Pozos Letrina

Residuos petroleros inyectados en las profundidades

Carla Flores Lot
José Rafael Flores Hernández

CartoCrítica
INVESTIGACIÓN, MAPAS Y DATOS
PARA LA SOCIEDAD CIVIL

Ciudad de México. Enero de 2026

ISBN: En trámite

CartoCrítica, A.C.
www.cartocritica.org.mx

Autoría
Carla Flores Lot
José Rafael Flores Hernández

Revisión
Manuel Llano Vázquez Prada

Diseño editorial
Agustín Martínez Monterrubio
comunessomos@gmail.com

Citar como: Flores Lot, C. & Flores Hernández, J. R. (2026). Pozos letrina: residuos petroleros inyectados en las profundidades. CartoCrítica, A.C.

Índice

Resumen 4
Objetivos del estudio 6
1. Introducción 7
2. Pozos de disposición y residuos de la extracción de hidrocarburos 10
2.1. DEFINICIÓN Y CLASIFICACIÓN DE LOS POZOS DE DISPOSICIÓN 12
2.1.1 Tipos de pozos 14
2.1.2 Tipos de residuos derivados de la extracción de hidrocarburos 17
2.2. FLUJOS DEL AGUA PRODUCIDA 20
2.2.1 Agua producida en México 23
2.2.2 Evolución temporal de agua producida en Pemex 25
2.2.2.1 Descarga de agua producida 26
3. Marco normativo 28
3.1. LEGISLACIÓN Y NORMATIVIDAD APLICABLE EN MÉXICO 29
3.2. REGULACIONES INTERNACIONALES SOBRE POZOS DE DISPOSICIÓN 36
3.2.1 El Acuerdo de Escazú y su relevancia para los pozos de disposición 38
4. Transparencia y gestión de la información 40
4.1. DISPONIBILIDAD Y CALIDAD DE LA INFORMACIÓN SOBRE POZOS DE DISPOSICIÓN EN MÉXICO 41
4.2 USO DE LOS DATOS ENTREGADOS Y DISPONIBLES 47
4.2.1 Inconsistencias en la información: Caso Campo Agua Fría 50
4.2.2 Los datos entregados por la ASEA 51
5. Impactos ambientales y sociales 52
5.1. IMPACTOS AMBIENTALES 54
5.1.1 Agua y ecosistemas 54
5.1.2 Suelo 60
5.1.3 Aire 61
5.2 IMPACTOS SOCIALES Y A LA SALUD 61
5.2.1 Casos documentados de daños a las comunidades y a la salud 63
6. Conclusiones 68
7. Recomendaciones 71
8. Bibliografía 73

Resumen

El presente estudio examina la gestión de los pozos de disposición (o pozos letrina) del sector hidrocarburos en México, infraestructuras críticas diseñadas para el confinamiento subterráneo de desechos líquidos y sólidos, principalmente el agua producida. Esta práctica, aunque común globalmente, plantea serias interrogantes sobre la seguridad ambiental y la salud humana debido a que los residuos inyectados contienen sustancias altamente tóxicas, como hidrocarburos, sales, metales pesados, compuestos orgánicos volátiles (COV) y materiales radiactivos de origen natural (NORM). La literatura científica documenta que la exposición a estos fluidos puede causar alteraciones hormonales, daños hepáticos y renales.

La urgencia del análisis se basa en datos duros: el volumen total de agua producida por Pemex aumentó un 95% entre 2000 y 2023, alcanzando 23.21 millones de metros cúbicos [MMm^3] en 2023. De este volumen, 77.7% (18.08 MMm^3) fue reinyectado al subsuelo, siendo el método de disposición dominante en el país. Las concentraciones de contaminantes en estas aguas son extremas; por ejemplo, el benceno en el agua de retorno excede los límites para agua potable hasta en 1,440 veces. Además, los pozos no son infalibles: fallas en su integridad o aumento de presión pueden permitir la migración de contaminantes hacia acuíferos e inducir sismicidad.

Entre los hallazgos centrales se encuentra una opacidad institucional estructural sobre estas operaciones. Las autoridades (ASEA, CNH, Pemex) negaron sistemáticamente el acceso a información crítica como coorde-

nadas geográficas y composición química, alegando seguridad nacional o secreto industrial. La información parcial entregada por Pemex resultó inconsistente: el volumen de agua inyectado reportado por la petrolera a través de solicitudes de información solo explicó, en promedio, 46% del volumen total inyectado que reporta en sus informes de sostenibilidad.

El marco normativo mexicano es fragmentado y deficiente. Las disposiciones de la ASEA carecen de límites cuantitativos de contaminantes y no obligan a la caracterización química rigurosa de todos los residuos, exponiendo vacíos frente a las regulaciones internacionales. La ubicación sistemática de esta infraestructura en territorios marginados se configura como un claro ejemplo de injusticia ambiental.

En conclusión, la combinación del volumen creciente de desechos, los riesgos ambientales documentados y la falta de transparencia pone en grave peligro los derechos colectivos a la salud y a un medio ambiente sano. Es imperativo que México fortalezca los estándares regulatorios y garantice la aplicación plena del Acuerdo de Escazú para asegurar la transparencia y la participación pública en este sector.

Objetivos del estudio

Identificar qué son los pozos de disposición, cómo operan y qué recursos se utilizan para su operación en México. Caracterizar estos pozos a partir de su definición legal y técnica, identificando las distintas tipologías reconocidas en la normatividad vigente. Analizar el funcionamiento y operación de los pozos de disposición, considerando los procesos involucrados y los recursos utilizados.

Evaluar la disponibilidad y accesibilidad de información sobre los pozos de disposición en fuentes oficiales y otros registros, identificando vacíos de información, inconsistencias normativas y limitaciones en la transparencia de los datos.

Identificar si existen riesgos asociados a los pozos de disposición, los potenciales impactos ambientales, tanto en términos de contaminación del suelo y agua como de posibles afectaciones a la salud.

1 Introducción

El sector de los hidrocarburos genera, durante sus etapas de exploración y extracción, grandes volúmenes de desechos que requieren un manejo especializado. Entre las infraestructuras destinadas a este fin se encuentran los pozos de disposición, comúnmente llamados pozos letrina, diseñados para recibir e inyectar en formaciones geológicas profundas desechos líquidos y sólidos como lodos de perforación y, principalmente, agua producida o agua congénita proveniente de los pozos de gas y petróleo. Aunque se trata de una práctica frecuente tanto en México como a nivel internacional, su aparente sencillez técnica contrasta con los riesgos que implica: su operación depende de la integridad a largo plazo del pozo, de la capacidad de confinamiento de las formaciones receptoras, de la posible sismicidad inducida, y de la existencia de reglas claras de monitoreo y de trazabilidad.

En México, el volumen de agua producida casi se ha duplicado desde el año 2000 al 2023. Este aumento se inscribe en el contexto de la maduración de los campos petroleros y la declinación natural de la producción de crudo, y se ve profundizado por los esfuerzos por recuperar un alto volumen de producción. De poco más de 23.2 millones de metros cúbicos de agua de desecho producida por Pemex en 2023, casi el 78% fue reinyectado al subsuelo, confirmando que la disposición profunda es el método dominante en el país.

La relevancia ambiental y de salud de esta práctica es ineludible debido a la evidencia técnica y científica acumulada sobre la complejidad de los fluidos inyectados que pueden contener hidrocarburos, sales, metales, compuestos orgánicos volátiles (COV) y materiales radiactivos de origen natural (NORM). Estos contaminantes pueden comprometer la calidad del agua potable, la biodiversidad, la seguridad alimentaria y la salud comunitaria. La literatura científica documenta efectos como alteraciones hormonales, bioacumulación con potencial tóxico, y daños a órganos.

Asimismo, el aumento de presión en las formaciones receptoras puede facilitar la migración de contaminantes e incrementar el riesgo de sismicidad inducida.

A ello se suma que, en el caso mexicano, el conocimiento público sobre estas operaciones es limitado. La información disponible no permite responder con claridad preguntas básicas sobre cuántos pozos existen, qué tipo de residuos reciben, cómo se monitorean, ni cuál es su desempeño a lo largo del tiempo. Esta falta de información se entrelaza con un marco normativo fragmentado y con mecanismos de vigilancia que no logran cubrir los distintos aspectos técnicos que la disposición profunda exige. El problema no es solo regulatorio: tiene implicaciones sobre el derecho de las comunidades a conocer los riesgos a los que pueden estar expuestas y sobre su capacidad de participar en decisiones que afectan su territorio. En regiones marginadas, donde esta infraestructura se concentra con mayor frecuencia, estos vacíos contribuyen a reproducir condiciones de injusticia ambiental y a crear zonas de sacrificio.

Este estudio surge de la necesidad de comprender mejor cómo funcionan los pozos de disposición en México, qué información existe sobre ellos y cuáles son los riesgos que esta práctica implica en términos ambientales, de salud pública y de acceso a la información. Para ello, el documento combina una revisión técnica y normativa con el análisis de solicitudes de información pública y una síntesis de los impactos documentados en la literatura científica.

En el capítulo dos se describen las características y tipos de pozos de disposición, así como los residuos que reciben. El capítulo tres revisa el marco regulatorio aplicable en México y en otros países. El capítulo cuatro analiza la disponibilidad y consistencia de la información proporcionada por las instituciones responsables. En el capítulo cinco se examinan los impactos ambientales y sociales documentados en estudios nacionales e internacionales. Finalmente, en los capítulos seis y siete se presentan conclusiones y recomendaciones orientadas a fortalecer la regulación, la vigilancia y la transparencia en el manejo de estos pozos.

2 Pozos de disposición y residuos de la extraccion de hidrocarburos

La actividad de la industria de los hidrocarburos comprende diversas etapas clave: exploración, extracción, distribución, procesamiento y comercialización. Durante las etapas de exploración y extracción de hidrocarburos se generan desechos que no pueden eliminarse completamente y son depositados en los llamados pozos de disposición. En México, se utilizan diversos tipos de pozos de disposición para la contención, almacenamiento y manejo de residuos líquidos y sólidos derivados de esta industria. Sin embargo, su implementación plantea interrogantes sobre la seguridad a largo plazo, el monitoreo ambiental y los riesgos asociados con la posible contaminación del suelo y los acuíferos, sismos inducidos y efectos acumulativos difíciles de mitigar.

Dado el potencial de alto impacto en el medio ambiente y la salud de las comunidades, la gestión de los pozos de disposición implica una alta responsabilidad tanto para las empresas productoras como para los organismos e instituciones encargadas de regularlos, es decir, tanto para Petróleos Mexicanos (Pemex) como para la Agencia Nacional de Seguridad Industrial y de Protección al Medio Ambiente del Sector Hidrocarburos (ASEA), la Secretaría de Energía (Sener) y en su momento para la Comisión Nacional de Hidrocarburos (CNH), ahora extinta[1], existe la obligación de rendir cuentas de manera clara y verificable, y las autoridades deben garantizar que toda la información relacionada con estas prácticas sea pública, accesible y comprensible.

Los desperdicios o sobrantes de la extracción de hidrocarburos representan una fuente potencial de contaminación crónica, ya que pueden filtrar sustancias tóxicas como metales pesados, hidrocarburos, sales y compuestos orgánicos persistentes hacia el suelo y cuerpos de agua subterráneos. Esta contaminación es difícil de remediar y puede comprometer la calidad del agua potable, la biodiversidad, la seguridad alimentaria y la salud comunitaria en las regiones afectadas. Por ejemplo, la exposición a los fluidos residuales del sector ha sido vinculada con alteraciones hormonales y bioacumulación con potencial de toxicidad crónica en po-

[1] Desde el 20 de diciembre de 2024 se declaró la extinción de esta Comisión y está en proceso de transición de sus deberes a la Secretaría de Energía (DOF 20 de diciembre 2024 y 18 de marzo de 2025).

blaciones cercanas (Kassotis, y otros, 2016). Además, algunos residuos inyectados en formaciones subterráneas pueden generar presión sobre las fallas geológicas, aumentando el riesgo de sismicidad inducida.

2.1. DEFINICIÓN Y CLASIFICACIÓN DE LOS POZOS DE DISPOSICIÓN

Los pozos de disposición, comúnmente conocidos como pozos letrina, son infraestructuras que se utilizan para la gestión de desechos generados durante la extracción y procesamiento de hidrocarburos. Estos pozos están diseñados para recibir y almacenar desechos líquidos y sólidos, incluyendo lodos de perforación, agua producida y otros fluidos residuales que contienen hidrocarburos. Su funcionamiento se basa en el almacenaje o disposición final de estos residuos, por lo que el potencial de contaminación es alto y se requiere de un manejo muy estricto (Rivera, 2021) (Villegas, Rivera, Herrera, & González, 2014). La disposición se realiza inyectando estos desechos en las formaciones geológicas receptoras, donde se espera que se degraden o se contengan. El diseño de estos pozos se basa en tres supuestos:

1. que estas formaciones receptoras estén a profundidades distintas o mayores que las de las formaciones productoras y de los acuíferos someros, para evitar que el fluido residual entre en contacto con ellas (Figura 1) (ARPEL, 2005);

2. que dichas formaciones receptoras sean permeables, para absorber el desecho, confinadas por una capa impermeable y lo suficientemente profundas para evitar su regreso y la migración de estos fluidos hacia acuíferos y subsuelo; y

3. que la presión de la inyección no supere la presión que soporta la formación receptora antes de fracturarse, llamada presión de fractura,[2] pues de lo contrario se puede abrir paso a estos desechos tóxicos hacia formaciones vecinas, acuíferos y subsuelo, que es justo lo que se debe evitar, por lo que siempre se requiere de pruebas previas para corroborar este factor.

2 https://www.epa.gov/uic/class-ii-oil-and-gas-related-injection-wells consultado el 27 de febrero de 2025.

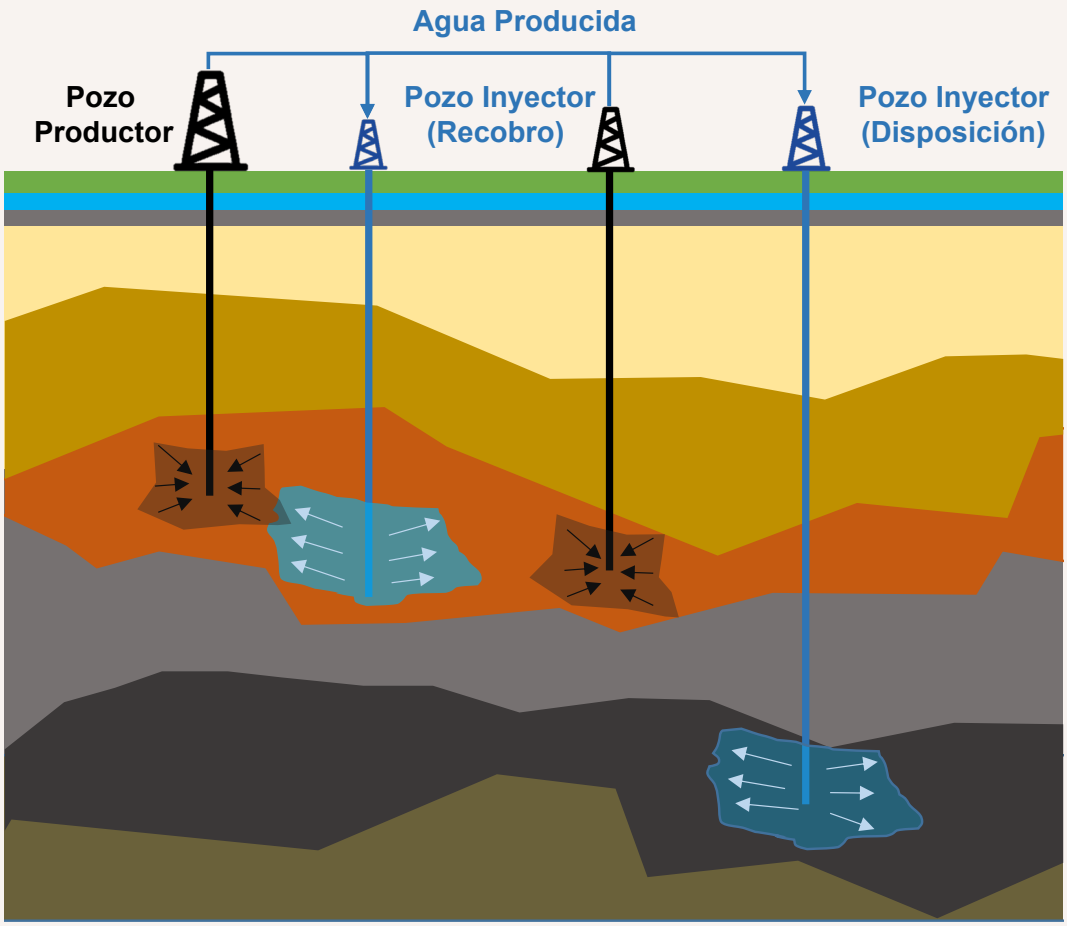


Figura 1. Pozo de disposición donde la inyección se realiza a la formación receptora. Fuente: elaboración propia.

Bajo estos tres supuestos, son necesarios rigurosos estudios previos y estrictas regulaciones para disminuir el riesgo de fugas, liberación de gases tóxicos y contaminación de suelo, acuíferos y entorno circundante (Guo, Geehan, & Ovalle, 2007) (Newman, McCosh, Woolsey, & Boodhay, 2009) (Silva, Alves, & França, 2012). Ante una regulación estricta se requiere de una observancia minuciosa y precisa, por lo que es fundamental identificar y constatar que existe un monitoreo continuo de las condiciones del pozo, de la capacidad de carga de la formación receptora, de la compo-

sición de los desechos o sustancias inyectadas y de la calidad de agua y suelo en las cercanías de estos pozos, en aras de promover la prevención de riesgos y de detectar a tiempo cualquier posible fuga o contaminación para su contención (Mandal, y otros, 2014) (Gurska, y otros, 2009).

2.1.1 TIPOS DE POZOS

Los pozos pueden tener distintos usos según el tipo de fluido que manejen y los objetivos de su operación. Partimos de dos tipos de uso más comunes que son la extracción y la inyección, lo que nos da dos tipos de infraestructuras:

- Pozos productores: que extraen hidrocarburos u otros recursos.
- Pozos inyectores: que inyectan fluidos como agua, gas o CO_2 para mantener presión y estimular la producción, también llamados de recuperación secundaria, o pueden inyectar sustancias para almacenamiento y residuos para disposición final, llamados pozos de disposición o pozos letrina.

Aunque cada tipo de pozo responde a una función técnica específica, en la práctica no siempre son estructuras rígidas e inmutables. Bajo ciertas condiciones geológicas y técnicas, un pozo puede cambiar de rol a lo largo de su vida útil. Por ejemplo, un pozo productor agotado puede reconvertirse en pozo de almacenamiento, aprovechando la formación ya caracterizada y la infraestructura existente; o también puede convertirse en un pozo inyector para estimular pozos nuevos adyacentes. A su vez, un pozo inyector diseñado para recuperación secundaria puede adaptarse para almacenamiento si cumple con los requisitos de contención y extracción, pero es más común que termine siendo un pozo de disposición final (Figura 2). Estas posibles transiciones permiten entender que los pozos de disposición o pozos letrina —aquellos dedicados específicamente a inyectar residuos para su confinamiento subterráneo permanente— forman parte de un ecosistema más amplio de infraestructura subterránea, cuyo ciclo de vida puede extenderse o transformarse con base en decisiones técnicas, económicas y regulatorias.

