.856	-0.472			
1,2 DE	-0.501	0.302	0.907	0.319	0.038	-0.885	0.331	0.545	0.432	0.452	-0.866	0.454	*-1.000		
TE	-0.474	-0.970	-0.834	-0.974	0.830	0.068	0.630	*-1.000	0.540	-0.997	0.880	0.520	0.508	-0.525	
IM	0.481	0.972	0.829	0.976	-0.835	-0.059	-0.637	*-0.999	-0.548	0.997	-0.876	-0.528	-0.500	0.518	*-1.000

Matriz de correlaciones: Coeficiente de pearson. *Correlación significativa: p<0,05. IM: índice mitótico, DBO₅: demanda biológica de oxígeno, DQO: demanda química de oxígeno, Turb: turbidez, B: benceno, CB: clorobenceno, CF: cloroformo, 1,4 DB: 1,4 diclorobenceno, 1,2 DE: 1,2-dicloroetano, TE: tricloroetileno.

En la tabla 17, que corresponde a la Z4, presa Echeverría, se observó una alta correlación negativa entre la disminución del O₂ y el incremento del TE y fue significativa. También se observó el mismo comportamiento entre las variables B y la turbidez y esta correlación fue significativa. Por otro lado, se observó una notable correlación negativa entre el incremento de la turbidez, la DQO, Ni, Pb, CF, B y el 1,4 DB y la disminución del IM celular, sin embargo, solo el 1,4 DB registró una correlación significativa

Tabla 17. Matriz de correlación de los parámetros de calidad del agua residual e índice mitótico en la presa Echeverría.

	O ₂	DBO ₅	DQO	Turb	Cd	Cu	Cr	Ni	Pb	B	CB	CF	1,4 DB	1,2 DE	TE
DBO ₅	-0.682														
DQO	-0.974	0.500													
Turb	-0.513	-0.277	0.693												
Cd	-0.388	0.939	0.171	-0.592											
Cu	-0.436	0.955	0.222	-0.548	*0.999										
Cr	0.858	-0.961	-0.721	-0.000	-0.806	-0.836									
Ni	0.978	-0.516	-1.000	-0.680	-0.189	-0.240	0.733								
Pb	0.608	0.165	-0.771	-0.993	0.495	0.449	0.115	0.759							
B	0.468	0.327	-0.655	*-0.999	0.633	0.592	-0.052	0.640	0.986						
CB	0.987	-0.792	-0.924	-0.366	-0.533	-0.577	0.931	0.931	0.471	0.317					
CF	0.616	0.156	-0.778	-0.992	0.487	0.440	0.125	0.766	*1.000	0.984	0.479				
1,4 DB	0.837	-0.171	-0.939	-0.899	0.180	0.128	0.437	0.932	0.944	0.875	0.736	0.947			
1,2 DE	-0.507	0.976	0.300	-0.479	0.991	0.997	-0.878	-0.318	0.375	0.524	-0.641	0.366	0.047		
TE	*-1.000	0.703	0.967	0.488	0.415	0.462	-0.873	-0.972	-0.585	-0.441	-0.991	-0.593	-0.820	0.533	
IM	-0.835	0.167	0.938	0.901	-0.183	-0.131	-0.434	-0.931	-0.945	-0.877	-0.734	-0.948	*-1.000	-0.050	0.818

Matriz de correlaciones: Coeficiente de pearson. *Correlación significativa: p<0,05. DBO₅: demanda biológica de oxígeno, DQO: demanda química de oxígeno, Turb: turbidez, B: benceno, CB: clorobenceno, CF: cloroformo, 1,4 DB: 1,4 diclorobenceno, 1,2 DE: 1,2-dicloroetano, TE: tricloroetileno.

A partir del promedio de las cuatro correlaciones, en relación con la media del IM, se construyó la matriz de correlación general para el AMP (Tabla 18). Los resultados mostraron que existe una alta correlación entre la disminución de O₂ y el aumento de DQO (-0,935) y turbidez (-0,842). También hubo una correlación entre el aumento de las variables DQO y DBO₅ (0,659). Hubo una correlación evidente entre el aumento de la turbidez, la DQO y el Pb (-0,919, -0,864, -0,692) en relación con la disminución del IM. Fue evidente que el mayor efecto antimitótico fue inducido por los parámetros fisicoquímicos como la turbidez y la DQO y los metales pesados como el Pb.

Tabla 18. Matriz de correlación de los parámetros de calidad del agua residual e índice mitótico de las cuatro zonas de estudio.

	O ₂	DBO ₅	DQO	Turb	Cd	Cu	Cr	Ni	Pb	B	CB	CF	1,4 DB	1,2 DE	TE
DBO ₅	0.407														
DQO	*-0.935	*0.659													
Turb	*-0.842	0.087	0.785												
Cd	-0.571	0.484	-0.251	-0.587											
Cu	-0.547	0.493	-0.220	-0.545	*0.999										
Cr	-0.064	0.878	0.264	-0.274	0.843	0.848									
Ni	-0.665	0.389	-0.367	-0.673	*0.992	*0.986	0.782								
Pb	0.676	-0.317	0.498	0.912	-0.808	-0.775	-0.641	-0.850							
B	-0.687	0.362	-0.395	-0.689	*0.988	*0.981	0.763	*1.000	*-0.853						
CB	-0.689	0.360	-0.399	-0.694	*0.987	*0.980	0.762	*0.999	-0.858	1.000					
CF	-0.591	0.394	-0.268	-0.503	*0.982	*0.988	0.777	*0.973	-0.705	*0.971	0.968				
1,4 DB	-0.645	0.380	-0.336	-0.603	*0.993	*0.992	0.775	*0.994	-0.787	*0.993	*0.992	*0.992			
1,2 DE	-0.689	0.360	-0.399	-0.694	*0.987	*0.980	0.762	*0.999	-0.858	*1.000	1.000	*0.968	*0.992		
TE	-0.689	0.360	-0.399	-0.694	0.987	*0.980	0.762	*0.999	-0.858	*1.000	1.000	*0.968	*0.992	1.000	
IM	-0.777	-0.390	*-0.864	*-0.919	0.227	0.179	-0.108	0.338	*-0.692	0.360	0.367	0.147	0.259	0.367	0.367

Matriz de correlaciones: Coeficiente de pearson. *Correlación significativa: p<0,05. IM: índice mitótico, DBO₅: demanda biológica de oxígeno, DQO: demanda química de oxígeno, Turb: turbidez, B: benceno, CB: clorobenceno, CF: cloroformo, 1,4 DB: 1,4 diclorobenceno, 1,2 DE: 1,2-dicloroetano, TE: tricloroetileno.

CAPITULO 5. DISCUSIÓN.

El ÁMP experimento un rápido crecimiento demográfico entre 1970 y 1990, lo que resultó en una expansión urbana; del mismo modo, se observó una recomposición en cuanto al uso del suelo y sus actividades económicas, ya que la industria se desplazó hacia el exterior, ello propició que el espacio desocupado fuera utilizado por establecimientos comerciales y de servicios. Los cambios que influyeron en tal reestructuración urbana fueron: la crisis económica que provoco cambios a principios de los años 80; las transformaciones estructurales resultantes de la liberación económica y la apertura de la economía externa; el desarrollo del transporte y las comunicaciones; todo ello condujo a un aumento de la contaminación del agua (Cortés-Hernández, 2021; Galicia-Hernández, 2015; Handal-Silva *et al.*, 2017; Rosas-Salas, 2013; Salas-Quintanal & Rivermar, 2015).

Aunado a lo anterior, lo laxo y limitado de políticas, leyes o normas para la protección ambiental han generado un desequilibrio en el desarrollo hacia el ambiente de la Cuenca del Alto Atoyac (CAA), lo que ha implicado daños ambientales severos en la contaminación del Atoyac en el ÁMP (Casiano-Flores *et al.*, 2019). Este crecimiento de la población, la industria y de los diferentes sectores económicos, que se inició en la década de 1970 con la imposición del modelo neoliberal (Vallejo-Román, 2016), ha provocado una competencia desmedida que ha ejercido una presión sin precedentes sobre los recursos hídricos de la cuenca del Atoyac, dejando una cantidad insuficiente para mantener los flujos necesarios para satisfacer las necesidades humanas y proteger los caudales para mantener los ecosistemas saludables.

En el presente estudio, se ha evidenciado que el río Atoyac está contaminado en toda su extensión desde la represa Covadonga hasta la presa Echeverría en el ÁMP. Esto está afectando a distintos municipios como Cuautlancingo, Coronango, San Andrés Cholula y San Pedro Cholula, Santa Clara Ocoyucan y Puebla; donde el río Rabanillo, el cual atraviesa los municipios de Cuautlancingo, San Pedro Cholula y Coronango, presentó incrementos en los parámetros fisicoquímicos, así como altas concentraciones de MP y COVs, con respecto a las otras zonas de estudio.

Es así que, con los resultados obtenidos en las tablas 10, 11, y 12 se demuestra que en el agua de los ríos Rabanillo, Zapatero y Atoyac existe un total de 18 sustancias químicas cuyas concentraciones exceden los límites máximos permisibles de la NOM-001-SEMARNAT-2021, CECA y de la Declaratoria Atoyac-Xochiac, así como, al caracterizar los parámetros fisicoquímicos del agua también exceden los LMP de la NOM-001-SEMARNAT-2021 (Tabla 9).

Según INEGI, 2010; el AMP-Tlaxcala, es la cuarta zona más grande de México, después de la Ciudad de México, Guadalajara y Monterrey, cuenta con 38 municipios perteneciente a los estados de Puebla y Tlaxcala, que en 2010 contaban con una población de 3,202,790 habitantes. Si solo se toma en cuenta la población del municipio, actualmente Puebla es el cuarto municipio más poblado del país (INEGI, 2020).

El AMP, tiene una superficie de 1,610.25 km² y cuenta con 18 municipios donde actualmente viven aproximadamente 2,732,568 millones de habitantes (INEGI, 2020), donde se ubican 130,592 unidades económicas (Gobierno de Puebla, 2020). La zona comprendida en este estudio, abarca una superficie territorial de 870.15 km², y comprende 6 municipios del AMP, con una población de 2,212,002 millones de habitantes (INEGI, 2020) coexistiendo con 4,500 industrias entre parques y corredores industriales (DENUE, 2019). Esto significa que la densidad industrial es igual a 5.17 industrias por km². Del total de industrias, la industria de la construcción (ladrillo y cemento), es la de mayor presencia ya que representa el 35.11% con 1,580 industrias, seguida de la metalúrgica con el 31% que son 1,395; la metal-mecánica con 8.51% y 383; alimentaria con 5.55% y 250 y textil con 5% y 225 industrias (Tablas 1, 2, 3, 4 y 5). Debido a esto, la mayor cantidad de contaminantes vertidos en las zonas de muestreo con COVs, MP, cloro, peróxidos, detergentes y colorantes (Cirtina *et al.*, 2016; Berumen-Rodríguez *et al.*, 2021; Habashi, 2012). Al analizar el agua en las zonas de estudio se identificaron los metales pesados: Cu, Cd, Cr, Ni y Pb, el metaloide As, y los COVs: benceno, cloroformo, cloruro de vinilo, 1,4-diclorobenceno, 1,1-dicloroetileno, hexaclorobutadieno, tricloroetileno, cloroformo, 1,2-dicloroetano, tetracloroetileno y tetracloruro de carbono que sobrepasan los LMP por las NOMs (Tablas 10 y 11). Estos resultados fueron similares a los encontrados por Bae *et al.*, 2005; Berumen-Rodríguez *et al.*, 2021; Casarett & Doull, 2001; Guerrero, 2005; Habashi, 2012; Sandoval-Villasana *et al.*, 2009, entre otros. Algunas investigaciones como la de Bravo-Inclán *et al.*, 2015; Cortés-Hernández, 2021; IMTA, 2005; Pérez-Castresana *et al.*, 2018, señalaron que en el río Atoyac se identificaron industrias de los giros textil, químico-farmacéutico, alimentos y bebidas, metalúrgico, metal-mecánico, entre otros, que descargan sus aguas al río. Montero *et al.*, (2006) y Sandoval *et al.*, (2009) identificaron sustancias como el benceno, cloroformo, tolueno y xileno en el río Atoyac.

En la tabla 9, se observa que la temperatura del río osciló entre 11 y 15° C, lo que corresponde a valores similares de temperatura en la cuenca del Atoyac en Tlaxcala y Puebla (16.9-18 °C) (Martínez-Tavera *et al.*, 2017; Sandoval-Villasana *et al.*, 2009), así como el río

Atoyac en Tlaxcala registró temperaturas de hasta 17 °C (García-Nieto *et al.*, 2011). Aunque no es un factor que influya en la calidad del agua, es importante mencionar que existen zonas en donde se descargan aguas residuales industriales, por lo que el agua puede alcanzar temperaturas entre los 30 y 35°C, lo cual influye en la tasa de crecimiento biológico, las reacciones químicas y la solubilidad de los contaminantes (Estrada-Rivera *et al.*, 2022). El valor de pH osciló entre 7.0 y 9.5 e indica que el agua es alcalina y podrían estar vinculados a la reducida tasa de actividad fotosintética. Estos altos valores podrían explicarse por las descargas de aguas residuales domésticas (jabón y detergentes), las provenientes de las industrias del giro metalúrgico debido a la presencia de metales pesados como el Cr, Ni y Pb; y las del giro textil debido a los procesos de tinte, lavado y blanqueo (Chhonkar *et al.*, 2000; Luna-Arenas & Rodríguez-Lozada, 2016; Maine & Sánchez, 2018; Martínez-Tavera *et al.*, 2017). Los valores coinciden con los obtenidos por Pérez Castresana *et al.* 2018, en Covadonga (pH = 8.04). En los ríos urbanos Vinalopó en España y Gascón en Cuba registraron valores de pH de 7.7 a 8.5, que también podrían estar asociados a la disolución de los carbonatos en el agua aportados por la disolución de rocas y suelos (Beita-Sandí & Barahona-Palomo, 2010; Clemares-Martínez, 2017; Pérez-Pompa *et al.*, 2012).

