



Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, Ciudad de México, México.
ISSN 2707-2207 / ISSN 2707-2215 (en línea), marzo-abril 2026,
Volumen 10, Número 2.

https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v10i2

DE LA CONTAMINACIÓN AL DESEQUILIBRIO HORMONAL: EL CASO DEL RÍO ATOYAC Y LA FERTILIDAD FEMENINA

**FROM POLLUTION TO HORMONAL IMBALANCE: THE
CASE OF THE ATOYAC RIVER AND FEMALE FERTILITY**

Karen Madai Cotzomi Castro

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, México

Paloma Montserrat Rosas Licona

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, México

Adrian Gustavo Badillo Morales

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, México

Jorge Raúl Cerna Cortez

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, México

Victorino Alatraste

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, México

De la Contaminación al Desequilibrio Hormonal: El Caso del Río Atoyac y la Fertilidad Femenina

Karen Madai Cotzomi Castro¹

madacast10@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0002-6349-4928>

Facultad de Ciencias Químicas
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
México

Paloma Montserrat Rosas Licona

rosaspaloma122@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0001-0025-4444>

Facultad de Ciencias Químicas
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
México

Adrian Gustavo Badillo Morales

adrianbadillo060@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0003-1371-7166>

Facultad de Ciencias Químicas
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
México

Jorge Raúl Cerna Cortez

jorge.cerna@correo.buap.mx

<https://orcid.org/0000-0003-4392-7028>

Dirección de Innovación y Transferencia del
Conocimiento de la Benemérita Universidad
Autónoma de Puebla
México

Victorino Alatraste

victorino.alatraste@correo.buap.mx

<https://orcid.org/0000-0001-8680-5018>

Facultad de Ciencias Químicas
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
México

RESUMEN

La cuenca del Río Atoyac, en México, constituye una zona crítica de contaminación ambiental debido al crecimiento industrial y urbano, así como a la deficiente gestión de residuos. En sus aguas y suelos se han identificado metales pesados, plaguicidas, compuestos orgánicos volátiles y microplásticos, a los cuales la población se expone cotidianamente por ingesta, inhalación y contacto dérmico. Muchos de estos compuestos actúan como disruptores endocrinos, con efectos adversos específicos sobre la salud reproductiva femenina. Esta revisión analiza la evidencia disponible sobre la asociación entre dichos contaminantes y alteraciones hormonales, endometriosis, síndrome de ovario poliquístico, falla ovárica prematura y fallos de implantación, así como complicaciones gestacionales. Los hallazgos resaltan la necesidad de estudios en las comunidades aledañas al río y de políticas públicas más estrictas de control y prevención.

Palabras clave: río Atoyac, disruptores endocrinos, infertilidad, reproducción

¹ Autor principal

Correspondencia: madacast10@gmail.com

From Pollution to Hormonal Imbalance: The Case of the Atoyac River and Female Fertility

ABSTRACT

The Atoyac River basin in Mexico is a critical area of environmental contamination due to industrial and urban growth, as well as poor waste management. Heavy metals, pesticides, volatile organic compounds, and microplastics have been identified in its waters and soils, to which the population is exposed daily through ingestion, inhalation, and dermal contact. Many of these compounds act as endocrine disruptors, with specific adverse effects on female reproductive health. This review analyzes the available evidence regarding the association between these contaminants and hormonal alterations, endometriosis, polycystic ovary syndrome, premature ovarian failure, and implantation failure, as well as gestational complications. The findings underscore the need for studies in the communities surrounding the river and for more stringent public policies to control and prevent pollution.

Keywords: Atoyac River, endocrine disruptors, infertility, reproduction

*Artículo recibido 20 marzo 2026
Aceptado para publicación: 20 abril 2026*



INTRODUCCIÓN

La presencia de agentes contaminantes en el aire, agua y suelo, cuando supera los límites permisibles establecidos en las normas, provoca desequilibrios ambientales con repercusiones físicas, químicas y biológicas (Manisalidis et al., 2020). Asimismo, el aumento de la población genera mayor demanda de producción, consumo de bienes y servicios, lo cual incrementa la demanda de agua y disminuye la calidad del recurso hídrico, afectando los servicios ecosistémicos, la biodiversidad de este y la salud de la población (Estrada-Rivera et al., 2022). Un caso representativo es la Cuenca del Alto Atoyac en México, que se extiende por 4000 km². Su origen se encuentra en las escorrentías y el deshielo de los volcanes Iztaccíhuatl-Popocatepetl en Puebla, atraviesa Tlaxcala y desemboca en la presa Manuel Ávila Camacho, abarcando 69 municipios con millones de habitantes (CONAHCYT, 2023). A lo largo de su trayectoria recibe efluentes como los ríos Zahuapan en Tlaxcala, el Río Rabanillo, Zapatero y San Francisco en Puebla, además de la presa Echeverría (Figura 1) (Covarrubias-López et al., 2023).

Cabe mencionar que el río recibe por parte de industrias alimentarias, mineras, manufactureras y químicas efluentes que, por sus contaminantes, incrementan la degradación ambiental (Javan et al., 2025). Además, la interconexión entre el crecimiento demográfico, la industrialización, la expansión urbana incontrolada, las actividades humanas, la combustión de combustibles fósiles, procesos naturales y la agricultura (Javan et al., 2025; Rao & Parsai, 2025 & Rodríguez-Espinosa et al., 2023); han propiciado el incremento de descargas urbanas e industriales hacia la cuenca, convirtiéndola en uno de los ríos más contaminados de México (CONAHCYT, 2023; Covarrubias-López et al., 2023).

Esta situación se manifiesta en los estados de Puebla y Tlaxcala, donde opera un gran número de industrias, muchas de las cuales vierten sus aguas residuales sin un tratamiento adecuado (Covarrubias-López et al., 2023). Además, la problemática se ve agravada por el incremento del volumen, resultado de las descargas de origen residencial y hospitalario (Mora et al., 2021; Rodríguez-Espinosa et al., 2023). A esto se suma la introducción de metales pesados en los cuerpos de agua y el suelo, lo cual afecta directamente a la cadena alimenticia (Ward et al., 2025). Esta contaminación, lejos de ser un problema aislado, muestra una estrecha vinculación entre el agua, el suelo y el aire, cuyos efectos multiplican los daños en los ecosistemas y los seres vivos (Javan *et al.*, 2025).



