

# Elementos para un nuevo acuerdo social por la contaminación de cuerpos de agua, daños y justicia social, caso Río Tula

*Elements for a new social agreement on water body contamination, damages and social justice: the case of the Tula River.*

Víctor Alcántara-Concepción<sup>1</sup>

Diana González-Tenorio<sup>2</sup>

Edelmira García-Nieto<sup>3</sup>

## Resumen

La situación de la contaminación por compuestos orgánicos en aguas superficiales y sus sedimentos plantea una preocupación importante a nivel local, regional y mundial, debido al potencial daño que causa a la salud pública y los ecosistemas a través de diversas vías. Es, por tanto, crucial identificar y cuantificar las fuentes de contaminación con el fin de desarrollar estrategias de gestión sostenible y encontrar nuevos mecanismos sociales que ayuden a las poblaciones a vivir en ambientes limpios y no solo permitan a los contaminadores, sean empresas o ciudades alejadas de estos sitios, seguir con estas dinámicas que provocan una pérdida regional de nuestros activos naturales. Este trabajo propone soluciones a un problema ambiental complejo, como lo puede ser la contaminación del Río Tula por contaminantes orgánicos, donde se describen las concentraciones en sedimentos, refiriendo la presencia de más de 65 compuestos en tres puntos muestreados, pero permitiendo mostrar la magnitud del impacto ambiental regional en este cuerpo de agua y discutiendo sobre el dilema que se presenta entre la contaminación presente, justicia socioambiental y el principio precautorio, con la propuesta de elementos para un plan de acción con la participación multidisciplinaria en un conflicto socio jurídico de naturaleza ambiental y con la participación de actores sociales directamente afectados por estas prácticas económico-sociales en un nuevo acuerdo social.

## Abstract

The pollution conditions by organic compounds in surface waters and their sediments pose an important preoccupation at a local, regional and global level, with the potential damage to public health and ecosystems through various ways. It is therefore crucial to identify and quantify the sources of pollution to develop sustainable management strategies and found new social mechanisms that help populations live in clean environments and not only allow polluters, be they companies or cities far from these sites, to continue with these dynamics that cause a loss regional of our natural assets. This work proposes solutions to a complex environmental problem, such as the contamination of the Tula River by organic contaminants, where the concentrations in sediments are described, referring the presence of more than 65 compounds in three sampled points but allowing the magnitude of the impact be shown, regional environmental in this body of water and discussing the dilemma that arises between the present contamination, socio-environmental justice and the precautionary principle, with the proposal of elements for an action plan with multidisciplinary participation in a socio-legal conflict of an environmental and with the participation of social actors directly affected by these economic-social practices in a new social agreement.

1 Centro de Investigación en Genética y Ambiente, Universidad Autónoma de Tlaxcala. México.  
ORCID. [orcid.org/0000-0003-1301-2839](https://orcid.org/0000-0003-1301-2839) Correo: [victor.alcantara.con@gmail.com](mailto:victor.alcantara.con@gmail.com)

2 Facultad de Estudios Superiores Iztacala. Universidad Nacional Autónoma de México.  
ORCID. [orcid.org/0000-0002-4563-3931](https://orcid.org/0000-0002-4563-3931) Correo: [diana6710@gmail.com](mailto:diana6710@gmail.com)

3 Centro de Investigación en Genética y Ambiente, Universidad Autónoma de Tlaxcala. México.  
ORCID. [orcid.org/0000-0002-6187-0208](https://orcid.org/0000-0002-6187-0208) Correo: [mirosgn@yahoo.com.mx](mailto:mirosgn@yahoo.com.mx)

**Palabras clave:** compuestos orgánicos tóxicos, riesgos a la salud y biota, sociedad y justicia socioambiental, río Tula, sedimentos.

**Keywords:** toxic organic compounds, health and biota risks, society and socio-environmental justice, Tula River, sediments.

## Antecedentes

El impacto humano sobre el ambiente, provocó la modificación de los ciclos biogeoquímicos naturales de los elementos, en los que los sedimentos son reconocidos como importantes sumideros de contaminantes orgánicos e inorgánicos. Se ha acuñado el término “ciclos antropogeoquímicos”, para enfatizar el papel de los cambios inducidos por el hombre (Rauch, 2012), lo cual significa que la contaminación antropogénica está bien documentada a escala global. La historia de la contaminación desde la época preindustrial, se conoce a partir de muchos estudios de sedimentos fechados y núcleos de turba con aumento de concentraciones de elementos químicos, estableciendo así el aumento histórico de la contaminación en las regiones. Por ejemplo, la gasolina sin plomo se introdujo en la década de 1980 y, desde entonces, las concentraciones de Pb han disminuido sustancialmente, mientras que las proporciones  $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$  han aumentado significativamente, debido a que este uso de combustibles alteró los niveles “naturales”, provocando importantes daños a ecosistemas y a la misma salud humana. En cuanto a los contaminantes orgánicos encontrados en cuerpos de agua, se identifica una amplia variedad de productos comerciales con altos contenidos de compuestos orgánicos, como disolventes, pinturas, adhesivos, plásticos, aromatizantes, gasolinas, gas natural y otros productos empleados en procesos industriales, de donde se utilizan y después se liberan al ambiente, terminando en sitios naturales.

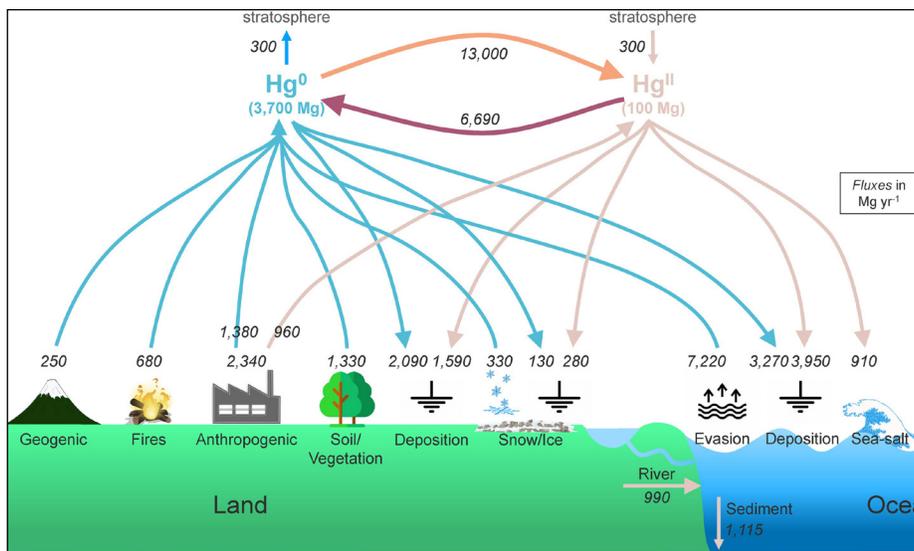
En la actualidad, en el llamado “antropoceno”, los ríos se encuentran fuertemente impactados por actividades humanas muy diversas que alteran sus características físicas, químicas, biológicas, hidrológicas y morfológicas. La creciente contaminación del agua representa una amenaza para la supervivencia y la seguridad humana. El deterioro de los cuerpos de agua naturales aumenta el costo de obtener recursos hídricos limpios y seguros, lo que induce directamente la escasez de agua para las comunidades a nivel local. Los cuerpos de agua naturales se transforman y deterioran debido a las actividades humanas, por el vertido de aguas residuales en diferentes áreas rurales, urbanas y periurbanas, provocando situaciones difíciles de restaurar naturalmente, lo cual pone en peligro la salud de las personas en pueblos y rancherías, limitando el crecimiento de la economía local y provocando una precaria calidad de vida (Meybeck, 2002).

La generación global de aguas residuales está estimada en  $359.4 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{año}$ , de los cuales el 63 % ( $225.6 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{año}$ ) se recolectan y el 52 % ( $188.1 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{año}$ ) se tratan. Por tanto, se estima que el 48 % de la producción mundial de aguas residuales se libera al ambiente sin tratamiento, donde se reutiliza intencionalmente. El  $40.7 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{año}$  del agua residual es tratada a nivel mundial, pero es insuficiente, ya que prácticamente el 50% del agua contaminada por actividades entrópicas sigue afectando a la biota, ecosistemas y comunidades (Jones et al., 2021).