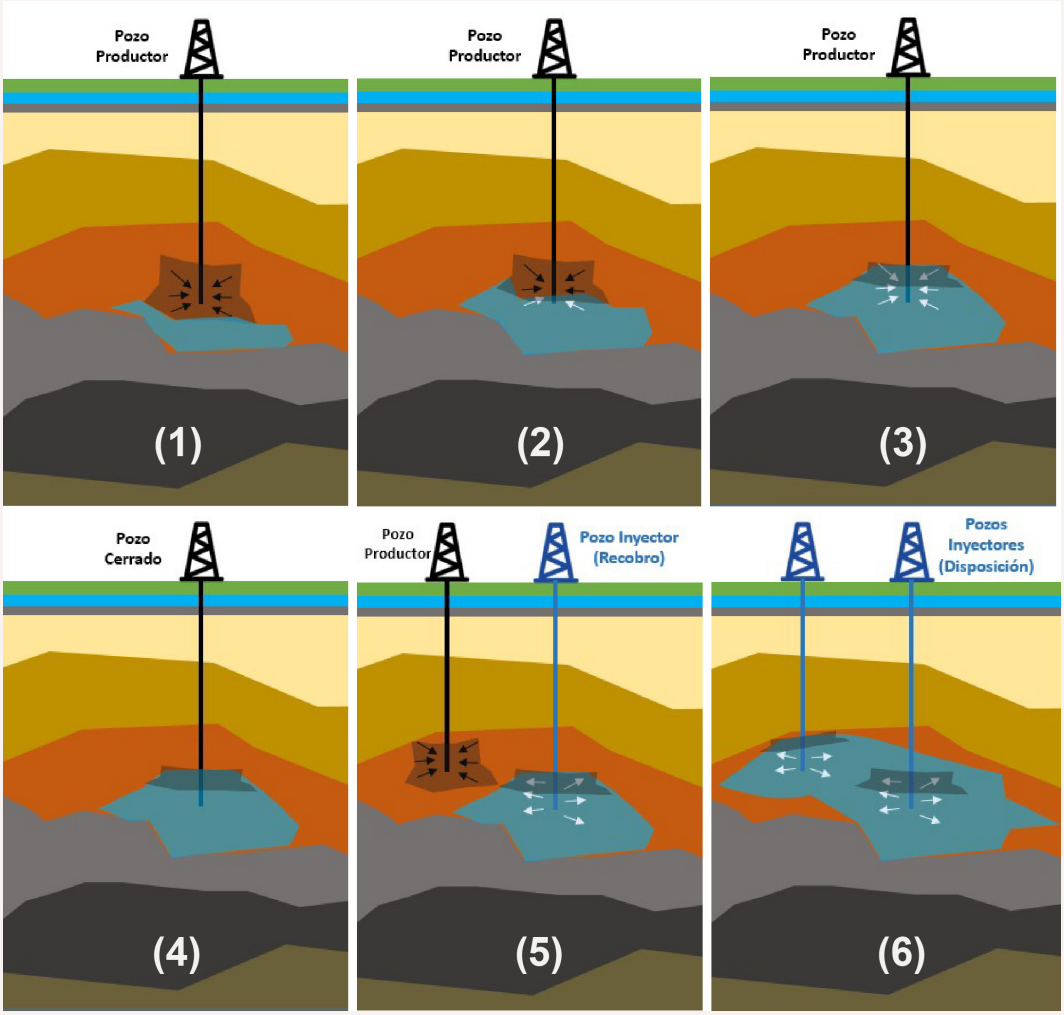


Figura 2. Ejemplo de un pozo productor que se convierte en pozo inyector y termina siendo un pozo de disposición: 1) pozo productor activo, 2) disminución de la reserva de petróleo y avance de acuífero, 3) agotamiento de la reserva, 4) pozo cerrado o taponado (temporalmente), 5) transición a pozo inyector de recobro3 y 6) transición a pozos de disposición. Fuente: elaboración propia.

Esta dinámica en los ciclos de vida de los pozos se ve reflejada en la diversidad de tipos definidos en los *Lineamientos de Pozos* emitidos por la CNH[4] y las *Disposiciones Administrativas de Carácter General* (DACG) *aplicables al diseño, construcción, operación y taponamiento de Pozos de Disposición*,[5] publicadas por la ASEA (Tabla 1).

---

[3] Que estimula la producción de un nuevo pozo.
[4] DOF: 20/09/2024, ACUERDO CNH.43.07/2024 por el que se modifican y adicionan diversas disposiciones de los Lineamientos de Pozos.
[5] DOF: 20/09/2021, DISPOSICIONES Administrativas de carácter general aplicables al diseño, cons-

TABLA 1. TIPOS DE POZOS SEGÚN LA NORMATIVA MEXICANA EN LA MATERIA.

	CNH - LINEAMIENTOS DE POZOS	**ASEA – DACG PARA POZOS DE DISPOSICIÓN**
Pozo de Almacenamiento:	Pozo a perforar o existente a recuperar en Yacimientos agotados, con el propósito de almacenar Hidrocarburos de manera subterránea en estructuras que cuenten con condiciones favorables;	
Pozo Inyector:	Pozo perforado para permitir la inyección de fluidos con fines de recuperación secundaria, recuperación mejorada, almacenamiento o disposición de fluidos;	
Pozo Letrina:	Pozo que deja de ser productor y su objetivo principal es permitir la inyección de recortes de la formación o fluidos residuales que sean producto de la Perforación, para su almacenamiento o desecho;	
Pozo Convertido:		Pozo Existente al cual se le realizaron las modificaciones necesarias y suficientes para ser utilizado como Pozo de Disposición;
Pozo de Disposición:		Pozo conectado a una Formación Receptora que se construye o se habilita para la inyección de Residuos de Manejo Especial del Sector Hidrocarburos con fines de disposición final. Incluye los Pozos Letrina y los Pozos Inyectores con fines de disposición de fluidos;
Pozo Existente:		Pozo cuyo objetivo principal fue la Exploración o Extracción de hidrocarburos y que actualmente se encuentra cerrado de forma temporal o definitiva;

trucción, operación y taponamiento de Pozos de Disposición.

	CNH - LINEAMIENTOS DE POZOS	ASEA – DACG PARA POZOS DE DISPOSICIÓN
Pozo Nuevo:		Pozo que se construye exclusivamente para la inyección de Residuos de Manejo Especial del Sector Hidrocarburos con fines de disposición final;
Taponamiento Permanente:	Actividades que con tapones de cemento y/o Barreras mecánicas en un Pozo, eliminan todo posible flujo hacia la superficie y aíslan los fluidos de formaciones de los Acuíferos, sin la intención de poder ser utilizado o reingresado;	
Taponamiento Temporal:	Actividades que con tapones de cemento y/o Barreras mecánicas en un Pozo eliminan todo posible flujo hacia la superficie y aíslan los fluidos de formaciones de los Acuíferos, dejando el Pozo con la posibilidad de incorporarse a producción de Hidrocarburos en el futuro, o ser usados con otro fin diferente al de producción;	

2.1.2 Tipos de residuos derivados de la extracción de hidrocarburos

Durante las etapas de exploración y producción de hidrocarburos se produce una gran cantidad de desechos, siendo los más importantes por su magnitud volumétrica el agua producida y los desechos de perforación compuestos por los fluidos (o lodos) y recortes de perforación (Reis, 1996). A continuación se describen brevemente estos tipos de desechos, mismos que son los que se inyectan posteriormente en los pozos de disposición:

- Recortes de perforación: fragmentos de roca que se generan durante el proceso de perforación, su composición depende del yacimiento perforado y entre otros componentes, pueden contener hidrocarburos, hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) y metales pesados (Allagoa, 2024).

- Lodos de perforación: utilizados para enfriar y lubricar la broca de perforación, pueden ser base agua o base aceite y contener aditivos químicos que son potencialmente tóxicos (Ball, Stewart, & Schliephake, 2011) (Gaurina-Međimurec, Pašić, Mijić, & Medveď, 2020). Además, existe la posibilidad de que esta mezcla entre en contacto con materiales radiactivos existentes en las profundidades geológicas, como el radón, un gas con propiedades altamente perjudiciales (Pan, y otros, 2025).

- Agua congénita: es el agua atrapada en la roca del yacimiento desde su formación. Puede contener altas concentraciones de sales disueltas (salmueras), minerales, hidrocarburos y otros compuestos orgánicos e inorgánicos que pueden ser tóxicos. Su composición química varía dependiendo del yacimiento y de la interacción con el petróleo o gas presente. Es un componente del agua producida (Morales-Bautista, Dominguez-Rodríguez, & Adams, 2011).

- Agua producida: el agua que sale a la superficie junto con los hidrocarburos durante la extracción de petróleo y de gas. Puede incluir agua congénita pero también agua inyectada en procesos de estimulación, recuperación secundaria o agua de filtraciones externas. Su composición es una mezcla de agua congénita y otros fluidos asociados al proceso de producción. Estas aguas que emergen durante la extracción a menudo contienen altos niveles de sal y otros contaminantes (Gaurina-Međimurec, Pašić, Mijić, & Medveď, 2020).

- Agua de retorno: el fluido inyectado para estimular la producción, como sucede durante la fracturación hidráulica que vuelve a la superficie a través del revestimiento del pozo al aliviar la presión de bombeo. Se componen de una mezcla del fluido inyectado originalmente y materiales que se disuelven o arrastran desde la formación geológica subterránea, y aunque es variable típicamente incluyen elementos tóxicos como los aditivos químicos del fluido de fractura, compuestos orgánicos volátiles (BTEX), hidrocarburos poliaromáticos policíclicos (HAP), altas concentraciones de sales (sólidos totales disueltos – TDS), metales pesados, ácido acético y compuestos halogenados (Luek & Gonsior, 2017) (Lester, y otros, 2015).

Es común que los términos agua congénita y agua producida se usen como sinónimos, de hecho Pemex lo hace y le llama agua congénita al agua producida, pero es importante tener en cuenta que el agua producida puede tener más elementos químicos que el agua de origen de la formación. El agua producida siempre va a contener impurezas, y dependiendo

de la saturación de estas será el daño consecuente para el entorno. Debido a su naturaleza, esta agua tiene la capacidad de contaminar los acuíferos, así como los cuerpos de agua superficial y el suelo, cuando su descarga hacia el medio ambiente o reúso no es llevada de la manera adecuada. Así como los recortes de perforación, la composición química del agua congénita y del agua producida depende de aspectos como la localización geográfica, el tipo de formación desde la cual se está produciendo, los hidrocarburos producidos, o del tipo de químicos y aditivos que se integran al agua inyectada para incrementar la producción o permitir la misma (Veil, 2020). Dentro de los componentes más comunes se incluyen: sales (típicamente con niveles de saturación por encima de la del agua de mar), hidrocarburos, metales pesados, material radiactivo de origen natural, sólidos suspendidos, altos niveles de sólidos disueltos totales, compuestos orgánicos volátiles (COV), gases disueltos, bacterias, químicos y aditivos agregados como anticorrosivos, ácidos, surfactantes, biocidas, rompedores de emulsiones, entre otros (Veil, 2020) (Reis, 1996) (Bandlien, y otros, 2024).

Los fluidos inyectados, y en particular los usados en las operaciones de fractura hidráulica, se mezclan con aguas subterráneas profundas —también llamadas aguas milenarias— y con componentes minerales del sustrato rocoso, algunos de los cuales presentan características corrosivas o radiactivas. Esta interacción se intensifica cuando el mismo fluido es usado múltiples veces para presurizar o estimular la producción y transforma gradualmente la composición del fluido, pudiendo generar elevadas concentraciones de elementos tóxicos y materiales radiactivos de origen natural o NORM por sus siglas en inglés (Pan, y otros, 2025) (Ochoa-Caballero & Rivera-Parra, 2021). Además, cuando estas aguas de retorno contienen niveles significativos de bromuro y son dirigidas a plantas convencionales de tratamiento de aguas residuales, diseñadas principalmente para residuos domésticos, ocurre una reacción química con el cloro utilizado en las etapas finales de desinfección. Esta reacción puede formar trihalometanos (THMs), compuestos orgánicos volátiles reconocidos por su potencial cancerígeno y sus efectos nocivos sobre la salud reproductiva y el desarrollo humano (Abraham, y otros, 2023).

En general, todos estos desechos contienen hidrocarburos, salmuera, metales pesados, HAP, COV y diversos elementos potencialmente tóxicos, es decir son residuos de manejo especial o residuos peligrosos cuyo manejo está regulado y condicionado mundialmente, lo que plantea serios riesgos ambientales en su disposición final si no reciben un tratamiento previo y un manejo adecuado y riguroso (Iturbe, Serrano, & Bustillos, 2006).

Las consecuencias ambientales de la disposición inadecuada de estos desechos son serias, pues la filtración de contaminantes puede llevar a la contaminación del suelo y de acuíferos, afectando la calidad del agua potable y los ecosistemas circundantes (Rivera, 2021). Además, se ha identificado que el cemento utilizado en el revestimiento de pozos se deteriora por descalcificación progresiva, lo que debilita su estructura y es susceptible a sufrir microfracturas, liberando tanto fluidos como gases ahí contenidos (Márquez, Sánchez, Martín-del-Río, Arribas, & Blasco-López, 2011). La falta de regulación y supervisión en la disposición de estos residuos ha sido un tema de preocupación, ya que muchas veces se realizan prácticas que no cumplen con los estándares ambientales, lo que puede resultar en daños irreversibles a los ecosistemas locales y afectar la salud humana de poblaciones aledañas (Villegas, Rivera, Herrera, & González, 2014). De hecho, existen reportes que registran presencia de compuestos orgánicos volátiles (COV) y otros contaminantes en estos desechos, mismos que de volatilizarse pueden contribuir a la contaminación del aire, lo que representa un riesgo adicional para la salud pública (Lyman & Mansfield, 2018). Además, la acumulación de metales pesados y otros contaminantes en el suelo puede tener efectos adversos en la flora y fauna locales, alterando los ciclos biogeoquímicos y afectando la biodiversidad (Gilbert, Nwachukwu, & Uzoije, 2018).

2.2. FLUJOS DEL AGUA PRODUCIDA.

Dado el volumen considerable de agua producida que se genera durante la extracción de hidrocarburos, su manejo se convierte en una necesidad operativa y ambiental ineludible. De acuerdo con Veil (2020), hay diversos caminos para el agua producida en la industria petrolera: 1) inyección al yacimiento para mejorar la producción; 2) inyección a una formación no productora para su desecho; 3) descarga a cuerpos de agua superficiales -idealmente con tratamiento previo-; 4) evaporación; 5) contratación de servicios de un tercero para el manejo y desecho del agua; 6) tratamiento y reúso dentro de la industria petrolera y 7) tratamiento y reúso para fines fuera de la industria petrolera. No obstante, tratar el agua producida con el fin de permitir su reúso o descarga bajo normativas ambientales implica costos significativamente más altos que otras formas de manejo, lo que ha llevado a la industria a privilegiar opciones menos exigentes como la reinyección al subsuelo, debido a que requiere poco o nulo tratamiento, permite aprovechar pozos inactivos existentes y reduce la necesidad de transporte y almacenamiento (Eyitayo, y otros, 2024). Los costos económicos de tratar el agua producida están en función de distintas variables como la calidad del agua de entrada y los requerimientos sobre el agua de salida, siendo este último

aspecto dependiente del uso final que se dará al agua, dichos usos finales también determinarán el tipo de equipos requeridos y los esquemas de tratamiento necesarios. El rango de costos totales asociados al tratamiento de agua producida varía según los distintos usos finales, y entre mayor sea la calidad de agua requerida, mayores serán los costos asociados a su tratamiento. Al respecto, Siagian y otros (2018) justo señalan que la reinyección tiene costos bajos, por requerir un tratamiento mínimo de remoción de sólidos e hidrocarburos, comparado contra el caso de uso final para agua potable e irrigación, que es altamente sensible a la salinidad original del agua (Figura 3).

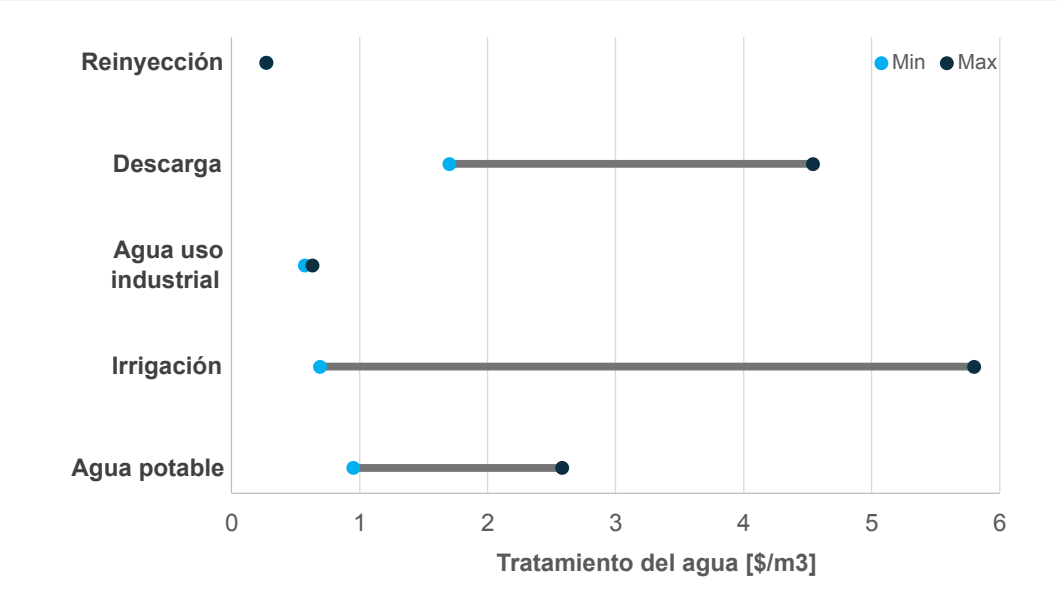


Figura 3. Costo total del tratamiento de agua producida para distintos usos finales en dólares por m3. Fuente: elaboración propia con datos de Siagian y otros (2018).

Los datos sobre el manejo del agua producida a nivel internacional, incluidos los reportes de países como Estados Unidos, confirman que la inyección al subsuelo es el método más utilizado para su disposición. De acuerdo con la Asociación Internacional de Productores de Petróleo y Gas (IOGP, por sus siglas en inglés), que recopiló información ambiental del 2023 de 43 empresas con operaciones en 67 países, el 63% del agua producida fue reinyectada al subsuelo, mientras que el 38% fue descargada en cuerpos de agua superficiales (IOGP, 2024). El informe señala que la mayoría de las operaciones de reinyección corresponden a la explotación en tierra firme, pues el manejo del agua en operaciones costa afuera presenta mayores desafíos operativos y limitaciones técnicas, por lo que en instalaciones costa afuera el método más común es el tratamiento y

vertido al mar, dadas las limitaciones para realizar reinyecciones. Como resultado, en 2023, el 83% del agua producida en tierra fue reinyectada, mientras que en actividades costa afuera solo se logró un 40% (Figura 4). Si bien en este reporte no se especifica si la inyección del agua producida es con fines de estimulación o de disposición final, sí existen estimaciones desagregadas para Estados Unidos, donde más del 90% del agua producida fue reinyectada al subsuelo entre 2007 y 2017 (Veil, 2020).