Por ejemplo, las industrias contaminan por tres vías: emisiones atmosféricas, aguas residuales y generación de residuos sólidos que afectan a la tierra y a los cuerpos de agua, a través de escorrentías u otro tipo de arrastre (Javan *et al.*, 2025).

Figura 1

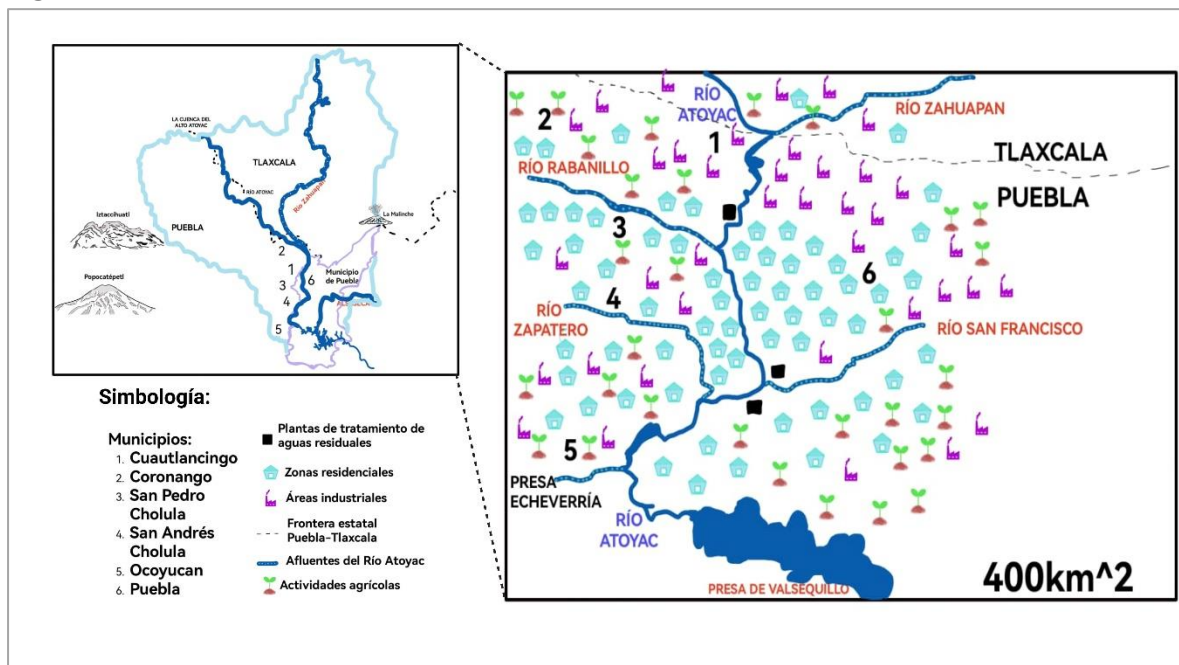


Figura 1. Representación visual del paso del Río Atoyac a través de los estados de Puebla y Tlaxcala. Imágenes modificadas de Covarrubias-López et al. (2023) & Mora et al. (2021)

La dinámica anteriormente mencionada conduce a la presencia en el agua, suelo y aire de los contaminantes más perjudiciales para la salud reproductiva: los disruptores endocrinos (EDCs, por sus siglas en inglés). Los EDCs son sustancias exógenas que, incluso en concentraciones ínfimas (del orden de ng/l), dañan el sistema endocrino al actuar como agonistas o antagonistas hormonales (López-Velázquez *et al.*, 2024). Ingresan al organismo por contacto dérmico, inhalación o ingestión (Hassan *et al.*, 2023). Entre sus efectos más relevantes se encuentran los daños a la salud reproductiva, que en mujeres y hembras de otras especies pueden manifestarse como infertilidad, ciclos menstruales alterados, fibromas uterinos, daños ováricos y abortos, aspectos que se desarrollarán más adelante (Hassan et al., 2023).

Ante esta problemática de contaminación, los EDCs emergen como una familia de contaminantes particularmente crítica por sus graves efectos sobre la salud reproductiva. Sin embargo, el impacto concreto de estos compuestos en poblaciones humanas expuestas al medio ambiente sigue siendo un área poco explorada.

and river exposure)” AND “(environmental exposure or reproductive health OR fertility OR infertility OR pregnancy OR miscarriage)” AND “(metals OR pesticides OR glyphosate OR phthalates OR triclosan OR "volatile organic compounds" OR chloroform OR "polycyclic aromatic hydrocarbons)" AND “(endocrine disruptors OR persistent pollutants OR heavy metals OR microplastics OR pesticides OR reproductive toxicity OR infertility OR fertility OR endometriosis)”.

Los criterios de inclusión establecieron que: (a) los documentos debían estar publicados entre 2016 y 2025, (b) ser artículos de investigación, revisiones o informes gubernamentales en inglés o español, y (c) abordar específicamente la contaminación del Río Atoyac y sus efectos en la reproducción femenina. Se excluyeron capítulos de libro, ponencias, trabajos de congresos y documentos duplicados. Posteriormente, el proceso de selección se realizó en tres etapas: (1) filtrado inicial por título y eliminación de documentos no relevantes respecto al tema central, (2) evaluación de resúmenes para verificar la pertinencia temática y (3) análisis del contenido completo para validar la calidad y la relevancia de la información. Tras este proceso, se seleccionaron 37 publicaciones que cumplieron con todos los criterios establecidos, complementadas con informes gubernamentales pertinentes.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Fuentes que contaminan al Río Atoyac

El deterioro ambiental del Río Atoyac deriva directamente de la expansión demográfica y la urbanización, manifestándose a través de actividades agrícolas y residenciales que han alterado sus características físicas, químicas, biológicas, hidrológicas y morfológicas (Mora et al., 2021; Covarrubias-López et al., 2023). Mora et al. (2021) señalan que, antes de entrar a la ciudad de Puebla, el cauce recibe contaminantes procedentes de las escorrentías agrícolas. No obstante, este problema se intensificó a causa del desarrollo económico e industrial de las últimas décadas en los estados de Puebla y Tlaxcala (Covarrubias-López et al., 2023). Incluso se reporta que el río recibe efluentes de distintas zonas industriales, plantas petroquímicas y aguas residuales municipales.