## Cuadro 1. Problemática del mercurio y el Convenio de Minamata

### La magnitud de la presencia de mercurio en el planeta:

Las mediciones en diferentes compartimentos ambientales nos muestran que las cantidades atmosféricas totales actuales son de 9.000 toneladas (ton) cada año de Mercurio (Hg), con emisiones antropogénicas de 2,000 ton/año y reemisiones terrestres y oceánicas de 2,000 y 5,000 ton/año respectivamente. La deposición atmosférica está equilibrada con respecto a las emisiones totales de Hg: la tierra y el océano reciben ~3,000 y ~6,000 ton/año, respectivamente, lo que supone una acumulación neta anual en la tierra y océanos de ~1.000 ton/año en cada matriz ambiental. Las emisiones geogénicas y la precipitación del Hg al fondo del océano son generalmente en mucho menores cantidades: ~300 ton/año.



Tomado de Zhang et al., 2023.

### Convenio de Minamata

Con los datos descritos, se puede afirmar que el mercurio (Hg), es un problema ambiental y de salud pública de preocupación planetaria que, en agosto de 2017, detonó un consenso internacional en la Organización de Naciones Unidas, en cuyo marco se adoptó el Convenio de Minamata sobre el Mercurio (MCM). El objetivo principal del convenio es reducir las emisiones (aire) y las liberaciones (agua y suelo) de Hg antropogénico, así como proteger el ambiente y la salud humana. (minamataconvention.org). Este tratado debe servirnos como ejemplo en la prohibición del uso de compuestos orgánicos, como los analizados y presentados en este trabajo, que afectan invariablemente a las comunidades, pueblos y/o los seres vivos de forma local, nacional y regional (Zhang et al., 2023).

## Situación de los recursos hídricos en el Valle del Mezquital y la contaminación con compuestos orgánicos

México cuenta con 471.5 mil millones de metros cúbicos de agua dulce renovable cada año y está considerado como un país con baja disponibilidad de agua. La agricultura y la ganadería consumen el 76.3% del agua en el país. En el mundo, estas actividades consumen en promedio el 70% del agua. En México, se consume el 13% del agua dulce, mientras que el promedio mundial es del 22% (FCEA, 2010).

### Cuadro 2. Principio Precautorio para el uso de sustancias químicas

#### **Principio Precautorio bajo niveles de contaminantes orgánicos en sedimentos.**

El Principio 15 de la Declaración de Río sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo dice lo siguiente: “Cuando existan amenazas de daños graves o irreversibles, la falta de certeza científica total no se utilizará como razón para posponer medidas rentables para prevenir la degradación ambiental”. En el contexto de la gestión de productos químicos, durante más de 40 años se ha argumentado por la comunidad científica que la priorización en la decisión en su uso o liberación al ambiente debería regirse por la persistencia de un compuesto orgánico. En la práctica, la persistencia se adopta como criterio clave para incluir sustancias químicas en el Convenio Internacional de Estocolmo sobre contaminantes orgánicos, un tratado global que se guía por el principio precautorio.

Aunque existe una resistencia por gobiernos nacionales, municipales y empresas para regirse por este principio preventivo, subestimando los efectos adversos no reversibles o efectos crónicos de las sustancias químicas. Se torna imprescindible tomar medidas sociales, educativas y regulatorias inmediatas para evitar mayores emisiones o descargas que provoquen la afectación de la flora y fauna para evitar futuros escenarios donde la sociedad podría enfrentarse a un planeta con especies vivas, la naturaleza o la salud humana en riesgo (Cousins et al., 2016).

En México, el 76% del agua concesionada se destina a uso agrícola, pecuario y acuícola; mientras que el 15% se destina al uso público urbano-doméstico y a otros usos conectados a las redes de agua potable. El 5% del agua se utiliza para actividades no domésticas autoabastecidas, como la industria, comercio y servicios. Por último, el 4% se destina para la generación de electricidad, sin contar la hidroelectricidad. Además, 60% de los cuerpos de agua presentan algún grado de contaminación y solo 50% del volumen recolectado en alcantarillado recibe tratamiento, esto sumado a que 71% del territorio nacional presenta un grado de presión hídrica<sup>4</sup> alto o muy alto (González et al., 2022).

Las crecientes presiones hídricas son una realidad nacional y regional inculcable que merece atención inmediata y eficaz. Las regiones hidrológico-administrativas que exhiben los mayores grados de presión hídrica del país son: XIII. Aguas del Valle

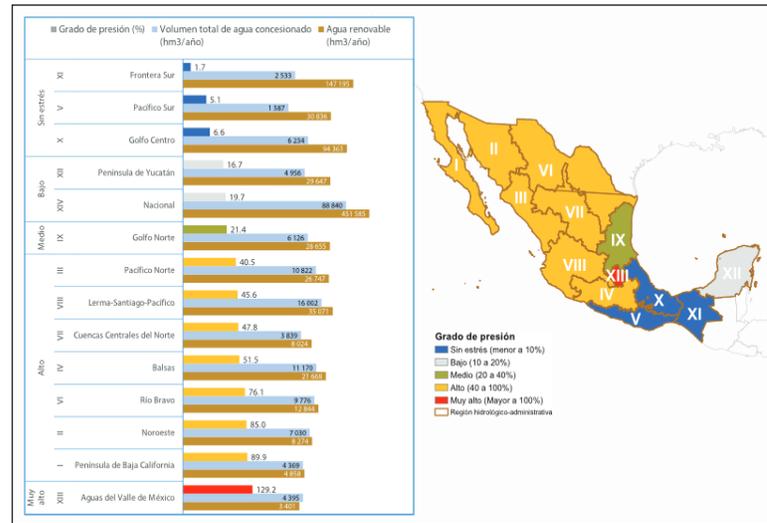
<sup>4</sup> El grado de presión hídrica es el cociente que resulta de dividir el volumen concesionado de agua al año en estudio sobre la disponibilidad natural media de agua anual en estudio, dado en porcentajes, a diferentes escalas territoriales. Los grados de presión hídrica son: sin estrés hídrico, 0-10%; bajo, 10.1-20%; medio, 20.1-40%; alto, 40.1-100%; y muy alto, cuando ese cociente es mayor a 100% (Vega, 2019).

de México (139.1%, muy alto); II. Noroeste (81.5%, alto), donde esta presión hídrica ha crecido de manera significativa durante los 18 años más recientes). Estas nueve regiones representan 78% del territorio nacional, 93% de la superficie regada en los 88 distritos de riego y las más de 40 mil unidades de riego agrícola con que cuenta el país, más de 82% del producto interno bruto total y 77% de la población nacional (Vega, 2019).

En la región del Valle del Mezquital, las aguas residuales se utilizan para regar más de 90,000 ha de tierras de cultivo que producen forraje y productos comestibles. De los 1,663 millones de m<sup>3</sup> de aguas residuales exportadas desde la Ciudad de México al Valle del Mezquital, el 75.5 % se transporta a través de canales subterráneos denominados colectivamente como Emisor Central. Los 407.4 millones de m<sup>3</sup> restantes se entregan a la parte oriental del Valle del Mezquital a través de un canal a cielo abierto llamado Gran Canal. Aproximadamente el 60 % de las aguas residuales transportadas por el Emisor Central son tratadas en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) de Atonilco, y el resto es transportado por un aliviadero combinado de alcantarillado al río Tula y eventualmente ingresa sin tratamiento al distrito de riego en el Valle del Mezquital (Durán-Álvarez et al., 2023).

En la Agenda 2030 de Objetivos de Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas (ONU-ODS), de la cual México es miembro, incorpora estrategias para la mitigación de los efectos del cambio climático y la reducción de la contaminación ambiental, lo que implica la calidad del agua (Objetivo 6), mientras que el Convenio de Estocolmo pone el foco en varios Contaminantes Orgánicos Persistentes, asumiendo el enfoque del principio de precaución como base para proteger el ambiente y la salud humana. Sin embargo, la presencia de contaminantes orgánicos en el agua potable no solo es indeseable, sino perjudicial para los ecosistemas y la salud humana, produciendo consecuencias graves, especialmente para los miembros vulnerables de la sociedad, como los niños o los ancianos. Se ha demostrado que los bacteriófagos están presentes en aguas residuales no tratadas, que son persistentes en el medio ambiente y que tienen la capacidad de llegar a acuíferos confinados (Carrillo et al., 2021).

**Figura 1. Grado de presión hídrica regional 2018**



Fuente: CONAGUA, 2018; González et al., 2022.

En México, se utilizan agroquímicos como una práctica común para la producción de alimentos del campo. Particularmente en la región del Valle del Mezquital, los cuerpos de agua superficiales (arroyos y ríos) suelen llevar concentraciones a nivel traza (partes por billón o partes por trillón) de plaguicidas y fertilizantes que se infiltran al subsuelo o llegan hasta zonas costeras, creando un desequilibrio en los ecosistemas acuáticos y terrestres (Segarra et al., 2021).