En la tabla 9, se observa que se incrementó la DBO₅, DQO, y la turbidez, lo que reduce la cantidad de OD en las cuatro zonas, por lo que no existen vida acuática aerobia en ninguna zona de estudio, resultado de los procesos de eutrofización que favorecen el crecimiento bacteriano que a su vez consume el oxígeno disuelto en el agua (Beita-Sandí & Barahona-Palomo, 2010; Pérez-Pompa *et al.*, 2012; REMTAVAREZ, 2007; Toro *et al.*, 2012; Yang *et al.*, 2008), estos resultados sugieren que los contaminantes orgánicos medidos por la DBO₅ y DQO están más concentrados en época de sequía, posiblemente debido a la reducción del caudal de los ríos, lo cual incide en la dilución y turbulencia del agua (Martínez-Tavera *et al.*, 2017; Pérez-Castresana *et al.*, 2018; Silva *et al.*, 2002); esta situación también puede explicarse como el resultado de las actividades domésticas de más 2 millones 700 mil habitantes y de 4,500 industrias. La Z2 que corresponde a Rabanillo presentó altas concentraciones de materia orgánica como resultado de la acumulación de contaminantes en la zona, debido a que el río se encuentra en una zona urbana y en las riberas de este se encuentran casas que descargan sus aguas residuales directamente sin ningún tipo de tratamiento, además de otras descargas clandestinas de aguas negras y desechos que los habitantes de colonias aledañas han reportado a las autoridades (Llaven-Anzures, 2022; Municipios, 2022). Todo esto sumado a la

intensa actividad industrial de 1,898 industrias en la zona, intensifican aún más, la acumulación de materia orgánica e inorgánica en el río.

Respecto a la cantidad de oxígeno disuelto en el agua, los resultados mostraron que ninguna de las zonas tiene una concentración suficiente para promover la vida acuática aerobia según los CECA. En el tramo comprendido de Z1-Z4 este parámetro disminuyó drásticamente registrando valores entre 0.68 mg/L y 0.39 mg/L respectivamente. En la Z1 se concentra toda la contaminación proveniente del estado de Tlaxcala y en la Z4 se acumula la contaminación proveniente de Tlaxcala aunada a la generada en los ríos urbanos de la ÁMP. Lo anterior indica, que el sistema no tiene la capacidad de autodepuración, debido a la gran cantidad de materia orgánica e inorgánica que recibe de las descargas urbanas e industriales (García-Nieto *et al.*, 2011; Martínez-Tavera *et al.*, 2017);

Se observaron altos grados de turbidez en las cuatro zonas, que oscilan entre 100 y 250 UNF y de acuerdo a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 de "Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano" los LMP son de 5 UNF, estos resultados indican que el agua a perdido su transparencia por la elevada concentración de sólidos suspendidos y como consecuencia se incrementa la DBO₅ y DQO, como ya se demostró anteriormente. Aunque también puede deberse a materiales en descomposición y partículas procedentes de vertidos de aguas residuales o escorrentía urbana, lo cual puede aumentar aún más el valor de este indicador (Estrada-Rivera *et al.*, 2022; Lenntech Water Treatment Solutions, 2022).

Altos valores de turbidez, DBO₅ y DQO implica disminución de OD. Los valores de OD oscilaron entre 1.98-0.39 mg/L de oxígeno, y los valores más bajos se registraron en la represa Covadonga y presa Echeverría de 0.68 y 0.39 mg/L respectivamente (Tabla 9). Al respecto Pérez-Castresana *et al.*, (2018), registraron valores de 0.52 mg/L de O₂. Por otro lado, Bravo-Inclán *et al.*, (2015) y Martínez-Tavera *et al.*, (2017), reportaron valores cercanos de OD (0 - 1.8 mg/L) en las zonas de confluencia del río Atoyac. De acuerdo a Huang *et al.*, (2017), la disminución de OD en los ríos urbanos es un parámetro común en los países en desarrollo y tiene graves consecuencias en los ecosistemas acuáticos como es la ausencia de peces, tal es el caso de lo que sucede en los ríos Atoyac, Rabanillo y Zapatero en el ÁMP e indica que existe gran cantidad de materia orgánica que no es susceptible de oxidarse y por consiguiente impide su capacidad de resiliencia y el desarrollo de vida acuática (Cieszynska *et al.*, 2012; Jonnalagadda & Mhere, 2001), relacionado con el incremento de la población, la urbanización y la industria en las zonas de estudio (CONAGUA, 2018; Díaz-Luna, 2018; INEGI, 2016).

Por los resultados obtenidos, observamos que el río Atoyac en el ÁMP está contaminado en toda su extensión, debido a la excesiva carga de materia orgánica e inorgánica que recibe de las 4,500 industrias y la población que impide llevar a cabo el proceso de autodepuración en el ÁMP. Por lo anterior, los parámetros OD, DBO₅, DQO y turbidez son indicadores que demuestran la influencia humana desde el punto de vista de la afectación por la presencia de las 4500 industrias y más de 2.7 millones de habitantes que por sus características producen desechos líquidos de calidad diferenciables. En las cuatro zonas de estudio se ha demostrado que existe una relación directa entre superficie territorial, número de industrias y población por lo que todas estas variables determinan la calidad del agua en los ríos del ÁMP, lo cual evidencia que las actividades humanas están correlacionadas positivamente con la degradación de la calidad del agua en las zonas de estudio (Liyanage & Yamada, 2017; Wang *et al.*, 2008; Zhao *et al.*, 2013).

Si tomamos en cuenta que el 75.16% del agua superficial en Puebla está destinada a su explotación agrícola e industrial (Llaven-Anzures, 2021) y solo el 24.84% es para consumo humano. De este 24.84%, el 37.5% de toda el agua superficial disponible está “contaminada” a “fuertemente contaminada” (CONAGUA, 2010) por consiguiente, es de esperarse que un alto porcentaje de la población del ÁMP este en contacto con las 18 sustancias químicas generadas por la industria, las actividades domésticas y la agricultura (Tablas 9-11). Esta situación implica que a corto, mediano o largo plazo parte de la población que habita el ÁMP específicamente aquella que se encuentra ubicada en la ribera de los ríos, pudieran padecer algún tipo de enfermedad relacionada con la contaminación hídrica.

La presencia de los contaminantes tóxicos en los ríos del ÁMP indican por un lado la limitada presencia de plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) en la zona, de ahí la presencia de estos contaminantes en las aguas subterráneas (González-Pérez *et al.*, 2019; Saldaña *et al.*, 2002) y aguas superficiales (Bravo-Inclán *et al.* 2015; Bonilla & Fernández *et al.*, 2014; García-Nieto *et al.*, 2011; Martínez-Tavera *et al.*, 2017; Pérez-Castresana *et al.*, 2018, 2019; Sandoval-Villasana *et al.*, 2009), que demuestran la libre circulación de 18 sustancias químicas en los ríos de manera incontrolada. Por otro lado, se ha demostrado ampliamente que la exposición continua a las sustancias químicas puede causar toxicidad celular, apoptosis, genotoxicidad y alteraciones fisiológicas en organismos vegetales (Berrocal *et al.*, 2013; Gantayat *et al.*, 2017; Llamas *et al.*, 2008; Valencia-Quintana *et al.*, 2013) y seres humanos (Morales-Novelo *et al.*, 2013; Pérez-Castresana *et al.*, 2019).

La mezcla de MP y COVs detectados en el AMP son contaminantes de origen industrial (Rhind, 2009) que inducen efectos antimitóticos y alteraciones en el índice de fases. Al respecto, este trabajo también proporciona información sobre el efecto citotóxico de las sustancias químicas identificadas en las zonas de estudio en los organismos vivos (*Allium cepa*) derivado del incremento industrial y poblacional. Los bioensayos demostraron que hubo inhibición en el proceso de mitosis de la población celular en *Allium cepa*, ya que en las represas Covadonga, Echeverría y en los ríos Rabanillo y Zapatero el efecto fue inhibitorio, debido a que el número de raíces y su longitud fue menor con respecto al testigo. Ocurre que la división celular de los meristemas radiculares puede inhibirse, ya sea retardando el proceso de mitosis como ocurrió en las muestras de agua de menor concentración (50 y 25%) en las cuatro zonas o destruyendo las células como probablemente ocurrió en las muestras de agua al 100% del río Rabanillo y no se observó crecimiento de raíces. Esto podría atribuirse a que los MP y los COVs, promueven la síntesis de la proteína quinasa nuclear (WEE1) responsable de fosforilar e inactivar la enzima Cdk1, evitando que se asocie con la proteína ciclina B y, por lo tanto, inhibiendo la actividad del factor que promueve la mitosis (Barbosa *et al.*, 2010; Yadav *et al.*, 2019). Esto también puede deberse a una síntesis alterada de nucleoproteínas y niveles reducidos de ATP, que proporcionan energía para el alargamiento de los microtúbulos que forman las fibras del huso, lo que posiblemente reduce la dinámica y la motilidad de los cromosomas (Causil -Vargas *et al.*, 2017). Estos resultados coinciden con las investigaciones de Herrero *et al.*, (2012); Mercado & Caleño, (2020), quienes observaron una disminución del IM al aumentar las dosis de glifosato respectivamente en sus tratamientos con respecto al tiempo.

La misma tendencia se observó en los índices de fase, donde el mayor porcentaje de células en división se encuentra en el estadio de profase, está se incrementa a medida que aumenta la concentración de las concentraciones (Tabla 14 y figura 19). Estos resultados sugieren pensar que la presencia de MP y COVs bloquean los complejos Cdk y ciclina A-B responsables de iniciar la condensación del material genético, así como activar proteínas llamadas condesinas, que son responsables de la polimerización de los microtúbulos para formar el huso acromático, que permite el paso normal de las células en división desde la profase a la metafase y anafase (Hepler & Hush, 1996). Este mismo comportamiento fue observado por Barbosa *et al.*, 2010 y Berrocal *et al.*, 2013 en *Allium cepa* en presencia de un biocida y MP respectivamente.

También se observó que, a medida que se incrementa la concentración en los tratamientos, los índices de metafase, anafase y telofase disminuyen. Esto podría deberse a la presencia de los MP (Cr, Pb, Ni y Cd) que no permiten a las células ingresar a las subsiguientes fases y coincide con lo observado por Barbosa *et al.*, 2010 que señalaron que las acumulaciones de MP en el medio intracelular pueden provocar daños en el material genético, que se producen a lo largo del ciclo celular.

Lyu *et al.*, (2020) y Roca & Guerrero, (2021), demostraron que el efecto del plomo, cuando registra altas concentraciones puede inhibir o acelerar la división celular en el meristemo apical de la raíz, ya que el crecimiento de las raíces depende de la mitosis celular. Estos resultados coinciden con los obtenidos en la presente investigación dado que, las muestras de agua de la Z2 presentaron altas concentraciones de Pb, por lo que observamos una inhibición en el número y longitud de las raíces. Fue en la Z2 donde se presentó la mayor concentración de plomo y se observó inhibición de la división celular en la concentración al 100%, ya que no presentó crecimiento de raíces (Tabla 10, 14 y figura 19). En presencia de Pb, se inhibe la división celular en el meristemo apical, lo que puede retrasar el proceso de la mitosis o destruir las células, impidiendo el crecimiento normal de las raíces y por tanto su elongación. Se ha comprobado que la toxicidad inducida por el plomo, depende de la concentración y el tiempo de exposición, a medida que las concentraciones van aumentando el crecimiento radicular de las raíces en *Allium Cepa* disminuye (Carruyo *et al.*, 2006; Ruíz-Moreno *et al.*, 2012; Téllez-Palacios *et al.*, 2014). Aun cuando es difícil evaluar los efectos citotóxicos de mezclas de contaminantes debido a los efectos sinérgicos de los contaminantes, dichos estudios se recomiendan en ambientes naturales, ya que es así como los organismos están expuestos a mezclas reales de contaminantes ambientales (Estrada *et al.*, 2022).

El análisis de correlación en Rabanillo (Z2) confirma una disminución del IM en las raíces de *Allium cepa* y se relaciona con el aumento de O₂, Pb, Cd, CB y TE (-0,998, -0,931, -0,995, -0,985 y -1,000; $p \leq 0,05$) (Tabla 15), lo cual corrobora que la Z2 es la zona de estudio que registró la mayor inhibición, no presentó crecimientos de raíces. Adicionalmente registraron las concentraciones más altas de turbidez (250.33 UNF), DQO (414.6 mg/L) y Pb (2.59 mg/L) así como, de otros MP y COVs. Asimismo, el análisis de correlación general destaca la alta correlación de algunos metales como Cu, Cd y Pb y COVs como Benceno, Clorobenceno, Cloroformo, 1,4-Diclorobenceno, 1,2-Dicloroetano, Tricloroetileno con el IM. Derivado de lo

anterior, el mayor efecto antimutagénico fue inducido por las variables fisicoquímicas de turbidez y DQO y Pb (Tabla 18).

Los MP como el Ni, Cr y el Pb encontrados en el ÁMP son dañinos, ya que están clasificados por el Departamento de Salud y Servicios Humanos (DHHS), la Agencia de Protección Ambiental (EPA) y la Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer (IARC) como carcinogénicos en seres humanos (ATSDR, 2005a; ATSDR, 2007a; ATSDR, 2012). La EPA ha demostrado los efectos del Pb principalmente en el sistema nervioso en niños y adultos, anemia y daño renal. El Cr tiene efectos en el sistema respiratorio (asma, tos, falta de aliento, etc.), piel (úlceras y quemaduras) y daño renal. El Ni puede causar bronquitis crónica, disminución de la función pulmonar y cáncer pulmonar (ATSDR, 2005a; ATSDR, 2007a; ATSDR, 2012; Montoya *et al.*, 2010). Los COVs encontrados en las zonas de estudio del ÁMP, como el benceno y el tricloroetileno son considerados altamente peligrosos, ya que de acuerdo al DHHS, la EPA y la IARC son carcinogénicos en seres humanos. El 1,2-Dicloroetano es considerado como posible cancerígeno. El efecto principal del benceno es sobre la sangre, ya que puede producir una disminución en el número de glóbulos rojos, lo que puede causar anemia; además de tener efectos perjudiciales en el sistema nervioso. La exposición del tricloroetileno a niveles altos puede ocasionar daño al hígado y a los riñones. Por otro lado, el DHHS determinó que el cloroformo puede ser considerado como carcinogénico en seres humanos, y entre sus efectos a la salud puede causar lesiones hepáticas, en el sistema nervioso y en los riñones (ATSDR, 1997; ATSDR, 2007b; ATSDR, 2019; ATSDR, 2022).