Una vez dentro de la zona metropolitana, la carga de contaminantes se incrementa sustancialmente debido a la deficiente regulación de descargas de aguas residuales (Covarrubias-López et al., 2023). Se estima que alrededor de 4500 industrias ubicadas en las inmediaciones del cauce y sus afluentes vierten residuos sin un control efectivo (Mora et al., 2021; CONAHCYT, 2023).



Asimismo, las plantas de tratamiento de aguas residuales del estado descargan directamente al río o a sus afluentes, lo que contribuye significativamente a su degradación ambiental (Mora et al., 2021; Covarrubias-López et al., 2023).

Las zonas industriales asentadas en la cuenca del Río Atoyac, tanto en Puebla como en Tlaxcala, abarcan diversos sectores productivos. Entre estos destacan los corredores y parques industriales automotrices, que concentran aproximadamente 170 empresas. Además, ramas como la textil, química, alimentaria, farmacéutica, construcción, metalurgia, metalmecánica, cerámica, vidrio, plásticos, minería, automotriz, papel, cartón, pinturas y servicios hospitalarios son incluidas (Mora et al., 2021; Covarrubias-López et al., 2023; CONAHCYT, 2023). Manisalidis et al. (2020) destacan que la incineración municipal, las plantas de energía eléctrica, refinerías, petroquímica, metalurgia, química y fertilizantes contribuyen significativamente a este deterioro ambiental. Finalmente, es importante considerar que la afectación del río no solo tiene un origen antropogénico; también influyen fuentes naturales como incendios forestales, tormentas de polvo, quemadas agrícolas y erupciones volcánicas.

Caracterización de contaminantes y evaluación de la calidad del agua del Río Atoyac

Estrada-Rivera *et al.* (2022) evaluaron la calidad del agua mediante cinco parámetros: Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5), Demanda Química de Oxígeno (DQO), Coliformes Fecales, Unidades de Toxicidad y Sólidos Suspendidos Totales. Sus resultados revelaron concentraciones elevadas de todos estos contaminantes, una condición que impide la autorrecuperación del río debido, principalmente, a la baja concentración de oxígeno disuelto que inhibe la biodegradación de la materia orgánica.

Posteriormente, Covarrubias-López *et al.* (2023) identificaron que los indicadores DBO5 y DQO, junto con las concentraciones de metales pesados y cianuro, superaban los Límites Máximos Permisibles (LMP) establecidos en la NOM-001-SEMARNAT-2021. Este estudio también detectó Compuestos Orgánicos Volátiles (COV) por encima de los LMP, entre los que se encuentran cloroformo, cloruro de vinilo, 1,4-diclorobenceno, hexaclorobutadieno, tricloroetileno, benceno, 1,2-dicloroetano, 1,1-dicloroetileno, tetracloruro de carbono y tetracloroetileno. Asimismo, se reportaron COV en menores concentraciones, como la metiletilcetona, piridina, clorobenceno y hexaclorobenceno.



Cabe mencionar que la presencia de contaminantes se extiende a otros compuestos, como fenoles, hidrocarburos aromáticos policíclicos, bifenilos policlorados y anilina (Mora *et al.*, 2021). Finalmente, también se ha documentado la existencia de plaguicidas e insecticidas (organoclorados), así como herbicidas que incluyen el hexaclorociclohexano, 1,1,1 tricloro-2,2-bis(p-clorofenil) etano (DDT), 1,1 dicloro-2,2-bis-p-clorofenil etileno (DDE), clordano, Aldrín, Mirex y glifosato (Covarrubias-López *et al.*, 2023; Mora *et al.*, 2021).

La Tabla 1 presenta una clasificación ampliada de otros contaminantes reportados en el Río Atoyac, que abarca desde metales pesados y sustancias químicas hasta microplásticos y compuestos farmacéuticamente activos.

Tabla 1. Diversidad de contaminantes detectados en el Río Atoyac

Categoría	Ejemplos de contaminantes	Referencia
Sustancias químicas	Benceno, tolueno, xileno	Covarrubias-López <i>et al.</i> , 2023
Metales pesados y otros	Al, As, Cd, Co, Cu, Cr, Sr, Fe, Mg, Hg, Mo, Ni, Pb, Zn; en sedimento: S, Ba, V	Covarrubias-López <i>et al.</i> , 2023; Castresana <i>et al.</i> , 2018; Mora <i>et al.</i> , 2021
Microplásticos	Ésteres de ácido ftálico (DEHP, DnHP, DPP, BBP, DEP), fibras sintéticas, pellets, películas y fragmentos de bolsas	Dueñas -Moreno <i>et al.</i> , 2023; Shruti <i>et al.</i> , 2018
Compuestos farmacéuticamente activos (PhACs)	Diclofenaco, naproxeno, triclosán	Mora <i>et al.</i> , 2021
Otros Contaminantes	Colorantes, fosfato, anilina, sulfato, grasas y aceites, nitrato, nitrito, bifenilos policlorados (PCB) y hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAB)	CONAHCYT, 2023; Mora <i>et al.</i> , 2021; Hernandez-Ramirez <i>et al.</i> , 2019

Vías de exposición humana a los contaminantes

Contaminación a nivel de agua

Edo *et al.* (2024) definen la contaminación hídrica como la introducción de contaminantes en cuerpos de agua superficiales o subterráneos, con consecuencias negativas para los ecosistemas y la disponibilidad de agua potable.



En el contexto del Río Atoyac, la problemática proviene de las escorrentías urbanas y agrícolas, la lixiviación de vertederos y zonas de cultivo, y las descargas directas de aguas residuales (tratadas o sin tratar) de origen industrial, hospitalario y doméstico (Dueñas-Moreno et al., 2023; Giri et al., 2024; Mora et al., 2021; Zuri et al., 2023). A estas vías se suman las deposiciones atmosféricas, tanto húmedas como secas (Giri et al., 2024; Montano et al., 2025). Una vez en el medio ambiente, los contaminantes pueden infiltrarse en el suelo y alcanzar los mantos acuíferos o evaporarse, perpetuando su ciclo (Ahmad et al., 2024; Giri et al., 2024; Shekhar et al., 2024). De esta manera, la exposición humana ocurre principalmente por contacto directo con el agua, ingesta de agua subterránea contaminada proveniente de pozos o manantiales (Meng et al., 2025; Shekhar et al., 2024), y a través de la contaminación cruzada en alimentos cultivados con aguas del río, los cuales son consumidos tanto por la población como por el ganado (Mora et al., 2021; Shekhar et al., 2024).