### Justicia Socioambiental

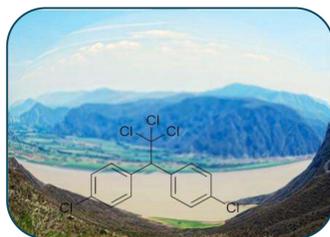
Según Delgado (2013), justicia socioambiental, es un término que se refiere a la salvaguarda de las personas cuya salud se ve afectada por agentes contaminantes y tóxicos, independientemente de sus identidades sociales. Se trata de solucionar problemas como la pérdida de biodiversidad, el cambio climático o las contaminaciones locales. Mientras se plantea que la justicia socioambiental se centra en los ideales de justicia e igualdad que las sociedades deben alcanzar para todos sus habitantes, también implica evaluar la causa fundamental de posibles injusticias y abogar por la disminución de las desigualdades que resultan en disparidades en salud. Además, la discriminación sistémica puede crear y perpetuar la injusticia socioambiental, incluidas políticas y leyes que impactan negativamente a las comunidades socialmente minorizadas.

La justicia socioambiental (JS), ha sido una preocupación central en una variedad de disciplinas. Tanto el concepto como su cobertura se han expandido sustancialmente en las últimas dos décadas. Este concepto se ha formado a partir de movimientos multifacéticos, luchas comunitarias y discursos en sociedades contemporáneas que buscan reducir los riesgos ambientales, aumentar la protección ambiental y, en general, reducir las desigualdades ambientales que sufren las minorías y las comunidades pobres. El término incorpora a otros como “racismo ambiental” y “clasismo ambiental”, que capturan la idea de que diferentes grupos raciales y socioeconómicos experimentan un acceso diferencial a la calidad ambiental (Kekana et al., 2023).

Brañes (2000), considera que la justicia socioambiental es la posibilidad de obtener la solución expedita y completa, por parte de las autoridades judiciales, de un conflicto jurídico de naturaleza ambiental, lo que supone que todas las personas están en igualdad de condiciones para acceder a la justicia y para obtener resultados individuales o colectivos justos, sin embargo, en términos reales, las condiciones sociales no son las mismas en sistemas capitalistas donde los más afectados siempre son los que tienen menor capacidad de obtener recursos o acceder a la justicia expedita por falta de estos mismos.

### LA JUSTICIA SOCIOAMBIENTAL

Es el trato justo y la participación significativa de todas las personas, independientemente de su raza, color, origen nacional o ingresos, con respecto al desarrollo, implementación y cumplimiento de las leyes, regulaciones y políticas ambientales, a las que agregaríamos el dialogo colectivo (Morcillo, 2018). El trato justo significa que ningún grupo de personas debe soportar una parte desproporcionada de las consecuencias ambientales negativas, incluyendo el uso de compuestos orgánicos y sus efectos negativos. Estas políticas gubernamentales, donde primero tiramos la piedra y después vemos que efecto tiene, deben erradicarse en beneficio de la sociedad y los ecosistemas existentes (Edersen, 2011).



Teniendo en cuenta la persistencia ambiental y la toxicidad del DDT, la Organización Panamericana de la Salud (OPS) organizó un programa de vigilancia en Mesoamérica, que incluyó la detección de DDT residual en muestras ambientales (suelo) y biológicas (tejido de peces y sangre de niños). Este programa se llevó a cabo en comunidades de México, Guatemala, El Salvador, Honduras, Nicaragua, Costa Rica y Panamá. Reportando en el primer informe de ese programa que, en algunas localidades de México, existen altas concentraciones de DDT (nivel promedio 50.2.ng/mL) en la sangre de niños (Pérez-Maldonado, et al., 2010).

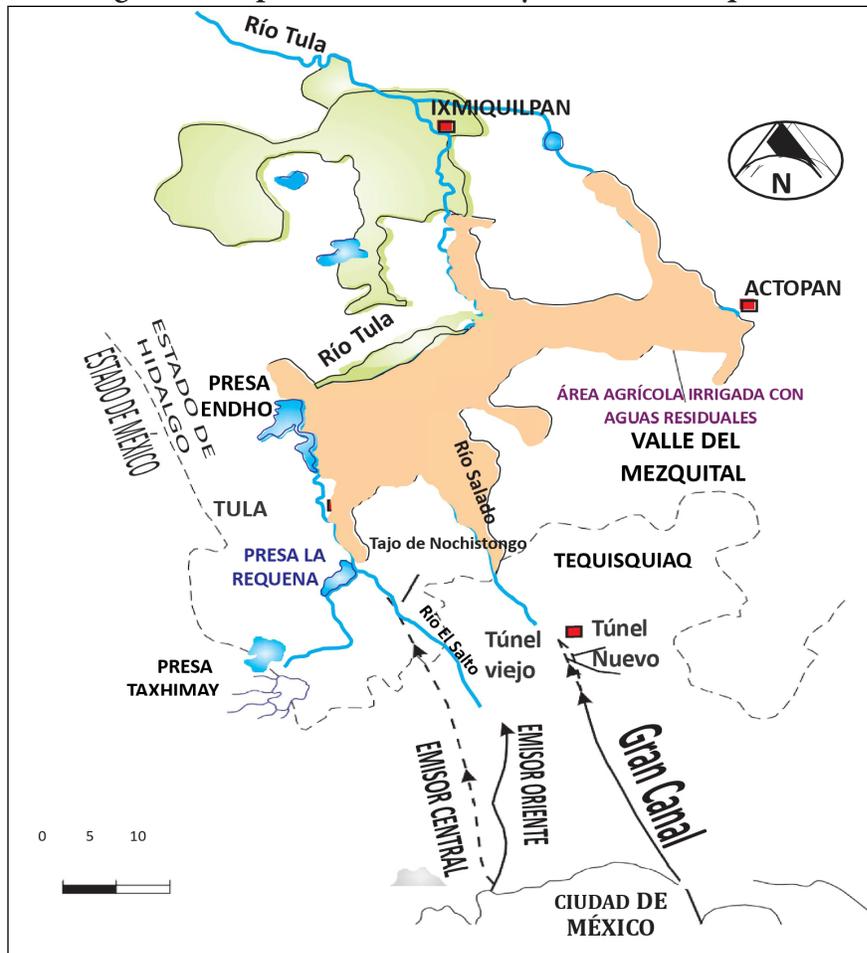
Una participación significativa en pro de la justicia socioambiental significa que:

- (1) Las personas tienen la oportunidad de participar en decisiones sobre actividades que pueden afectar el ambiente y/o su salud;
- (2) se toma en cuenta la incorporación de las contribuciones elaboradas desde las comunidades en las decisiones de las agencias reguladoras;
- (3) sus preocupaciones locales tienen que ser consideradas en el proceso de toma de decisiones
- (4) los tomadores de decisiones buscan y facilitan la participación de todos los potencialmente afectados

### Problemática local: Valle de Tula

El valle de Tula (85.000 ha) se encuentra entre las latitudes 19°54' y 20°30' Norte, y las longitudes 99°22' y 98°56' Oeste. La temperatura media anual es de 16.7°C y cuenta con precipitaciones que oscilan entre 435 y 618 mm, la cuales se presentan entre mayo y octubre. Aproximadamente 1,663 millones de m<sup>3</sup> (Mm<sup>3</sup>) anuales de aguas residuales generadas en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México son transportadas a 80 km hasta el Valle de Tula, a través del Emisor Central subterráneo, transportando un promedio de 1,255.8 Mm<sup>3</sup>/año y el Gran Canal a cielo abierto transporta un promedio de 407.2 Mm<sup>3</sup>/año (Chamizo-Checa et al., 2020).

Figura 2. Mapa del Valle de Tula y Valle del Mezquital



Fuente: elaboración propia.

La Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Atotonilco, elimina agentes patógenos del agua conservando la mayoría de los nutrientes utilizados en el riego. Esta planta trata el 60% del caudal del Emisor Central, mientras que las aguas residuales sin tratar se incorporan al río Tula, en la parte oeste del Valle del Mezquital. La mezcla de efluentes y aguas residuales sin tratar se conduce por gravedad hasta la zona de riego (Chávez Mejía et al., 2019; Rodríguez Varela et al., 2021).

Actualmente, tanto el agua superficial como la subterránea son utilizadas por la población local como única fuente de agua potable, siendo la cloración el único tratamiento del agua potable, lo que presenta un riesgo biológico a través de la contaminación fecal (Vázquez-Salvador et al., 2020). Adicionalmente, existe una contaminación por presencia de sustancias químicas utilizadas en casas-habitación, la industria y la agricultura en la zona del Valle del Mezquital, lo cual puede representar afectaciones a la población y a los ecosistemas inmersos en agua, suelo y subsuelo del área (Durán Álvarez et al., 2023).