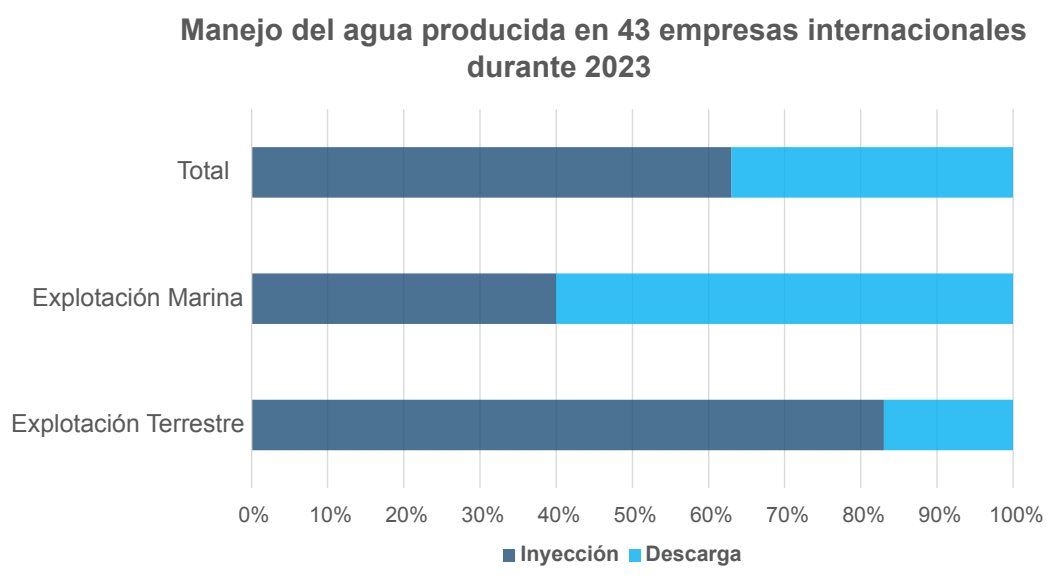


Figura 4. Manejo del agua producida en 43 empresas internacionales. Fuente: elaboración propia con datos de IOGP (2024).

Para los datos del agua producida de Estados Unidos en 2017, Veil (2020) desagregó la información en porcentajes de manejo sobre objetivo de reinyección y destino final. Del 91.5% que fue reinyectada, el 43.6% se inyectó con fines de recuperación mejorada (aumento de presión, barrido con agua, entre otros), el 38% para disposición final, y un 9.9% fue transferido a terceros para su tratamiento y finalmente inyección para disposición final. El 8.5% restante que no fue reinyectado, se manejó mediante otras estrategias: el 1.4% fue tratado y reutilizado dentro de la misma industria (por ejemplo, en la preparación de fluidos de perforación o fracturación); el 5.5% se descargó en cuerpos de agua superficiales; el 0.4%, principalmente en zonas áridas, se evaporó en superficie mediante fosas administradas por terceros; y el 1.3% fue tratado para usos externos a la industria, como riego o control de polvo en caminos, cuando las condiciones lo permitieron (Figura 5).

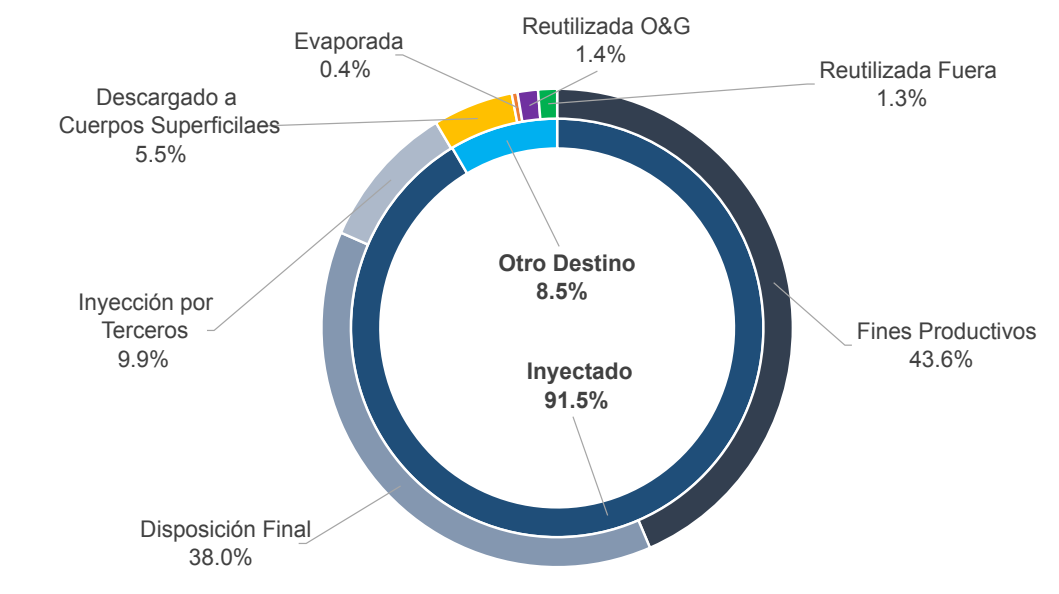


Figura 5. Manejo del agua producida en Estados Unidos durante 2017.
Fuente: elaboración propia con datos de Veil (2020).

2.2.1 Agua producida en México

Los informes de sostenibilidad que Pemex publica anualmente[6] contienen datos de volumen de agua "congénita" generada, y si bien la definen como el agua de la formación que posteriormente es separada del crudo, utilizan el concepto para cualquier agua que regresa de la perforación y actividad de producción, es decir, en este apartado la consideraremos como **agua producida** dadas las definiciones revisadas anteriormente.

El informe correspondiente a 2023, que es el último publicado a la fecha (2025), señala que para ese año se separó de los hidrocarburos un volumen de 23.21 millones de metros cúbicos [MMm^3] de agua producida, proveniente de solo dos subsidiarias: Pemex Exploración y Producción (PEP) quien registró 21.01 MMm^3 y Pemex Logística, quien reportó un total de 2.2 MMm^3 (Figura 6). En cuanto al destino de esta agua, se reporta que el 77.7%, es decir 18.08 MMm^3 fue reinyectado al subsuelo en pozos de disposición autorizados, lo que supondría que no se reutilizó para estimulación productiva. Este dato confirma que, al igual que en el resto del mundo, en México la reinyección al subsuelo es el principal medio de disposición del agua producida, y es mayor al 63% global pero menor al 90% de Estados Unidos.

[6] Disponibles en https://www.Pemex.com/etica_y_transparencia/transparencia/informes/Paginas/informes.aspx, consultados en marzo de 2025.

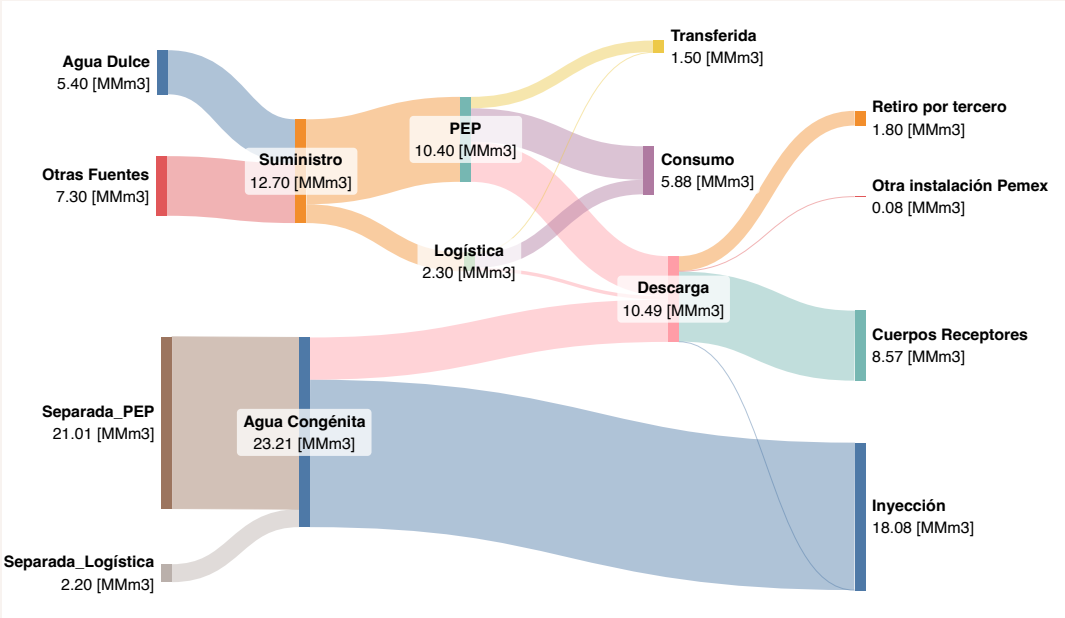


Figura 6. Flujos de agua para Pemex Exploración y Producción (PEP) y Pemex Logística durante 2023. Fuente: elaboración propia con datos de Pemex (2023).

Lo que no podemos encontrar en estos informes es dónde ocurren estas inyecciones, en cuántos pozos y con qué frecuencia se realizaron, dónde se almacenan los fluidos en el periodo previo, cómo y por dónde se transportan ni qué composición química tienen antes de ser inyectados.

Como se observa en la Figura 6, el agua producida que no fue inyectada a los pozos de disposición se descargó a "cuerpos receptores" previo tratamiento, es decir, cuerpos de aguas superficiales, señalando que dichas descargas cumplen con la normatividad establecida por la CONAGUA, pero sin datos que lo confirmen. El volumen de agua producida que fue descargado a los ríos u otros cuerpos de agua en 2023 corresponde a 5.13 MMm^3 lo que representa el 22.3% del agua producida que se generó en ese año. Este porcentaje es ligeramente menor a la cifra reportada internacionalmente pero cinco veces mayor al de Estados Unidos, donde solo se descarga el 5.5%.

Ahora bien, Pemex no solo descarga agua producida a los cuerpos de agua, sino que también aguas residuales de otros usos, teniendo una descarga a cuerpos de agua de 8.57 MMm^3 (Figura 6). Pero con qué calidad, en qué cuerpos de agua, qué monitoreo hay de ellos, qué tratamientos previos se implementaron, con qué frecuencia se hacen las descargas y si se mezcla agua producida con el resto de aguas residuales, no se reporta en estos informes y no se localizó información proactiva en los portales de las dependencias.

2.2.2 Evolución temporal de agua producida en Pemex

Los informes de sostenibilidad de Pemex se empezaron a publicar en el año 2000, lo que permite revisar estos volúmenes a través del tiempo, y visualizar su generación, inyección y descarga. Con los datos reportados y corroborando con datos de Comisión Nacional de Hidrocarburos,[7] se elaboró una gráfica temporal (Figura 7) donde se puede observar que en las últimas dos décadas se ha presentado un incremento en cuanto al volumen total de agua producida en conjunto con los hidrocarburos producidos. Mientras que en el año 2000 se separaban un total de 11.9 MMm^3 de agua producida, para el año 2023 este valor ya ascendía a 23.2 MMm^3, lo que representa un incremento del 95%. Este comportamiento es natural ya que conforme los campos petroleros maduran la cantidad de agua que se produce en conjunto con el petróleo y el gas aumenta. Vale la pena hacer notar que el grueso de la producción petrolera en México proviene de campos que se encuentran en una etapa madura y cuya producción está declinando (Ferrari & Flores-Hernández, 2024). En la gráfica también se incluye la producción de petróleo crudo a lo largo del periodo, visualizando la tendencia de incremento del agua producida conforme la producción de crudo declina.

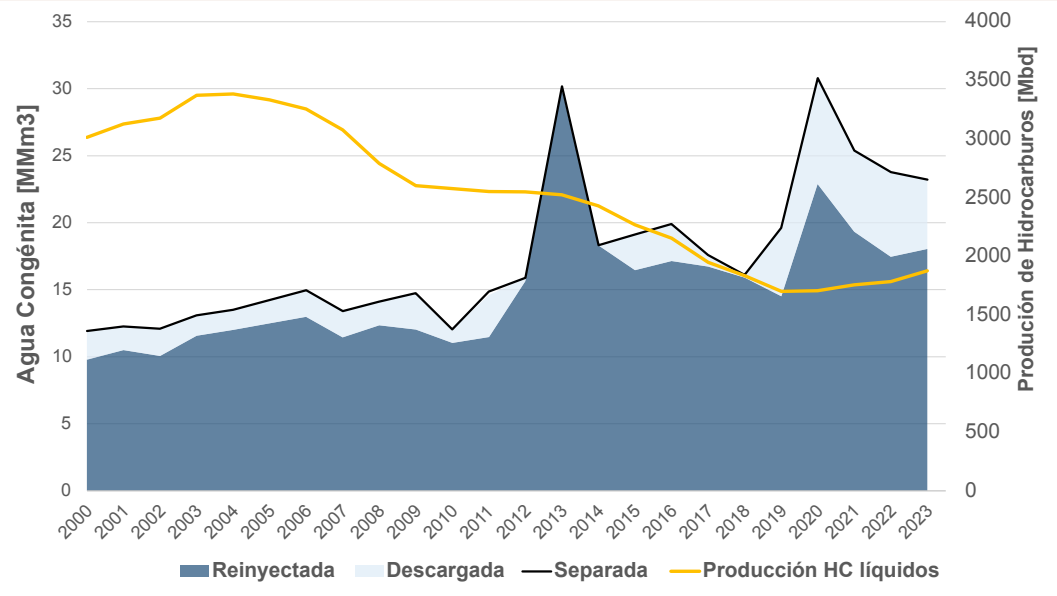


Figura 7. Producción de agua congénita en PEMEX, así como su disposición final, durante los años 2000 a 2023. Fuente: elaboración propia con datos de Pemex y CNH (2025).

[7] Sistema de Información de Hidrocarburos, disponible en https://sih.hidrocarburos.gob.mx/, consultado en febrero de 2025.

Otro aspecto importante que influye en la cantidad de agua que se produce con los hidrocarburos es el ritmo de extracción, ya que cuando este es muy acelerado se produce un efecto de conificación en los yacimientos y el agua presente en los mismos se filtra hacia los pozos productores. Los datos mostrados en la Figura 7 muestran que durante el último sexenio ha ocurrido un incremento importante en cuanto al volumen de agua separada de los hidrocarburos, el cual podría estar relacionado con los intentos para restablecer la plataforma de producción petrolera de manera acelerada, de hecho, durante el primer mes del año 2025 algunas refinerías en los Estados Unidos presentaron quejas a Pemex por el alto contenido de agua en el petróleo crudo exportado, a lo que algunos especialistas señalaron la posibilidad de que esto sucediera por la sobre explotación de los yacimientos en territorio nacional (Usla, 2025). Es evidente que el incremento en la producción de hidrocarburos líquidos en México durante el último sexenio se ha acompañado de un incremento sustancial en cuanto al volumen de agua producida generada.

En cuanto a la disposición del agua producida durante este periodo de 23 años, se tiene que en promedio se inyectó el 86% de la misma, con algunos periodos como el transcurrido entre los años 2012 y 2014, donde el 100% del agua separada fue reinyectada. Durante los últimos años, de 2019 a 2023, además del ya comentado aumento en el volumen total de agua producida también se observa una disminución en la inyección de ésta, siendo solo el 75%, lo cual es 11% menos que el promedio observado en el periodo y lo cual implica que hubo un incremento del agua que es descargada hacia los cuerpos receptores, llegando a 25%.

2.2.2.1 Descarga de agua producida

Como se ha señalado antes, el agua producida junto con los hidrocarburos tiene asociada una gran cantidad de contaminantes, que pueden estar presentes de forma natural o que su agregación ocurre como parte de los procesos productivos. Si bien, Pemex señala que el agua descargada a cuerpos de agua recibe un tratamiento previo, al revisar los datos reportados en los informes de sostenibilidad de Pemex sobre indicadores de calidad del agua como la Demanda Biológica de Oxígeno (DBO), los Sólidos Suspendidos Totales (SST) o Hidrocarburos Presentes Totales (HPT) en el agua descargada, se observa un aumento en las concentraciones de estos elementos que coincide con el aumento del volumen de agua producida descargada. Dado que manejan cifras agregadas y anuales, Pemex argumenta que este aumento se debe a la descarga de agua producida en la Terminal Marítima de Dos Bocas ubicada en el estado de

Tabasco (PEMEX, 2023). Con los datos recabados de estos informes, se elaboraron las gráficas de la Figura 8, donde se puede observar lo expresado anteriormente, donde las descargas totales han disminuido desde 2013 mientras que las de agua producida se han disparado desde 2019 (a), y este pico coincide con el aumento de hidrocarburos, SST y DBO (b) (c) y (d) entre 2018 y 2021.