Contaminación a nivel de suelo

Los contaminantes presentes en el río se incorporan al suelo principalmente mediante procesos de adsorción, originados por descargas de aguas residuales, deposición atmosférica y actividades antropogénicas asociadas a industrias químicas, petroquímicas, metalúrgicas y de fertilizantes (Ashry & Naggar, 2025; Manisalidis et al., 2020; Meng et al., 2025; Montano et al., 2025; Zuri et al., 2023). Entre los más frecuentes destacan metales pesados, hidrocarburos y pesticidas, los cuales se acumulan significativamente en los suelos y subsuelos (Manisalidis et al., 2020). La movilidad y persistencia de las sustancias se determinan por la succión del suelo, parámetro cuyo comportamiento está definido por la curva suelo-agua característica (Rojas & Rojas, 2005). La complejidad de esta relación incorpora el fenómeno de histéresis, de modo que la capacidad de retención y transporte del suelo no es única, sino que depende de la trayectoria de humectación y de secado (Rojas et al., 2020). Los modelos de estructura porosa dual, que consideran la distribución de cavidades y enlaces, permiten describir matemáticamente este comportamiento, evidenciando el alcance de la histéresis y, en consecuencia, la capacidad del suelo para liberar o retener (Rojas & Rojas, 2005).

Posteriormente, los contaminantes pueden ser absorbidos por los cultivos, acumulándose en raíces, tallos, hojas o granos, lo que facilita su incorporación a la cadena alimentaria (Meng et al., 2025).



Los humanos se vuelven susceptibles a través de la ingesta indirecta de alimentos contaminados y por contacto dérmico con suelos o polvos, que pueden penetrar a través de heridas, glándulas sudoríparas y folículos pilosos (Giri et al., 2024; Zuri et al., 2023). Adicionalmente, ciertos contaminantes como los hidrocarburos aromáticos policíclicos pueden movilizarse mediante volatilización y lixiviación (Montano et al., 2025).

Contaminación a nivel del aire

El aire representa una vía de exposición secundaria, aunque relevante, ya que facilita la dispersión de contaminantes hacia el agua y el suelo. Este proceso ocurre principalmente mediante la deposición ácida, que altera el pH y afecta a cultivos y ecosistemas acuáticos (Manisalidis et al., 2020). Las emisiones industriales, urbanas y agrícolas (que liberan vapores, gases y partículas) son las fuentes primarias de estos contaminantes (Giri et al., 2024). Dichas emisiones transportan partículas de polvo de distintos tamaños (suspendidas, sedimentadas y pesadas) que contienen contaminantes originados en el río (Zuri et al., 2023; Manisalidis et al., 2020). La población entra en contacto con estos aerosoles y deposiciones atmosféricas por inhalación y penetración cutánea (L. Ali et al., 2024; Giri et al., 2024; Zuri et al., 2023; Meng et al., 2025). Una vez inhaladas, las partículas pueden depositarse en el sistema respiratorio, migrar al sistema linfático o circulatorio, o ser fagocitadas por macrófagos (Giri et al., 2024).

Efectos de los disruptores endocrinos en la reproducción femenina

Como se ha documentado anteriormente, la cuenca del Río Atoyac presenta una carga significativa de metales pesados, metaloides, compuestos orgánicos, microplásticos, pesticidas, entre otros (Covarrubias-López et al., 2023; Castresana et al., 2018; Mora et al., 202). Si bien no existen estudios que evalúen directamente sus efectos en la población femenina local, la evidencia de investigaciones sobre estos contaminantes por separado revela un riesgo considerable para la salud reproductiva.

Metales pesados

Szcześna *et al.* (2022) señalan que los metales pesados poseen propiedades carcinogénicas y mutagénicas, capaces de generar alteraciones endocrinas y daños neurológicos. En modelos animales, el cadmio, plomo, mercurio y arsénico inducen estrés oxidativo, lo que deriva en degeneración de la estructura ovárica, alteraciones del desarrollo folicular, apoptosis, infertilidad y fallo ovárico prematuro



(Pérez-Debén et al., 2020). Por su parte, el plomo y el cadmio también se asocian a alteraciones endocrinas, dismenorrea, endometriosis, miomas uterinos y fallos de implantación, asimismo, con riesgos como preeclampsia, abortos espontáneos y partos prematuros (Collin et al., 2022; Kumar et al., 2019; Laws et al., 2021; Pérez-Debén et al., 2020). En la Tabla 2 se resumen estos hallazgos.

Tabla 2. Efecto de los metales pesados en mujeres y hembras.

Individuo afectado	Plomo	Cadmio
Mujer no gestante	Alteración endocrina (acumulación en glándulas). Infertilidad y desajustes hormonales. Alteración del eje hipotálamo-hipofisario (FSH, LH, TRH (hormona liberadora de tiotropina), testosterona).	Dismenorrea, esterilidad, menstruaciones anormales. Alteración de la esteroidogénesis y endometriosis. Asociación con fibromas uterinos. Disminución del grosor endometrial y de la expresión de ER- α (receptor de estrógenos alfa). Decidualización precoz.
Embarazadas	Abortos espontáneos. Partos prematuros. Hipertensión gestacional.	Preeclampsia. Partos prematuros.
Fetos/Neonatos	Bajo peso al nacer. Alteraciones del desarrollo fetal (defectos en transcripción de ADN). Defectos del tubo neural.	Disminución de peso al nacer.
Animales	Inhibición de la implantación en ratones. Alteraciones estructurales del endometrio.	Alteraciones morfológicas y moleculares del endometrio. Fallo en implantación (ratas). Apoptosis en células endometriales.

Información recopilada de Agaram et al. (2025), Collin et al. (2022), Kumar et al. (2019), Laws et al. (2021), Pérez-Debén et al. (2020).

Por otro lado, el cromo se asocia con un mayor riesgo de abortos espontáneos, partos prematuros y bajo peso neonatal (Kumar *et al.*, 2019). Además, en ratas, el níquel provoca mortalidad embrionaria, bajo peso y malformaciones en las crías, como consecuencia de su genotoxicidad y de la alteración en los mecanismos de reparación del ADN; este metal también promueve la tumorigénesis al estimular el crecimiento y la proliferación celular (Du Plessis *et al.*, 2023).