### Metodología

El trabajo de campo presentado consistió en el muestreo prospectivo de sedimentos en 3 sitios del río Tula, durante la estación de secas (última semana de febrero de 2023), el cual se encuentra altamente contaminado por descargas de aguas negras, actividades industriales, urbanas y uso de agroquímicos. En este trabajo, 69 compuestos orgánicos tóxicos (ver tabla 2) fueron medidos por medio de Cromatografía de Gases-Masas por recolección en microfibra en fase sólida (SPME) como lo sugerido por Hjort, 2019. Donde varios de estos compuestos orgánicos tóxicos identificados están inscritos en las listas de contaminantes de preocupación y prioritarios (OSPAR<sup>5</sup>, 2005) y tienen efectos negativos para los organismos acuáticos y los seres humanos.

**Tabla 1. El trabajo de muestreo en el río Tula, México**

Clave	Coordenadas	Observaciones	Observaciones
	Latitud Norte	Longitud Oeste	
S2	19°56'21"	-99°17'04"	Río Tula. Antes de PTAR. Agua obscura negro-azulado.
T7	20°06'13"	-99°21'58"	Río Tula. Tributario a Presa Endhó.
S24	19°58'17"	-99°18'08"	Río Tula. Salida de la PTAR. DM.

Fuente: elaboración propia.

El agua puede contaminarse por un sinnúmero de procesos geogénicos o antropogénicos; sin embargo, una de las principales fuentes de contaminación del agua corresponde a las descargas directas de aguas residuales tratadas y no tratadas de sectores urbanos (parte del agua residual viene desde el área metropolitana de la ciudad de México), e industriales (Estado de México e Hidalgo), así como la entrada de lixiviados

5 “Convenio OSPAR”: Convenio para la Protección del Medio Marino del Atlántico Nordeste.

agroquímicos por desechos de compuestos orgánicos industriales y plaguicidas de las zonas agrícolas. También es necesaria la inclusión de otros plaguicidas e hidrocarburos en el análisis de sedimentos, ya que pueden existir otros compuestos que denotan riesgos para los organismos acuáticos y poblaciones humanas cercanas si se encuentran en ambientes naturales del río Tula, tales como el glifosato, que es un compuesto altamente tóxico y de uso masivo en el planeta (Finizio et al., 2022). Además, la concurrencia de plaguicidas e hidrocarburos aromáticos policíclicos puede potencialmente representar un alto riesgo para los organismos que habitan en los sedimentos (ver tabla 2).

La sobreexplotación de los recursos hídricos y la contaminación de los cuerpos de agua, incluso en regiones pobladas de baja densidad, es un tema de preocupación crítica que tiene importantes consecuencias para los ecosistemas y la salud humana.

Los sedimentos del río Tula son sumideros de contaminantes que ingresan al medio acuático y se consideran un índice de contaminación y de potencial riesgo de toxicidad en especies y/o las personas de comunidades cercanas a los sitios contaminados. Además, la complejidad de los contaminantes en sedimentos puede complicar la acción de consorcios bacterianos que los degraden o transformen. A menudo existen datos limitados, ya sea sobre la concentración, toxicidad potencial (ver cuadro 3), número de compuestos identificados o evaluación del área afectada, esté es el caso en el río Tula, por lo que fue interesante medir concentraciones de 71 compuestos orgánicos en sedimentos para conocer el grado de contaminación y las posibles afectaciones.

## Resultados

El agua puede contaminarse por un sinnúmero de procesos geogénicos o antropogénicos, sin embargo, una de las principales fuentes de contaminación del agua corresponde a las descargas directas de aguas residuales tratadas y no tratadas de sectores urbanos (parte del agua residual viene desde el área metropolitana de la ciudad de México) e industriales (Estado de México e Hidalgo), así como la entrada de lixiviados agroquímicos por desechos de compuestos orgánicos industriales y plaguicidas de las zonas agrícolas. También es necesaria la inclusión de otros plaguicidas e hidrocarburos en el análisis de sedimentos, ya que pueden existir otros compuestos que denotan riesgos para los organismos acuáticos y poblaciones humanas cercanas si se encuentran en ambientes naturales del río Tula, tales como el glifosato, que es un compuesto altamente tóxico y de uso masivo en el planeta (Finizio et al., 2022). Además, la concurrencia de plaguicidas e hidrocarburos aromáticos policíclicos puede potencialmente representar un alto riesgo para los organismos que habitan en los sedimentos (ver cuadro 3).

**Tabla 2. Concentraciones de 69 compuestos orgánicos en sedimentos del río Tula, Estado de México. México (primera parte)**

Grupo de compuestos orgánicos	Nombre de sustancias	S2*	T7*	S24*
<b>Compuestos Orgánicos Semivolátiles (SVOC)</b>	m-Cresol	38.19	245.87	88.97
	2,4-Dimethylphenol	3.32	81.63	23.72
	Toluidine, o-	0.69	38.57	2.57
	Benzoic acid	0.68	9.71	2.07
<b>Hidrocarburo Aromático Policíclico (PAHs)</b>	Phenol	584.44	791.97	313.09
	Naphthalene	34.35	247.94	59.49
	Hydroquinone	505.30	24.08	12.14
	Biphenyl	7.87	21.81	13.48
	Acenaphthylene	1.33	11.21	3.79
	1-Naphthylamine	33.97	8.50	1.22
	Naphthalenol-1	22.92	0.00	0.00
	4-Nitrophenol	1.26	12.91	2.53
	Fluorene	3.48	0.00	0.00
	Anthracene	5.83	0.00	0.00
	Phenanthrene	4.36	4.28	0.00
	Fluoranthene	5.08	0.25	0.00
	Pyrene	28.72	2.92	0.27
	2,4,6-Tribromophenol	2.08	0.00	0.00
	Chrysene	2.40	216.80	46.85
Benzo[b]fluoranthene	0.64	47.60	7.00	
<b>Plaguicidas Organofosforados (OPs)</b>	Dichlorvos	49.49	15.73	102.16
	Monocrotophos	9.21	0.49	0.13
	Sulfotep	0.25	0.35	0.00
	Dimethoate	0.00	0.00	3.51
	Chlorpyrifos	0.68	5.44	2.25
	Malathion	0.22	63.95	3.24
	Parathion	7.06	32.25	7.39
	Chlorfenvinphos	7.87	0.34	0.00
	Ethion	1.29	256.52	2.50
	Coumaphos	0.00	0.00	1.80
	Ethyl O-(p-nitrophenyl) phenyl phosphonothionate	24.60	41.38	1.28

Fuente: elaboración propia.

\*Todas las concentraciones están reportadas en ng/g.

**Tabla 2. Concentraciones de 69 compuestos orgánicos en sedimentos del río Tula, Estado de México. México (segunda parte)**

Grupo de compuestos orgánicos	Nombre de sustancias	S2*	T7*	S24*	
Ftalatos (PAEs)	Dimethyl phthalate	51.27	5.68	2.12	
	Diethyl phthalate	12.02	11.71	8.91	
	Di-n-butyl phthalate	33.08	1.12	15.01	
	Butyl benzyl phthalate	17.26	8.57	3.13	
	Di-n-octyl phthalate	23.24	3.89	2.02	
Plaguicidas Organoclorados (OCIs)	Hexachloroethane	0.00	0.00	0.00	
	2,4-Dichlorophenol	1.17	88.60	60.56	
	Hexachlorobenzene	0.00	1.49	1.20	
	Pentachlorophenol	3.48	0.00	0.00	
	2,4,5-T-methyl ester	0.23	0.22	0.00	
	BHC-alpha	0.00	11.29	8.92	
	BHC-beta	1.18	0.20	0.00	
	Lindane	0.22	5.06	2.62	
	BHC-delta	0.00	21.03	0.00	
	Propachlor	1.33	10.39	1.63	
	Heptachlor	0.00	20.30	0.00	
	Heptachlor exo-epoxide	3.05	0.00	0.00	
	Mirex	0.00	17.07	4.24	
	Aldrin	0.00	0.48	0.00	
	Dieldrin	4.69	174.20	14.11	
	Endrin	9.93	0.00	0.00	
	Endrin aldehyde	1.26	5.10	1.09	
	Endosulfan I	0.00	2.46	0.95	
	Endosulfan II	0.16	56.00	1.55	
	DDD-p,p'	0.29	11.82	5.50	
DDT-p,p'	1.67	212.22	15.50		
Otros	Isoxazolidinonas (ISOs)	Clomazone	3.60	6.62	3.09
	Carbamatos (CARBs)	Chlorpropham	0.00	0.63	0.00
		Ethiofencarb	0.00	13.19	10.68
	Diclorobencenos (DCBs)	1,4-Dichlorobenzene	8.23	53.09	54.53
		1,2-Dichlorobenzene	1.26	4.91	6.23
	Compuestos Nitro-aromáticos (NACs)	1,3-Dinitrobenzene	34.89	24.51	40.45
	Clorofenoles (CPs)	2-Chlorophenol	1.16	5.70	1.46
	Fármacos (Pharma)	Phthalide	7.25	52.67	4.62
	Fenol ácido descarboxilasa (PADs)	Fenoprop-methyl	0.00	9.99	0.00
	Anilinas (AN)	4,4'-Methylenebis(N,N-Dimethylaniline)	4.15	526.56	8.19
	PBOs	Piperonyl butoxide	4.63	0.00	0.00
Permetrinas (PIRs)	Permethrin I	42.24	6.50	1.31	

Fuente: elaboración propia.