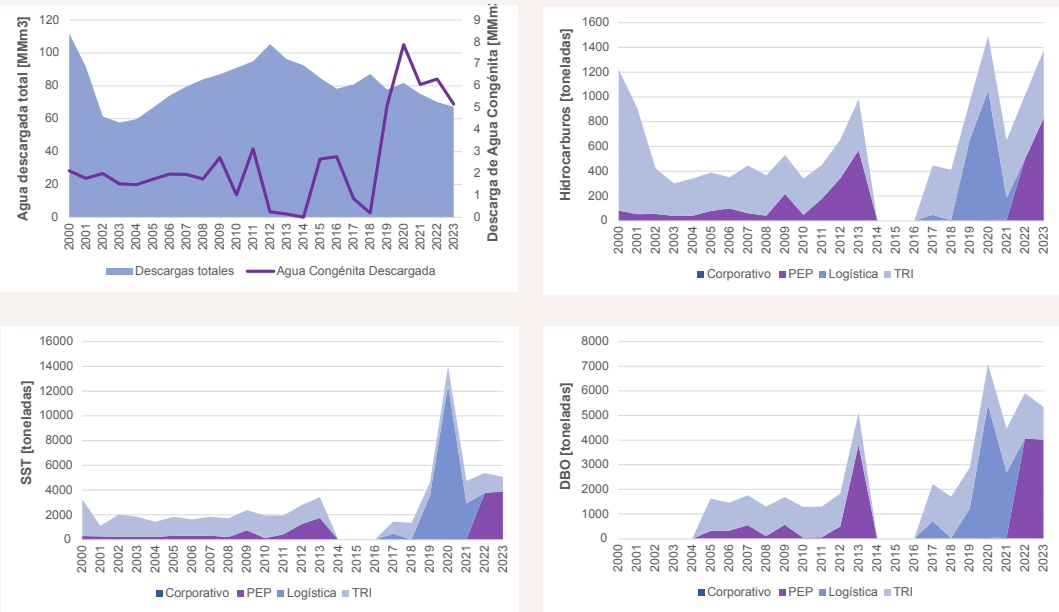
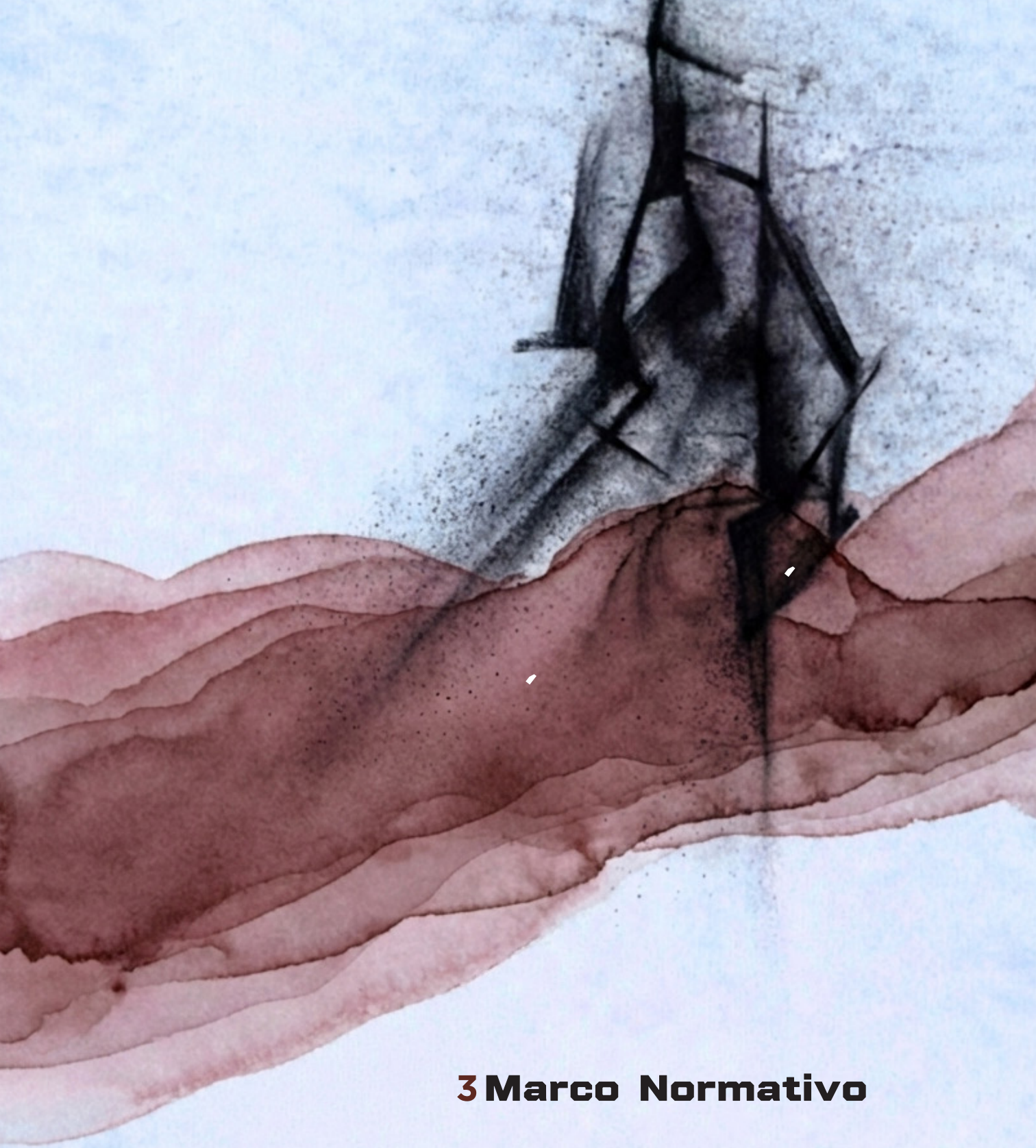


Figura 8. Descargas de agua e indicadores de calidad del 2000 a 2023: (a) descargas de agua total y congénita por parte de Pemex; (b) HPT; (c) SST y (d) DBO de las descargas. Fuente: elaboración propia con datos de (PEMEX, 2025).

La obligación de reportar la calidad del agua descargada en las actividades petroleras, junto con el incremento reciente en el volumen de agua producida dispuesta mediante descargas, permite visibilizar parcialmente su impacto en la presencia de ciertos contaminantes. No obstante, es importante señalar que en los últimos años solo alrededor del 25 % del agua congénita ha sido manejada mediante descargas directas —sin que se informe públicamente en qué sitios se realizan—, mientras que el resto es reinyectado al subsuelo sin que exista información disponible suficiente sobre su calidad, el estado de los pozos receptores, los criterios técnicos de inyección ni el destino final de ese fluido.



3 Marco Normativo

3.1. LEGISLACIÓN Y NORMATIVIDAD APLICABLE EN MÉXICO

En México, el marco legal que regula los pozos de disposición —también señalados en los instrumentos indistintamente como pozos letrina— está compuesto por un conjunto de instrumentos jurídicos de distinto nivel jerárquico y con competencias distribuidas entre diversas instituciones, principalmente la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), la Agencia de Seguridad, Energía y Ambiente (ASEA) y la Secretaría de Energía (SENER). Si bien existen disposiciones específicas para este tipo de infraestructura, la mayor parte de la regulación se articula de forma indirecta a través del marco general sobre manejo de residuos y actividades del sector hidrocarburos (Tabla 2).

En el nivel más alto, la *Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos* establece en su artículo 4º el derecho humano a un medio ambiente sano y en su artículo 6º el derecho al acceso a la información. Estos principios son fundamentales para exigir transparencia, prevención del daño ambiental, y protección de los derechos colectivos frente a prácticas de disposición subterránea que puedan afectar acuíferos, suelos o territorios habitados.

Desde el enfoque ambiental resguardado por la Semarnat, la *Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente* (LGEEPA) establece el principio de prevención, así como la obligación de someter ciertas obras y actividades a una evaluación de impacto ambiental, lo cual puede incluir pozos de disposición si se determina que generan riesgos significativos. Por su parte, la *Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos* (LGPGIR) define a los residuos de manejo especial (RME) y residuos peligrosos (RP), y prohíbe su disposición en sitios no autorizados, sin embargo, no regula específicamente la inyección subterránea como método de disposición final.

La ASEA, a través de sus *Disposiciones administrativas de carácter general aplicables al diseño, construcción, operación y taponamiento de Pozos de Disposición* publicadas en 2021, es la única entidad que ha emitido lineamientos específicos para la construcción, operación y taponamiento de pozos de disposición. Estas disposiciones introducen requisitos técni-

cos y operativos (como pruebas de hermeticidad, monitoreo de presión y análisis de riesgos), pero no establecen límites cuantitativos sobre contaminantes, ni obligan a caracterizar químicamente todos los residuos a inyectar. Además, las capacidades de inspección y seguimiento de la ASEA en campo son limitadas.

El *Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes* (RETC), normado por la NOM-165-SEMARNAT-2013, obliga a reportar la liberación o transferencia de más de 200 sustancias peligrosas, y muchas de ellas están estrechamente relacionadas con los lodos de perforación, las aguas producidas, congénitas y de retorno. Si bien, el RETC está diseñado para reportes de emisiones a aire, agua o suelo y no refleja adecuadamente las transferencias a formaciones geológicas profundas mediante pozos, estas inyecciones pueden registrarse como transferencia a suelo anualmente. No obstante en 2015 la Semarnat publicó la *Guía de Criterios Ambientales para la Exploración y Extracción de Hidrocarburos Contenidos en Lutitas*, en la cual se reconoce explícitamente el riesgo de presencia de materiales radiactivos de origen natural (NORM, por sus siglas en inglés) en las aguas de retorno. Advierte que estos materiales pueden movilizarse desde formaciones geológicas profundas durante el proceso de fracturamiento hidráulico y contaminar el agua producida o de retorno. Ante este riesgo, recomienda que los operadores realicen monitoreo radiológico específico y que, en caso de detectarse niveles significativos, se apliquen las directrices del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) para el manejo, control y disposición de residuos radiactivos. Sin embargo esto no es vinculante ni se menciona en ningún instrumento normativo.

En materia de descargas, CONAGUA sería la entidad responsable de la regulación, pero no regula ni emite autorizaciones específicas para pozos de disposición, su mandato en materia de aguas subterráneas y cuerpos receptores puede y debe ser activado cuando exista riesgo de afectación hídrica.

TABLA 2. RESUMEN DE MARCO NORMATIVO MEXICANO EN TORNO A LOS POZOS DE DISPOSICIÓN.

Documento	Institución	Artículos	Contenido
Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA)	Semarnat	15, 28, 120, 121, 124, 129, 133, 136, 139	Principio de prevención de contaminación, obligación de evaluación de impacto ambiental, descargas de origen industrial o extractivo reguladas, prohibido descargar o infiltrar aguas con contaminantes, tratamiento previo obligatorio, comunicar a autoridades de la salud de riesgos, monitoreo sistemático y permanente, prevenir contaminación de suelos y riesgos a la salud.
Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR)	Semarnat	5, 19, 28, 31-XI, Título quinto, 67	Definición de residuos de manejo especial y residuos peligrosos, incluyendo residuos de rocas, lodos y residuos tóxicos; obligatoriedad de planes de manejo, mención explícita de lodos de perforación como residuo peligroso, no confinamiento sin tratamiento previo, no diluir para confinamiento.
Reglamento de la LGPGIR	Semarnat	51, 96, 98, 100, 101, 102, 103, 104	En formaciones geológicas: se requiere autorización previa, con modelos y pruebas de integridad de pozos de inyección y de interacción de residuos con yacimiento, monitoreo comparativo de la calidad del agua subterránea, asegurar estabilidad e integridad del confinamiento, fuera de ANP, asegurar la nula migración de residuos de la cavidad, instrucciones de cierre de confinamiento.

Documento	Institución	Artículos	Contenido
DISPOSICIONES administrativas de carácter general que establecen los lineamientos para la gestión integral de los Residuos de Manejo Especial del Sector Hidrocarburos.	ASEA		Están orientadas a confinamiento en superficie terrestre y tienen un perfil meramente administrativo asociado a trámites. Identifica la generación de residuos de manejo especial y peligrosos, se obliga al registro como generador y a la presentación de planes de manejo, pero no hay mención de los lodos de perforación ni aguas producidas. A los recortes solo se les menciona al inicio antes de la expedición de las disposiciones.
DISPOSICIONES Administrativas de carácter general aplicables al diseño, construcción, operación y taponamiento de Pozos de Disposición.	ASEA	Todo	Todo el documento es sobre estos pozos y los residuos contemplados. Hace referencia a la NOM-001-ASEA-2019 y señala el requerimiento de autorización previo a las inyecciones. Se señalan los tipos de pozos y la conversión entre éstos, y se especifica que únicamente se pueden inyectar fluidos compatibles con la formación receptora. Establecen datos obligados como capacidad de carga, análisis de riesgo, comprobar aislamiento hidráulico, hacer pruebas técnicas, notificar construcción e inyecciones, monitoreos continuos y entregar informes de actividad, inactividad y abandono. Deben entregar un programa para la Operación de Inyección, donde entre otros datos se pide la composición del fluido de inyección.

Documento	Institución	Artículos	Contenido
DISPOSICIONES administrativas de carácter general que establecen los Lineamientos en materia de seguridad industrial, seguridad operativa y protección al medio ambiente para realizar las actividades de Exploración y Extracción de Hidrocarburos en Yacimientos No Convencionales en tierra.	ASEA	2, 63, 65, 67, 68, 69, 71, 72, 73	Se hace referencia al fluido de retorno y a los pozos de disposición como receptores de éste. Su almacenamiento debe ser en presas portátiles herméticas. Se exhorta a su tratamiento y reúso. Se debe registrar volumen producido y tipo de disposición. Caracterizar la composición e implementar un programa de monitoreo semanal de pozos de disposición, conservar y mantener actualizada la información del historial de inyección.
Lineamientos de pozos (2024)	SENER (anteriormente CNH)	3, 32, 34, 35	Solo se reconocen pozos inyectores y letrina en materia de almacenamiento y desecho. Requerimiento de aviso previo para estos pozos pero no de autorización. Se debe entregar programa con datos técnicos y avisar de los taponamientos permanentes.
Lineamientos en materia de seguridad industrial, operativa y protección ambiental para actividades de reconocimiento y exploración superficial, exploración y extracción de hidrocarburos.	ASEA	80, 113, 119, 120, 153	Están más orientados a la seguridad que a la protección ambiental. Requerimiento de prevenir flujo de emisiones y contaminantes a acuíferos en general. Disposición de fluidos o recortes en contenedores herméticos.
NOM-001-ASEA-2019, Criterios para clasificar a los Residuos de Manejo Especial (RME) del Sector Hidrocarburos	ASEA		Enlistan los RME, donde se incluyen los recortes y fluidos de perforación, y se exige plan de manejo. No hablan como tal de ninguna de las aguas que retornan a la superficie.

Documento	Institución	Artículos	Contenido
NOM-052-SEMARNAT-2005, identificación, clasificación y listados de residuos peligrosos.	Semarnat		Se enlistan residuos peligrosos por sector y formas de identificarlos. No se mencionan los residuos específicos de la etapa de extracción pero muchos componentes identificados están presentes en las aguas, congénitas, de retorno y producidas.
NOM-001-SEMARNAT-2021, Establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores.	Semarnat		Se enlistan grasas y aceites, pH, nitrógeno, toxicidad, metales y cianuros, y sólidos suspendidos totales.
NOM-143-SEMARNAT-2003, Establece las especificaciones ambientales para el manejo de agua congénita asociada a hidrocarburos.	Semarnat		Señala que el agua congénita debe ser dispuesta en cuerpos receptores o en formaciones receptoras en el subsuelo. Evitar derrames o filtraciones en suelo natural. Se debe caracterizar y determinar su concentración de hidrocarburos, sólidos y sales disueltas y metales pesados, y se establecen límites máximos permisibles para ello. Se establecen características de pozos de inyección para disposición final de agua congénita.
NOM-145-SEMARNAT-2003, Confinamiento de residuos en cavidades construidas por disolución en domos salinos geológicamente estables.	Semarnat		Un domo salino puede ser una formación receptora de disposición de residuos y se especifican las características mínimas para ello. Se incluyen residuos contaminados con hidrocarburos y salmueras

Documento	Institución	Artículos	Contenido
NOM-138-SEMARNAT/SS-2003, Límites máximos permisibles de hidrocarburos en suelos y lineamientos para el muestreo en la caracterización y especificaciones para la remediación.	Semarnat, Secretaría de Salud		Incluye como contaminante “mezcla de productos desconocidos derivados del petróleo”, petróleo crudo, combustóleo y gasóleo, BTEX y HAP.
NOM-165-SEMARNAT-2013, Que establece la lista de sustancias sujetas a reporte para el registro de emisiones y transferencia de contaminantes.	Semarnat		Se enlistan sustancias estrechamente asociados con residuos inyectados en pozos de disposición como metales pesados, metaloides, COV y HAP, halogenados, solventes industriales y sustancias radiactivas.
Guía para la gestión integral de residuos provenientes de las actividades del Sector Hidrocarburos.	ASEA		Se mencionan los recortes y lodos de perforación como ejemplo de una lista de residuos peligrosos y las aguas residuales provenientes de la perforación, reparación y terminación de pozos como RME.
Guía de Criterios Ambientales para la Exploración y Extracción de Hidrocarburos Contenidos en Lutitas	Semarnat		Se reconocen recortes y lodos de perforación, agua producida, congénita y de retorno, y señala recomendaciones y riesgos asociados para su inyección en pozos letrina. Contiene datos técnicos que debieran ser vinculantes en los lineamientos de pozos de disposición y no meras recomendaciones en una guía.

De acuerdo con la NOM 143 de Semarnat, el agua congénita es lo que globalmente se conoce como agua producida, lo que coincide con el uso del término por parte de Pemex en los informes de sostenibilidad. Pero resulta preocupante que en los instrumentos de ASEA se haga tan poca referencia a estas aguas, más que en los Lineamientos sobre no convencionales y en las guías que fungen como meras recomendaciones.

En resumen, el marco normativo nacional que regula los pozos de disposición o pozos letrina en México está fragmentado, incompleto y con pocos instrumentos que aborden de manera específica y directa esta práctica. Aunque se han desarrollado disposiciones técnicas, la regulación se mantiene parcial, dispersa y con sistemas de vigilancia ambiental insuficientes.

3.2. REGULACIONES INTERNACIONALES SOBRE POZOS DE DISPOSICIÓN

A nivel internacional, la regulación de los pozos de disposición o pozos letrina es heterogénea: algunos países han establecido marcos normativos robustos para controlar la inyección subterránea de residuos líquidos, en otros aún predominan vacíos legales o enfoques permisivos. Lo común en los países con regulación avanzada es la preocupación por proteger los acuíferos, garantizar la integridad geológica de las formaciones receptoras y establecer sistemas de monitoreo técnico a largo plazo. En Estados Unidos, la práctica está regulada bajo el programa Underground Injection Control (UIC), establecido en el marco de la Safe Drinking Water Act (SDWA) de 1974 y administrado por la Agencia de Protección Ambiental (EPA). Este programa clasifica los pozos en seis clases; los utilizados para la disposición de aguas de producción, retorno o residuos asociados a hidrocarburos corresponden a los pozos Clase II. Se exige una serie de requisitos técnicos: modelación geológica, pruebas de presión e integridad, sistemas de doble barrera, y monitoreo continuo para evitar migraciones indeseadas de fluidos (EPA, 2025). La inyección en acuíferos de uso actual o potencial está estrictamente prohibida.[8]

En Canadá, aunque la regulación es provincial, el Alberta Energy Regulator (AER) ha establecido directrices específicas para pozos de inyección profunda. Estas incluyen: estudios de caracterización geológica, análisis de la presión del reservorio, demostración de que no existe comunicación hidráulica con acuíferos y vigilancia durante y después de la operación del pozo (AER, 2024).

[8] https://www.epa.gov/uic/class-ii-oil-and-gas-related-injection-wells, consultado en marzo 2025.

En la Unión Europea, no existe una norma sectorial específica sobre pozos de disposición. Sin embargo, la Directiva Marco del Agua (2000/60/CE) prohíbe la inyección de sustancias peligrosas a cuerpos subterráneos, salvo en condiciones controladas y con autorización expresa. Aunque este marco se ha aplicado principalmente a casos de infiltración y lixiviación, establece un precedente restrictivo importante. Por otro lado, la regulación sobre el almacenamiento geológico de CO_2 (Directiva 2009/31/CE) establece estándares altamente técnicos, como el uso de modelos predictivos, sistemas de monitoreo post-cierre y responsabilidades a largo plazo.[9]

En el plano internacional, el Convenio de Basilea sobre el control de movimientos transfronterizos de residuos peligrosos, ratificado por México en 1991, no regula directamente la inyección subterránea, pero establece principios generales sobre el manejo ambientalmente racional que podrían aplicarse por analogía.[10] Por su parte, el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) ha desarrollado lineamientos específicos para el tratamiento de materiales radioactivos que ocurren naturalmente (NORM, por sus siglas en inglés), comunes en aguas de retorno y recortes de perforación. Estos lineamientos exigen evaluación radiológica, barreras de confinamiento y vigilancia continua (IAEA, 2014).

Este panorama muestra que, en los países con mayor producción de hidrocarburos, existe una tendencia hacia una regulación preventiva, técnica y basada en principios de precaución. La existencia de prohibiciones en zonas vulnerables, de evaluaciones hidrogeológicas obligatorias, y de responsabilidad post-cierre, contrasta fuertemente con el contexto mexicano, donde solo las *Disposiciones sobre Pozos de Disposición*, emitidas por ASEA en 2021 abordan directamente el tema. Aun así, estas carecen de límites cuantitativos sobre contaminantes, no imponen evaluación radiológica obligatoria y operan con capacidades institucionales de vigilancia limitadas.

En conclusión, los marcos regulatorios internacionales evidencian los vacíos del sistema normativo nacional y ofrecen referencias técnicas clave para fortalecer estándares, impulsar reformas o sustentar exigencias de mayor control ambiental.

---

[9] https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/ALL/?uri=celex%3A32009L0031, consultado en marzo de 2025

[10] https://www.gob.mx/semarnat/documentos/documento-oficial-del-convenio-de-basilea, consultado en marzo de 2025.