De las cuatro zonas, las más contaminadas fueron: el río Rabanillo (Z2) y la presa Echeverría. Ya que el río Rabanillo se localiza en los municipios con mayor densidad industrial que son Cuautlancingo, Coronango y San Pedro Cholula y la presa Echeverría se ubica en uno de los municipios con mayor densidad poblacional que es Puebla. Ambas zonas coinciden, con los resultados del coeficiente de correlación entre los valores de DBO₅ y DQO que fueron de 0.31 y 0.68 respectivamente, e indican que en el Río Rabanillo predominan las aguas residuales industriales, mientras que en Echeverría predominan las aguas residuales domésticas (Ardila-Arias *et al.*, 2012). Estos resultados también se corroboran con los correspondientes análisis de correlación (Tablas 14, 15, 16, 17 y 18) y análisis citotóxicos en *Allium cepa* (Tablas 12 y 13).

De acuerdo con la NOM, la EPA y las correlaciones realizadas, el agua de los ríos de el ÁMP no es recomendable para ningún tipo de uso. En términos de impacto ambiental, la producción

y consumo de bienes y servicios en el AMP no sólo va acompañado de una mayor demanda del líquido, sino también de una mayor generación de residuos urbanos e industriales.

CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES.

En el AMP se identificó que las industrias que destacan por su número son: de la construcción (ladrillo y cemento), metalúrgica y metalmecánica que en total representan más de la mitad de la contaminación generada por el sector, con un total de 1,580 (35.11%), 1,395 (31%) y 383 (8.51%) industrias respectivamente. En un menor porcentaje la alimentaria y textil con 250 (5.55%) y 225 (5%) industrias respectivamente. Los contaminantes identificados en las diferentes zonas de estudio que alteran la calidad del agua están asociados principalmente a la industria textil y alimentaria.

En relación con los parámetros físico-químicos, se registraron altos valores de DBO₅ y DQO en los ríos Zapatero y Rabanillo respectivamente (138 mg/L DBO₅ y 414 mg/L DQO); a consecuencia el OD tuvo bajas concentraciones en las cuatro zonas de estudio, y en la presa Echeverría se observó la menor concentración (0.39 mg O₂/L), seguida de Covadonga (0.68 mg O₂/L), Rabanillo (1.86 mg O₂/L) y Zapatero (1.98 mg O₂/L). Se evidencia un alto grado de deterioro en el Atoyac y sus tributarios, por la condición anóxica de la cuenca que demuestra poca capacidad de autodepuración de los ríos, por lo que sus aguas se han convertido en un atentado a la salud humana y ecosistémica.

Los metales pesados que destacaron fueron: Cu (4.20 mg/L Echeverría), Pb (2.59 mg/L Rabanillo) y Ni (2.30 mg/L Echeverría). En su recorrido el río Atoyac registró en la presa Echeverría los valores más altos de metales y metaloides, Cu>Ni>CN>As>Pb>Cr>Cd, estos valores se encuentran asociados al giro industrial de la construcción, metalúrgica, textil y química.

En la presa Echeverría y en el río Rabanillo se registraron las concentraciones más altas de COVs, entre los que se identificaron: Benceno, 1,2-Dicloroetano, Tetracloroetileno, Tetracloruro de carbono, Tricloroetileno, Clorobenceno, Cloroformo, 1,1-Dicloroetileno, Cloruro de vinilo, 1,4-Diclorobenceno y Hexaclorobutadieno; provenientes de la industria textil, de plástico, química y de construcción, por lo que el agua no se puede beber ni utilizar para actividades esenciales como la agricultura; también es una fuente de insalubridad, que puede causar y transmitir enfermedades. En consecuencia, los ríos urbanos de la cuenca del Atoyac en el AMP se han convertido en vehículos potenciales de enfermedades y alteraciones ambientales. Esto se debe, por un lado, al cambio de uso de suelo, al acelerado y mal planeado crecimiento demográfico e industrial y, por otro, a la falta de PTAR en los municipios e industrias, así como a la laxa aplicación de las Normas Oficiales Mexicanas.

Los resultados obtenidos de la evaluación citotóxica del agua residual de las distintas zonas en el biomodelo *Allium cepa* mostraron que particularmente el agua proveniente del río Rabanillo, produjo la mayor inhibición del crecimiento radicular alterando el ciclo celular. Este comportamiento se podría relacionar con la densidad industrial, elevadas concentraciones de metales pesados y COVs, siendo la turbidez, la DQO y el Pb los parámetros que generan el mayor efecto citotóxico y por consecuencia, los que modificaron el funcionamiento del ciclo celular. Estas evidencias sugieren pensar que el agua del río Atoyac y concretamente el río Rabanillo, es el agua más contaminada de la cuenca en el ÁMP.

El análisis de correlación en Rabanillo (Z2) confirma una disminución del IM en las raíces de *Allium cepa* y se relaciona con la disminución de O₂ (-0,998; $p \leq 0,05$) y el aumento de Pb, CB y TE (-0,931, -0,985 y -1,000; $p \leq 0,05$), las cuales fueron significativas. El análisis de correlación general destaca las altas correlaciones significativas de la DQO, turbidez y Pb (-0,919, -0,864, -0,692; $p \leq 0,05$) en relación con la disminución del IM.

Podemos resaltar que la problemática de los ríos Rabanillo y Zapatero y la represa Covadonga y presa Echeverría, en el ÁMP, es multifactorial. Ya que se contabilizaron un total de 4500 industrias de diversos giros, donde se registraron 18 sustancias químicas, entre MP y COVs, destacando por sus altas concentraciones el Pb, Ni (IARC – carcinogénico), Cu, CF, B y TE (IARC GRUPO 1A, EPA – carcinogénicos), donde el Rabanillo (Z2) y Echeverría (Z4) , fueron las zonas más contaminadas, ya que la Z2 tuvo el mayor número de industrias (1898), altos valores de DQO, Turb, y altas concentraciones de Pb; mientras que la Z4, registró altas concentraciones de MP y COVs, sin embargo fue Rabanillo quien registro la mayor citotoxicidad, ya que no hubo crecimiento de raíces en la concentración al 100% de agua residual.

La contaminación química en el ÁMP, en términos históricos, es un reflejo del incumplimiento de las NOMs, la desigualdad y el deterioro ambiental, cuyos efectos se traducen en un proceso de desarrollo insostenible. La complejidad radica en la polarización de las fuerzas económicas, que, junto con la consolidación del modelo capitalista y la industrialización, han conducido a un aumento sostenido del consumismo, creado una distribución no equitativa de los bienes comunes como el agua, anteponiendo las necesidades de los grupos más vulnerables. Por ello, es urgente producir cambios en el sistema productivo, donde se tome en cuenta el conocimiento del agua y se creen espacios de coalición entre los

sectores académico, público, privado y ciudadano para implementar una nueva política industrial orientada hacia metas incluyentes y sustentables.

REFERENCIAS.

- Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades (ATSDR). (2005a). Reseña Toxicológica del Níquel (versión actualizada) (en inglés). Atlanta, GA: Departamento de Salud y Servicios Humanos de EE. UU., Servicio de Salud Pública. https://www.atsdr.cdc.gov/es/toxfaqs/es_tfacts15.html.
- Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades (ATSDR). (1997). Reseña toxicológica del Tricloroetileno. Atlanta, GA: Departamento de Salud y Servicios Humanos de los EE.UU., Servicio de Salud Pública. https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs19.pdf.
- Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades (ATSDR). (2005b). Reseña Toxicológica del Alfa-, Beta-, Gama- y Delta-Hexaclorociclohexano (versión actualizada) (en inglés). Atlanta, GA: Departamento de Salud y Servicios Humanos de EE. UU., Servicio de Salud Pública. http://medbox.iiab.me/modules/en/cdc/www.atsdr.cdc.gov/es/toxfaqs/es_tfacts43.html.
- Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades. (ATSDR). (1998). Reseña Toxicológica del 1,4- Diclorobenceno (en inglés). Atlanta, GA: Departamento de Salud y Servicios Humanos de los EE.UU., Servicio de Salud Pública. https://www.atsdr.cdc.gov/es/toxfaqs/es_tfacts10.pdf
- Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades. (ATSDR). 2000. Reseña Toxicológica de los Bifenilos Policlorados (BPCs) (en inglés). Atlanta, GA: Departamento de Salud y Servicios Humanos de los EE.UU., Servicio de Salud Pública. <http://www.cvs.saude.sp.gov.br/pdf/toxfaq29.pdf>.
- Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades. (ATSDR). 2002. Reseña Toxicológica de los DDT, DDE y DDD (en inglés). Atlanta, GA: Departamento de Salud y Servicios Humanos de EE. UU., Servicio de Salud Pública. https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs35.html.
- Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades. (ATSDR). 2012. Reseña Toxicológica del Cromo (en inglés). Atlanta, GA: Departamento de Salud y Servicios Humanos de los EE.UU., Servicio de Salud Pública. https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs7.html
- Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades. (ATSDR). 2007a. Reseña Toxicológica del Plomo (en inglés). Atlanta, GA: Departamento de Salud y Servicios Humanos de los EE.UU., Servicio de Salud Pública. https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs7.html
- Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades. (ATSDR). 2007b. Reseña Toxicológica del Benceno (en inglés). Atlanta, GA: Departamento de Salud y Servicios Humanos de los EE.UU., Servicio de Salud Pública. https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs3.html
- Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades. (ATSDR). 1997. Reseña Toxicológica del Cloroformo (edición actualizada en inglés). Atlanta, GA: Departamento de Salud y Servicios Humanos de EE. UU., Servicio de Salud Pública. https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs6.html

- Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades. (ATSDR). 2022. Reseña Toxicológica del 1,2-Dicloroetano (edición actualizada en inglés). Atlanta, GA: Departamento de Salud y Servicios Humanos de EE. UU., Servicio de Salud Pública. https://www.atsdr.cdc.gov/es/toxfaqs/es_tfacts38.pdf
- Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades. (ATSDR). 2019. Reseña Toxicológica del Tricloroetileno (edición actualizada en inglés). Atlanta, GA: Departamento de Salud y Servicios Humanos de EE. UU., Servicio de Salud Pública. https://www.atsdr.cdc.gov/es/toxfaqs/es_tfacts19.pdf
- Alrousan, D. M. A., Dunlop, P. S. M., McMurray, T. A., & Byrne, J. A. (2009). Photocatalytic inactivation of E. coli in surface water using immobilised nanoparticle TiO₂ films. *Water Research*, 43(1), 47–54. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2008.10.015>.
- Altieri-Ramirez, M. J. (2019). *Los impactos de los procesos urbano-territoriales y de gestión en la cuenca del Alto Atoyac* [Tesis doctoral, Universidad Autónoma de Puebla]. Repositorio Institucional. <https://repositorioinstitucional.buap.mx/server/api/core/bitstreams/40c0a3a6-e8fb-4b89-9cd9-afde8d4fbf8f/content>
- Andrioli, Nancy Beatriz. (2011). *Evaluación de agentes químicos con potencial genotóxico en células meristemáticas de Allium cepa*. (Tesis doctoral. Universidad de Buenos Aires). Biblioteca digital https://bibliotecadigital.exactas.uba.ar/download/tesis/tesis_n4922_Andrioli.pdf
- Aquino-Moreno, E., Rodríguez Tapia, L., & Morales Novelo, J. (2015). Valoración económica de los impactos ambientales en la salud por la contaminación del río Atoyac. <http://www.amica.com.mx/issn/archivos/107.pdf>.
- Arango, S. S. (2012). Biomarcadores para la evaluación de riesgo en la salud humana. *Revista Facultad Nacional de Salud Pública*, 30(1), 75-82. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-386X2012000100009
- Ardila-Arias, A. N., Calle, J. R., Villaseñor, E. A., & Hernández, J. A. (2012). Remoción fotocatalítica de DQO, DBO₅ y COT de efluentes de la industria farmacéutica. *Revista Politécnica*, 8(15), 9-17. <https://revistas.elpoli.edu.co/index.php/pol/article/view/316>
- Arellano-Aguilar, O., Solís-Ángeles, S., Serrano- García, L., Morales-Sierra, E., Mendez- Serrano, A. & Montero-Montoya, R. (2015). Use of the Zebrafish Embryo Toxicity Test for Risk Assessment Purpose: Case Study. *Journal of FisheriesSciences.com*, 9(4), 52-62. https://www.researchgate.net/profile/Soledad-Solis-Angeles/publication/302895954_Use_of_the_Zebrafish_Embryo_Toxicity_Test_for_Risk_Assessment_Purpose_Case_Study/links/5732b60a08ae9f741b2360f5/Use-of-the-Zebrafish-Embryo-Toxicity-Test-for-Risk-Assessment-Purpose-Case-Study.pdf
- Ayala-Rodríguez, I. (2009). La Situación ambiental en Puebla: Elementos para la educación. Universidad Iberoamérica Puebla. México. 317 pp.
- Bae, J. S., Freeman, H. S., & Kim, S. D. (2006). Influences of new azo dyes to the aquatic ecosystem. *Fibers and Polymers*, 7, 30-35. <https://doi.org/10.1007/BF02933599>.