\*Todas las concentraciones están reportadas en ng/g.

La sobreexplotación de los recursos hídricos y la contaminación de los cuerpos de agua, incluso en regiones pobladas de baja densidad, es un tema de preocupación crítica que tiene importantes consecuencias para los ecosistemas y la salud humana. En cuanto a los contaminantes orgánicos encontrados en cuerpos de agua, se identificó una amplia variedad de productos que se liberan a través de fuentes puntuales de contaminación, como desechos sólidos/efluentes industriales, hospitalarios y agrícolas, y a través de fuentes difusas, como escorrentías urbanas y fugas/derrames accidentales.

Los sedimentos del río Tula son sumideros de contaminantes que ingresan al medio acuático y se consideran un índice de contaminación y de potencial riesgo de toxicidad en especies y/o las personas de comunidades cercanas a los sitios contaminados. Además, la complejidad de los contaminantes en sedimentos puede complicar la acción de consorcios bacterianos que los degraden o transformen. A menudo, existen datos limitados, ya sea sobre la concentración, toxicidad potencial (ver cuadro 3), número de compuestos identificados o evaluación del área afectada, éste es el caso en el río Tula, por lo que fue interesante medir concentraciones de 69 compuestos orgánicos en sedimentos para conocer el grado de contaminación y las posibles afectaciones.

## Discusión

En este estudio, todos los compuestos orgánicos evaluados fueron detectados en los sitios muestreados, revelando así la magnitud de la contaminación del río Tula, Edo. de México, México. Se midió la presencia de plaguicidas organoclorados, organofosforados, hidrocarburos aromáticos policíclicos en los sedimentos; donde probablemente estos compuestos orgánicos tóxicos provienen de sitios relacionados con descargas industriales, actividades agrícolas y las plantas de tratamiento de aguas residuales.

En el río Tula, Estado de México, México, se realizan intensas actividades agrícolas, industriales y residenciales. Los plaguicidas de polaridad media a alta no se han estudiado intensamente en sedimentos a pesar de su mayor uso y liberación al ambiente en los últimos años. Este trabajo midió 71 plaguicidas, compuestos aromáticos policíclicos, fármacos, e incluso bifenilos policlorados en sedimentos recolectados en el río Tula para evaluar los efectos adversos potenciales en organismos que habitan cerca o dentro de los sedimentos. Se detectaron un total de 71 compuestos en los sedimentos donde se puede apreciar que los Hidrocarburo Aromático Policíclico y los Ftalatos tienen las concentraciones más altas, con valores de 30 y hasta 500 ng g, lo que puede significar riesgos importantes para las cadenas tróficas en ambientes acuáticos debido a que estos compuestos son conocidos por ser persistentes con propiedades potencialmente tóxicas, mutagénicas y cancerígenas. En general, el Valle del Mezquital presentó mayor contaminación por plaguicidas tales como Dichlorvos ó Ethyl O-(p-nitrophenyl) phenyl phosphonothionate. Enguita & Leitão (2013), señalan que la Hydroquinone, así como el Phenol, son extremadamente tóxicos para los organismos acuáticos a un nivel de concentración de partes por millón, como es este caso, y la mayoría de ellos pueden influir en las propiedades organolépticas de peces y en el comportamiento o capacidad de defensa ante depredadores.

La presencia de concentraciones de compuestos orgánicos en sedimentos indica una clara evidencia de vertimiento de materiales agrícolas (aplicación de plaguicidas) y

actividades industriales recientes. Otras posibles fuentes incluyen las aguas residuales domésticas de los asentamientos cercanos. El riesgo es alto para organismos acuáticos como peces y dafnias en el río Tula con tendencia de desarrollar anomalías debido a la presencia de compuestos orgánicos tóxicos y la sinergia de efectos múltiples en comunidades aledañas (ver cuadro 3).

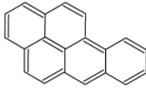
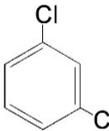
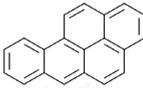
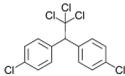
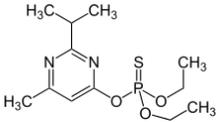
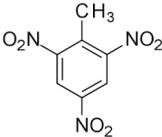
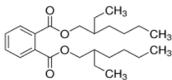
La exposición a compuestos orgánicos plantea importantes riesgos para la salud de los agricultores y poblados cercanos, incluidos enfermedades crónicas como cáncer, enfermedades cardíacas, problemas reproductivos y trastornos neurológicos. El uso generalizado y el manejo inadecuado de compuestos orgánicos también ha llevado a la contaminación ambiental, afectando a especies naturales como aves, abejas y organismos acuáticos a través de diversas vías. Los compuestos orgánicos en el medio ambiente pueden sufrir transformaciones, formando potencialmente productos de degradación más dañinos (ver cuadro 3).

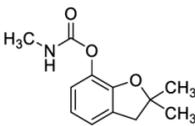
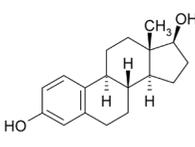
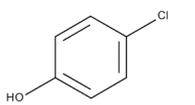
Gardner-Frolick et al., (2022) Shakir et al., 2017; Rout et al., (2021), entre otros investigadores, han demostrado los riesgos de la eliminación de aguas residuales con altos contenidos de fármacos procedentes de plantas de tratamiento o etapas de tratamiento incompletos que provocan el rápido aumento de genes resistentes a los antibióticos al eliminar etapas de oxidación, interrupción de procesos de biodegradación o eliminación de etapas de tratamientos de adsorción/remoción.

Para confirmar lo antes descrito, se pueden encontrar que, según Dong et al., 2018, entre el 30% y el 50% de las fuentes de agua superficiales se han visto afectadas por esta contaminación, lo que la convierte en una amenaza cada vez más predominante para el agua y la calidad y restauración de los ecosistemas acuáticos. Los principales contaminantes de fuentes difusas provienen de la erosión del suelo y de actividades relacionadas con la agricultura. Cada año, alrededor del 0.3% al 0.8% de las tierras de cultivo en todo el mundo se ven afectadas por una degradación excesiva que hace que el suelo sea inadecuado para la producción agrícola (Biggelaar et al., 2004).

Los contaminantes, hidrocarburos, bifenilos policlorados, hidrocarburos policíclicos y plaguicidas, son compuestos estables que permanecen intactos por mucho tiempo en el ambiente y tienen características tóxicas para la salud humana y ecosistemas acuáticos, pudiendo migrar a entornos naturales terrestres. Asimismo, la contaminación de los ecosistemas acuáticos con compuestos orgánicos, cómo los cuantificados en este estudio, es un problema generalizado a nivel regional. En el cuadro 3, se mencionan los principales efectos adversos de los grupos químicos estudiados en el presente estudio.