3.2.1 El Acuerdo de Escazú y su relevancia para los pozos de disposición

El Acuerdo de Escazú, ratificado por México y en vigor desde 2021, establece principios fundamentales para garantizar el derecho a un medio ambiente sano, con implicaciones directas para la gestión de pozos de disposición en la industria de hidrocarburos. Este instrumento internacional destaca tres pilares: acceso a la información, participación pública y acceso a la justicia en asuntos ambientales.

- **Acceso a la información (artículos 5 y 6):** El artículo 5 reconoce el derecho de toda persona a solicitar información ambiental, incluyendo la relacionada con residuos tóxicos, ubicación de pozos de disposición, riesgos y medidas de mitigación. El artículo 6 complementa esta garantía al establecer la obligación de las autoridades de generar y divulgar dicha información de forma proactiva, comprensible, regular y accesible, incluso en formatos adaptados a grupos vulnerables. La existencia de sistemas de información ambiental, registros de emisiones y alertas tempranas son elementos clave para cumplir con este mandato.

- **Participación pública (artículo 7):** Las decisiones sobre la ubicación y operación de pozos de disposición deben permitir la participación efectiva de las comunidades. Esto implica incluir a la población desde la planeación y evaluación de impacto ambiental hasta la toma de decisiones, garantizando procesos inclusivos y transparentes.

- **Acceso a la justicia (artículo 8):** El Acuerdo asegura que las personas afectadas por actividades contaminantes puedan impugnar decisiones o acciones que vulneren sus derechos ambientales. Para ello, deben existir mecanismos eficaces y asequibles que permitan exigir responsabilidad a las autoridades o empresas involucradas.

La aplicación plena del Acuerdo de Escazú en México resulta indispensable para evaluar y gestionar los impactos de los pozos de disposición. Al exigir información clara y oportuna, permitir la participación informada de las comunidades y ofrecer vías de justicia ambiental, este acuerdo fortalece la gobernanza y puede contribuir a una reducción de los impactos ambientales y de emisiones de GEI, en sintonía con los compromisos climáticos establecidos en las Contribuciones Determinadas a Nivel Nacional (NDC por sus siglas en inglés).

La NDC mexicana promueve enfoques ecosistémicos para enfrentar la crisis climática. En el caso de los pozos de disposición, es viable considerar la meta de Adaptación, que incluye Implementar medidas para incrementar la resiliencia de las comunidades, mejorar la gestión del agua y fortalecer la capacidad de respuesta ante desastres naturales. También promueve la protección de los recursos naturales y los servicios ecosistémicos, así como reducir la vulnerabilidad de la agricultura y la biodiversidad ante el cambio climático.

México fue uno de los primeros países en presentar su NDC en 2015, y la actualizó en 2020. En noviembre de 2025 presentó su tercera actualización, conocida como NDC 3.0, en el marco de la COP30, reafirmando su compromiso con el Acuerdo de París y alineando sus objetivos climáticos con una trayectoria de cero emisiones netas para mediados de siglo. La NDC 3.0 incorpora metas absolutas de reducción de emisiones para 2035, componentes como pérdidas y daños, medios de implementación, condiciones habilitadoras y temas transversales como género, derechos humanos y transición justa, así como un énfasis reforzado en adaptación y resiliencia. Sin embargo, la ambición y viabilidad de estos compromisos han sido objeto de análisis y debate entre organizaciones de la sociedad civil y especialistas, quienes han señalado retos en su implementación y la persistente dependencia de combustibles fósiles en el país, lo que podría dificultar el cumplimiento pleno de sus objetivos climáticos.[11]

[11] https://resourcegovernance.org/es/events/sociedad-civil-analiza-la-ndc-30-de-mexico-tras-su-presentacion-en-la-cop30

4 Transparencia y gestión de la información

4.1. DISPONIBILIDAD Y CALIDAD DE LA INFORMACIÓN SOBRE POZOS DE DISPOSICIÓN EN MÉXICO

La magnitud de la actividad y sus posibles impactos en el ambiente y la salud hacen imprescindible una supervisión pública rigurosa. Por el gran volumen y los tipos de sustancias tóxicas que se inyectan al subsuelo o se descargan en cuerpos de agua, esta actividad exige una vigilancia sistemática y pública. Su gestión debe ser estricta, ajustarse a la normativa vigente y mantenerse actualizada y accesible a la ciudadanía para permitir cualquier tipo de escrutinio.

¿Cuántos pozos de disposición hay en el país? ¿Dónde están? ¿Qué profundidad tienen? ¿Qué residuos se han inyectado en ellos, en qué cantidades y con qué composición química? ¿Cuándo y con qué frecuencia se han realizado estas inyecciones? ¿Qué tan saturados están los pozos? ¿Qué tan cerca o lejos están de los acuíferos? ¿Qué y cuánto se ha descargado en los ríos cercanos? ¿Con qué frecuencia ha monitoreado la autoridad estos eventos?

Todas estas son preguntas indispensables para comprender lo que sucede en los territorios. Y todas exigen una respuesta clara y fundamentada en información pública, accesible, desagregada y actualizada. La disponibilidad de estos datos es un requisito básico en un contexto de justicia ambiental, donde la prevención de riesgos y la participación ciudadana juegan un papel fundamental.

Al buscar qué información pública existe sobre pozos de disposición, se encontró que es escasa, confusa y poco útil para poder responder cualquiera de las preguntas anteriores. En el portal cartográfico de hidrocarburos,[12] puesto en línea por la extinta Comisión Nacional de Hidrocarburos (CNH), si bien se incluyen capas vectoriales con los pozos y las infraestructuras, no es posible identificar aquellos destinados a la disposición final, los atributos no van más allá de señalar si son pozos inyectores o infraestructuras de inyección, que como hemos señalado también pueden tener el objetivo de almacenaje o de estimular la producción. En

[12] https://mapa.hidrocarburos.gob.mx

la capa de Infraestructura > Instalaciones, se despliegan 14 puntos clasificados como plantas de inyección o sistemas de inyección de agua congénita, pero resulta confuso porque son pocas instalaciones para la gran demanda nacional, no coinciden con ninguno de los pozos clasificados como inyectores y no se especifica el objetivo de la inyección.

El portal del Sistema de Información de Hidrocarburos,[13] está enfocado a datos de producción y actividad petrolera, los datos están agregados por provincia petrolífera y no se incluye información sobre pozos de disposición, ni eventos de inyección. En los ya citados informes de sostenibilidad de Pemex, los datos están agregados y no se comparten los datos de la composición química de los fluidos de inyección para disposición final, solo nos permiten conocer anualmente porcentajes inyectados, descargados e indicadores de calidad del "agua congénita" o producida total, lo que solo nos habla del proceso de la empresa, pero no de los territorios.

Ante este panorama de escasa o nula información disponible del tema, se presentaron cinco solicitudes de información por medio de la Plataforma Nacional de Transparencia[14] dirigidas a la ASEA, CNH, y a Pemex Exploración y Producción (PEP). A las tres instituciones se les solicitó información que, con base en los instrumentos legales aplicables, y en particular en las *Disposiciones Administrativas de Carácter General aplicables al diseño, construcción, operación y taponamiento de Pozos de Disposición*, tanto el promovente como la autoridad están obligados respectivamente a entregar y registrar. En resumen, se solicitó información desglosada por pozo y por evento de inyección, de: identidad (nombre del pozo), ubicación geográfica, estado operativo (activo, inactivo o cerrado de forma permanente), clasificación del pozo, así como el historial de eventos de inyección con fines de disposición final: fechas, frecuencia, tipos de residuos inyectados, volumen inyectado, composición química, presión de inyección, pruebas de hermeticidad y compatibilidad, registro de fugas, sistemas de monitoreo y eventos de taponamiento.

Las respuestas de las tres autoridades son elusivas respecto de la entrega de la información:

- **ASEA negó** el acceso a la mayoría de la información solicitada bajo tres argumentos principales: por un lado, clasificó como **reservados** datos clave relativos a pozos de disposición —como coordenadas geográficas, tipo de pozo y objetivo de inyección— invocando riesgos

[13] https://sih.hidrocarburos.gob.mx/
[14] https://www.plataformadetransparencia.org.mx/Inicio

a la **seguridad nacional**; por otro lado, declaró la **inexistencia** de buena parte de los datos operativos solicitados, como volumen inyectado, presión, pruebas de hermeticidad, fugas o monitoreo. Reservó también el tipo de sustancia inyectada y su composición química, con base en la protección del **secreto industrial**. Además, la Agencia señala que no está obligada a generar documentos ad hoc, y se negó a sistematizar los datos en un formato abierto y accesible (CSV, Excel o shapefile), como fue solicitado. **Entregó** una versión pública de un Informe Anual de Operaciones en Pozos de Disposición correspondiente a la empresa PERENCO, fechado el 4 de julio de 2024. El contenido de dicho informe incluye —de forma fragmentada y poco estructurada— algunos datos como volumen y presión inyectada acumulada, nombre del campo, y fechas generales de pruebas de inyección y de operación. Sin embargo, esta información es genérica, repetida en todos los registros y no está desagregada por evento ni pozo específico, además de estar en **formato cerrado (PDF)** lo que limita su capacidad de análisis y su utilidad técnica o comunitaria.

- Es preocupante que en diez años de operación (2015–2024), que fue el periodo solicitado, la ASEA solo entregó un informe de una empresa privada en versión pública. No existe información equivalente de Pemex ni de otras operadoras. Todo lo demás fue reservado o declarado inexistente, y no se generaron versiones públicas de la información que resguardan como lo exigen los artículos 11 y 70 de la *Ley General de Transparencia*. No solo es evidente la omisión que contradice de forma directa la obligación legal de garantizar el acceso a la información ambiental de interés público, sino que al parecer los sujetos regulados no están entregando informes de cumplimiento.

- **CNH redireccionó** repetidamente al mapa interactivo del Centro Nacional de Información de Hidrocarburos (CNIH): https://mapa.hidrocarburos.gob.mx, alegando que en ese sitio se puede consultar información pública general sobre pozos, pero este no contiene información de pozos de disposición o inyectores destinados a la disposición final. **Entregó** un listado con **tres pozos** para el periodo 2016 a 2018, sin más datos que el nombre y su clasificación como inyector, pero sin dato alguno del objetivo de la inyección ni demás información solicitada. En contradicción con el mapa interactivo, señalaron que las coordenadas solo están disponibles a través del trámite de "**licencias de uso**". Señalaron que a la fecha los operadores no han presentado planes o programas que consideren pozos de disposición, por lo que declararon la información como

inexistente. Luego de un recurso de revisión agregaron las coordenadas de los tres pozos, pero insistieron en no contar con la información solicitada, a pesar de que los regulados están obligados a dar aviso de construcción y operación de este tipo de pozos; y en que la información solicitada **sólo puede consultarse** mediante solicitud de **licencia de uso** (lo que implica restricciones y posibles costos).

- **Pemex PEP** en una primera respuesta declaró la información como **inexistente** o que no era de su competencia. Se ingresó un recurso de revisión tras lo cual respondieron cuatro unidades operativas de la Subdirección de Producción y la Gerencia de Monitoreo y Operación de Pozos Inyectores (GMOPI) quienes entregaron listados tabulares con algunos de los datos solicitados, pero agregados anualmente, con respuestas generalizadas y homogéneas como que todo lo inyectado es agua congénita y tiene agua, sal, metales y compuestos orgánicos. Cabe mencionar que el listado de la gerencia, que se esperaría que incluyera los demás listados, no coincidía con ningún pozo de las unidades operativas.

La Tabla 3 resume de qué atributos se obtuvo información, de qué dependencia y las observaciones más relevantes:

TABLA 3. RESUMEN DE LAS RESPUESTAS A LAS SOLICITUDES DE INFORMACIÓN SOBRE POZOS DE DISPOSICIÓN

✅ **INFORMACIÓN ENTREGADA** ⚠️ **INFORMACIÓN PARCIAL** ❌ **INFORMACIÓN NO ENTREGADA**

Dependencia		Pemex		ASEA		CNH	
Número de pozos		210		6		3	
Nº	Atributo	Entrega	Notas	Entrega	Notas	Entrega	Notas
1	ID de pozo	✅	Suponiendo que es el total de pozos	❌		⚠️	Solo de 3 pozos
2	Nombre	✅	Suponiendo que es el total de pozos	⚠️	Solo un año (2023) y una empresa, no Pemex	⚠️	Solo de 3 pozos
3	Coordenadas	❌	Remiten al mapa de CNH	❌	Se reserva información	⚠️	Solo de 3 pozos
4	Estado del pozo	✅	Reportado	❌		⚠️	Remiten a mapa de CNH
5	Tipo de pozo	✅	Inyector	⚠️	Convertido	⚠️	Remiten a mapa de CNH

Dependencia		Pemex		ASEA		CNH	
Número de pozos		210		6		3	
Nº	Atributo	Entrega	Notas	Entrega	Notas	Entrega	Notas
6	Fecha por evento de inyección	✗	Solo año por pozo; no por evento	⚠	Por evento, para tres pozos	✗	
7	Objetivo de la inyección	✓	Disposición, manejo de agua o presurización	⚠	Disposición final	✗	
8	Tipo de sustancia inyectada	✓	Generalmente “agua congénita”; en algunos “líquido”	⚠	Agua congénita	✗	
9	Composición química	⚠	Sólo fórmula genérica: “sales disueltas, metales y orgánicos”; solo 1 unidad reporta % de salinidad	⚠	Datos parciales (sólidos, cloruros, densidad, etc.) solo 2023	✗	
10	Volumen inyectado por evento	⚠	Solo volumen anual inyectado en m3	⚠	Volumen por evento para 3 pozos en 2023, en otras unidades (bbl)	✗	
11	Presión de inyección por evento	⚠	Promedio anual	⚠	Por evento, solo para 2023 y 3 pozos	✗	
12	Formación receptora	✓	Reportado	⚠	Solo para cuatro pozos	✗	
13	Tipo de roca sello	✓	Reportado	✗		✗	
14	Compatibilidad de sustancia	⚠	Lo afirman por defecto	✗		✗	
15	Informes anuales de operaciones previas	✗	Todos declaran “no aplica”	⚠	Solo un año (2023) y una empresa.	✗	
16	Fecha de pruebas de inyectividad	✗	“No aplica” en todos	⚠	Solo para cuatro pozos	✗	
17	Fecha de pruebas de hermeticidad	✗	“No aplica” o “No disponible”	⚠	Solo para cuatro pozos	✗	

Dependencia		Pemex		ASEA		CNH	
Número de pozos		210		6		3	
Nº	Atributo	Entrega	Notas	Entrega	Notas	Entrega	Notas
18	Sistemas de monitoreo continuo	⚠	Declaración de “bitácora” o “presión-volumen”, sin registros	⚠	Solo para cuatro pozos	✗	
19	Registro de fugas	⚠	Declaraciones de “no se tiene registro” o remite a GMOPI	⚠	Reporte de 1 fuga en el universo de los 4 pozos	✗	
20	Fecha de taponamiento	✗	Todos “no aplica”; siguen operando	⚠	Señalan que no aplica	✗	
21	Observaciones adicionales	⚠	Declaraciones generales sin datos nuevos	⚠	Declaraciones generales sin datos nuevos	✗	

Esta serie de respuestas confirma una tendencia ya observada tanto dentro de una misma institución como entre instituciones: la fragmentación y la falta de centralización y estandarización de información crítica. A pesar de las instrucciones del INAI de realizar búsquedas exhaustivas, las respuestas siguen remitiendo al solicitante a otras áreas, sin proporcionar directamente la información solicitada ni versiones públicas útiles. El ejercicio permitió constatar un grave déficit estructural de transparencia y de documentación pública sobre las operaciones de disposición subterránea de fluidos. Ninguna de las autoridades responsables —que reciben, gestionan y resguardan esta información— ha logrado proporcionar ni fragmentos que puedan complementarse ni un conjunto completo de datos solicitados, ni técnica, ni operativa, ni ambientalmente. La información entregada es incompleta, parcial, se presenta con distintos tipos de clasificación, unidades y niveles de desagregación, es dispersa entre distintas áreas, es decir, no se hablan entre sí listados de una misma unidad de producción, y en la mayoría de los casos limitada a listados básicos de la mera existencia de pozos.

Destaca el uso excesivo y contradictorio de reservas de información por parte de ASEA que negó la entrega de las coordenadas geográficas de los pozos de disposición bajo el argumento de seguridad nacional, aun cuando esa misma información ya es de acceso público en las plataformas oficiales de la Comisión Nacional de Hidrocarburos, lo que contradice el principio de progresividad de las leyes de transparencia. La misma

ASEA invocó de manera sistemática a la confidencialidad comercial o el secreto industrial para negar información sobre los fluidos que se inyectan en el subsuelo y que pueden contaminar acuíferos, limitando el acceso a datos clave sobre los riesgos y afectaciones potenciales, caricaturizando la rendición de cuentas a información que no es útil para saber qué está pasando en el territorio. El secreto comercial no puede prevalecer sobre la seguridad y el derecho de las comunidades afectadas a conocer y participar en las decisiones que las involucran directamente. Además, la negativa constante se justifica en limitaciones normativas internas, priorizando criterios de confidencialidad y lineamientos laxos por encima del derecho de acceso a la información pública. La combinación de estos mecanismos de opacidad consolida un esquema en el que prevalecen los intereses comerciales y de protección corporativa, en detrimento del derecho colectivo a la salud y a un medio ambiente sano.

4.2 USO DE LOS DATOS ENTREGADOS Y DISPONIBLES

Los datos reportados por Pemex PEP contienen información sobre 239 pozos inyectores operados en el país durante el periodo de 2015 a 2025. Se entregaron once archivos Excel de distintas unidades de operación, cada uno con un formato distinto de registro de datos, algunos con una pestaña por año, otros con una sola pestaña repitiendo filas por pozo, algunos con todos los años del periodo, algunos con menos, y en la mayoría se reporta un volumen de agua congénita inyectada por pozo con unidades de metros cúbicos [m^3] por "evento". Además de que el formato de registro es distinto entre todos los archivos, también los rubros de información incluida difieren, y los datos reportan cosas distintas e incompatibles para su integración desde una perspectiva nacional. Por ejemplo, en la fecha del "evento" se incluye el rango de un año poniendo fecha de inicio el 1 de enero y la fecha final el 31 de diciembre, lo que invita a pensar que se trata de un dato anual. También en algunos casos se proporciona el gasto diario en m^3 por día, lo que supondría que al multiplicarlo por 365 éste coincidiera con el volumen reportado en el periodo de un año. Pero esto no siempre sucede y se encuentra la leyenda de que no hay inyecciones por evento sino que es continua, a pesar de que el rubro se tituló "por evento", por lo que resulta imposible determinar la naturaleza y procedencia del dato. Es decir, en un mismo archivo los datos se contradecían y en general resultaron inconsistentes y confusos. De los 11 activos de producción de Pemex, solo 5 reportan información clara respecto a los volúmenes de inyección de agua. El objetivo era simple, saber cuánto fluido residual se inyectaba al subsuelo y con qué composición química, pero fue imposible tener claro si el volumen proporcionado es un total anual, mensual, diario o a qué se refieren, por lo que resulta evidente la falta de rigor en la sistematización de

sus registros y la falta de seriedad para responder a la ciudadanía. Dicha presentación de los datos hace imposible comparar objetivamente la información proporcionada con otros registros disponibles, como los datos sobre el agua inyectada que aparecen en los Informes de Sostenibilidad publicados por la propia empresa estatal o los volúmenes de agua producida reportados por la extinta CNH. Es decir, la ciudadanía no cuenta con información que le permita revisar la consistencia de lo que reporta anualmente la empresa pública ni exigir la rendición de cuentas correspondiente.