- Baker, A. J. M., & Walker, P. (1989). Physiological responses of plants to heavy metals and the quantification of tolerance and toxicity. *Chemical Speciation & Bioavailability*, 1(1), 7-17. <https://doi.org/10.1080/09542299.1989.11083102>
- Ballantyne, B., Marrs, T. C., & Syversen, T. (2009). *Basic elements of toxicology. General, Applied and Systems Toxicology*. <https://doi.org/10.1002/9780470744307.gat001>
- Barbosa, J. S., Cabral, T. M., Ferreira, D. N., Agnez-Lima, L. F., & De Medeiros, S. B. (2010). Genotoxicity assessment in aquatic environment impacted by the presence of heavy metals. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 73(3), 320-325. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2009.10.008>.
- Beita-Sandí, W., & Barahona-Palomo, M. (2011). Fisico-química de las aguas superficiales de la Cuenca del río Rincón, Península de Osa, Costa Rica. *UNED Research Journal/Cuadernos de Investigación UNED*, 2(2), 157-179. <https://www.redalyc.org/pdf/5156/515651982004.pdf>.
- Berrocal, A. M., Blas, R. H., Flores, J., & Siles, M. A. (2013). Evaluación del potencial mutagénico de biocidas (vertimec y pentacloro) sobre cebolla. *Revista colombiana de biotecnología*, 15(1), 17-27. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=776/77628609003>.
- Berumen-Rodríguez, A. A., Pérez-Vázquez, F. J., Díaz-Barriga, F., Márquez-Mireles, L. E., & Flores-Ramírez, R. (2021). Environmental and human health effects caused by the Mexican bricks factories. *Salud Pública de México*, 63(1), 100-108. <https://doi.org/10.21149/11282>
- Bonciu, E., Firbas, P., Fontanetti, C. S., Wusheng, J., Karaismailoğlu, M. C., Liu, D., ... & Papini, A. (2018). An evaluation for the standardization of the Allium cepa test as cytotoxicity and genotoxicity assay. *Caryologia*, 71(3), 191-209. <https://doi.org/10.1080/00087114.2018.1503496>.
- Bonilla & Fernández, M. N., Silva-Gómez, S. E., Toxtle-Tlamani, J. S. & Santamaría-Juárez, J. D. (2014). Concentraciones de metales pesados totales en aguas residuales vertidas a ecosistemas acuáticos por dos parques industriales en Puebla, México. *Revista Iberoamericana de Producción Académica y Gestión Educativa*, (2), 1-25. <https://www.pag.org.mx/index.php/PAG/article/view/208/256>.
- Bravo-Inclán, L. A., Sánchez-Chávez, J., Izurieta-Dávila, J. L. & Tomasini-Ortiz, A. C. (2015). Evaluación toxicológica del Río Atoyac, pue., y su relación con los parámetros fisicoquímicos. 2° Congreso Nacional AMICA. <http://www.amica.com.mx/issn/archivos/183.pdf>.
- Brito, E. M. S., De la Cruz Barrón, M., Caretta, C. A., Goñi-Urriza, M., Andrade, L. H., CuevasRodríguez, G., Malm, O., Torres, J.P., Simon, M. & Guyoneaud, R. (2015). Impact of hydrocarbons, PCBs and heavy metals on bacterial communities in Lerma River, Salamanca, Mexico: investigation of hydrocarbon degradation potential. *Sci. Total Environ.* 521, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.02.098>.
- Bustillo, A., Oscar, P. & Briançon, E. (2020). "Simulación de la calidad bacteriológica del Río Choqueyapu -La Paz, utilizando qual2k". *Instituto de Ingeniería Sanitaria*, 4, 27-41. http://iis.umsa.edu.bo/images/Facultad/Revistas/Revista-IIS_No4-Final 20171.pdf#page=54.

- Camelo-Martínez, E. (2013). Toxicología Ambiental. Universidad Nacional Abierta y a Distancia, Bogotá, Colombia. file:///C:/Users/Hp/Downloads/189996489-Modulo-Toxicologia-Ambiental.pdf.
- Carabarán, A. (2000). Agua y confort en la vida de la Antigua Puebla, Instituto de Ciencias Sociales y Humanidades /BUAP/ Sociedad Mexicana de la Historia de la Ciencia y la Tecnología, México.
- Carruyo, I., Fernández, Y., Marcano, L., Montiel, X. & Torrealba, Z. (2006). Efectos tóxicos inducidos por el plomo en meristemas radiculares de cebolla (*Allium Cepa*). *Boletín del Centro de Investigaciones Biológicas*, 40(3), 311-326. <https://produccioncientificaluz.org/index.php/boletin/article/view/65>
- Casarett, L. J. & Doull, J. (2001). Principios generales de toxicología. En C. D. Klaassen & J. B. Watkins (Eds), *Manual de Toxicología: La Ciencia Básica de los tóxicos* (pp. 1- 74). New York: McGraw-Hill. <https://es.scribd.com/doc/215957376/Manual-de-Toxicologia-Casarett>.
- Casiano Flores, C., Özerol, G., Bressers, H., Kuks, S., Edelenbos, J., & Gleason, A. (2019). The state as a stimulator of wastewater treatment policy: a comparative assessment of three subnational cases in central Mexico. *Journal of Environmental Policy & Planning*, 21(2), 134-152. <https://doi.org/10.1080/1523908X.2019.1566060>.
- Casiano-Flores, C., Vikolainen, V., & Bressers, H. (2016). Water governance decentralisation and river basin management reforms in hierarchical systems: do they work for water treatment policy in Mexico's Tlaxcala Atoyac Sub-basin?. *Water*, 8(5), 210. <https://doi.org/10.3390/w8050210>.
- Castree, N. (2008). Neoliberalising nature: the logics of deregulation and reregulation. *Environment and planning A*, 40(1), 131-152. <https://doi.org/10.1068/a3999>.
- Causil-Vargas, L. A., Coronado, J. L., Vega, M. F., Donado, K. A., Pacheco, C., & Verbel, L. F. (2017). Efecto citotóxico del hipoclorito de sodio (NaClO), en células apicales de raíces de cebolla (*Allium cepa* L.). *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 11(1), 97-104. <https://doi.org/10.17584/rcch.2017v11i1.5662>.
- Chhonkar, P. K., Datta, S. P., Joshi, H. C., & Pathak, H. (2000). Impact of industrial effluents on soil health and agriculture-Indian experience: Part II-Tannery and textile industrial effluents. *J Sci Ind Res*, 59, 446– 454. <http://nopr.niscair.res.in/handle/123456789/26583>.
- Cieszynska, M., Wesolowski, M., Bartoszewicz, M., Michalska, M., & Nowacki, J. (2012). Application of physicochemical data for water-quality assessment of watercourses in the Gdansk Municipality (South Baltic coast). *Environmental monitoring and assessment*, 184(4), 2017-2029. <https://doi.org/10.1007/s10661-011-2096-5>.
- Cirtina, D., Ionescu, N., & Cirtina, L. M. (2016). Environmental impact assesement related to metallurgical industry activities. *Metallurgija*, 55(3), 481-484. <https://hrcak.srce.hr/153690>.
- Clemares Martínez, E. (2017). Evaluación de los parámetros físico-químicos de Baix Vinalopó. Recuperado de <http://193.147.134.18/bitstream/11000/4300/1/Clemares%20Mart%C3%ADnez%2C%20Emilio.pdf>.

- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). Atlas del agua en México, edición 2018. (146 pp.) http://sina.conagua.gob.mx/publicaciones/AAM_2018.pdf.
- Correa-Martins, M. N., Souza, V. V. D., & Silva-Souza, T. D. (2016). Cytotoxic, genotoxic and mutagenic effects of sewage sludge on *Allium cepa*. *Chemosphere*, 148, 481-486. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.01.071>
- Cortés-Hernández, J. H. (2021). Origen histórico de la contaminación hídrica y análisis jurídico del río Atoyac. *Tecnología y ciencias del agua*, 12(1), 133-191. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2021-01-05>.
- Diario Oficial de la Federación (DOF). (1989). Criterios Ecológicos de Calidad del Agua; CE-CCA-001/89. Ciudad de México, México. <http://legismex.mty.itesm.mx/acu/acca001.pdf>
- Diario Oficial de la Federación (DOF). (1997). Límites Máximos Permisibles de Contaminantes en Las Descargas de Aguas Residuales en Aguas y Bienes Nacionales; NOM-001-SEMARNAT-1996. Ciudad de México, México. <http://www.profepa.gob.mx/innovaportal/file/3290/1/nom-001-semarnat-1996.pdf>
- Diario Oficial de la Federación (DOF). (2000). Agua Para Uso y Consumo Humano. Límites Permisibles de Calidad y Tratamientos a Que Debe Someterse el Agua Para su Potabilización; MODIFICACION NOM-127-SSA1-94. Ciudad de México, México. <https://www.ucol.mx/content/cms/13/file/NOM/Nom-127-ssa1-1994.pdf>
- Diario Oficial de la Federación (DOF). (2010). Acuerdo por el que se dan a conocer los estudios técnicos de Aguas Nacionales Superficiales de la Región Hidrológica Número 18 Balsas, México. http://dof.gob.mx/nota_detalle_popup.php?codigo=5175730.
- Diario Oficial de la Federación (DOF). (2011). Declaratoria de Clasificación de los ríos Atoyac, Xochiac o Hueyapan, y Sus Afluentes. México. http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5199672&fecha=06/07/2011.
- Díaz-Luna, P. (2018). *Análisis de funcionalidad de un espacio público. Una aproximación multifactorial. Caso de estudio: sección del parque lineal de Vía Atlixcáyotl; en el área metropolitana de Puebla, México* (Tesis Doctoral, Universidad Iberoamericana Puebla, Puebla). <https://repositorio.iberopuebla.mx/handle/20.500.11777/3791>.
- Elías, C., Paz, O. & Rodrigo, G. (2012). Estudio de ecotoxicidad y genotoxicidad en recursos hídricos. *Instituto de Ingeniería Sanitaria*, 2, 8-14. <http://ingenieriacivil.umsa.bo>.
- Escobar, A. (1999). After nature: Steps to an antiessentialist political ecology. *Current anthropology*, 40(1), 1-30. <https://doi.org/10.1086/515799>.
- Escobedo-Paredes, C. R., Rodríguez-Soto, J. C., Contreras-Quiñones, M., Aspajo-Villalaz, C., Calderón-Peña, A., León Alcántara, E., Cornejo-Roque, B. E., Aldama-Reyna, C. W., Agreda-Delgado, J. & Valverde-Alva, M. (2020). Citotoxicidad y genotoxicidad de nanopartículas de cobre sobre *Allium cepa* L. (Amaryllidaceae). *Arnaldoa*, 27(1), 181-190. <http://doi.org/10.22497/arnaldoa.271.27110>
- Espinosa-Reyes, G., Ilizaliturri-Hernández, C., González-Mille, D., Mejía-Saavedra, J., Nava, A. D., Cuevas, M., & Cilia-López, G. (2013). Contaminantes orgánicos persistentes en la cuenca baja

del río Coatzacoalcos, Veracruz. *Golfo de México. Contaminación e impacto ambiental: diagnóstico y tendencias. 2da. edición. Mexico: UAC, UNAM-ICMYL, CINVESTAV-Unidad Mérida,* 309-322.
https://www.researchgate.net/profile/Cesar_IlizaliturriHernandez2/publication/272488104_Co ntaminantes_organicos_persistentes_en_la_cuenca_baja_del_Rio_Coatzacoalcos_Veracruz/li nks/54e610700cf2cd2e028bb8e8.pdf.

Estrada, A., García, W. A., Chavez, E., Castelan, R., Zayas, M. T., Treviño, S., Díaz, A. & Handal, A. (2022). Mixture of Toxic Metals and Volatile Organic Compounds in a River Induces Cytotoxicity. *Journal of Chemistry*, 2022. <https://doi.org/10.1155/2022/1285826>.

Estrada-Rivera, A., Díaz-Fonseca, A., Treviño-Mora, S., García-Suastegui, W., Castelán-Vega, R. del C., Chávez-Bravo, E., Zayas-Pérez, M., Moran-Perales, J. L., Silva, A. (2022). Anthropogenic Contamination of the Atoyac River, México. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 987(1), 012007. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/987/1/012007>.

FAO. (2020). Día mundial del agua:2010: Agua limpia para un mundo sano. <http://www.fao.org/americas/noticias/ver/es/c/229276/>.

Farago, M. 1994. Plants and the chemical elements: biochemistry, uptake, tolerance and toxicity. VCH Verlagsgesellschaft, Weinheim. 292 p.

Fragoso, L. R., Baltasar, E. H., & Esparza, J. A. R. (2004). El ciclo celular: características, regulación e importancia en el cáncer. *Biotecnología aplicada*, 21(2), 60-69. <https://elfoscientiaecigb.edu.cu/PDFs/Biotecnol%20Apl/2004/21/2/BA002102RV060-069.pdf>

Galicia-Hernández, E. (2015). Un acercamiento histórico a las condiciones "originales" de funcionamiento del sistema hídrico subterráneo y su respuesta superficial en la microcuenca de la ciudad de Puebla. *Investigaciones geográficas*, (86), 38-52. <https://doi.org/10.14350/rig.41358>

Gantayat, S., Mania, S., Pradhan, C., & Das, A. B. (2017). Ionic Stress Induced Cytotoxic Effect of Cadmium and Nickel Ions on Roots of *Allium cepa* L. *Cytologia*, 83(2), 143-148. <https://doi.org/10.1508/cytologia.83.143>.

García-Nieto, E., Carrizales-Yañez, L., Juárez-Santacruz, L., García-Gallegos, E., Hernández-Acosta, E., Briones-Corona, E., & Vázquez-Cuecuecha, O. G. (2011). Plomo y arsénico en la subcuenca del Alto Atoyac en Tlaxcala, México. *Revista Chapingo serie ciencias forestales y del ambiente*, 17(1), 7-17. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2010.06.040>.