**Cuadro 3. Daños a ecosistemas y salud humana**

Estructura química (e.g.)	Descripción
	<p><b>Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAP)</b></p> <p>Son contaminantes persistentes y ubicuos, por lo que se bioacumulan fácilmente en la biota, especialmente en los organismos acuáticos. Además, tienen una fuerte afinidad por los sedimentos (materia orgánica), lo que altera el ciclo regular de los ecosistemas. Además, los HAP son tóxicos y perjudiciales para los seres humanos, ya que se consideran teratogénicos, cancerígenos y mutagénicos para las personas (Wang et al., 2021)</p>
	<p><b>Diclorobencenos (DCB)</b></p> <p>Los diclorobencenos se consideran una amenaza potencial de toxicidad para la ecología y la salud humana, ya que podrían desencadenar múltiples alteraciones en diferentes tejidos biológicos. La exposición a los bencenos podría provocar una serie de efectos sobre la salud, incluidos cáncer, cirrosis e irritación de órganos. Al ser compuestos persistentes, su tendencia a bioacumularse y a biotransformarse son factores vitales para cambiar la toxicidad. La bioacumulación es uno de los criterios de valoración en la evaluación de riesgos químicos (Tunsaringkarn et al., 2012)</p>
	<p><b>Compuestos Orgánicos Semivolátiles (COSV)</b></p> <p>Su persistencia y bajas tasas de degradación provocan que se acumulen en los ecosistemas y población cercana, con efectos negativos para la salud humana (daños en hígado, riñones y sistema central nervioso, cáncer) y a nivel de cadenas tróficas (Yan et al., 2023b).</p>
	<p><b>Plaguicidas Organoclorados (POCL)</b></p> <p>Son compuestos persistentes en el ambiente. Se bioacumulan y biomagnifican causando interferencias endocrinas graves y otros efectos adversos como cáncer en mamíferos y peces. También provocan daños a la salud humana a través del consumo de pescado contaminado y daños directos en el ecosistema acuático (Burgos Aceves et al., 2021).</p>
	<p><b>Plaguicidas Organofosforados (OP)</b></p> <p>Son compuestos que, una vez liberados al ambiente, pueden transformarse en metabolitos, producto de su degradación, pero muchas veces más tóxicos que los compuestos originales, con efectos negativos en el sistema reproductivo, retraso del crecimiento intrauterino, muerte del feto, baja fertilidad y defectos de nacimiento teratogénicos (Ajiboye et al., 2022).</p>
	<p><b>Compuestos Nitroarómicos (NACs)</b></p> <p>Compuestos altamente tóxicos incluso en bajos niveles de concentración. Son persistentes en el ambiente y pueden bioacumularse, amenazando así la salud humana y los ecosistemas (Yan et al., 2023b).</p>
	<p><b>Ésteres de Anhídrido Ftálico (PAE)</b></p> <p>En la actualidad, se han encontrado alrededor de treinta tipos de PAE, 6 de los cuales han sido incluidos en la lista de control prioritario de la USEPA por sus daños ecológicos y a la salud humana (Yan et al., 2023b).</p>

	<p><b>Carbamatos (CARB)</b></p> <p>En seres vivos inhiben la colinesterasa con efectos en el sistema nervioso central, se sospecha que los carbamatos son carcinógenos y mutágenos. Por lo tanto, el uso gradual de carbamatos puede ser potencialmente peligroso para ecosistemas y seres humanos (Mdeni et al., 2022).</p>
	<p><b>Fármacos (PHARM)</b></p> <p>En la última década ha habido una creciente preocupación por la gran cantidad de fármacos que se encuentran en el agua de ríos y lagos, mismos que podrían producir daños como cáncer, problemas de fertilidad, disruptores endocrinos y afectar la glándula tiroides en seres humanos, así como generar efectos dañinos en individuos acuáticos, como la inhibición del crecimiento y la reproducción, cambios morfológicos, feminización, cambios hormonales, entre otros (Shanmuganathan et al., 2023).</p>
	<p><b>Clorofenoles (CF)</b></p> <p>En los organismos acuáticos se acumulan dentro de tejidos, principalmente en los peces, induciendo la mortalidad en etapa embrionaria temprana (Yadav et al., 2023).</p>

### Retos actuales de un nuevo acuerdo social

Por otro lado, se han presentado también numerosos conflictos ambientales, pero de naturaleza ambiental, social y local. Debido a la escasez de otras fuentes de agua y al ahorro que representa sustituir la fertilización convencional por las aguas residuales (que aportan nitrógeno y fósforo en cantidades significativas), entre otros factores, en el Valle del Mezquital, la disputa es por la apropiación de las aguas residuales, no por su desvío hacia otras zonas, por su tratamiento o por el rechazo a los problemas de salud que ocasionan. Para las comunidades locales, las aguas residuales representan un “oro negro”, que les ha permitido salir de la miseria y cuyos impactos negativos son secundarios frente a los beneficios que les ha traído. Por ejemplo, gracias a la irrigación con aguas negras, la producción promedio de maíz de la zona (10 toneladas por hectárea) supera la media nacional obtenida por agricultura de secano o por riego con agua de pozo (2 y 8,6 toneladas por hectárea) respectivamente. Por ello, varios grupos campesinos se opusieron, en su momento, a la construcción de la planta de tratamiento de aguas residuales de Atotonilco (Hidalgo), porque consideran que la irrigación con agua tratada conlleva la inversión en fertilizantes químicos y un mayor costo del agua, así como una disminución en el volumen de agua que reciben (Vázquez Rodríguez, 2021). A esta problemática de contaminación se suman factores sociales, económicos y de salud que deben resolverse en su conjunto y que, muchas veces, las leyes no pueden subsanar, ni los acuerdos sociales vigentes.

En el caso del río Sonora, el 6 de agosto de 2014, se presentó un derrame de 40 mil metros cúbicos de lixiviados de sulfato de cobre acidulado, en el arroyo *Las Tinajas*, afluente del río Bacanuchi, a su vez afluente del río Sonora. El derrame afectó la parte alta de la cuenca y los pobladores de las comunidades afectadas, aledañas al río Tula, se han encontrado limitados a ejercer acciones, por encontrarse sujetos a la realización de

estudios técnico-científicos sobre el estado de los ecosistemas y los efectos producidos por los impactos ambientales, que, por su esencia y el objeto tan diverso del estudio, son evaluaciones multidisciplinarias altamente costosas que no se encuentran a su alcance (Ibarra y Moreno, 2017), en donde las comunidades adolecen de la justicia socioambiental a la que deben acceder por su baja disposición de recursos sociales, jurídicos y económicos.

Ante el panorama descrito, incluyendo las muestras de posibles compuestos orgánicos tóxicos en sitios del río Tula, que muestra los probables daños por la presencia de estos compuestos en forma individual, pero más aún por los posibles daños en ecosistemas o a la salud humana, por la sinergia de efectos negativos de la combinación de los contaminantes, es necesario definir los retos actuales o puntos a tratar en el proceso de protección nuestros ríos, lagos, ecosistemas y salud de la población en relación con la revisión y ajuste de la legislación y normatividad existente, el fortalecimiento y empoderamiento de las redes comunitarias locales; trabajos multidisciplinarios que emiten informes técnicos, mejoramiento de saneamiento del agua y ayudas económicas en esas mismas comunidades; formación de un sistema de información inter e intrainstitucional que atienda desde lo local la problemática del impacto social de la contaminación en áreas naturales. Para esto, se proponen algunas líneas de trabajo con una serie de acciones para comenzar los trabajos de solución a la contaminación de los 71 compuestos orgánicos, entre otros compuestos con las mismas características químicas que puedan elevar la contaminación, generar riesgos a la salud y ecosistemas naturales.

Para la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA), la justicia ambiental es “el trato justo y la participación de todas las personas, independientemente de su raza, color, origen nacional o ingresos, con respecto al desarrollo, implementación y cumplimiento de las leyes, reglamentos, regulaciones ambientales”, y políticas. La justicia socioambiental (JS), es el trato justo de personas o grupos de personas para no ser sometidas voluntaria o involuntariamente a desproporcionadas cargas ambientales resultantes de operaciones o políticas industriales, gubernamentales y comerciales. La justicia socioambiental tiene que transitar por la prohibición y/o sustitución del uso de sustancias químicas innecesarias por la industria u otras fuentes que sean transportadas a ambientes naturales y/o cerca de poblaciones locales provocando afectaciones (Chaudhry, 2024).

Las cinco líneas de trabajo propuestas de JS para las zonas afectadas en el Valle del Mezquital y en general para espacios naturales son:

Primera línea de trabajo: los negociadores y formuladores de políticas, con la ayuda de grupos multidisciplinarios que reconozcan que es prioridad el restablecimiento de los ecosistemas y el resarcimiento del tejido social, con el seguimiento y elaboración de los estudios técnico-científicos necesarios, ayudarán a los grupos sociales con menores recursos debiendo tomar en cuenta las desigualdades e injusticias históricas y contemporáneas de la contaminación por compuestos orgánicos, esforzándose por lograr una justicia distributiva en la asignación de costos y beneficios a la población local, prohibiendo la presencia de compuestos orgánicos que afecten la salud o los ecosistemas, garantizando la participación e influencia plena y significativa de las comunidades.

Segunda línea de trabajo: deberán buscar la justicia procesal, basándose en el principio precautorio cómo eje rector de cualquier reglamento, norma o ley ante toda

presencia de riesgos por exposición de sustancias tóxicas que tenga como destino un compartimento ambiental, ecosistema o entidad social.

Tercera línea de trabajo: deberán promover normas orientadas a la justicia y basadas en los derechos en todos los niveles y escalas de gobernanza, evitando políticas, mecanismos de mercado e incentivos que profundicen la injusticia socioambiental, el racismo o los abusos de los derechos humanos.