De manera similar, el cobalto reduce la fertilidad y el número de sitios de implantación en ratones, y sus altas concentraciones placentarias se han vinculado con cardiopatías congénitas (Ćwiertnia et al., 2022). Asimismo, el molibdeno interfiere con la fertilidad: un exceso de este elemento altera el ciclo estral y el desarrollo embrionario en ratones, ya que compite con los cofactores enzimáticos del cobre, induciendo una deficiencia secundaria de este mineral (González-Martin et al., 2024).

Metaloides y otros elementos

En cuanto a otros elementos, el arsénico afecta la salud reproductiva al alterar la menarquia, reducir la esteroidogénesis gonadal, inducir apoptosis en células germinales y provocar infertilidad. Durante el embarazo, induce muerte fetal, bajo peso materno y neonatal, estrés oxidativo, inflamación placentaria y partos prematuros (Kumar et al., 2019; Adeogun et al., 2024). Estudios en ratas confirman estos efectos, observándose una reducción del peso ovárico, del grosor uterino (especialmente en el miometrio) y de la cantidad de folículos viables y glándulas endometriales (Pérez-Debén et al., 2020). Por otra parte, la exposición materna al vanadio (ya sea a través del aire, agua o alimentos contaminados) se ha relacionado con neonatos de bajo peso (Kumar et al., 2019). Mecánicamente, el exceso de hierro puede inducir ferroptosis y daño ovárico, lo que afecta la maduración endometrial y deriva en infertilidad (Zhang et al., 2023). Finalmente, altas concentraciones sanguíneas de cobre son incompatibles con la implantación embrionaria, un efecto observado en humanos (Pérez-Debén et al., 2020).

Compuestos orgánicos volátiles (COV)

El contacto recurrente con compuestos orgánicos volátiles (COV) se correlaciona con una disminución en la cantidad de ovocitos, alteraciones en el desarrollo y maduración folicular y un mayor riesgo de infertilidad (Yang et al., 2024). Por su parte, los bifenilos policlorados (PCB) ejercen sus efectos disruptores al mimetizar hormonas sexuales debido a su afinidad por los receptores estrogénicos y androgénicos, afectando así los sistemas endocrino, nervioso y reproductivo (Montano et al., 2022; Szczęśna et al., 2022). La Tabla 3 sintetiza estos hallazgos.



Tabla 3. Principales alteraciones que generan COV en mujeres

Compuesto	Efectos	Referencias
HAP (Hidrocarburos aromáticos policíclicos)	Alteración en los niveles de estrógenos y foliculogénesis, bajo peso al nacer, neurotoxicidad, trastorno por déficit de atención e hiperactividad, deterioro cognitivo leucemia linfocítica aguda infantil, daño ovárico, anovulación, partos prematuros y malformaciones congénitas en neonatos como cardiopatías, defectos del tubo neural y labio leporino	Montano et al., 2025 Williams et al., 2018
Cloroformo	Menstruaciones irregulares, abortos espontáneos, malformaciones congénitas, muerte fetal	Williams et al., 2018
Fenoles	Insuficiencia ovárica primaria, alteraciones menstruales, senescencia reproductiva	Laws et al., 2021
PCB (Bifenilos policlorados)	Menopausia precoz, desequilibrios menstruales, endometriosis, abortos espontáneos	Montano et al., 2022; Szczęsna et al., 2022

Microplásticos (MP)

Los microplásticos (MP) constituyen contaminantes emergentes con un impacto significativo en la salud reproductiva femenina. En roedores, estas partículas se acumulan en el ovario, donde inducen estrés oxidativo. Este mecanismo provoca una reducción en la cantidad de ovocitos y del tamaño ovárico, altera el ciclo estral, disminuye los niveles de las hormonas folículo estimulante (FSH) y luteinizante (LH), y favorece la falla ovárica prematura (Ali et al., 2024; Giri et al., 2024) Incluso, los MP internalizados en las células de la granulosa activan la vía de señalización Wnt/ β -catenina, un proceso que promueve fibrosis, apoptosis e inflamación, alterando consecuentemente el desarrollo folicular (Giri et al., 2024). Los efectos también se extienden al útero, donde se observa una disminución del grosor endometrial, reducción de glándulas endometriales y desarrollo del síndrome de Asherman (Liu et al., 2021).



Aditivos presentes en los MC, como el ftalato, ejercen efectos negativos al actuar como disruptores endocrinos. Generan una retroalimentación negativa sobre el eje hipotálamo-hipófisis-ovario, lo que se traduce en disfunciones ováricas y uterinas (Land et al., 2025). Un caso particular es el ftalato de bis(2-etilhexilo), detectado en concentraciones elevadas en el líquido folicular de mujeres con síndrome de ovario poliquístico. En células de la granulosa incrementa la producción de andrógenos y favorece la formación de quistes ováricos (Laws et al., 2021). Además, puede causar ciclos menstruales más cortos y un mayor riesgo de tumores benignos en el endometrio y miometrio (Land et al., 2025).

Plaguicidas, insecticidas y herbicidas

Los plaguicidas organoclorados actúan como disruptores endocrinos con actividad estrogénica, induciendo efectos neurotóxicos y cancerígenos, cuya severidad depende de la dosis, el tiempo y la vía de exposición (Kumar et al., 2019; Du Plessis et al., 2023).

Entre estos, el DDT y su metabolito DDE se asocian con el SOP y una reducción de la fecundidad (Laws et al., 2021). Sus efectos crónicos incluyen la aparición de tumores benignos uterinos, endometriosis, desequilibrios menstruales y menopausia precoz. Incrementa el riesgo de pérdida gestacional temprana, abortos espontáneos, partos prematuros, muerte fetal y, en los neonatos, gastroquisis (Kumar et al., 2019; Rani et al., 2020; Laws et al., 2021; Panagopoulos et al., 2023). Estudios en roedores explican estos hallazgos mediante un desbalance hormonal caracterizado por la disminución de progesterona, estrógenos, prostaglandinas, FSH y la globulina transportadora de hormonas sexuales, junto con un aumento de testosterona (Laws et al., 2021; Wang et al., 2025).