Garza-Aguilar, S. M., Sánchez-Camargo, V. A., Godínez-Palma, S. K., & Lara-Núñez, A. (2014). Avances recientes en el estudio del ciclo celular en plantas. *Revista de Educación Bioquímica*, 33(2), 39-47. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1665-19952014000200002

Glińska, S., Bartczak, M., Oleksiak, S., Wolska, A., Gabara, B., Posmyk, M., & Janas, K. (2007). Effects of anthocyanin-rich extract from red cabbage leaves on meristematic cells of *Allium*

cepa L. roots treated with heavy metals. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 68(3), 343-350. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2007.02.004>.

Gobierno del Estado de Puebla. (2020). Desarrollo Regional Estratégico. Región 21-31 Área Metropolitana de la Ciudad de Puebla. https://planeader.puebla.gob.mx/pdf/ProgramasRegionales2020/0_ProRegionales%2021-31%20Puebla.pdf.

González-Jácome, A. (2009). El control del agua en la cuenca de los ríos Atoyac y Zahuapan por el estado mexicano posrevolucionario. *Anduli: revista andaluza de ciencias sociales*, (8), 169-190.

https://www.researchgate.net/publication/28316225_El_Control_del_Agua_en_la_Cuenca_de_Los_Rios_Atoyac_y_zahuapan_por_el_Estado_Mexicano_Posrevolucionario.

González, P. M., & Hernández, E. (2009). Impactos de la contaminación del Río Santiago en el bienestar de los habitantes de El Salto, Jalisco. *espacio abierto*, 18(4), 709-729. <https://www.redalyc.org/pdf/122/12211871006.pdf>.

González-Borroto, J. I. (2006). *Evaluación del potencial genotóxico de derivados furiletilénicos aplicando ensayos in vitro e in vivo* (Tesis doctoral, Universidad Autónoma de Barcelona, España). <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=76470>.

González-Macias, C., Schifter, I., Lluch-Cota, D.B., Mendez-Rodriguez, L. & HernandezVazquez, S. (2007). Environmental assessment of aromatic hydrocarbons—contaminated sediments of the Mexican Salina Cruz Bay, *Environ. Monit. Assess.*, 133, 187–207. <https://doi.org/10.1007/s10661-006-9572-3>.

González-Pérez, E., Ortega-Escobar, H. M., Yáñez-Morales, M. J., & Rodríguez-Guillen, A. (2019). Diagnóstico de indicadores de calidad físico-química del agua en afluentes del río Atoyac. *Tecnología y ciencias del agua*, 10(1), 30-51. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2019-01-02>.

Greenpeace. (2012). Ríos tóxicos de México. http://www.greenpeace.org/mexico/global/mexico/report/2012/rios_toxicos.pdf.

Greim, H., & Snyder, R. (2018). Introduction to the Discipline of Toxicology. *Toxicology and Risk Assessment: A Comprehensive Introduction*, 1-19. <https://doi.org/10.1002/9781119135944.ch1>

Guachalla, L., & Ascarrunz, M. (2003). La Genética Toxicológica: Una ciencia en constante desarrollo. *Biofarbo*, 75-82. <https://pesquisa.bvsalud.org/portal/resource/pt/lil-385176>.

Guerrero, J. (2005). Cianuro: Toxicidad y destrucción biológica. *El Ingeniero de minas*, 10, 22-25. <http://www.researchgate.net/publication/258499252>.

Habashi, F. (2012). Pollution problems in the metallurgical industry: A review. *Journal of Mining and Environment*, 2(1), 17-26. <https://doi.org/10.22044/JME.2012.16>.

- Han, Y., Liu, T., Wang, J., Zhang, C., Zhu, L. (2016). Genotoxicity and oxidative stress induced by the fungicide azoxystrobin in zebrafish (*Danio rerio*) livers. *Pesticide Biochemistry and Physiology* 133, 13–19. <https://doi.org/10.1016/j.pestbp.2016.03.011>.
- Handal-Silva, A., Pérez-Castresana, G., Morán-Perales, J. L. & García-Suastegui, W. (2017). Historia de la contaminación hídrica del Alto Balsas. *Revista del Desarrollo Urbano y Sustentable*, 3(9), 10-23. http://www.ecorfan.org/bolivia/researchjournals/Desarrollo_Urbano_y_Sustentable/vol3num9/Revista_del_Desarrollo_Urbano_y_Sustentable_V3_N9_2.pdf
- Hepler, P. K., & Hush, J. M. (1996). Behavior of microtubules in living plant cells. *Plant Physiology*, 112(2), 455. <https://doi:10.1104/pp.112.2.455>.
- Herrero, O., Martín, J. P., Freire, P. F., López, L. C., Peropadre, A., & Hazen, M. J. (2012). Toxicological evaluation of three contaminants of emerging concern by use of the *Allium cepa* test. *Mutation Research/Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis*, 743(1-2), 20-24. <https://doi.org/10.1016/j.mrgentox.2011.12.028>.
- Huang, J., Yin, H., Chapra, S. & Zhou, Q. (2017). Modelling dissolved oxygen depression in an urban river in China. *Water*, 9(7), 520. <https://doi.org/10.3390/w9070520>
- Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). (2005). Estudio de Clasificación del Río Atoyac, Puebla-Tlaxcala; CONAGUA: México City, México. <http://viveatoyac.org.mx/images/Biblioteca%20tem%C3%A1tica/Biblioteca%20sobre%20el%20agua/3e008%20Estudio%20de%20clasificacion%20del%20rio%20Atoyac.pdf>.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2015). Número de Habitantes. INEGI. <http://www.cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/pue/poblacion/default.aspx?tema=me&e=21>.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2021). México en cifras. <https://www.inegi.org.mx/app/areasgeograficas/?ag=21#tabMCcollapse-Indicadores>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía, INEGI. (1995). Estadísticas del Medio Ambiente. México, 1994. (453 pp). http://www.conabio.gob.mx/conocimiento/estrategia_nacional/doctos/estudiodepais/CAP1_Contexto_fisico.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía, INEGI. (2009a). Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos: San Andrés Cholula. https://www.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos_geograficos/21/21119.pdf
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía, INEGI. (2009b). Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos: San Pedro Cholula. https://www.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos_geograficos/21/21140.pdf
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía, INEGI. (2009c). Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos: Cuautlancingo. https://www.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos_geograficos/21/21041.pdf

- Instituto Nacional de Estadística y Geografía, INEGI. (2009d). Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos: Puebla. https://www.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos_geograficos/21/21114.pdf
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía, INEGI. (2016). Anuario Geográfico y Estadístico de Puebla. http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/Productos/prod_serv/contenidos/espa_nol/bvinegi/productos/nueva_estruc/anuarios_2016/702825083755.pdf.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía, INEGI. (2019) Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas (DENUE). <https://www.inegi.org.mx/app/mapa/denue/>.
- Jonnalagadda, S. B., & Mhere, G. (2001). Water quality of the Odzi River in the eastern highlands of Zimbabwe. *Water Research*, 35(10), 2371-2376. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(00\)00533-9](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(00)00533-9).
- Kirsch-Volders, M., Vanhauwaert, A., Eichenlaub-Ritter, U., & Decordier, I. (2003). Indirect mechanisms of genotoxicity. *Toxicology letters*, 140, 63-74. [https://doi.org/10.1016/S0378-4274\(02\)00498-8](https://doi.org/10.1016/S0378-4274(02)00498-8).
- Kumari, M., Mukherjee, A., & Chandrasekaran, N. (2009). Genotoxicity of silver nanoparticles in *Allium cepa*. *Science of the total environment*, 407(19), 5243-5246. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2009.06.024>
- Lagunas Cruz, M. D. C., Valle Mendiola, A., & Soto Cruz, I. (2014). Ciclo celular: Mecanismos de regulación. *Vertientes. Revista Especializada en Ciencias de la Salud*, 17(2). <http://revistas.unam.mx/index.php/vertientes/article/view/51694/46146>
- Lenntech Water Treatment Solutions. 2020. Turbidez. Empresa de diseño y fabricación para tratamiento y purificación de agua. <https://www.lenntech.es/turbidez.htm>.
- Liyanage, C. P., & Yamada, K. (2017). Impact of population growth on the water quality of natural water bodies. *Sustainability*, 9(8), 1405. Doi: 10.3390/su9081405.
- Llamas, A., Ullrich, C. I., & Sanz, A. (2008). Ni²⁺ toxicity in rice: Effect on membrane functionality and plant water content. *Plant Physiology and Biochemistry*, 46(10), 905-910. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2008.05.006>.
- Llaven-Anzures, Y. (12 de septiembre de 2022). *La zona de Cuautlancingo del Acuífero Valle de Puebla es el segundo más explotado en el país por la industria automotriz: Oxfam*. La Jornada de Oriente. <https://www.lajornadadeoriente.com.mx/puebla/la-zona-de-cuautlancingo-del-acuifero-valle-de-puebla-es-el-segundo-mas-explotado-en-el-pais-por-la-industria-automotriz-oxfam/>.
- Llaven-Anzures, Y. (2021, 4 de mayo). UNAM: 75.16% del agua superficial en Puebla está destinada a su explotación agrícola e industrial. La Jornada de Oriente. <https://www.lajornadadeoriente.com.mx/puebla/unam-75-16-del-agua-superficial-en-puebla-esta-destinada-a-su-explotacion-agricola-e-industrial/>.

- López, A. P. (2014). Estudio in vitro de las respuestas celulares asociadas con la exposición a contaminantes emergentes (Tesis doctoral, Universidad Autónoma de Madrid). file:///C:/Users/Usuario/Downloads/peropadre_lopez_ana.pdf
- López-Nigro, M. M., Portmann, E., Angeleri, G., Gurni, A., & Carballo, M. A. (2009). Biomarcadores para evaluación de genotoxicidad potencial. *Boletín Latinoamericano y del Caribe de Plantas Medicinales y Aromáticas*, 8(2), 154-159. <https://www.redalyc.org/pdf/856/85611769014.pdf>
- López-Sardi, E. M., García, B. N., Larroudé, V., Picicelli, R., Reynoso, C. Y., & Ramírez Martínez, É. (2016). Uso de allium cepa test como indicador de eficacia para el tratamiento de efluentes. *Ciencia y tecnología*, (16), 81-89. <http://dspace.palermo.edu/dspace/handle/10226/1737>
- López-Zamora, R. & Montalvo-Vargas, R. (2015). Expansión urbana, agua potable y saneamiento en la Zona Metropolitana Puebla Tlaxcala (ZMPT). *Observatorio Iberoamericano del desarrollo local y la economía social*, (9), 1-16. https://econpapers.repec.org/article/ervoidles/y_3a2015_3ai_3a19_3a5.htm.
- Lorenzo-Márquez, H., Torres-Dosal, A., Barba Macías, E., Ilizaliturri Hernández, C. A., Martínez-Salinas, R. I., Morales López, J. J., & Sánchez Moreno, I. (2016). Estimación de riesgo de exposición a metales pesados por consumo de pecos (*Pterygoplichthys* spp.) en infantes de comunidades ribereñas de los ríos Grijalva y Usumacinta, México. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 32(2), 153-164. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0188-49992016000200153&script=sci_arttext.
- Loreto-López, R. (2012). Agua, acequias, heridos y molinos. Un ejemplo de dinámica ambiental urbana. Puebla de los Ángeles. Siglos XVI-XIX. *Revista Sociedad, Ciudad y Territorio*, (3), 42-73. <http://www.oumpuebla.com.mx/documents/RosalvaLoreto.pdf>.
- Lyu, G., Li, D., Li, S., Ning, C., & Qin, R. (2020). Genotoxic effects and proteomic analysis on *Allium cepa* var. *agrogarum* L. root cells under Pb stress. *Ecotoxicology* 29, 959–972. <https://doi.org/10.1007/s10646-020-02236-x>.
- Ma, T. H., Xu, Z., Xu, C., McConnell, H., Rabago, E. V., Arreola, G. A., & Zhang, H. (1995). The improved *Allium/Vicia* root tip micronucleus assay for clastogenicity of environmental pollutants. *Mutation Research/Environmental Mutagenesis and Related Subjects*, 334(2), 185-195. [https://doi.org/10.1016/0165-1161\(95\)90010-1](https://doi.org/10.1016/0165-1161(95)90010-1)
- Maine, M. A., & Sanchez, G. C. (2018). Tratamiento de efluentes de la industria metalúrgica. Pontificia Universidad Javeriana. <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/114524>.
- Márquez, M. H., & Negrete, J. L. M. (2016). Genotoxicidad de metales presentes en el agua de bebida en la Región de la Mojana, departamento de Sucre, Colombia. In 2014. http://mca.edu.co/wp-content/uploads/2019/09/m2014_20.pdf.
- Martinez-Tavera, E., Rodriguez-Espinosa, P. F., Shruti, V. C., Sujitha, S. B., Morales-Garcia, S. S., & Muñoz-Sevilla, N. P. (2017). Monitoring the seasonal dynamics of physicochemical parameters from Atoyac River basin (Puebla), Central Mexico: multivariate approach. *Environmental Earth Sciences*, 76(2), 1-15. <https://doi.org/10.1007/s12665-017-6406-2>