Cuarta línea de trabajo: necesitarán imponer fuertes medidas regulatorias para prevenir la contaminación intencional, previsible y no intencional que surja de la industria química, incluidos controles a los fabricantes, minoristas, recicladores, empresas de residuos e instalación de nuevas plantas de aguas residuales con procesos de eliminación rigurosa de los compuestos orgánicos inmersos en el agua y/o sedimentos del río o espacios naturales aledaños. Instaurar un nuevo acuerdo social nacional/planetario, cómo el Convenio Internacional de Minamata ([minamataconvention.org/](http://minamataconvention.org/)) o el Convenio de Estocolmo (<https://chm.pops.int/>), que disminuya o prohíba el uso en la producción y comercialización de compuestos orgánicos tóxicos que puedan provocar efectos negativos en cuerpos, suelos, sedimentos, aire, agua, ecosistemas y/o comunidades<sup>6</sup>, así como un cambio de tecnologías de producción que eviten el uso, producción, desecho y emisión de productos tóxicos, pensando que sé ha privilegiado solo a la economía y que, sin embargo, debe privilegiarse, en primer lugar, a las comunidades y ecosistemas naturales para posteriormente dar beneficios a las empresas, ya que, históricamente, se han privilegiado los negocios, con las consecuentes afectaciones a la sociedad y ecosistemas naturales.

Finalmente, la quinta línea de trabajo establece que se necesitarán establecer financiamientos justos, generosos y solidarios, así como asistencia técnica para compensar a las comunidades históricamente afectadas por parte de los responsables, sean personas físicas o corporaciones nacionales o transnacionales.

## Conclusiones

El uso y vertimiento de diferentes compuestos orgánicos desde la Ciudad de México y a lo largo del Estado de México hasta el Valle de Tula, ha ocasionado la aparición de compuestos orgánicos en sedimentos del río Tula, con niveles de decenas y centenas de  $\text{ng g}^{-1}$ . Las aguas residuales urbanas, tratadas y no tratadas, inmersas en el Río Tula, son usadas para actividades domésticas y en el consumo humano, revelando la prevalencia de agentes provenientes de actividades agropecuarias e industriales con posibles efectos negativos para la población aledaña y la biota del río Tula. También, es posible que el destino ambiental observado para estos compuestos pueda representar altas afectaciones a la salud, decesos de microorganismos y organismos acuáticos en el Valle del Tula.

Es necesario encontrar soluciones desde las mismas comunidades y grupos interdisciplinarios que ayuden a resolver el dilema complejo entre los beneficios que conlleva la entrada de agua con altos contenidos de materia orgánica que si bien ayu-

---

<sup>6</sup> Desde la perspectiva del Principio Preventivo, donde se comience de forma inversa: primero probando qué no genera daños, ni a corto ni a largo plazo, antes de su uso y liberación al ambiente.

dan a la fertilidad de los campos agrícolas, por otro lado, propician la llegada de contaminantes que afectan a las comunidades y ecosistemas locales.

Las cargas de contaminantes vertidas al río Tula aún representan un riesgo ambiental, especialmente para los microorganismos, organismos acuáticos y seres humanos aledaños, por lo cual debe realizarse un monitoreo constante de las concentraciones de contaminantes en agua y sedimentos, en suelos y organismos terrestres, aunque es necesario que se implementen medidas desde los gobiernos a nivel local, municipal y nacional, para evitar la llegada de compuestos orgánicos al río Tula que provoquen daños a los ecosistemas y la salud humana del Valle de Tula.

Es necesario diseñar un plan de acción que contemple, al menos, las 5 líneas de trabajo propuestas en este documento (1) Políticas públicas formuladas por grupos multidisciplinarios; 2) Justicia y Principio precautorio; 3) Normas orientadas a la justicia socioambiental; 4) Nuevo acuerdo social y prohibición de contaminación intencional; 5) Financiamiento justo *ad hoc* a las comunidades rurales, con el fin de salvaguardar los ecosistemas y las poblaciones cercanas al río Tula y evitar efectos graves en la población, tales como cáncer, cirrosis, alteraciones en el sistema nervioso central o decesos de especies naturales o personas.

## Bibliografía

- AJIBOYE, T. O.; Oladoye, P., O., Olanrewaju, C., A., y Akinsola, G., O. (2022). “Organophosphorus pesticides: Impacts, detection and removal strategies” en *Environ. Nanotechnol. Monit. Manag.* Doi: 10.1016/j.enmm.2022.100655
- BIGGELAAR, C. Lal, R. Wiebe, K. y Breneman, V. (2004). “The Global Impact of Soil Erosion on Productivity” en *Advances in Agronomy*. Volumen 81, pp. 49-95. Doi:10.1016/S0065-2113(03)81002-7
- BRAÑES, R. (2000). *El Acceso a la Justicia Ambiental en América latina: Derecho Ambiental y Desarrollo Sostenible*. Oficina Regional para América Latina y el Caribe (ORPALC), Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA).
- BURGOS A. Migliaccio V.; Di Gregorio I.; Paoletta G.; Lepretti M.; Faggio C.; y Lionetti L. (2021). “1, 1, 1-Trichloro-2, 2-Bis (P-Chlorophenyl)-Ethane (DDT) and 1, 1-Dichloro-2, 2-Bis (P, P'-Chlorophenyl) Ethylene (DDE) as Endocrine Disruptors in Human and Wildlife: a Possible Implication of Mitochondria” en *Environ. Toxicol. Pharmacol.* Volumen 87. Doi:103684. 10.1016/j.etap.2021.103684
- CARRILLO Gómez, J. Durán Acevedo y C. García Rico (2021). “Methodology for the bacteria detection in drinking water through an e-nose and e-tongue” en *INGECUC*. Volumen 17, número 1, pp. 165-173. Doi:10.17981/ingecuc.17.1.2021.13
- CHAMIZO C, S.; Otazo-Sánchez, E., Gordillo Martínez, A., Suárez-Sánchez, J., González-Ramírez, C., y Muñoz Nava, H. (2020). “Megacity waste water poured into a nearby basin: Looking for sustainable scenarios in a case study” en *Water*. Doi:10.3390/w12030824
- CHÁVEZ M. A.C., Navarro-González, I., Magaña López, R., Uscanga-Roldán, D., Zaragoza Sánchez, P.I., y Jiménez C., B. E. (2019). “Presence and natural treatment of organic micropollutants and their risks after 100 years of incidental water re-

- use in agricultural irrigation” en *Water (Switzerland)*. Volumen 11, número 10. Doi:10.3390/w11102148
- CONAGUA (2013). *Estadísticas del Agua en México. Edición 2013*. Disponible en: [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/260111/EAM2013\\_br.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/260111/EAM2013_br.pdf).
- COUSINS, I.T.; Vestergren, R.; Wang, Z.; Scheringer, M.; y McLachlan, M.S. (2016). “The precautionary principle and chemicals management: The example of perfluoroalkyl acids in groundwater” en *Environ*. Volumen 94, pp. 331-340. Doi:10.1016/j.envint.2016.04.044
- DONG, F., Liu, Y., Wu, Z., Chen, Y., y Guo, H. (2018). “Identification of watershed priority management areas under water quality constraints: A simulation-optimization approach with ideal load reduction” en *Journal of Hydrology*. Volumen 562, pp. 577-588. Doi:10.1016/j.jhydrol.2018.05.033
- DURÁN Á. J. C., Prado, B., Zanella, R., Rodríguez, M., y Díaz, S. (2023). “Wastewater surveillance of pharmaceuticals during the COVID-19 pandemic in Mexico City and the Mezquital Valley: A comprehensive environmental risk assessment” en *Science of the Total Environment*. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.165886>
- ENGUITA, F. J. y A. L. Leitão (2013). “Hydroquinone: environmental pollution, toxicity, and microbial answers” en *Biomed Res Int*. Volumen 2013, artículo 542168. Doi:10.1155/2013/542168
- EDERSEN, O. W. (2011). “Environmental Justice in the UK: Uncertainty, Ambiguity and the Law” en *Legal Studies*. Volumen 3, número 2, pp. 279-304. Doi:1111/j.1748-121X.2010.00185.x
- FINIZIO, A., Grenni, P., Petrangeli, A. B., Barra-Caracciolo, A., Santoro, S, y Di Guardo, A. (2022). “Use of large datasets of measured environmental concentrations for the ecological risk assessment of chemical mixtures in Italian streams: A case study” en *Sci Total Environ*. Doi:10.1016/j.scitotenv.2021.150614
- GARCÍA S, E. M. (2019). “El agua residual como generadora del espacio de la actividad agrícola en el Valle del Mezquital, Hidalgo, México” en *Estudios Sociales. Revista de Alimentación Contemporánea y Desarrollo Regional*. Volumen 29, número 54, pp. 1-34. Doi.org/10.24836/es.v29i54.741
- GARDNER F. R.; Boyd, D., y Giang, A. (2022). “Selecting Data Analytic and Modeling Methods to Support Air Pollution and Environmental Justice Investigations: A Critical Review and Guidance Framework” en *Environ Sci Technol*. Volumen 56, número 5, pp. 2843-2860. Doi: 10.1021/acs.est.1c01739
- GONZÁLEZ V. F. J., Vázquez Herrera E., Aguilar Amilpa, E., y Arriaga Medina, J.A. (2022). *Perspectivas del agua en México, propuestas hacia la seguridad hídrica*. Ciudad de México, UNAM-Red del Agua UNAM, CERSHI-UNESCO, Agua Capital.
- HJORT Colunga, E. R. (2019). *Detección de plaguicidas en muestras ambientales mediante la técnica de cromatografía de gases*. Tesis de Maestría en Ciencias, Limnología. Posgrado de Ciencias del Mar y Limnología, Universidad Nacional Autónoma de México.
- IBARRA, F. y J. MORENO (2017). “La justicia ambiental en el río Sonora” en *Revista de Ciencias Sociales y Humanas*. Volumen 10, número 10, pp. 93-113. Disponible en: <http://www.ojs.unsj.edu.ar/index.php/reviise/article/view/168>