No obstante, se realizó el ejercicio de revisar y trabajar con los datos proporcionados en el periodo de 2017 y 2023 por tener mejor representación de los datos y exclusivamente con el rubro de gasto de inyección (m^3/día), y en su ausencia se asumió el volumen proporcionado como volumen diario. Se asume que este ejercicio es una interpretación de muchas posibles dada la inconsistencia de la información recibida. El resultado muestra que, según los datos proporcionados, el volumen de agua inyectado por la petrolera nacional habría duplicado su valor entre 2017 y 2023 al pasar de poco menos de 6 millones de metros cúbicos [MMm^3] en 2017 a 12.17 [MMm^3] en 2023 (Figura 9).

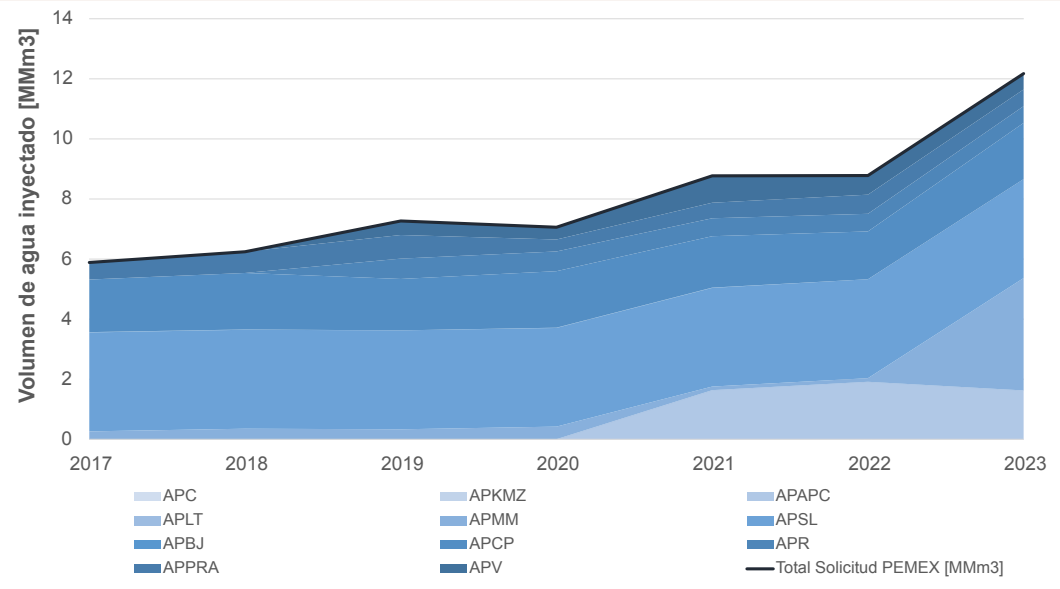


Figura 9. Volumen de agua congénita inyectada anualmente por Activo de Producción según datos reportados por Pemex PEP. Fuente: elaboración propia, con base en datos de Pemex.

Asumiendo que este podría ser un escenario posible por el orden de magnitud, se decidió comparar esta información con los datos de inyección de agua que Pemex proporciona en sus informes de sostenibilidad (Figura 10).

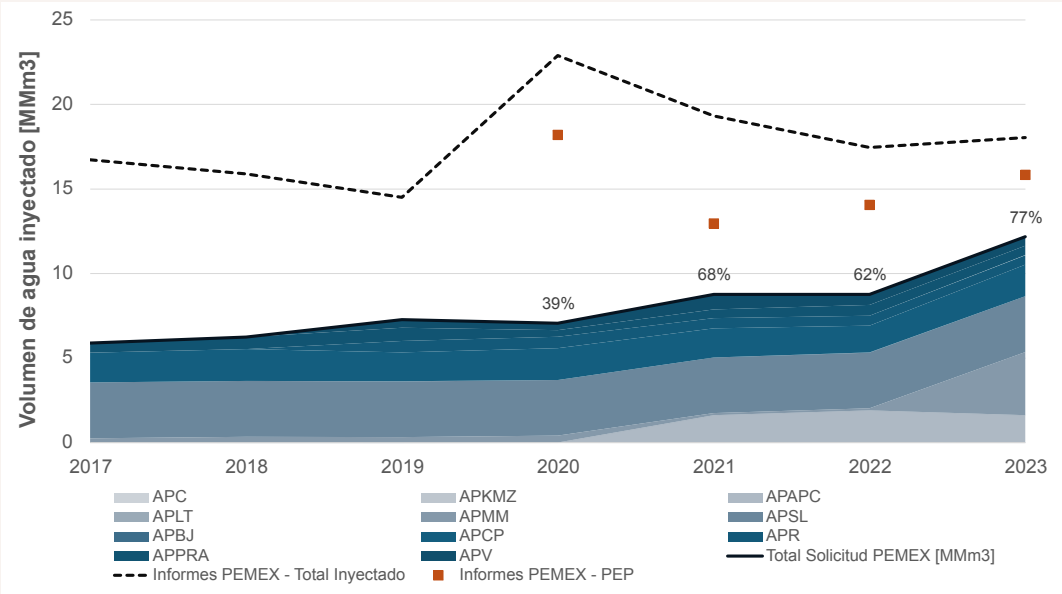


Figura 10. Volumen de agua congénita inyectada anualmente. Comparación de datos entregados por SAI e informes anuales de sostenibilidad de Pemex. Nota: Los porcentajes se refieren a la relación que hay entre los datos de inyección total de los Activos y los de PEP según informes. Fuente: elaboración propia, con base en datos de Pemex.

Como se puede apreciar en la Figura 10, los datos de agua inyectada reportados mediante la solicitud de acceso a la información (SAI) sólo explican, en promedio, el 46% del volumen total inyectado que se reporta en los informes de sostenibilidad. Si bien podría pensarse que esto se debe a que dichos datos de inyección se refieren al total ocurrido, que incluye lo inyectado por Pemex PEP y Pemex Logística, la realidad muestra lo contrario ya que al comparar contra los datos de inyección exclusivos de PEP, que se pueden distinguir del resto a partir de los informes de sostenibilidad de 2020, queda claro que los datos de inyección proporcionados por los activos sólo explican, en el mejor de los casos para 2023, el 77% de la inyección.

Este ejercicio muestra que existen inconsistencias entre dos fuentes de información oficiales de Pemex. Dichas diferencias pueden deberse, entre otros factores, a la falta de claridad en la información proporcionada, lo que obliga a tener que realizar suposiciones como las antes explicadas para poder trabajar con los datos. Por otro lado, el propio Pemex señala en la información entregada que se tiene ausencia de información para varios Activos del 2015 al 2020 *"Debido al ciberataque ocurrido en noviembre de 2019..."*, sin embargo, lo anterior no debería afectar los datos posteriores. En cualquier caso ocurre que es imposible determinar qué sucede con el agua producida en el país.

4.2.1 Inconsistencias en la información: Caso Campo Agua Fría

Agua Fría es uno de los 29 campos que conforman el complejo Chicontepec y el campo donde se han realizado dos de las tres pruebas de inyección continua de agua en el complejo, las cuales iniciaron en 2008. Hasta septiembre de 2018, se habían inyectado al campo un total de 33.7 millones de barriles de agua [MMb], equivalentes a 5.35 millones de metros cúbicos de agua [MMm^3]. El agua inyectada proviene, primero, de los procesos de deshidratación de crudo de otros campos efectuados en la central de almacenamiento y bombeo Poza Rica; posteriormente, el agua inyectada comienza a provenir exclusivamente de la central de almacenamiento y bombeo Tajín V., en donde se deshidratan crudos producidos del propio complejo Chicontepec. Hasta 2018 la inyección se realizaba mediante 6 pozos productores convertidos a inyectores: 1) AF-801H; 2) AF-815; 3) AF-822; 4) AF-841; 5) AF-846; y 6) AF-864 (Berlanga & Hernández, 2024).

En los datos proporcionados por Pemex se puede confirmar la existencia y operación de los pozos antes mencionados como inyectores, sin embargo, resalta el hecho de que para todo el periodo sobre el cual se ofrece información, esto es, del año 2015 al 2024, se observa que el volumen total inyectado por evento reportado para cada pozo es el mismo para todos los pozos con un valor de 65 [m^3/evento]. Lo anterior también ocurre en el caso de la presión de inyección, la cual se reporta de 85 [bar] por igual para cada uno de los pozos inyectores. Dichos datos contrastan con los reportados por Berlanga y Hernández (2024), quienes muestran que tanto en su conjunto como de manera individual el volumen mensual de agua inyectada a los pozos ha ido variando a lo largo del tiempo, lo que implica que es imposible que el volumen total inyectado por evento sea igual entre los pozos y a lo largo del tiempo. Por otro lado, los datos sobre la presión promedio de inyección en los pozos reportados por estos autores muestran que la misma ha ido creciendo a lo largo del tiempo y que como mínimo ha alcanzado valores de 88.25 [bar] (equivalentes a 90 atmósferas [Kg/cm^2]). Lo anterior implica que los datos de presión reportados por Pemex para la inyección en Agua Fría que, al ser todos iguales promedian 85 [bar], están por debajo del mínimo reportado en la literatura académica.

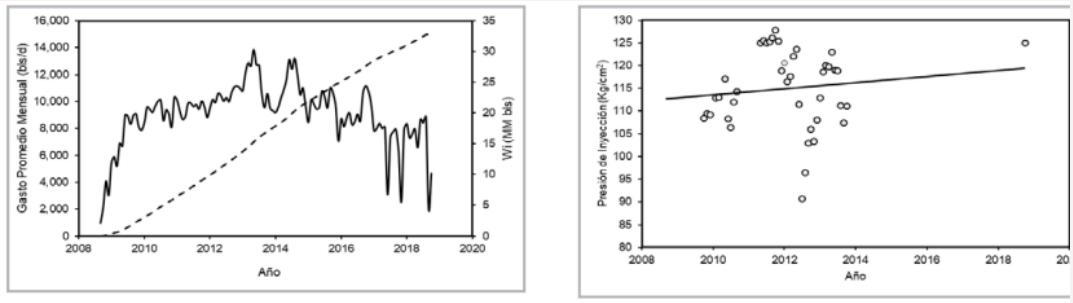


Figura 11. A la izquierda, promedio mensual de agua inyectada por día (línea sólida) y volumen inyectado acumulado (línea discontinua), en campo Agua Fría. A la derecha presión promedio de inyección. Fuente: Berlanga y Hernández, (2024), p. 29.

4.2.2 Los datos entregados por la ASEA

En atención a la solicitud de información que se realizó a la ASEA, la agencia contesta con información referente a 4 pozos de disposición de agua congénita ubicados en el estado de Tabasco y operados por la empresa privada Perenco como parte de un contrato de producción compartido con Pemex. Los pozos antes referidos son: 1) El Golpe-22T; 2) El Golpe-29; 3) El Golpe-23D; y 4) El Golpe-23.

A partir de esta información es posible determinar los volúmenes de inyección de agua llevados a cabo en dichos pozos durante el año 2023. De acuerdo con estos datos, durante ese año el volumen total inyectado conjuntamente en los 4 pozos ascendió a 6.16 [Mbd]. Cuando este volumen de agua inyectado se compara con la producción total de agua que ocurrió a nivel nacional durante 2023, se tiene que dichas inyecciones **solo permiten explicar el destino del 1.5% del agua producida en el país** para ese año.

5 Impactos Ambientales y Sociales

Los residuos que genera la extracción de combustibles fósiles como el agua congénita, el agua producida, el agua de retorno del fracking, los recortes de perforación y diversos lodos contaminados tienen una composición química compleja y potencialmente peligrosa, ya que contienen sales, hidrocarburos, metales pesados y gases tóxicos, incluyendo cadmio, bario, níquel, cromo, y sulfuro de hidrógeno. Algunos de estos compuestos son carcinogénicos y presentan potencial de bioacumulación, como el cadmio, lo que los vuelve especialmente peligrosos para ecosistemas fluviales y terrestres. No obstante, suelen inyectarse en el subsuelo en los llamados pozos de disposición o pozos letrina. La disposición final de estos residuos representa uno de los eslabones más críticos del ciclo extractivo, ya que generan severos impactos ambientales y riesgos a la salud humana. Aun así, es común la práctica de inyectar estos residuos en pozos profundos, descargarlos en cuerpos de agua o disponerlos en superficies abiertas, actividad frecuentemente opaca, subregulada o mal monitoreada. Si bien la industria justifica estas prácticas como opciones técnicamente viables, múltiples estudios han documentado efectos negativos sobre los ecosistemas, el agua, el suelo, la atmósfera y las comunidades humanas, especialmente en contextos de sobrecarga, mala planificación o abandono de la infraestructura.

Al respecto, se realizó un análisis de literatura científica especializada con el fin de identificar impactos potenciales asociados a la disposición de estos residuos, así como diversos casos documentados que evidencian afectaciones concretas a ecosistemas y comunidades. Los hallazgos identifican afectaciones a la biodiversidad, al agua, al suelo, al aire, a la salud humana y a las comunidades expuestas, visibilizando la amplitud y gravedad de los riesgos implicados, al tiempo que se cuestiona la legitimidad de las prácticas de disposición como solución “limpia” o “final” al problema de los residuos de la industria fósil.

5.1. IMPACTOS AMBIENTALES

La disposición de estos residuos constituye una fuente documentada de impactos ambientales que afectan simultáneamente los ecosistemas, el agua, el suelo, el aire y, en ciertos contextos, incluso la estabilidad geológica. En diversos contextos se ha observado que los pozos de disposición tienen una integridad deficiente, y de acuerdo con la literatura revisada en el apartado 2, siempre hay riesgos de fugas y fisuras.

5.1.1 Agua y ecosistemas

Uno de los impactos ambientales más graves está asociado a la posible migración de contaminantes a través de fracturas o fallas reactivadas por el incremento de presión en el subsuelo. Gaurina y colaboradores (2020) documentan que la inyección puede inducir la reactivación de fallas geológicas, permitiendo que los residuos migren lateral o verticalmente hacia acuíferos, zonas vadosas o incluso la superficie. El riesgo implícito es la contaminación de agua, como señala un artículo de Ma et al. (2024) el cual identifica en el campo Pavillion, en Wyoming, EE.UU., la presencia de benceno, tolueno y xilenos en pozos de agua cercanos a sitios de disposición de agua producida, en niveles que exceden por mucho los límites normativos, incluso en muestras recogidas a más de 50 metros del sitio original. En un artículo de revisión publicado por Gilbert et al., (2018), se menciona el caso de Osisioma, una comunidad en la zona del delta del río Níger en Nigeria, donde algunos compuestos químicos de los residuos inyectados migraron en el subsuelo y contaminaron acuíferos utilizados para el abastecimiento de agua potable de la comunidad. Además, simulaciones sobre el volumen crítico de agua contaminada necesario para sobrepasar los límites permisibles en suelo, muestran que bastan mililitros de agua de retorno con altas concentraciones de benceno para comprometer 1 kg de suelo, lo que refuerza el riesgo de lixiviación hacia los acuíferos (Gilbert et al., 2018).

Uno de los componentes inorgánicos más preocupantes en el agua de retorno y agua producida (FPW, por sus siglas en inglés) generada por el fracking son los materiales radiactivos de origen natural, conocidos como NORM. El artículo de Pan et al. (2025) identifica específicamente al

radio-226 (Ra-226), radio-228 (Ra-228) y uranio-238 (U-238) como radionúclidos presentes en estas aguas, señalando que sus concentraciones pueden superar los niveles seguros para el agua potable establecidos por la Organización Mundial de la Salud. Estas sustancias pueden alcanzar los acuíferos debido a fallas en la integridad de los pozos, como fugas en el revestimiento o fracturas en la cimentación. Además, el documento señala que durante el manejo y transporte del FPW, se han reportado numerosos incidentes de derrames, lo que representa una vía crítica de exposición. Por ejemplo, en Estados Unidos, se documentaron al menos 225 casos de fugas de FPW entre 2006 y 2012, y aunque la mayoría del volumen de estos residuos se destina a reinyección profunda, la etapa de transporte sigue siendo una fuente importante de riesgo debido a la presencia de estos elementos radioactivos. La disolución de barita ($BaSO_4$) en condiciones reductoras también puede liberar radio y bario al ambiente, mientras que las salmueras profundas —producto del agua de formación geológica— pueden migrar hacia la superficie a través de fallas o pozos abandonados, aumentando la posibilidad de contaminación radiactiva en aguas superficiales o subterráneas. En sedimentos de ríos aguas abajo de sitios de descarga, incluso después del tratamiento, se ha observado una acumulación de radio, lo cual evidencia que los procesos actuales no siempre eliminan eficazmente estos elementos. Esta presencia persistente de NORM en el ambiente representa riesgos no solo por su toxicidad química sino también por su capacidad de emitir radiación ionizante que afecta la salud humana y la biota a largo plazo.

En el caso de los ecosistemas acuáticos, los elementos tóxicos agotan el oxígeno disuelto y promueven la eutrofización de los cuerpos de agua receptores, implicando cambios ecosistémicos profundos como pérdidas de poblaciones e incluso la extinción local de muchas especies acuáticas como los anfípodos —pequeños crustáceos— que son un elemento clave en la cadena trófica acuática y en el caso de algunas especies de peces. Estos residuos de inyección inducen una toxicidad aguda a corto plazo, manifestada en linfocitosis, hiperplasia epidérmica, y septicemia hemorrágica (Gilbert, et al., 2018). De forma paralela, la presencia de disruptores endocrinos en cuerpos de agua superficiales próximos a pozos de disposición ha sido confirmada mediante bioensayos celulares, con efectos

equivalentes a compuestos hormonales potentes como flutamida o mifepristona. Estas sustancias pueden inducir feminización en peces, inhibición reproductiva o alteraciones en el desarrollo embrionario (Kassotis, y otros, 2016). En ambientes marinos también se ha detectado que estos compuestos causan alteraciones fisiológicas en peces y en comunidades bentónicas, con toxicidad crónica por bioacumulación de hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) y metales, además de acumulación en sedimentos y disrupciones ecológicas incluso en condiciones de vertido que cumplen con regulaciones internacionales (Neff, Lee, & DeBlois, 2011).

Ochoa y Rivera (2021) mencionan que la alta salinidad de las aguas congénitas afecta procesos fisiológicos en plantas, como la fotosíntesis, la síntesis proteica y el metabolismo energético, llevando incluso a su muerte. Asimismo, los hidrocarburos disueltos de bajo peso molecular que permanecen tras el tratamiento son altamente solubles y tóxicos para fauna acuática. También se ha documentado la bioacumulación en suelos de metales pesados como bario, estroncio, cromo y cadmio, presentes en aguas residuales petroleras que, según Mesa et al. (2018), estos elementos pueden ser absorbidos por las plantas y transferirse a través de la cadena alimenticia, afectando organismos superiores y eventualmente a los humanos.