De manera similar, el insecticida hexaclorociclohexano se relaciona directamente con el desarrollo de la endometriosis, al incrementar las lesiones uterinas y su vascularización (Laws et al., 2021; Szczesna et al., 2022). Por otro lado, plaguicidas como el Clordano y el Mirex alteran las hormonas sexuales en neonatos y aumentan el riesgo de malformaciones congénitas (Fucic et al., 2021). Los herbicidas a base de glifosato en ratones gestantes provocan una disminución de la progesterona sérica y de la expresión de Lhr (receptor de hormona luteinizante) en el ovario. Asimismo, las ratas Wistar comprometidas mostraron un descenso en la producción ovárica de estrógenos (Serra et al., 2021).



Contaminantes farmacéuticos activos (PhACs)

Los PhACs como los antiinflamatorios no esteroideos, pueden inducir de manera reversible el síndrome del folículo luteinizado no roto, reducir las concentraciones de progesterona y promover la formación de quistes ováricos (Montero et al., 2016).

Dentro de los PhACs, el triclosán (TCS) actúa como agonista de los receptores androgénicos y estrogénicos. Esta actividad hormonal deriva en la elevación de estrógenos y progesterona, favoreciendo la carcinogénesis y, además, contribuye al desarrollo de cáncer de endometrio y ovario (Marques et al., 2022; Maksymowicz et al., 2022). Durante la gestación humana, la presencia de TCS a concentraciones superiores a 0.1 μM induce apoptosis en los sincitiotrofoblastos, en consecuencia, disminuye la expresión de la enzima placentaria 11 β -hidroxiesteroide deshidrogenasa (11 β -HSD2), asociada con abortos espontáneos (Marques et al., 2022). Adicionalmente, concentraciones elevadas de TCS provocan estrés oxidativo en el tejido ovárico, promoviendo apoptosis e incluso aumentando la producción de estradiol y progesterona en las células de la granulosa (Maksymowicz et al., 2022).

CONCLUSIONES

La contaminación de la cuenca del Río Atoyac representa un problema de salud pública crítico en México, lo anterior debido a la presencia de metales pesados, compuestos orgánicos volátiles, microplásticos y plaguicidas. Dada la presencia de evidencia científica limitada y la inexistencia de estudios concluyentes que evalúen directamente a la población femenina local, la literatura revisada demuestra que estos contaminantes podrían ejercer efectos adversos específicos sobre la salud reproductiva. Los resultados obtenidos en biomodelos muestran efectos adversos y dañinos, manifestados en alteraciones endocrinas, falla ovárica prematura, endometriosis, síndrome de ovario poliquístico, fallos en la implantación embrionaria, así como en un mayor riesgo de abortos espontáneos, partos prematuros y bajo peso neonatal. Esta brecha subraya la urgencia de realizar investigaciones específicas en las comunidades aledañas al río para cuantificar con precisión el impacto de esta exposición multifactorial.



REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Adeogun, A. E., Ogunleye, O. D., Akhigbe, T. M., Oyedokun, P. A., Adegbola, C. A., Saka, W. A., Afolabi, O. A., & Akhigbe, R. E. (2024). Impact of arsenic on male and female reproductive function: a review of the pathophysiology and potential therapeutic strategies. *Naunyn-Schmiedeberg S Archives Of Pharmacology*. <https://doi.org/10.1007/s00210-024-03452-6>
- Ahmad, M. F., Ahmad, F. A., Alsayegh, A. A., Zeyaulah, M., AlShahrani, A. M., Muzammil, K., Saati, A. A., Wahab, S., Elbendary, E. Y., Kambal, N., Abdelrahman, M. H., & Hussain, S. (2024). Pesticides impacts on human health and the environment with their mechanisms of action and possible countermeasures. *Heliyon*, 10(7), e29128. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e29128>
- Ali, L., Alam, A., Ali, A. M., Teoh, W. Y., & Altarawneh, M. (2024). A comprehensive Review into Emission Sources, Formation Mechanisms, Ecological Effects, and Biotransformation Routes of Halogenated Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (HPAHs). *Ecotoxicology And Environmental Safety*, 286, 117196. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2024.117196>
- Ali, W., Buriro, R. S., Gandahi, J. A., Chen, Y., Aabdin, Z. U., Bhutto, S., Sun, J., Zhu, J., Liu, Z., & Zou, H. (2024). A critical review on male-female reproductive and developmental toxicity induced by micro-plastics and nano-plastics through different signaling pathways. *Chemico-Biological Interactions*, 394, 110976. <https://doi.org/10.1016/j.cbi.2024.110976>
- Ashry, A., & Naggar, Y. A. (2025). Microplastic contamination in water, fish, and shrimp collected from the Nile River in Upper Egypt poses ecological and human health hazards. *Environmental Research*, 121945. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2025.121945>
- Collin, M. S., Venkatraman, S. K., Vijayakumar, N., Kanimozhi, V., Arbaaz, S. M., Stacey, R. G. S., Anusha, J., Choudhary, R., Lvov, V., Tovar, G. I., Senatov, F., Koppala, S., & Swamiappan, S. (2022). Bioaccumulation of lead (Pb) and its effects on human: A review. *Journal Of Hazardous Materials Advances*, 7, 100094. <https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2022.100094>
- Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT). (2023). 1er informe estratégico. Cuenca del Alto Atoyac (Tlaxcala y Puebla): Región de emergencia sanitaria y



ambiental; problemática socioambiental y recomendaciones para su atención integral (Versión octubre de 2023). <https://conahcyt.mx>

Covarrubias-López, A. C., García-Suastegui, W. A., Valencia-Quintana, R., Avelino-Flores, F., Méndez-Bermúdez, A., & Handal-Silva, A. (2023). Human Impact in the Watershed of the Atoyac River in the Metropolitan Area of Puebla, Mexico. *Sustainability*, 15(13), 10565. <https://doi.org/10.3390/su151310565>

Ćwiertnia, A., Kozłowski, M., & Cymbaluk-Płoska, A. (2022). The Role of Iron and Cobalt in Gynecological Diseases. *Cells*, 12(1), 117. <https://doi.org/10.3390/cells12010117>

Du Plessis, M., Fourie, C., Stone, W., & Engelbrecht, A. (2023). The impact of endocrine disrupting compounds and carcinogens in wastewater: Implications for breast cancer. *Biochimie*, 209, 103-115. <https://doi.org/10.1016/j.biochi.2023.02.006>

Dueñas-Moreno, J., Vázquez-Tapia, I., Mora, A., Cervantes-Avilés, P., Mahlkecht, J., Capparelli, M. V., Kumar, M., & Wang, C. (2023). Occurrence, ecological and health risk assessment of phthalates in a polluted urban river used for agricultural land irrigation in central Mexico. *Environmental Research*, 240, 117454. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.117454>