- Martí-Valls, J., Valls-Llobet, C., Mestres-Miserachs, C., Homs-Valles, M., Fuste y Munné, H., Parra-Barranchina, P. & Ferris-Pellicer, A. (2011). La contaminación y la Salud. *Centre d' Anàlisis i Programes Sanitaris*, 108. http://www.caps.cat/images/stories/caps/LA_CONTAMINACIN_Y__LA_SALUD.pdf.
- Mauriz-Turrado, I. & Martínez-Pérez, J. M. (2014). Agentes genotóxicos: Métodos de detección y evaluación. *El rincón de la ciencia*, (66), 1-11. <http://rincondelaciencia.educa.madrid.org/Curiosid3/rc-153/rc-153.pdf>.
- McCulligh, C., Páez-Vieyra, J. C., & Moya-García, G. (2007). Mártires del Río Santiago: informe sobre las violaciones al derecho a la salud ya un medio ambiente sano en Juanacatlán y El Salto, Jalisco, México. <https://rei.iteso.mx/bitstream/handle/11117/5338/Martires+del+r%C3%ADo+Santiago+Informe+sobre+violaciones+al+derecho+de+la+salud+y+medio+ambiente+sano+en+Juanacatlan+y+El+Salto+Jalisco.pdf?sequence=2>.
- Meharg, A. A., Wright, J., & Osborn, D. (2000). Chlorobenzenes in rivers draining industrial catchments. *Science of the total environment*, 251, 243-253. [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(00\)00387-9](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(00)00387-9).
- Mendoza, E. (2014). Contaminados 70% de ríos en México. *Contralínea*. <http://www.contralinea.com.mx/archivo-revista/index.php/2014/09/14/contaminados-siete-de-cada-10-rios-de-mexico/>.
- Mendoza-Cariño, M., Quevedo-Nolasco, A., Bravo-Vinaja, Á., Flores-Magdaleno, H., De la Isla, D. B., de Lourdes, M., ... & Zamora-Morales, B. P. (2014). Estado ecológico de ríos y vegetación ribereña en el contexto de la nueva ley general de aguas de México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 30(4), 429-436. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0188-49992014000400010&script=sci_arttext.
- Mercado, S. A. S., & Caleño, J. D. Q. (2020). Cytotoxic evaluation of glyphosate, using *Allium cepa* L. as bioindicator. *Science of the total environment*, 700, 134452. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134452>.
- Mineyuki, Y., Wick, S. M., & Gunning, B. E. S. (1988). Preprophase bands of microtubules and the cell cycle: kinetics and experimental uncoupling of their formation from the nuclear cycle in onion root-tip cells. *Planta*, 174, 518-526. <https://doi.org/10.1007/BF00634482>.
- Misra, R. R. & Waalkes, M. P. (1998). Toxicología. Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales (Ed), Enciclopedia de Salud y Seguridad en el Trabajo, (pp. 33.35-33.38). Madrid, España. <http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/TextosOnline/Enciclopedia OIT/tomo1/33.pdf>.
- Montero, R., Serrano, L., Araujo, A., Dávila, V., Ponce, J., Camacho, R., ... & Méndez, A. (2006). Increased cytogenetic damage in a zone in transition from agricultural to industrial use: comprehensive analysis of the micronucleus test in peripheral blood lymphocytes. *Mutagenesis*, 21(5), 335-342. <https://doi.org/10.1093/mutage/gel040>.

- Morales-Novelo, J. A., Rodríguez-Tapia, L., Torres-Ayala, F. (2015). Modelo de contaminación del río Atoyac e incidencia de enfermedades en la región Puebla – Tlaxcala. <https://docplayer.es/40068499-Modelo-de-contaminacion-del-rio-atoyac-e-incidencia-de-enfermedades-en-la-region-puebla-tlaxcala.html>.
- Municipios. (12 de septiembre de 2022). *Manantiales se queja por descarga de aguas residuales de Cuautlancingo*. <https://municipiospuebla.mx/nota/2016-10-13/san-pedro-cholula/manantiales-se-queja-por-descarga-de-aguas-residuales-de>.
- Muñoz-Nava, H., Suárez-Sánchez, J., Vera-Reyes, A., Orozco-Flores, S., Batlle-Sales, J., Ortiz-Zamora, A. D. J., & Mendiola-Argüelles, J. (2012). Demanda bioquímica de oxígeno y población en la subcuenca del Río Zahuapan, Tlaxcala, México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 28(1), 27-38. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-49992012000100003&lng=es&tlng=es.
- Navarro-González, I.; Flores-Valverde, E. & Valladares, R. (2004). Evaluación ambiental y epidemiológica para identificar factores de riesgo a la salud por contaminación del río Atoyac, México. *Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental*, 29, 1-8. <https://docplayer.es/8096200-Evaluacion-ambiental-y-epidemiologica-para-identificar-factores-deriesgo-a-la-salud-por-contaminacion-del-rio-atoyac-mexico.html>.
- Nikolaou, A. D., Golfinopoulos, S. K., Kostopoulou, M. N., Kolokythas, G. A., & Lekkas, T. D. (2002). Determination of volatile organic compounds in surface waters and treated wastewater in Greece. *Water Research*, 36(11), 2883-2890. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(01\)00497-3](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(01)00497-3).
- OCDE. (2013). Estudio territorial: Puebla-Tlaxcala, México, México: OCDE. https://www.oecd-ilibrary.org/urban-rural-and-regional-development/ocde-estudio-territorial-puebla-tlaxcala-mexico-2013_9789264208490-es.
- Ohe, T., Watanabe, T., & Wakabayashi, K. (2004). Mutagens in surface waters: a review. *Mutation Research/Reviews in Mutation Research*, 567(2-3), 109-149. <https://doi.org/10.1016/j.mrrev.2004.08.003>.
- Organización Mundial de la Salud, OMS (2017). Agua, saneamiento e higiene. Recuperado de https://www.who.int/water_sanitation_health/water-quality/es/.
- Orozco-Barrenetxea, C., Pérez-Serrano, A., González-Delgado, M.N., Rodríguez-Vidal, F.J. & Alfayate-Blanco, J. M. (2003). *Contaminación Ambiental. Una visión desde la Química*. España: Thomson.
- Palacio, S. M., Espinoza-Quiñones, F. R., Galante, R. M., Zenatti, D. C., Seolatto, A. A., Lorenz, E. K., Zacarkim, C. E., Rossi, N., De Almeida Rizzutto, M., & Tabacniks, M. H. (2005). Correlation between heavy metal ions (copper, zinc, lead) concentrations and root length of *Allium cepa* L. in polluted river water. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, 48, 191–196. <https://doi.org/10.1590/s1516-89132005000400024>.

- Paleta-Pérez, G. (2014). El sistema de cargos en la configuración de la clase obrera con orígenes rurales en la región de Cholula, Puebla. *Dimensión Antropológica*, 61, 97-118. <https://www.dimensionantropologica.inah.gob.mx/wp-content/uploads/04Dimension61.pdf>.
- Peña, C.E., Carter, D.E. & Ayala-Fierro, F. (2001). Evaluación de Riesgos y Restauración Ambiental, Southwest Hazardous Waste Program: A Superfund Basic Research and Training Program at the College of Pharmacy the University of Arizona. <https://es.scribd.com/doc/52214802/TOXICOLOGIA-AMBIENTAL>.
- Peralta-Zaragoza, O., Bahena-Román, M., Díaz-Benítez, C. E., & Madrid-Marina, V. (1997). Regulación del ciclo celular y desarrollo de cáncer: perspectivas terapéuticas. *Salud pública de México*, 39, 451-462. <https://www.scielosp.org/article/spm/1997.v39n5/451-462/es/?fbclid=IwAR1ryM44fCLLsdNnYmVZZRwiX0VQB0j7OC14G2RpDvXWeSsqpbK4i-CDGYU>
- Pérez-Castresana, G., Tamariz-Flores, V., López-Reyes, L., Hernández-Aldana, F., Castelán-Vega, R., Morán-Perales, J. L., García-Suastegui, W. A., Díaz-Fonseca, A. & Handal-Silva, A. (2018). Atoyac River Pollution in the Metropolitan Area of Puebla, México. *Water*, 10, 267, 1-17. <https://doi.org/10.3390/w10030267>.
- Pérez-Pompa, N. E., Marañón-Reyes, A. M., González-Marañón, A., Rodríguez-Mendoza, Y., & Naranjo-López, C. (2012). Estudio de la correlación entre el índice biótico bmwp-cub y parámetros físicoquímicos en el río Gascón de Santiago de Cuba. *Revista Cubana de Química*, 24(3), 231-242. <https://www.redalyc.org/pdf/4435/443543727005.pdf>.
- Posada, M. I. & Arroyave, M. 2006. Efectos del mercurio sobre algunas plantas acuáticas tropicales. *EIA*, (6), 57-67. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1794-12372006000200006
- Red Madrileña de Tratamientos Avanzados para Aguas Residuales con Contaminantes no Biodegradables (REMTAVARES). (2007). <http://www.madrimasd.org/blogs/remtavares/2007/05/10/65346>.
- Repetto, M. (2009). Toxicología Fundamental. Madrid, España: Díaz de Santos. <http://www.editdiazdesantos.com/wwwdat/pdf/9788479788988.pdf>.
- Rhind, S. (2009). Anthropogenic pollutants: a threat to ecosystem sustainability? *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 364(1534), 3391-3401. <https://doi.org/10.1098/rstb.2009.0122>.
- Roca, A. A., & Guerrero, A. M. (2021). Efecto citotóxico por cobre en *Allium cepa* (Amaryllidaceae). *Arnaldoa*, 28(3), 727-746. <http://dx.doi.org/10.22497/arnaldoa.283.28315>.
- Rodríguez, L. & Morales, J. (2014). Contaminación del Atoyac, daños ambientales y tecnologías de mitigación. Primera Edición. UAM, México.
- Rodríguez, M. T. V. (2006). La industrialización en Puebla, México, 1835-1976. In *Encuentro de Latinoamericanistas Españoles (12. 2006. Santander): Viejas y nuevas alianzas entre América Latina y España* (pp. 650-662). CEEIB. <https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-00103437/>.

- Rodríguez-Espinosa, P. F., Shrutji, V. C., Jonathan, M. P., & Martínez-Tavera, E. (2018). Metal concentrations and their potential ecological risks in fluvial sediments of Atoyac River basin, Central Mexico: Volcanic and anthropogenic influences. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 148, 1020-1033. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.11.068>.
- Rodríguez-Momroy, J., & Durán-de-Bazúa, C. (2006). Remoción de nitrógeno en un sistema de tratamiento de aguas residuales usando humedales artificiales de flujo vertical a escala de banco. *Tecnología, Ciencia, Educación*, 21(1), 25-33. <https://www.redalyc.org/pdf/482/48221104.pdf>
- Rodríguez-Soto, J. C., Barazorda-Miranda, C. E., Pollack-Velásquez, L., Contreras-Quiñones, M., & Aldama-Reyna, C. W. (2018). Citotoxicidad y genotoxicidad de nanopartículas de oro sintetizadas por ablación láser sobre *Allium cepa* L. (Amaryllidaceae). *Arnaldoa*, 25(3), 1015-1026. <http://doi.org/10.22497/arnaldoa.253.25313>
- Rodríguez-Tapia, L., Morales-Novelo, J. A. & Zavala-Vargas, P. (2012). Evaluación socioeconómica de daños ambientales por contaminación del río Atoyac en México. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 3, 143-151. <http://www.redalyc.org/pdf/3535/353531980010.pdf> 01/10/2019
- Roldán-Reyes, E. (2016). Introducción a la toxicología. https://www.researchgate.net/profile/Elia-Roldan/publication/331269448_Introduccion_a_la_toxicologia/links/5f441934a6fdcccc43faa50f/Introduccion-a-la-toxicologia.pdf
- Roldán-Reyes, E. (2016). Introducción a la Toxicología. Universidad Nacional Autónoma de México: UNAM, FES. <https://www.zaragoza.unam.mx/portal/wpcontent/Portal2015/publicaciones/libros/cbiologicas/libros/Toxico-ago18.pdf>.
- Román, J. V. (2016). Talleres de mezclilla y transformaciones sociambientales en un municipio rural. El caso de Tepetitla de Lardizábal, Tlaxcala, México. *Sociedad y Ambiente*, (11), 68-91. https://planeader.puebla.gob.mx/pdf/ProgramasRegionales2020/0_ProRegionales%2021-31%20Puebla.pdf.
- Rosas-Landa, O. (2017, 28 de agosto). El Alto Atoyac y la contaminación que no cesa. Animal político. <https://www.animalpolitico.com/verdad-justicia-y-reparacion/alto-atoyac-devolver-la-vida-al-rio-las-comunidades/>.
- Rosas-Salas, S. F. (2013). Agua e industria en Puebla. El establecimiento de la fábrica textil La Covadonga, 1889-1897. *Relaciones. Estudios de historia y sociedad*, 34(136), 223-264. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0185-39292013000400009.
- Salas Quintanal, H., & Rivermar, M. L. (2015). Nativitas, Tlaxcala. La construcción en el tiempo de un territorio rural. Instituto de Investigaciones Antropológicas. <http://ru.ii.unam.mx:8080/handle/10684/21>.
- Salazar-Exaire, C. (2006). El agua en la conformación de la ciudad de Puebla. Boletín del Archivo Histórico del Agua, 11(32),39-49. <http://132.248.9.34/hevila/Boletindelarchivohistoricodelagua/2006/vol11/no32/4.pdf>.