Ciertas prácticas también incluyen descargas superficiales o almacenamiento en piletas abiertas, lo que representa una forma directa de exposición ambiental, donde los residuos quedan en contacto con el agua, el aire, el suelo y el escurrimiento pluvial. Estas prácticas facilitan la volatilización de compuestos tóxicos, la infiltración hacia capas superficiales del suelo y la eventual entrada a cuerpos de agua cercanos. En los informes de sostenibilidad de Pemex, mencionan la descarga de un volumen de agua congénita, misma que tendría que cumplir con las normas correspondientes que serían NOM-001-SEMARNAT-2021, la NOM-138-SEMARNAT/SS-2003, la NOM-143-SEMARNAT-2003, pero no hay información de los tratamientos aplicados ni de la calidad del agua que es descargada. Además, el tratamiento es complejo y poco común en México, el agua de retorno del fracking y el agua producida (que Pemex llama congénita) contienen concentraciones muy elevadas de sólidos disueltos to-

tales (TDS), metales pesados como bario, estroncio y hierro, hidrocarburos, grasas y otros compuestos orgánicos volátiles. Esto hace que no puedan ser tratadas en plantas municipales convencionales o estaciones centrales, ya que estas no están diseñadas para eliminar ese tipo y concentración de contaminantes, sino que se limitan a la remoción de sólidos suspendidos y trazas de hidrocarburos flotantes, pero los metales y compuestos disueltos no son eliminados, por lo que el agua sigue siendo tóxica incluso tras el proceso de tratamiento (Ochoa-Caballero & Rivera-Parra, 2021). Algunas tecnologías avanzadas de tratamiento, como la ósmosis inversa, se vuelven económicamente inviables cuando el TDS supera los 40,000 mg/L (algo común en aguas de retorno). Otras opciones como la destilación o cristalización térmica son técnicas eficaces, pero su implementación es muy costosa y con bajo rendimiento (Gregory, Vidic, Dzombak, Landis, & Kassner, 2011).

En el caso del agua de retorno, el riesgo es crítico, ya que las concentraciones de los elementos potencialmente tóxicos reportados en la literatura exceden ampliamente los límites máximos permisibles establecidos en la normatividad vigente. Para visualizar que podría estar sucediendo en México, se tomaron los datos de las concentraciones reportadas por Gregory et al. (2011) y Ma et al. (2024) y se compararon con los límites máximos permisibles de las normas mexicanas correspondientes: la NOM-001-SEMARNAT-2021 que establece los límites para las descargas de agua, la NOM-143-SEMARNAT-2003 que establece los parámetros para descargar agua congénita sin tratamiento y la NOM-127-SSA1-2021, que establece los límites máximos para el agua potable, identificando el número de veces que la concentración común reportada de cada componente excede los límites establecidos (Tabla 4). Podemos observar que en todos los casos se exceden los límites por mucho, y el benceno hasta más de mil veces.

TABLA 4. CONCENTRACIÓN REPORTADA POR COMPONENTE EN AGUAS DE RETORNO Y LOS LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES DE LA NORMATIVA MEXICANA.

Parámetro	[ ] en Agua de retorno (Gregory et al. 2011, Ma et al., 2024)	NOM-001-SEMARNAT-2021 Descargas	NOM-143-SEMARNAT-2003 Agua congénita	NOM-127-SSA1-2021 Agua potable	Excede límite máximo
Sólidos disueltos totales (TDS)	7,000 a 287,000 mg/L	1,000 mg/L	500 mg/L	1,000 mg/L	287 veces
Cloruros	hasta 148,000 mg/L	350 mg/L			422 veces
Calcio	hasta 31,000 mg/L			500 mg/L	62 veces
Estroncio	hasta 6,800 mg/L			4 µg/L (EPA)	1 millón 700 mil veces
Bario	hasta 4,700 mg/L	5 mg/L		1.3 mg/L	de 940 hasta 3,615 veces
Aceites y grasas	hasta 260 mg/L	15 mg/L			17 veces

Parámetro	[ ] en Agua de retorno (Gregory et al. 2011, Ma et al., 2024)	NOM-001-SEMARNAT-2021 Descargas	NOM-143-SEMARNAT-2003 Agua congénita	NOM-127-SSA1-2021 Agua potable	Excede límite máximo
Hierro total	hasta 50 mg/L	10 mg/L		0.3 mg/L	de 5 hasta 166 veces
Manganeso	hasta 7 mg/L	0.15 mg/L		0.15 mg/L	47 veces
Hidrocarburos	1 a 380 mg/L		15 mg/L		25 veces
Benceno	14,400 µg/L			10 µg/L	1,440 veces
Tolueno	114,000 µg/L			700 µg/L	163 veces
Etilbenceno	25,200 µg/L			300 µg/L	84 veces
Xilenos	210,000 µg/L			500 µg/L	420 veces

Ahora bien, la NOM-138-SEMARNAT/SS-2003 establece límites para componentes tóxicos en suelo, e incluye a los elementos BTEX señalando los umbrales en mg/kg: 6 para benceno, 40 para tolueno, 10 para etilbenceno y 40 para los xilenos. Al estimar cuánto volumen de agua de retorno contaminaría 1 kg de suelo se identificó que menos de medio litro de agua de retorno bastaría para rebasar los límites y ocasionar un sitio contaminado.

Las concentraciones reportadas en aguas de retorno de operaciones de fracking superan por varios órdenes de magnitud estos límites, lo que implica que volúmenes relativamente pequeños de dichos fluidos son suficientes para contaminar cuerpos de agua o suelos por encima de los umbrales legales y ambientales. Esta desproporción resalta la urgencia de transparentar, regular y obligar a la rendición de cuentas con mayor rigor el manejo de aguas residuales en la industria extractiva, así como la necesidad de establecer mecanismos de monitoreo y remediación efectivos ante cualquier liberación al ambiente.

5.1.2 Suelo

A nivel geotécnico, Wojtanowicz (2008) advierte que la falta de control en el crecimiento de fracturas puede conectar las formaciones de disposición con capas permeables superiores, vulnerando así el subsuelo y los sistemas hídricos regionales. A nivel de suelo, la contaminación también es crítica, pues la exposición crónica a residuos ricos en sales, hidrocarburos y metales pesados resulta en la descomposición de la estructura física del suelo, pérdida de fertilidad y persistencia de contaminantes recalcitrantes. Gurska et al. (2009) analizaron cómo fracciones pesadas de hidrocarburos (F3 y F4), asociadas a estas aguas residuales, persisten incluso en sitios con remediación activa. Estas fracciones contienen compuestos mutagénicos y cancerígenos, resistentes a la degradación natural, lo que representa un riesgo crónico de alteración geoquímica del suelo. Complementariamente, Morales-Bautista et al. (2011) señalan que la fuga, filtración, o descarga accidental de agua congénita con alta salinidad y contenido de sodio pueden cambiar radicalmente las propiedades fisicoquímicas del suelo (como la conductividad eléctrica, el pH y la presión osmótica), lo que causa su esterilización y afecta su capacidad productiva.

Otro impacto ambiental menos visible, pero de creciente atención, es la sismicidad inducida por la inyección de residuos líquidos bajo alta presión. En Texas y Oklahoma, se ha demostrado que la acumulación de pre-

sión en pozos clase II puede reactivar fallas geológicas preexistentes, generando microsismos o incluso eventos sísmicos perceptibles, en algunos casos con daños estructurales. La presión de fractura del terreno puede ser sobrepasada inadvertidamente cuando no hay monitoreo en tiempo real ni modelos geomecánicos adecuados (Gaurina-Međimurec, Pašić, Mijić, & Medveď, 2020).

5.1.3 Aire

En cuanto a la calidad del aire, los estudios de Lyman y Mansfield (2018) y Ma et al. (2024) demuestran que los recortes de perforación y las aguas producidas y de retorno pueden liberar compuestos orgánicos volátiles (COV), incluyendo BTEX (benceno, tolueno, etilbenceno y xilenos), ya que pueden volatilizarse desde tanques, estanques o incluso migrar desde el subsuelo hasta la atmósfera. Esta volatilización ocurre por la alta presión de vapor de estos compuestos, especialmente en condiciones cálidas y áridas. El resultado es una fuente sostenida de contaminación atmosférica, con impactos sobre la salud y la calidad del aire regional. En un estudio realizado en Utah, Lyman y Mansfield (2018) midieron emisiones de hasta 11.2 kg/día de BTEX desde una superficie de 2 hectáreas de una zona de almacenamiento y disposición final, esta cifra es superior a la reportada en estudios previos realizados en Luisiana.

5.2 IMPACTOS SOCIALES Y A LA SALUD

Como se ha señalado, los recortes y lodos de perforación, el agua producida, y el agua de retorno contienen una mezcla compleja de compuestos potencialmente tóxicos que representan una amenaza significativa para los seres vivos, incluida la salud humana, tanto fisiológica como social, particularmente para los trabajadores y las comunidades cercanas a pozos de inyección, sitios de almacenamiento o regiones con infraestructura deficiente.

La ubicación sistemática de infraestructura para la disposición de aguas residuales en comunidades empobrecidas, racializadas o marginadas constituye un ejemplo claro de lo que se conoce como zonas de sacrificio: territorios donde se permite —y en muchos casos se perpetúa— el deterioro ambiental y la afectación a la salud humana en nombre del desarrollo energético o económico. En estos espacios, los impactos acumulativos de la contaminación, la falta de acceso a información y la exclusión de los procesos de toma de decisiones generan condiciones de injusticia ambiental persistente. Por ejemplo, en un estudio sobre el sur de Texas, Johnston et al. (2016) documentan cómo los pozos de inyección de aguas residuales de la industria petrolera se concentran de ma-

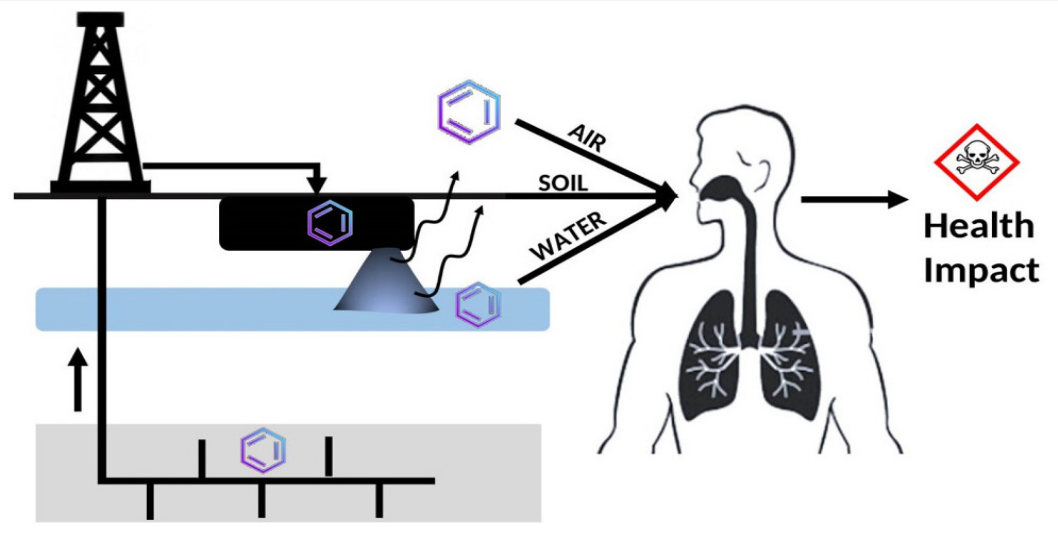


Figura 12. Resumen gráfico sobre el daño a la salud de los compuestos tóxicos derivados de aguas producidas. Fuente: Ma, Hurtado, Eguilior, & Llamas-Borrajo (2024).

nera desproporcionada en áreas habitadas por comunidades hispanas, afroamericanas y de bajos ingresos, e identificaron que 16% de los pozos de agua potable estaban a menos de 5 km de pozos de disposición pese a los riesgos conocidos de contaminación del agua, del aire y de la generación de sismicidad inducida, siendo que el 70% - 36,653- de este tipo de pozos en Texas tiene al menos una violación ambiental registrada y más de 4 mil de éstos tienen fugas y fallas significativas. Se resalta que estas comunidades tienen menor poder político, menos acceso a recursos legales y técnicos, y una historia de exclusión sistemática en los procesos de regulación ambiental. Esta distribución no es aleatoria ni neutral, sino que refleja una estructura de decisiones que deliberadamente ignora el derecho de estas poblaciones a la salud y a un ambiente sano. Las zonas de sacrificio, por tanto, no solo son espacios de degradación ecológica, sino también de violencia estructural y de exclusión histórica de ciertos grupos frente a los costos del modelo extractivo. Esto es grave, no solo por alterar el entorno o evitar el acceso a los recursos naturales de calidad, sino también porque enferma crónicamente a las personas. La disposición de aguas residuales generadas durante la extracción de hidrocarburos, tanto en contextos convencionales como no convencionales (e.g., fracking), ha sido asociada a múltiples efectos adversos para la salud, ya sea por exposición directa (inhalación, contacto dérmico o ingestión) o mediante procesos de migración y volatilización de contaminantes hacia el ambiente. Estos impactos pueden ser agudos, crónicos o manifestarse de forma diferida.

Diversos estudios han documentado efectos que incluyen toxicidad orgánica, cancerígena, neurotóxica, endocrina y reproductiva. Los metales pesados como cadmio, mercurio, bario, cromo y plomo, que pueden provocar daños neurológicos, hepáticos, renales y riesgo de bioacumulación (Gilbert, Nwachukwu, & Uzoije, 2018) (Lester, y otros, 2015) (Ochoa-Caballero & Rivera-Parra, 2021). Los COV (BTEX) y los HAP se reconocen por su potencial mutagénico y cancerígeno y el benceno está relacionado con leucemia y otras enfermedades hematológicas (Butkovskyi, Bruning, Kools, Rijnaarts, & van Wezel, 2017) (Ma, Hurtado, Eguilior, & Llamas-Borrajo, 2024). Los sólidos disueltos totales (SDT), la alta salinidad, el exceso de sodio y gases como el sulfuro de hidrógeno (H_2S) son irritantes y letales en concentraciones elevadas (Gregory, Vidic, Dzombak, Landis, & Kassner, 2011) (Ochoa-Caballero & Rivera-Parra, 2021).

5.2.1 Casos documentados de daños a las comunidades y a la salud

Nigeria. En el Delta del Níger, uno de los territorios más explotados por la industria petrolera a nivel global, múltiples comunidades enfrentan impactos severos en la salud debido a la disposición inadecuada de residuos derivados de perforaciones e inyecciones profundas. El estudio de Gilbert et al. (2018) documenta que en zonas cercanas a pozos de disposición, los suelos y cuerpos de agua presentan altas concentraciones de metales pesados como plomo, cromo, bario, níquel y zinc, que superan ampliamente los límites internacionales de exposición segura. El níquel y el cromo pueden actuar como inmunosupresores, afectando la función de linfocitos y otras células del sistema inmune, y suelen encontrarse en forma disuelta o coloidal en las aguas de retorno, lo que facilita su movilidad a través del subsuelo y su entrada en la cadena alimenticia mediante procesos de bioacumulación en plantas y animales. En estas comunidades, se han registrado efectos fisiológicos significativos, incluyendo alteraciones hematológicas, daño hepático y renal, y manifestaciones de citotoxicidad celular. La exposición es particularmente preocupante en niños y mujeres embarazadas, quienes presentan un mayor riesgo de efectos neurológicos y del desarrollo, así como daños en la piel. La falta de monitoreo, la proximidad entre viviendas y pozos contaminantes, y la ausencia de infraestructura de contención agravan estos efectos. Entre las comunidades más impactadas se encuentra el pueblo Ogoni, el cual ha tenido un aumento de afectaciones en la salud por la exposición al agua contaminada como anomalías en el comportamiento, enfermedades respiratorias, supresión del crecimiento, la inducción o inhibición de enzimas, respuestas fisiológicas adversas, trastornos sanguíneos, resultados reproductivos negativos, reducción de la inmunidad frente a enfermedades y parásitos, cánceres de distintos órganos y daño cromosómico.

Ecuador. En la región amazónica del Ecuador, poblaciones indígenas asentadas cerca de infraestructuras petroleras han estado expuestas por décadas a la liberación directa o accidental de aguas congénitas, un residuo altamente tóxico generado durante la extracción de crudo. El estudio de Ochoa-Caballero y Rivera-Parra (2021) analizó 15 muestras de agua congénita recolectadas en diferentes bloques petroleros de la Amazonía ecuatoriana, encontrando concentraciones elevadas de metales pesados como cadmio, bario, cromo, plomo y níquel, así como presencia de hidrocarburos totales del petróleo (TPH) y compuestos fenólicos. Estos residuos fueron detectados no solo en sitios de almacenamiento, sino también en cuerpos de agua superficiales cercanos y suelos aledaños, lo que evidencia procesos de infiltración o escurrimiento que pueden llegar a las fuentes de consumo de las comunidades. El cadmio ha sido vinculado con daño renal, osteomalacia y efectos carcinógenos, mientras que el cromo hexavalente (Cr^{6+}) se ha asociado a cáncer pulmonar, alteraciones genéticas y dermatotoxicidad. Todas estas sustancias tienen la capacidad de bioacumularse, representando un riesgo crónico de cáncer, toxicidad hepática, alteraciones renales, daños al sistema nervioso, problemas de desarrollo cognitivo, daños en la piel, alteraciones cardiovasculares y daño reproductivo. Además, al menos cinco de las muestras mostraron niveles que superan los límites internacionales en al menos un contaminante. Las comunidades afectadas —entre ellas grupos indígenas kichwas y shuar— no solo dependen de los ríos contaminados para abastecimiento diario, sino que enfrentan un legado de inequidad ambiental derivado del modelo extractivo.

Estados Unidos. En diversas formaciones de gas no convencional en Estados Unidos (como Marcellus, Barnett y Haynesville), se han documentado aguas de retorno con concentraciones extremas de sólidos disueltos totales (TDS), hasta 300,000 mg/L, equivalentes a ocho veces la salinidad del agua de mar (Gregory, Vidic, Dzombak, Landis, & Kassner, 2011). Este nivel de salinidad puede provocar trastornos gastrointestinales y desequilibrios electrolíticos si contamina fuentes de agua potable. Además, la presencia de hidrocarburos totales del petróleo (TPH) representa un riesgo adicional de toxicidad hepática y potencial carcinogenicidad, sobre todo cuando se almacenan residuos sin control.

Pensilvania.
Radioactividad. El estudio de Zhang et al. (2015) en Pensilvania documenta concentraciones de radio-226 (Ra-226) en aguas producidas y de retorno que alcanzaron hasta 18,000 pCi/L, superando ampliamente el límite máximo de 5 pCi/L establecido por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA) para agua potable. Mediante modelación de dosis efectiva total (TEDE) utilizando el software RESRAD, se estimó que los trabajadores expuestos directamente a estas aguas podrían recibir hasta 36.9 mrem/año por la radiación gamma externa. Aunque dicho valor está por debajo del límite regulatorio (100 mrem/año para público general), la exposición no es puntual sino sostenida, por lo que el estudio también estima un riesgo de cáncer fatal a lo largo de la vida de hasta 9 en 10,000, valor que se acerca al umbral utilizado por la EPA. Además, los ensayos de lixiviación mostraron que el Ra-226 contenido en lodos frescos puede liberarse fácilmente al ambiente, con concentraciones en el lixiviado que alcanzaron los 378 pCi/L, es decir, más de 75 veces el límite de seguridad para agua potable. Esto refuerza la preocupación de que derrames, infiltraciones o mal manejo de estos residuos radiactivos en sitios de disposición podrían representar un riesgo tanto para el ambiente como para la salud humana.