Edo, G. I., Itoje-Akpokiniovo, L. O., Obasohan, P., Ikpekor, V. O., Samuel, P. O., Jikah, A. N., Nosu, L. C., Ekokotu, H. A., Ugbune, U., Oghoro, E. E. A., Emakpor, O. L., Ainyanbhor, I. E., Mohammed, W. A., Akpogheli, P. O., Owheruo, J. O., & Agbo, J. J. (2024). Impact of environmental pollution from human activities on water, air quality and climate change. *Deleted Journal*. <https://doi.org/10.1016/j.ecofro.2024.02.014>

Estrada-Rivera, A., Fonseca, A. D., Mora, S. T., Suastegui, W. A. G., Bravo, E. C., Vega, R. C., Perales, J. L. M., & Handal-Silva, A. (2022). The Impact of Urbanization on Water Quality: Case Study on the Alto Atoyac Basin in Puebla, Mexico. *Sustainability*, 14(2), 667. <https://doi.org/10.3390/su14020667>

Fucic, A., Duca, R. C., Galea, K. S., Maric, T., Garcia, K., Bloom, M. S., Andersen, H. R., & Vena, J. E. (2021). Reproductive Health Risks Associated with Occupational and Environmental Exposure to Pesticides. *International Journal Of Environmental Research And Public Health*, 18(12), 6576. <https://doi.org/10.3390/ijerph18126576>



- Giri, S., Lamichhane, G., Khadka, D., & Devkota, H. P. (2024). Microplastics contamination in food products: Occurrence, analytical techniques and potential impacts on human health. *Current Research In Biotechnology*, 7, 100190. <https://doi.org/10.1016/j.crbiot.2024.100190>
- Gonzalez-Martin, R., Palomar, A., Perez-Deben, S., Salsano, S., Quiñonero, A., Caracena, L., Fernandez-Saavedra, R., Fernandez-Martinez, R., Conde-Vilda, E., Quejido, A. J., Giles, J., Vidal, C., Bellver, J., & Dominguez, F. (2024). Higher Concentrations of Essential Trace Elements in Women Undergoing IVF May Be Associated with Poor Reproductive Outcomes Following Single Euploid Embryo Transfer. *Cells*, 13(10), 839. <https://doi.org/10.3390/cells13100839>
- Hassan, S., Thacharodi, A., Priya, A., Meenatchi, R., Hegde, T. A., R, T., Nguyen, H., & Pugazhendhi, A. (2023). Endocrine disruptors: Unravelling the link between chemical exposure and Women's reproductive health. *Environmental Research*, 241, 117385. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.117385>
- Hernandez-Ramirez, A., Martinez-Tavera, E., Rodriguez-Espinosa, P., Mendoza-Pérez, J., Tabla-Hernandez, J., Escobedo-Urías, D., Jonathan, M., y Sujitha, S. (2019). Detección, procedencia y riesgos ambientales asociados de contaminantes de la calidad del agua durante eventos anómalos en el río Atoyac, centro de México: Un enfoque de monitoreo en tiempo real. *The Science Of The Total Environment*, 669, 1019-1032. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.138>
- Javan, K., Darestani, M., Ibrar, I., & Pignatta, G. (2025). Interrelated Issues within the Water-Energy-Food Nexus with a Focus on Environmental Pollution for Sustainable Development: A Review. *Environmental Pollution*, 368, 125706. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2025.125706>
- Kumar, S., Sharma, A., & Kshetrimayum, C. (2019). Environmental & occupational exposure & female reproductive dysfunction. *The Indian Journal Of Medical Research*, 150(6), 532. https://doi.org/10.4103/ijmr.ijmr_1652_17
- Land, K. L., Ghuneim, S. M., Williams, B. A., & Hannon, P. R. (2025). Phthalates Disrupt Female Reproductive Health: A Call for Enhanced Investigation into Mixtures. *Reproduction*. <https://doi.org/10.1530/rep-24-0117>



- Laws, M. J., Neff, A. M., Brehm, E., Warner, G. R., & Flaws, J. A. (2021). Endocrine disrupting chemicals and reproductive disorders in women, men, and animal models. *Advances In Pharmacology*, 151-190. <https://doi.org/10.1016/bs.apha.2021.03.008>
- Liu, Z., Zhuan, Q., Zhang, L., Meng, L., Fu, X., & Hou, Y. (2021). Polystyrene microplastics induced female reproductive toxicity in mice. *Journal Of Hazardous Materials*, 424, 127629. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127629>
- López-Velázquez, K., Ronderos-Lara, J. G., Saldarriaga-Noreña, H. A., Murillo-Tovar, M. A., Villanueva-Rodríguez, M., Guzmán-Mar, J. L., Hoil-Canul, E. R., & Cabellos-Quiroz, J. L. (2024). Endocrine-disrupting compounds in urban rivers of the southern border of Mexico: Occurrence and ecological risk assessment. *Emerging Contaminants*, 11(1), 100456. <https://doi.org/10.1016/j.emcon.2024.100456>
- Maksymowicz, M., Ręka, G., Machowiec, P., & Piecewicz-Szczęsna, H. (2022). Impact of Triclosan on Female and Male Reproductive System and Its Consequences on Fertility; A Literature Review. *Journal Of Family & Reproductive Health*. <https://doi.org/10.18502/jfrh.v16i1.8592>
- Manisalidis, I., Stavropoulou, E., Stavropoulos, A., & Bezirtzoglou, E. (2020). Environmental and Health Impacts of Air Pollution: A Review. *Frontiers In Public Health*, 8. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2020.00014>
- Marques, A. C., Mariana, M., & Cairrao, E. (2022). Triclosan and Its Consequences on the Reproductive, Cardiovascular and Thyroid Levels. *International Journal Of Molecular Sciences*, 23(19), 11427. <https://doi.org/10.3390/ijms231911427>
- Meng, F., Liu, D., Bu, T., Zhang, M., Peng, J., & Ma, J. (2025). Assessment of pollution and health risks from exposure to heavy metals in soil, wheat grains, drinking water, and atmospheric particulate matter. *Journal Of Environmental Management*, 376, 124448. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.124448>
- Montano, L., Baldini, G. M., Piscopo, M., Liguori, G., Lombardi, R., Ricciardi, M., Esposito, G., Pinto, G., Fontanarosa, C., Spinelli, M., Palmieri, I., Sofia, D., Brogna, C., Carati, C., Esposito, M., Gallo, P., Amoresano, A., & Motta, O. (2025). Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in the