- Saldaña, P., Lerdo, T. A., Gómez, M. A., & López, R. (2002). La importancia de incluir análisis de toxicidad en descargas industriales y municipales que afectan a los cuerpos receptores. *Instituto Mexicano de Tecnología del Agua*, 1-11. https://www.researchgate.net/profile/PilarSaldana/publication/228775202_Importancia_de_incluir_analisis_de_toxicidad_en_descargas_industriales_y_municipales_que_afectan_a_los_cuerpos_receptores/links/546e17db0cf2b5fc17603de1/Importancia-de-incluir-analisis-de-toxicidad-en-descargas-industriales-y-municipales-que-afectan-a-los-cuerpos-receptores.pdf.
- Saldaña-Fabela, P. S., & Gómez-Balandra, M. A. (2001). Caracterización de fuentes puntuales de contaminación en el Río Atoyac, México. XXX Congreso Interamericano Ingeniería sanitaria y Ambiental, del 26 al 30 de noviembre, Punta del Este, Uruguay. http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/uruguay30/mx08163_saldana_fabela.pdf.
- Salmerón Mendoza, Y. E., & Urbina Alvarado, B. D. L. C. (2012). *Determinación de plomo en raíces de Valeriana officinalis, Smilax aspera L. y Panax ginseng mediante la marcha analítica y la bitoxicidad por Alliumcepa L* [tesis de pregrado, Universidad Autónoma de Nicaragua]. <http://riul.unanleon.edu.ni:8080/jspui/handle/123456789/6074>
- Samboni-Ruiz, N. E., Carvajal Escobar, Y., & Escobar, J. C. (2007). Revisión de parámetros fisicoquímicos como indicadores de calidad y contaminación del agua. *Ingeniería e investigación*, 27(3), 172-181. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/28869>.
- Sandoval-Villasana A., Pulido-Flores G., Monks S., Gordillo Martínez A. J. y Villegas-Villareal E.C. (2009). Evaluación fisicoquímica, microbiológica y toxicológica de la degradación ambiental del río Atoyac, México. *Interciencia*, 34(12), 880-886. https://www.uaeh.edu.mx/investigacion/icbi/LI_Helminetos/Griselda_Pulido/sandoval2009a.pdf.
- Sarac, I., Bonciu, E., Butnariu, M., Petrescu, I., & Madosa, E. (2019). Evaluation of the cytotoxic and genotoxic potential of some heavy metals by use of Allium test. *Caryologia. International Journal of Cytology, Cytosystematics and Cytogenetics*, 72(2), 37-43. <https://doi.org/10.13128/cayologia-256>
- Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL). (2013a). Catálogo de localidades: San Lorenzo Almecatla. <http://www.microrregiones.gob.mx/catloc/contenido.aspx?refnac=210410023>.
- Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL). (2013b). Catálogo de localidades: San Pedro Cholula. <http://www.microrregiones.gob.mx/catloc/LocdeMun.aspx?tipo=clave&campo=loc&ent=21&mun=140>.
- Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL). (2013c). Catálogo de localidades: San Andrés Cholula. <http://www.microrregiones.gob.mx/catloc/LocdeMun.aspx?tipo=clave&campo=loc&ent=21&mun=119>.
- Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL). (2013d). Catálogo de localidades: Puebla. Recuperado de <http://www.microrregiones.gob.mx/catloc/LocdeMun.aspx?tipo=clave&campo=loc&ent=21&mun=114>.

- SEDESOL, CONAPO & INEGI. Delimitación de las zonas metropolitanas de México, 2010. Recuperado de http://www.conapo.gob.mx/es/CONAPO/Delimitacion_zonas_metropolitanas_2010_Capitulos_I_a_IV
- Sharma, A., Bora, C. R., & Shukla, V. (2013). Evaluation of Seasonal Changes in Physico-chemical and Bacteriological Characteristics of Water from the Narmada River (India) Using Multivariate Analysis. *Natural Resources Research*, 22(4), 283–296. <https://doi.org/10.1007/s11053-013-9204-x>.
- Silva, J., Fuentealba, C., Bay-Schmith, E., & Larrain, A. (2007). Estandarización del bioensayo de toxicidad aguda con *Diplodon chilensis* usando un tóxico de referencia. *Gayana (Concepción)*, 71(2), 135-141. <http://dx.doi.org/10.4067/S0717-65382007000200001>
- Silva, S., Muñoz, O., De la Isla de Bauer, M., Infante, G. (2002). Contaminación ambiental en la región de Atlitico: 1 Agua. *Terra Latinoam*, 20, 243–251. <https://www.redalyc.org/pdf/573/57320303.pdf>.
- Tarazona, J. V., & Ramos-Peralonso, M. J. (2014). *Ecotoxicology. Encyclopedia of Toxicology*, 276–280. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-386454-3.00494-2>.
- Tchounwou, P. B., Yedjou, C. G., Patlolla, A. K., & Sutton, D. J. (2012). Heavy metal toxicity and the environment. In *Molecular, clinical and environmental toxicology* (pp. 133-164). Springer, Basel. https://doi.org/10.1007/978-3-7643-8340-4_6.
- Teitelbaum, D. T. (2009) Introducción a la toxicología ocupacional y ambiental». Escrito en Estados Unidos. En Bertram G Katzung; Susan B Masters; Anthony J Trevor, eds. *Farmacología básica y clínica*. Lange médica book (11a edición edición). México: McGraw-Hill-Lange. 987-998. ISBN 9786071503367.OCLC 699461359
- Téllez Palacios, M. J., Torres Blandon, I. L., & Treminio Juárez, F. J. (2014). *Determinación cualitativa de plomo en especies marinas obtenidas en Poneloya mediante el Bioensayo Allium Cepa L y marcha analítica, enero-mayo 2014* [tesis de pregrado, Universidad Autónoma de Nicaragua]. <http://riul.unanleon.edu.ni:8080/jspui/bitstream/123456789/3146/1/227090.pdf>
- Toro, M., Robles, S., Avilés, J., Nuño, C., Vivas, S., Bonada, N., ... & Jáimez-Cuéllar, P. (2002). Calidad de las aguas de los ríos mediterráneos del proyecto GUADALMED. Características físicoquímicas. *Limnetica*, 21(3-4), 63-75. <http://www.limnologia.com/documentos/limnetica/limnetica-21-2-p-63.pdf>.
- U.S. Environmental Protection Agency. (2020). Drinking Water. National Primary Drinking Water Regulations, Volatile Organic Contaminants. <https://www.epa.gov/ground-water-and-drinking-water/national-primary-drinking-water-regulations>.
- Urbano de Tlaxcala. (2013). Actualización del plan de desarrollo de la Zona Metropolitana Puebla – Tlaxcala. Periódico Oficial No. 33. Segunda Sección. <http://periodico.tlaxcala.gob.mx/indices/Peri33-3a2013.pdf>
- Valencia-Quintana, R., Gómez-Olivares, J. L., Sánchez-Alarcón, J., Castillo-Cadena, J. & Waliszewski, S. (2009). Potencial genotóxico de aguas superficiales y sedimentos del Sistema

Hidrológico Atoyac-Zahuapan y de efluentes industriales en el estado de Tlaxcala. *Ciencia en la frontera: revista de ciencia y tecnología de la UACJ*, 7(1), 61-71. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/235996943_Potencial_genotoxico_de_aguas_superficiales_y_sedimentos_del_Sistema_Hidrologico_Atoyac-Zahuapan_y_de_efluentes_industriales_en_el_estado_de_Tlaxcala.

Valencia-Quintana, R., Sánchez-Alarcón, J. L., Gómez-Arroyo, S., Cortes-Eslava, J., Waliszewski, S., Fernández, S. & Villalobos-Pietrini, R. (2013). Genotoxicidad de plaguicidas en sistemas vegetales. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 29, 133-157. www.revistascca.unam.mx.

Vázquez-Ramos, J.M. & Sánchez, M.P. (2003) The cell cycle and seed germination. *Seed Sci Res*, 13, 113-130. <https://doi.org/10.1079/SSR2003130>

Velasco-Santos, P. (2014). Antropología socioambiental: ecología política, sujetos rurales y transformación del Río Atoyac en el municipio De Nativitas, Tlaxcala (Tesis doctoral, Universidad Nacional Autónoma de México]. Recuperado de <http://132.248.9.195/ptd2014/febrero/0708905/0708905.pdf>.

Ventura-Rodríguez, M. T. (2006). La industrialización en Puebla, México, 1835-1976. Encuentro de Latinoamericanistas Españoles: Viejas y nuevas alianzas entre América Latina y España, 2006, s.l., España. pp.650-662. <https://econpapers.repec.org/paper/haljournal/halshs-00103437.htm>.

Vergara-García, A. P. (2010). Estandarización del ensayo del cometa alcalino en células de sangre periférica (Tesis de Pregrado, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia). <https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/8667/tesis619.pdf>.

Wang, J., Da, L., Song, K., & Li, B. L. (2008). Temporal variations of surface water quality in urban, suburban and rural areas during rapid urbanization in Shanghai, China. *Environmental Pollution*, 152(2), pp. 387-393. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2007.06.050>.

Wright, R. T., Boorse, D. F. (2010). Science and the Environment En B. Cummings (Ed.), *Environmental Science: Toward a sustainable future* (pp. 2-20). San Francisco, Estados Unidos: Pearson.

Yadav, A., Raj, A., Purchase, D., Ferreira, L. F. R., Saratale, G. D., & Bharagava, R. N. (2019). Phytotoxicity, cytotoxicity and genotoxicity evaluation of organic and inorganic pollutants rich tannery wastewater from a Common Effluent Treatment Plant (CETP) in Unnao district, India using *Vigna radiata* and *Allium cepa*. *Chemosphere*, 224, pp. 324-332. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.02.124>.

Yang, X. E., Wu, X., Hao, H. L., & He, Z. L. (2008). Mechanisms and assessment of water eutrophication. *Journal of Zhejiang University Science B*, 9(3), pp. 197-209. <https://doi.org/10.1631/jzus.B0710626>.

Yu, H. G., Dawe, R. K., Hiatt, E. N., & Dawe, R. K. (2000). The plant kinetochore. *Trends in Plant Science*, 5(12), 543-547. [https://doi:10.1016/s1360-1385\(00\)01789-1](https://doi:10.1016/s1360-1385(00)01789-1)

- Zambrano, J. (2019, 3 de febrero). Zona metropolitana de Puebla reporta explosión urbana de hasta 1,500%. MILENIO. <https://www.milenio.com/politica/comunidad/zona-metropolitana-puebla-reporta-explosion-urbana-1-500>.
- Zamora-Almazan, M. J. (2019). Factores de vulnerabilidad socioambiental en relación con fuentes de contaminación en Puebla-Tlaxcala [Tesis de maestría, Universidad Nacional Autónoma de México]. Recuperado de <https://repositorio.unam.mx/contenidos/3489952>.
- Zhang, W., Liu, W., Zhang, J., Zhao, H., Zhang, Y., Quan, X., Jin, Y. (2012). Characterisation of acute toxicity, genotoxicity and oxidative stress posed by textile effluent on zebrafish. *Journal of environmental sciences*, 24(11), pp. 2019-2027. [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(11\)61030-9](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(11)61030-9).
- Zhao, H., Duan, X., Stewart, B., You, B., & Jiang, X. (2013). Spatial correlations between urbanization and river water pollution in the heavily polluted area of Taihu Lake Basin, China. *Journal of Geographical Sciences*, 23(4), 735-752. <https://doi.org/10.1007/s11442-013-1041-7>.

ANEXO 1. NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-001-SEMARNAT-2021.

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.

1. Objetivo y campo de aplicación

La Norma Oficial Mexicana tiene por objeto establecer los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales, con el fin de proteger, conservar y mejorar la calidad de las aguas y bienes nacionales.

Es de observancia obligatoria para los responsables de las descargas de aguas residuales en cualquier tipo de cuerpo receptor propiedad de la Nación.

La Norma no aplica a las descargas de aguas provenientes de drenajes destinados exclusivamente para aguas pluviales ni a las descargas que se vierten directamente a sistemas de drenaje y alcantarillado municipales.

2. Referencias normativas

Los siguientes documentos referidos o los que los sustituyan, son necesarios para la correcta aplicación de esta Norma Oficial Mexicana.

2.1. Norma Mexicana NMX-AA-003-1980, Aguas residuales-Muestreo (cancela a la NMX-AA-003-1975). Declaratoria de vigencia publicada en el Diario Oficial de la Federación el 25 de marzo de 1980.

2.2. Norma Mexicana NMX-AA-005-SCFI-2013, Análisis de agua-Medición de grasas y aceites recuperables en aguas naturales, residuales y residuales tratadas-Método de prueba (cancela a la NMX-AA-005-SCFI-2000). Declaratoria de vigencia publicada en el Diario Oficial de la Federación el 11 de abril de 2014.

2.3. Norma Mexicana NMX-AA-007-SCFI-2013, Análisis de agua-Medición de la temperatura en aguas naturales, residuales y residuales tratadas-Método de prueba (cancela a la NMX-AA-007-SCFI-2000). Declaratoria de vigencia publicada en el Diario Oficial de la Federación el 23 de enero de 2014.

2.4. Norma Mexicana NMX-AA-008-SCFI-2016 Análisis de agua-Medición de pH en aguas naturales, residuales y residuales tratadas-Método de prueba (cancela a la NMX-AA-008-SCFI-2011). Declaratoria de vigencia publicada en el Diario Oficial de la Federación el 9 de septiembre de 2016.

2.5. Norma Mexicana NMX-AA-017-1980, Aguas-Determinación de color (cancela a la NMX-AA-017-1975). Declaratoria de vigencia publicada en Diario Oficial de la Federación el 11 de julio de 1980.

3. Términos y definiciones

Para los efectos de esta Norma se consideran las definiciones contenidas en la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, la Ley de Aguas Nacionales y su Reglamento, la Ley Federal de Derechos y la Ley Federal sobre Metrología y Normalización y su Reglamento, así como las siguientes:

3.1. Acta Circunstanciada:

Documento que emite la Comisión, la Procuraduría o la Unidad de Verificación en el que se harán constar en forma circunstanciada los hechos u omisiones que se hubiesen presentado durante la diligencia.

3.2. Aguas pluviales: Aquellas que precipitan de la atmósfera de forma natural, ya sea en forma de lluvias, nieve y/o granizo.

3.3 Carbono Orgánico Total: Es un indicador de la materia orgánica presente en el agua; también es conocido como la diferencia del carbono total menos el carbono inorgánico en una sola masa; y se conforma de las distintas fracciones como Carbono Orgánico Disuelto, Carbono Orgánico Purgable, Carbono Orgánico Suspendido, y Carbono Orgánico No Purgable.

3.4. Cianuros: Se refiere a todos los grupos CN- en compuestos cianurados que pueden ser determinados como ion cianuro.

3.5. Color verdadero: Es el color de la muestra debido a sustancias en forma disuelta, se mide en la muestra una vez que se eliminaron los sólidos suspendidos y pseudocoloidales para ello la muestra será filtrada o centrifugada.

3.6. Comisión: Comisión Nacional del Agua.

3.7. Concentración Efectiva Media (CE50): Concentración en la que una sustancia, materiales o mezcla de ellos, en forma pura o combinados en muestras ambientales o de proceso, genere efectos o cambios adversos en el 50% de los organismos de prueba expuestos o en el parámetro biológico seleccionado para evaluar el efecto tóxico.