- JONES, Edward R.; van Vliet, Michelle T. H.; Qadir, Manzoor; Bierkens, y Marc F. P. (2021). "Country-level and gridded estimates of wastewater production, collection, treatment and reuse" en *Earth System Science Data*. Volumen 13, número 2, pp. 237-254.
- KEKANA, H. N., Ruhiiga, T. M., Ndou, N. N. y Palamuleni, L. G. (2023). "Environmental justice in South Africa: the dilemma of informal settlement residents" en *Geo Journal*. Número 4, pp. 3709-3725. Doi: 10.1007/s10708-022-10808-z
- MDENI, N. L., Adeniji, A. O. Okoh, A. I., y Okoh, O. O. (2022). "Analytical Evaluation of Carbamate and Organophosphate Pesticides in Human and Environmental Matrices: A Review" en *Molecules*. Volumen 27, número 3. Doi:10.3390/molecules27030618
- MEYBECK, M (2002). "Riverine quality in the Anthropocene: propositions for global space and time analysis, illustrated by the Seine River" en *Aquat. Sci.* Volumen 64, pp. 376-393, Doi: 10.1007/PL00012593.
- MORA, A., García Gamboa, M., Sánchez Luna, M. S., Gloria García, L., Cervantes Avilés, P., y Mahlkecht, J. (2021). "A review of the current environmental status and human health implications of one of the most polluted rivers of Mexico: The Atoyac River, Puebla" en *Science of the Total Environment*. Volumen 782. Doi:10.1016/j.scitotenv.2021.146788
- MORCILLO, L. V. (2018). "Un aula para la justicia social" en *Revista del Cisen Tramas/Maepova*. Volumen 6, número 1, pp. 37-54.
- OCHOA Noriega, C. A., Aznar Sánchez, J. A., Velasco Muñoz, J. F; y Álvarez Bejar (2020). "The use of water in agriculture in Mexico and its sustainable management: a bibliometric review" en *Agronomy J.* Volumen 10, número 12. Doi:10.3390/agronomy10121957 10 1957
- OSPAR (2005). *List of Chemicals for Priority Action in its current form was adopted in 2005*. Disponible en: <https://www.ospar.org/work-areas/hasec/hazardous-substances/priority-action>.
- PÉREZ-Maldonado. I.N., Trejo, A., Ruedert, C., Jovel-Rdel, C., Méndez, M.P., Ferrari, M., Saballos-Sobalvarro, E., Alexander, C., Yáñez-Estrada, L., Lopez, D., Henao, S., Pinto, E. R.; y F. Díaz-Barriga, (2010). "Assessment of DDT levels in selected environmental media and biological samples from Mexico and Central America" en *Chemosphere*. Volumen 78, número 10, pp. 1244-1249. Doi: 10.1016/j.chemospha.2009.12.040
- RAUCH JN. (2012). "The present understanding of Earth's global anthrobiogeochemical metal cycles" en *Mineral Economics*. Volumen 25, número 1, pp. 7-15. Doi. org/10.1007/s13563-011-0011-8
- RODRÍGUEZ-Varela, M., Durán-Álvarez, J. C., Jiménez-Cisneros, B., Zamora, O., y Prado. B. (2021). "Occurrence of Perfluorinated Carboxylic Acids in Mexico City's Wastewater: A Monitoring Study in the Sewerage and a Mega Wastewater Treatment Plant" en *The Science of the Total Environment*. Volumen 774. Doi:10.1016/j.scitotenv.2021.145060
- ROUT, P. R., Zhang, T. C., Bhunia, P. y R. Y. Surampalli (2021). "Treatment technologies for emerging contaminants in wastewater treatment plants: A review" en *Science of the Total Environment*. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141990>

- SEGARRA, A., Mauduit, F., Amer, N., Biefel, F., Hladik, M., Connon, R; y S. Brander, (2021). “Salinity Changes the Dynamics of Pyrethroid Toxicity in Terms of Behavioral Effects on Newly Hatched Delta Smelt Larvae” en *Toxics*. Volumen 9, número 2: 40. Doi:10.3390/toxics9020040
- SHAKIR, E., Zahraw, Z. y Al-Obaidy, A.H.M.J. (2017). “Environmental and Health Risks Associated with Reuse of Wastewater for Irrigation” en *Egyptian Journal of Petroleum*. Volumen 26, pp. 95-102. Doi.org/10.1016/j.ejpe.2016.01.003
- SHANMUGANATHAN, R., Sibtain Kadri, M., Mathimani, T., Hoang, Le. Q, y Pugazhendhi. A. (2023). “Recent innovations and challenges in the eradication of emerging contaminants from aquatic systems” en *Chemosphere*. Volumen 332. Doi: 10.1016/j.chemosphere.2023.138812
- TUNSARINGKARN, T, Siriwong, W., Rungsiyothin, A. y Nopparabundit, S. (2012) “Occupational exposure of gasoline station workers to BTEX compounds in Bangkok, Thailand” en *Int. J. Occup. Environ. Med.* Volumen 3, pp. 117-125.
- VÁZQUEZ-Rodríguez, G.-A. (2023). “La acción Comunitaria Contra La “basurización” de Hidalgo, México” en *Letras Verdes. Revista Latinoamericana De Estudios Socioambientales*. Número 34. Doi: 10.17141/letrasverdes.34.2023.5960
- VÁZQUEZ-Salvador, N., Silva-Magaña, M. A., Tapia-Palacios, M. A., Mora-López, M., Félix-Arellano, E., Rodríguez-Dozál, S., Riojas-Rodríguez, H., y Mazari-Hiriart, M. (2020). “Household water quality in areas irrigated with wastewater in the Mezquital Valley, Mexico” en *J. Water Health*. Volumen 18, número 6, pp. 1098-1109. Doi: 10.2166/wh.2020.095
- VEGA López, E. (2019). “Presiones hídricas, amenazas climáticas y pérdidas de biodiversidad en México: agenda y políticas inaplazables del nuevo gobierno” en *Economía*. Volumen 16, número 46, pp. 126-135.
- WANG, A.T., Li, J., Wang, Q., Fang, B., Yuan, G. L., y Duan, X. C. (2021). “Polycyclic aromatic hydrocarbons in sedimentary cores of Tibetan Plateau: Influence of global warming on cold trapping” en *Environmental Pollution*. Volumen 278, pp. 1-9. Doi:10.1016/j.envpol.2021.116916
- YADAV, S., Kumar S., y Haritash, A. K. (2023). “A comprehensive review of chlorophenols: Fate, toxicology and its treatment” en *Journal of Environmental Management*. Doi:10.1016/j.jenvman.2023
- YAN Jiang, Yanying Yao, Haolang Liu, Shengmin Zhang, Xin Bai, Xiulan Ma, Yujun Wang, y Qibiao Ren. (2023). “Volatile organic compounds conversion pathways and odor gas emission characteristics in chicken manure composting process” en *Frontiers in Ecology and Evolution*. Doi:10.3389/fevo.2023.1192132
- ZHANG, Y., P. Zhang, Z. Song, S. Huang, T. Yuan, P. Wu, V. Shah, M. Liu, et al., (2023). “An updated global mercury budget from a coupled atmosphere–land–ocean model: 40% More re-emissions buffer the effect of primary emission reductions” en *One Earth*. Doi:10.1016/j.oneear.2023.02.004