- Environment: Occupational Exposure, Health Risks and Fertility Implications. *Toxics*, 13(3), 151. <https://doi.org/10.3390/toxics13030151>
- Montano, L., Pironti, C., Pinto, G., Ricciardi, M., Buono, A., Brogna, C., Venier, M., Piscopo, M., Amoresano, A., & Motta, O. (2022). Polychlorinated Biphenyls (PCBs) in the Environment: Occupational and Exposure Events, Effects on Human Health and Fertility. *Toxics*, 10(7), 365. <https://doi.org/10.3390/toxics10070365>
- Montero, A. A., Carnerero, C. S., Vidal, P. I., & Verdugo, A. A. (2016). Antiinflamatorios no esteroideos e infertilidad. *Medicina de Familia SEMERGEN*, 43(1), 72-73. <https://doi.org/10.1016/j.semerg.2016.01.013>
- Mora, A., García-Gamboa, M., Sánchez-Luna, M. S., Gloria-García, L., Cervantes-Avilés, P., & Mahlknecht, 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. *The Science Of The Total Environment*, 782, 146788. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146788>
- Panagopoulos, P., Mavrogianni, D., Christodoulaki, C., Drakaki, E., Chrelias, G., Panagiotopoulos, D., Potiris, A., Drakakis, P., & Stavros, S. (2023). Effects of endocrine disrupting compounds on female fertility. *Best Practice & Research Clinical Obstetrics & Gynaecology*, 88, 102347. <https://doi.org/10.1016/j.bpobgyn.2023.102347>
- Pérez-Debén, S., Gonzalez-Martin, R., Palomar, A., Quiñonero, A., Salsano, S., & Dominguez, F. (2020). Copper and lead exposures disturb reproductive features of primary endometrial stromal and epithelial cells. *Reproductive Toxicology*, 93, 106-117. <https://doi.org/10.1016/j.reprotox.2020.01.008>
- Rani, L., Thapa, K., Kanojia, N., Sharma, N., Singh, S., Grewal, A. S., Srivastav, A. L., & Kaushal, J. (2020). An extensive review on the consequences of chemical pesticides on human health and environment. *Journal Of Cleaner Production*, 283, 124657. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124657>
- Rao, J. N., & Parsai, T. (2025). Pollution and toxicity of heavy metals in wildfires-affected soil and surface water: A review and meta-analysis. *Environmental Pollution*, 125845. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2025.125845>



- Rodriguez-Espinosa, P., Fonseca-Campos, J., Ochoa-Guerrero, K., Hernandez-Ramirez, A., Tabla-Hernandez, J., Martínez-Tavera, E., Lopez-Martínez, E., & Jonathan, M. (2023). Identifying pollution dynamics using discrete Fourier transform: From an urban-rural river, Central Mexico. *Journal Of Environmental Management*, 344, 118173. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118173>
- Rojas, E., & Rojas, F. (2005). Modeling hysteresis of the soil-water characteristic curve. *Soils and foundations*, 45(3), 135-145. https://doi.org/10.3208/sandf.45.3_135
- Rojas, E., Arroyo, H., Horta, J., de la Luz Pérez-Rea, M., López-Lara, T., & Hernández, J. B. (2020). Modeling the soil–water retention curves while the soil is deforming. *Comptes Rendus. Mécanique*, 348(12), 983-1001. <https://doi.org/10.5802/crmeca.63>
- Serra, L., Estienne, A., Vasseur, C., Froment, P., & Dupont, J. (2021). Review: Mechanisms of Glyphosate and Glyphosate-Based Herbicides Action in Female and Male Fertility in Humans and Animal Models. *Cells*, 10(11), 3079. <https://doi.org/10.3390/cells10113079>
- Shekhar, C., Khosya, R., Thakur, K., Mahajan, D., Kumar, R., Kumar, S., & Sharma, A. K. (2024). A Systematic Review of Pesticide Exposure, Associated Risks, and Long-Term Human Health Impacts. *Toxicology Reports*, 13, 101840. <https://doi.org/10.1016/j.toxrep.2024.101840>
- Shruti, V., Jonathan, M., Rodriguez-Espinosa, P., & Rodríguez-González, F. (2018). Microplastics in freshwater sediments of Atoyac River basin, Puebla City, Mexico. *The Science Of The Total Environment*, 654, 154-163. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.054>
- Szczęsna, D., Wiczorek, K., & Jurewicz, J. (2022). An exposure to endocrine active persistent pollutants and endometriosis — a review of current epidemiological studies. *Environmental Science And Pollution Research*, 30(6), 13974-13993. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-24785-w>
- Wang, L., Ma, X., & Liu, J. (2025). Adverse Effects of Pesticides on the Ovary: Evidence from Epidemiological and Toxicological Studies. *Environment & Health*. <https://doi.org/10.1021/envhealth.4c00243>



- Ward, G., Watts, M. P. C., & Hansson, S. R. (2025). The unintended consequences of modernity: Pollution and its effect on reproductive, maternal and fetal health. *Pregnancy Hypertension*, 40, 101204. <https://doi.org/10.1016/j.preghy.2025.101204>
- Williams, A. L., Bates, C. A., Pace, N. D., Leonhard, M. J., Chang, E. T., & DeSesso, J. M. (2018). Impact of chloroform exposures on reproductive and developmental outcomes: A systematic review of the scientific literature. *Birth Defects Research*, 110(17), 1267-1313. <https://doi.org/10.1002/bdr2.1382>
- Yang, Q., Zhang, J., & Fan, Z. (2024). Association between volatile organic compounds exposure and infertility risk among American women aged 18–45 years from NHANES 2013–2020. *Scientific Reports*, 14(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-024-80277-6>
- Zhang, J., Su, T., Fan, Y., Cheng, C., Xu, L., & LiTian, N. (2023). Spotlight on iron overload and ferroptosis: Research progress in female infertility. *Life Sciences*, 340, 122370. <https://doi.org/10.1016/j.lfs.2023.122370>
- Zuri, G., Karanasiou, A., & Lacorte, S. (2023). Microplastics: Human exposure assessment through air, water, and food. *Environment International*, 179, 108150. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2023.108150>