3.8. Contaminantes patógenos y parasitarios: Son aquellos microorganismos, quistes y huevos de parásitos que pueden estar presentes en las aguas residuales y que representan un riesgo a la salud humana, flora o fauna. En lo que corresponde a esta Norma Oficial Mexicana sólo se consideran *Escherichia coli*, Enterococos fecales y los huevos de helmintos.

3.9. Coordenadas geográficas: Sistema de referencia que permite localizar un punto en la superficie de la tierra y que emplea para ello dos coordenadas angulares, Latitud (norte) y Longitud (oeste), expresadas en grados sexagesimales en sus tres componentes (Grados (°), minutos (') y segundos (")) y referenciadas al Datum WGS84.

3.10. Demanda Química de Oxígeno (DQO): La medida del oxígeno consumido por la oxidación de la materia orgánica e inorgánica en una prueba específica.

3.11. Dictamen de conformidad: Documento emitido por la Procuraduría, o la Unidad de Verificación o por la Comisión que avala el cumplimiento de la presente Norma.

4. Especificaciones

4.1. La concentración de parámetros básicos, así como de contaminantes patógenos y parasitarios, metales y cianuros para las descargas de aguas residuales a cuerpos receptores, no debe exceder el valor indicado como límite permisible de acuerdo al tipo de cuerpo receptor en las Tablas 1 y 2 de esta Norma Oficial Mexicana.

TABLA 1. Límites Permisibles

Parámetros (*) (miligramos por litro, excepto cuando se especifique)	Ríos, arroyos, canales, drenes			Embalses, lagos y lagunas			Zonas marinas mexicanas			Suelo								
										Riego de áreas verdes			Infiltración y otros riegos			Cárstico		
	P.M	P.D.	V.I.	P.M	P.D.	V.I.	P.M	P.D.	V.I.	P.M	P.D.	V.I.	P.M	P.D.	V.I.	P.M	P.D.	V.I.
Temperatura (°C)	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35
Grasas y Aceites	15	18	21	15	18	21	15	18	21	15	18	21	15	18	21	15	18	21
Sólidos Suspendidos Totales	60	72	84	20	24	28	20	24	28	30	36	42	100	120	140	20	24	28
Demanda Química de Oxígeno	150	180	210	100	120	140	85	100	120	60	72	84	150	180	210	60	72	84
Carbono Orgánico Total*	38	45	53	25	30	35	21	25	30	15	18	21	38	45	53	15	18	21
Nitrógeno Total	25	30	35	15	25	30	25	30	35	NA	NA	NA	NA	NA	NA	15	25	30
Fósforo Total	15	18	21	5	10	15	15	18	21	NA	NA	NA	NA	NA	NA	5	10	15
Huevos de Helminthos (huevos/litro)	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	1								
<i>Escherichia coli</i> , (NMP/100 ml)	250	500	600	250	500	600	250	500	600	250	500	600	250	500	600	50	100	200
Enterococos fecales* (NMP/100 ml)	250	400	500	250	400	500	250	400	500	250	400	500	250	400	500	50	100	200
pH (UpH)	6-9																	
Color verdadero	Longitud de onda									Coeficiente de absorción espectral máximo								
	436 nm									7,0 m ⁻¹								
	525 nm									5,0 m ⁻¹								
	620 nm									3,0 m ⁻¹								
Toxicidad aguda (UT)	2 a los 15 minutos de exposición																	
N.A: No Aplica P.M: Promedio Mensual P.D: Promedio Diario V.I: Valor Instantáneo NMP: Número más probable UpH: Unidades de pH UT: Unidades de Toxicidad * Si Cloruros es menor a 1000 mg/L se analiza y reporta DQO. * Si Cloruros es mayor o igual a 1000 mg/L se analiza y reporta COT. * Si la conductividad eléctrica menor a 3500 µS/cm se analiza y reporta <i>E. coli</i> . * Si la conductividad eléctrica es mayor o igual a 3500 µS/cm se analiza y reporta Enterococos fecales. Las determinaciones de Conductividad eléctrica y de Cloruros no requieren la acreditación y aprobación de la entidad correspondiente.																		

**TABLA 2
Límites Permisibles para Metales y Cianuros**

Parámetros (miligramos por litro)	Ríos, arroyos, canales, drenes			Embalses, lagos y lagunas			Zonas marinas mexicanas			Suelo								
										Riego de áreas verdes			Infiltración y otros riegos			Cárstico		
	P.M.	P.D.	V.I.	P.M.	P.D.	V.I.	P.M.	P.D.	V.I.	P.M.	P.D.	V.I.	P.M.	P.D.	V.I.	P.M.	P.D.	V.I.
Arsénico	0,2	0,3	0,4	0,1	0,15	0,2	0,2	0,3	0,4	0,2	0,3	0,4	0,1	0,15	0,2	0,1	0,15	0,2
Cadmio	0,2	0,3	0,4	0,1	0,15	0,2	0,2	0,3	0,4	0,05	0,075	0,1	0,1	0,15	0,2	0,05	0,075	0,1
Cianuro	1	2	3	1	1,5	2	2	2,50	3	2	2,5	3	1	1,50	2	1	1,5	2
Cobre	4	5	6	4	5	6	4	5	6	4	5	6	4	5	6	4	5	6
Cromo	1	1,25	1,5	0,5	0,75	1	1	1,25	1,5	0,5	0,75	1	0,5	0,75	1	0,5	0,75	1
Mercurio	0,01	0,015	0,02	0,005	0,008	0,01	0,01	0,015	0,02	0,005	0,008	0,01	0,005	0,008	0,01	0,005	0,008	0,01
Níquel	2	3	4	2	3	4	2	3	4	2	3	4	2	3	4	2	3	4

Plomo	0,2	0,3	0,4	0,2	0,3	0,4	0,5	0,75	1	0,5	0,75	1	0,2	0,3	0,4	0,2	0,3	0,4
Zinc	10	15	20	10	15	20	10	15	20	10	15	20	10	15	20	10	15	20
Parámetros medidos de manera total	P.M: Promedio Mensual P.D: Promedio Diario V.I: Valor Instantáneo																	

5. Métodos de prueba

5.1. Para determinar los valores y concentraciones de los parámetros establecidos en esta Norma Oficial Mexicana, se deberán aplicar las normas mexicanas según corresponda, indicadas en el capítulo 2.

5.2. Para determinar la toxicidad aguda de las descargas de aguas residuales vertidas a cuerpos receptores, los análisis deberán efectuarse mediante muestras simples. La evaluación se realizará a través de *Vibrio fischeri* (*Photobacterium phosphoreum*). El límite permisible es menor o igual a 2 Unidades de Toxicidad (UT). Las Unidades de Toxicidad (UT), se determinan por la fórmula:

$$1 \text{ UT} = 100/\text{CE50}$$

Donde:

CE50 es la concentración que genera efectos adversos, letales o no letales en el 50% de los organismos de prueba expuestos o en el parámetro biológico seleccionado para evaluar el efecto tóxico.

5.3. El responsable de la descarga de aguas residuales debe verificar que los métodos para el muestreo y análisis utilizados por los laboratorios de prueba, sean los establecidos en el numeral 2. Referencias normativas de la presente norma.

Los laboratorios de prueba a que hace referencia el párrafo anterior, deberán ser acreditados por la entidad de acreditación y aprobados por la autoridad competente.

El responsable de la descarga podrá solicitar a la Secretaría, la autorización de métodos de prueba alternos conforme a lo establecido en la legislación aplicable en la materia.

6. Muestreo

6.1. El responsable de la descarga realizará el monitoreo de las descargas de aguas residuales para determinar el promedio diario y el mensual, con la periodicidad establecida en el numeral 6.2 a través de un laboratorio.

6.2. La periodicidad de los muestreos, análisis e informe de resultados se indican en la Tabla 3 para descargas de tipo municipal y en la Tabla 4 para descargas no municipales. En situaciones que justifiquen un mayor control, como protección de fuentes de abastecimiento de agua para consumo humano, emergencias hidroecológicas o procesos productivos fuera de control, la Comisión podrá modificar la periodicidad de muestreo, análisis e informe de resultados.

7. Procedimiento para la evaluación de la conformidad

7.1. La Comisión, la Procuraduría o las Unidades de Verificación podrán evaluar la conformidad de la presente norma a petición de parte, para fines particulares u oficiales en los términos establecidos por la Ley Federal sobre Metrología y Normalización.

7.2. La Secretaría por conducto de la Comisión aprobará los Laboratorios y las Unidades de Verificación, en los términos establecidos en la Ley Federal sobre Metrología y Normalización. Los Laboratorios realizarán el muestreo y el análisis de las muestras que se requieran para la evaluación de la conformidad de la presente norma.

7.3. La Comisión mantendrá actualizado en su página electrónica el listado de las Unidades de Verificación y los Laboratorios.

7.4. En caso de que la evaluación de la conformidad se realice a través de una Unidad de Verificación, ésta notificará a la Comisión el inicio de los trabajos, se coordinará con el Laboratorio seleccionado por el interesado, y deberá constatar e informar a la Comisión la siguiente información:

7.5. Los gastos que se originen por los servicios de evaluación de la conformidad, serán a cargo del interesado conforme a lo establecido en el Artículo 91 de la Ley Federal sobre Metrología y Normalización.

7.6. El proceso de evaluación se realizará mediante una visita de verificación durante la cual se levantará un acta circunstanciada que deberá ser firmada por quienes en ella intervinieron. La negativa del interesado a firmar el acta circunstanciada no afectará su validez.

7.7. El Laboratorio que realice el muestreo emitirá un informe de resultados de muestreo y análisis y al término de la verificación, quien realice la Evaluación de la conformidad emitirá y firmará el Dictamen de Conformidad que integrará todos los datos recabados durante las acciones de verificación y los resultados del análisis de Laboratorio.

7.8. Para emitir el dictamen de conformidad se debe:

7.9. En el caso de que el dictamen de conformidad resulte no favorable, se procederá conforme a las disposiciones jurídicas vigentes.

7.10. El dictamen de conformidad no exime al responsable de efectuar el muestreo y análisis que se estipula en las Tablas 3 y 4 de esta Norma Oficial Mexicana.

7.11. El dictamen de conformidad favorable expedido por una Unidad de Verificación será reconocido por las autoridades competentes.

7.12. El cumplimiento de lo establecido en el capítulo 7 de esta Norma, no sustituye a las visitas de inspección y vigilancia que la autoridad puede realizar en el ejercicio de las atribuciones que le confiere la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, la Ley de Aguas Nacionales, la Ley Federal de Derechos, y demás ordenamientos jurídicos.

7.13. La Comisión, es la autoridad competente para resolver controversias en la interpretación de este procedimiento de evaluación de la conformidad.

8. Concordancia con normas internacionales

Esta Norma Oficial Mexicana no es equivalente (NEQ) con ninguna Norma Internacional, por no existir esta última al momento de su elaboración.

ANEXO 2. NORMA MEXICANA NMX-AA-003-1980.
NORMA MEXICANA "AGUAS RESIDUALES - MUESTREO"
(Publicada en el **Diario Oficial de la Federación** el 6 de noviembre de 1992).

1. Objetivo y campo de aplicación

Esta norma establece los lineamientos generales y recomendaciones para muestrear las descargas de aguas residuales, con el fin de determinar sus características físicas y químicas, debiéndose observar las modalidades indicadas en las normas de métodos de prueba correspondientes.

2. Definiciones

2.1 Agua residual

Es el líquido de composición variada proveniente de usos municipal, industrial, comercial, agrícola, pecuario o de cualquier otra índole, ya sea pública o privada y que por tal motivo haya sufrido degradación o alteración en su calidad original.

2.2 Canal abierto

Cualquier conducto en el cual el agua fluye presentando una superficie libre.

2.3 Colector

Es un conducto abierto o cerrado que recibe las aportaciones de agua de otros conductos.

2.4 Descarga

Es el conjunto de aguas residuales que se vierten o disponen en algún cuerpo receptor.

2.5 Muestra simple

Es aquella muestra individual tomada en un corto período de forma tal que el tiempo empleado en su extracción sea el transcurrido para obtener el volumen necesario.

2.6 Muestra compuesta

Es la que resulta del mezclado de varias muestras simples.

3. Aparatos y equipo

3.1 Recipientes para el transporte y conservación de las muestras **3.2** Muestreadores automáticos

3.3 Válvulas y accesorios **3.4** Hielera o refrigerador

3.5 Material común de laboratorio

4. Identificación de muestras

4.1 Se deben emplear etiquetas pegadas o colgadas, o numerar los frascos anotándose la información en una hoja de registro. Estas etiquetas deben contener como mínimo la siguiente información.

Identificación de la descarga. Número de muestra.

Fecha y hora de muestreo. Punto de muestreo. Temperatura de la muestra. Profundidad de muestreo.

Nombre y firma de la persona que efectúa el muestreo.

4.2 Hoja de registro con los datos citados en el inciso 4.1.

5. Procedimiento

5.1 Cualquiera que sea el método de muestreo específico que se aplique a cada caso, debe cumplir los siguientes requisitos.

5.1.1 Las muestras deben ser representativas de las condiciones que existan en el punto y hora de muestreo y tener el volumen suficiente para efectuar en él las determinaciones correspondientes.

92

5.1.2 Las muestras deben representar lo mejor posible las características del efluente total que se descarga por el conducto que se muestrea.

5.1.3 Al efectuarse el muestreo, deben anotarse los datos según los incisos 4.1 y 4.2.2.

5.2 Muestreo en tomas.

5.3 Muestreo en descargas libres.

5.4 Muestreo en canales y colectores.

5.5 Cierre de los recipientes de muestreo.

5.6 Obtención de muestras compuestas.

5.7 Preservación de las muestras.

5.8 Preservar la muestra durante el transporte por medio de un baño de hielo y conservar las muestras en refrigeración a una temperatura de 277K (4°C).

5.9 Se recomienda que el intervalo de tiempo entre la extracción de la muestra y su análisis sea el menor posible y que no exceda de tres días.