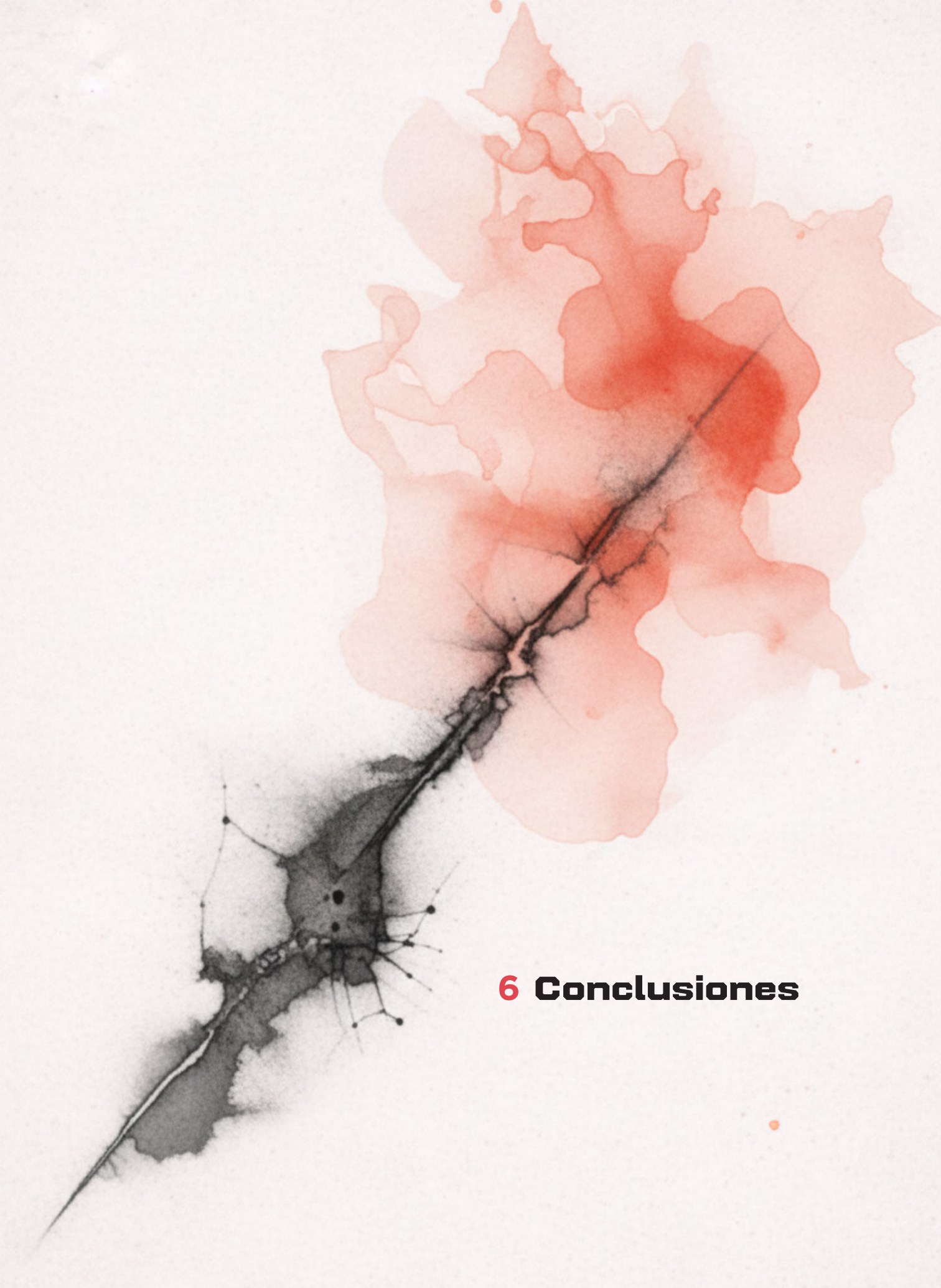
Colorado y Nuevo México

Disruptores endocrinos. Kassotis et al. (2016) recolectaron muestras de agua superficial en cercanías de sitios activos de disposición de aguas residuales en zonas de extracción petrolera, y encontraron hasta 65 compuestos con potencial de disrupción endocrina con niveles significativos de actividad estrogénica, androgénica y progestagénica. Estas muestras mostraron alteración de receptores hormonales en ensayos celulares, más del 60% de la actividad del receptor fue bloqueada al estar en contacto con el agua del sitio, lo que sugiere la presencia de disruptores endócrinos que pueden afectar el sistema reproductivo y el desarrollo. En el río New River, se identificaron equivalencias hormonales similares a compuestos que generan infertilidad, inhibición de ovulación o cambios de expresión genética en fauna. La exposición a este tipo de compuestos ha sido asociada con problemas de fertilidad, alteraciones del desarrollo fetal y pubertad precoz, entre otros. En al menos un sitio, el agua superficial tenía niveles de actividad hormonal comparables a aguas impactadas por aguas negras sin tratamiento. Aunque no se realizaron estudios en humanos, el artículo destaca que muchas de estas zonas están habitadas o tienen presencia ganadera, lo que eleva la preocupación por la transferencia a humanos a través de agua o alimentos contaminados.

Utah

Emisiones tóxicas. El estudio de Lyman et al. (2018) documenta emisiones atmosféricas provenientes de sitios de disposición superficial de residuos petroleros conocidos como *landfarms*. Estos sitios reciben aguas de retorno, recortes de perforación y otros desechos que son esparcidos y dispuestos sobre el suelo sin recubrimiento, facilitando su evaporación. Los resultados mostraron la liberación de compuestos como benceno, tolueno y compuestos orgánicos volátiles (COV) al aire, especialmente en días cálidos y sin viento. En particular, las concentraciones de benceno en el aire —sustancia clasificada como cancerígena por la IARC— alcanzaron niveles que superaban los valores de referencia de exposición crónica para aire ambiente. Aunque el estudio no incluye biomonitoreo humano, los autores advierten que la inhalación prolongada de estos contaminantes puede representar un riesgo importante para la salud respiratoria y hematológica de trabajadores, comunidades cercanas o fauna expuesta. La falta de cobertura o contención en estos sitios genera una ruta directa de exposición aérea, lo cual contradice buenas prácticas ambientales y pone en evidencia fallas en la regulación local de residuos petroleros.

Formación Marcellus (Pensilvania, Ohio, West Virginia)
Alta exposición a BTEX. El estudio de Ma y Hurtado (2024) desarrolla un modelo de evaluación de riesgo para estimar los efectos crónicos y agudos de la exposición a BTEX (benceno, tolueno, etilbenceno y xileno) derivados de filtraciones de aguas de retorno en operaciones de fracking en la formación Marcellus, EE.UU. Los resultados indican que incluso 100 días después de una fuga, las concentraciones de benceno en el aire superan los límites aceptables de riesgo cancerígeno en todos los escenarios climáticos considerados (árido, semiárido y húmedo), tanto para adultos como para niños, de hecho, el riesgo crónico de cáncer por inhalación de benceno fue especialmente alto en niños, debido a su mayor frecuencia respiratoria, superficie de piel expuesta y patrones de comportamiento al aire libre. Además del benceno, se detectaron riesgos no cancerígenos por exposición a tolueno y xileno, también más elevados en niños. Las vías de exposición más relevantes fueron la inhalación aérea y, en menor medida, el contacto dérmico e ingestión de agua contaminada. El riesgo agudo para trabajadores sin equipo de protección también se estimó elevado: la exposición por inhalación a benceno durante un solo día superó el umbral de riesgo cancerígeno, y en 15 días se alcanzaron niveles de hasta 5×10^{-4}, 500 veces por encima del límite aceptable. Asimismo, el índice de riesgo no cancerígeno (HQ) para benceno y xileno por exposición aguda inhalatoria también rebasó el umbral de seguridad (HQ > 1), especialmente en escenarios de exposición prolongada y con poca ventilación. Estos resultados evidencian que fugas no detectadas de aguas de retorno representan un riesgo grave a la salud humana, tanto por exposición directa como por contaminación del aire, el suelo y cuerpos de agua subterráneos.



6 Conclusiones

La información sobre los pozos de disposición en México revela un panorama crítico sobre la forma en que se gestionan los residuos derivados de la extracción de hidrocarburos, en particular, el agua producida, de retorno y otros fluidos contaminantes. Desde una perspectiva técnico-operativa, se identificó que estos pozos representan una de las prácticas más opacas y menos reguladas del sector hidrocarburos, pese a su alto potencial de impacto ambiental y de riesgo para los ecosistemas y la salud de las comunidades. Aunque se reconocen múltiples tipos de pozos —productores, inyectores, letrina o de disposición— y residuos —como recortes de perforación, agua de retorno, lodos contaminados y aguas congénitas—, en la práctica no existen mecanismos de control rigurosos ni un sistema efectivo de trazabilidad.

El análisis del marco normativo nacional evidencia una dispersión legislativa y la ausencia de criterios cuantitativos y técnicos obligatorios sobre los residuos inyectados. Aunque existen disposiciones administrativas emitidas por la ASEA, estas se centran más en requisitos de trámite que en parámetros técnicos o ambientales. A diferencia de los marcos regulatorios internacionales, México carece de controles sobre radiación, límites de concentración de contaminantes o monitoreos post-cierre, lo cual pone en entredicho la eficacia del modelo regulador actual. El Acuerdo de Escazú que establece obligaciones sobre transparencia y acceso a la información, participación y justicia ambiental, tampoco ha sido aplicado de manera plena en este ámbito y es un espacio de oportunidad para la rendición de cuentas al respecto y la participación ciudadana.

Uno de los hallazgos más críticos del estudio radica en la opacidad institucional y la fragmentación de la información. Las solicitudes realizadas a Pemex, ASEA y CNH revelan una negativa sistemática a entregar información pública, bajo argumentos de secreto industrial, seguridad nacional o simple inexistencia de datos. Los pocos datos entregados presentan inconsistencias graves, formatos incompatibles y ausencia de desagregación, lo que impide reconstruir de forma fiable qué sustancias se inyectan, dónde, con qué frecuencia y bajo qué condiciones. Incluso en los casos donde se entregaron informes de inyección, estos mostraron errores evi-

dentes, como reportar volúmenes idénticos durante varios años, o presiones inyectadas que contradicen lo reportado en estudios académicos independientes.

Desde una perspectiva ambiental, los impactos potenciales de los pozos de disposición son severos y están bien documentados en la literatura científica. Se ha identificado que los pozos no son infalibles, y es común la presencia de fisuras y fugas al subsuelo, por lo que la inyección de estos residuos puede provocar contaminación del agua subterránea, afectación de cuerpos de agua superficiales, degradación del suelo, emisiones tóxicas al aire y riesgos geológicos como la sismicidad inducida. La alta toxicidad y persistencia de los compuestos involucrados —hidrocarburos, metales pesados, sales, materiales radiactivos, disruptores endócrinos, entre otros— implica riesgos crónicos e irreversibles para ecosistemas y seres humanos.

Estos impactos no son teóricos. Casos documentados en Nigeria, Ecuador y Estados Unidos, muestran efectos reales en la salud de las comunidades, en muchos casos caracterizados por enfermedades crónicas, alteraciones neurológicas, reproductivas y cancerígenas. En México, la falta de información pública impide una evaluación detallada de los daños, pero la coincidencia entre aumento en la inyección, y en los niveles de contaminantes en descargas sugiere que los riesgos no están siendo adecuadamente gestionados.

Por último, el patrón de ubicación de los pozos de disposición en territorios marginados, empobrecidos o con limitada capacidad de exigencia ciudadana, evidencia que se trata de una práctica profundamente injusta. Estos territorios se convierten en zonas de sacrificio ambiental y humano, donde se depositan los costos de una industria que opera sin rendición de cuentas efectiva. Frente a ello, resulta imperante replantear el modelo extractivo vigente, priorizando la salud de las personas, la protección del medio ambiente y el respeto a los derechos colectivos.

7 Recomendaciones

1. **Reforma integral del marco normativo**
   Urge establecer un marco regulador específico y robusto para los pozos de disposición, con parámetros técnicos obligatorios, límites cuantitativos de contaminantes, y regulaciones específicas sobre materiales radiactivos, sellos hidráulicos, y monitoreo post-cierre. Se debe armonizar la legislación ambiental con las disposiciones del sector hidrocarburos, garantizando criterios de precaución.

2. **Implementación plena del Acuerdo de Escazú**
   Se deben establecer mecanismos reales para garantizar el acceso oportuno, completo y comprensible a toda la información sobre pozos de disposición. Además, deben fortalecerse los procesos de consulta pública y garantizar el derecho a la justicia ambiental en los territorios afectados.

3. **Establecimiento de un sistema nacional de información ambiental extractiva**
   Es necesario construir una base de datos pública, georreferenciada y en formato abierto, que concentre información técnica y ambiental sobre los pozos de disposición, incluyendo ubicación, tipo, frecuencia de inyección, volumen, y composición química de los residuos y resultados de monitoreo.

4. **Auditoría externa e independiente a Pemex y ASEA**
   Se debe realizar una evaluación técnica e institucional externa de la gestión de los pozos de disposición, comparando los reportes públicos con los datos operativos internos, y evaluando las capacidades reales de monitoreo y vigilancia de las autoridades reguladoras.

5. **Transición hacia el cierre progresivo de pozos de disposición**
   Esta práctica debe ser reconsiderada como una opción de emergencia y no como un método sistemático de disposición. Debe iniciarse una política nacional de cierre programado y remediación de pozos, priorizando alternativas de tratamiento y reducción de la generación de residuos.

6. **Reparación integral a comunidades impactadas**
   Las poblaciones que habitan cerca de pozos de disposición deben contar con mecanismos de atención médica especializada, evaluación ambiental independiente, acceso a información verificable y vías para exigir compensaciones por los impactos a su salud y su entorno.

8 Biblografía

AER, A. E. (2024). *Understanding Resource Development.* Obtenido de Directive 065: https://www.aer.ca/regulations-and-compliance-enforcement/rules-and-regulations/directives/directive-065

Allagoa, M. (2024). Managing Drill Cuttings Waste in Our Age. En K. R. Hakeem, *Perspectives and Insights on Soil Contamination and Effective Remediation Techniques.* IntechOpen. doi:10.5772/intechopen.1006868

ARPEL. (2005). *Guía para la disposición y el tratamiento de agua producida* (Vol. 1). Montevideo, Uruguay: Alconsult International.

Ball, A., Stewart, R., & Schliephake, K. (2011). A review of the current options for the treatment and safe disposal of drill cuttings. *Waste Management & Research the Journal for a Sustainable Circular Economy, 30*(5), 457-473. doi:https://doi.org/10.1177/0734242x11419892

Bandlien, E. H., Kruijf, S. D., Vik, E. A., Ekern, O. F., J. B., S. K., Dyce, G., & Bertone., F. (2024). *Water Management in Oil and Gas Operations: Industry Practice and Policy Guidelines for Developing Countries.* Washington DC: World Bank Group. doi::10.1596/978-1-4648-2047-2.

Berlanga, J., & Hernández, A. (2024). Campo Agua Fría: Una década inyectando agua, cuatro produciendo aceite. *Ingeniería Petrolera, 64*(1), 27-46. Obtenido de https://biblat.unam.mx/hevila/Ingenieriapetrolera/2024/vol64/no1/2.pdf

Butkovskyi, A., Bruning, H., Kools, S., Rijnaarts, H., & van Wezel, A. (2017). Removal of contaminants of emerging concern from urban wastewater by biofiltration. *Environmental Science: Water Research & Technology, 3*(3), 502 - 514. doi:https://doi.org/10.1021/acs.est.6b05640

EPA, U. E. (2025). *Underground Injection Control (UIC) Program*. Obtenido de Protecting Underground Sources of Drinking Water from Underground Injection (UIC): https://www.epa.gov/uic

Eyitayo, S., Watson, M., Kolawole, O., Xu, P., Bruant, R., & Henthorne, L. (2024). External utilization of oil and gas produced water: Why is the industry hesitant tu full-scale implementation? *Environment, Development and Sustainability*, 89-108.

Ferrari, L., & Flores-Hernández, J. (19 de abril de 2024). *Geología mata economía: las metas incumplidas y el inicio de un nuevo declive de la producción petrolera mexicana.* Obtenido de Observatorio Ciudadano de la Energía, AC: https://energia.org.mx/wp-content/uploads/2024/04/GeologiaEconomia-Pemex-Abril2024.pdf

Gaurina-Međimurec, N., Pašić, B., Mijić, P., & Medveď, I. (2020). Deep underground injection of waste from drilling activities: an overview. *Minerals, 10*(4), 303. doi:https://doi.org/10.3390/min10040303

Gilbert, L. C., Nwachukwu, M., & Uzoije, A. P. (2018). A review of petroleum waste management and environmental quality status of Niger Delta. *Petroleum and Chemical Industry International, 1*(1), 1 - 10. doi:https://dx.doi.org/10.33140/AEWMR

Gregory, K., Vidic, R., Dzombak, D., Landis, R., & Kassner, M. (2011). Water management challenges associated with the production of shale gas by hydraulic fracturing. *Elements, 7*(3), 181 - 186. doi:https://doi.org/10.2113/gselements.7.3.181

Guo, Q., Geehan, T., & Ovalle, A. (2007). Increased assurance of drill cuttings reinjection: challenges, recent advances, and case studies. *Spe Drilling & Completion, 22*(2), 99-105. doi:https://doi.org/10.2118/87972-pa

Gurska, J., Wang, W., Gerhardt, K., Khalid, A., Isherwood, D., Huang, X., . . . Greenberg., B. (2009). Three year field test of a plant growth promoting rhizobacteria enhanced phytoremediation system at a land farm for treatment of hydrocarbon waste. *Environmental Science & Technology, 43*(12), 4472-4479. doi:https://doi.org/10.1021/es801540h

IAEA, I. A. (2014). *International Atomic Energy Agency.* Obtenido de Radiation Protection and the Management of Radioactive Waste in the Oil and Gas Industry. Safety Reports Series No. 34.: https://www.iaea.org/publications/6747/radiation-protection-and-the-management-of-radioactive-waste-in-the-oil-and-gas-industry

IOGP, I. A. (2024). *Environmental performance indicators – 2023 data.* IOGP. Obtenido de https://www.iogp.org/bookstore/product/iogp-environmental-performance-indicators-2023-data/

Iturbe, R., Serrano, R., & Bustillos, L. (2006). Análisis de riesgo a la salud de una instalación petrolera del suroeste de México. *Ingeniería Investigación Y Tecnología, 7*(1), 1-15. doi:https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2006.07n1.001

Johnston, J., Werder, E., & Sebastian, D. (2016). Wastewater disposal wells, fracking, and environmental injustice in southern Texas. *American Journal of Public Health, 106*(3), 550 - 556. doi:https://doi.org/10.2105/AJPH.2015.303000

Kassotis, C. D., L. R. Iwanowicz, D. M., Cozzarelli, I. M., Mumford, A. C., Orem, W. H., & Nagel, S. C. (2016). Endocrine disrupting activities of surface water associated with a West Virginia oil and gas industry wastewater disposal site. *Science of The Total Environment, 557-558*, 901–910. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.03.113

Lester, Y., Ferrer, I., Thurman, E. M., Sitterley, K. A., Korak, J. A., Aiken, G., & Linden., K. G. (2015). Characterization of hydraulic fracturing flowback water in Colorado: Implications for water treatment. *Science of the Total Environment, 512-513*, 637–644. doi:https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.01.043

Luek, J., & Gonsior, M. (2017). Organic compounds in hydraulic fracturing fluids and wastewater: A review. *Water Research, 123*, 536–548. doi:https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.06.038

Lyman, S., & Mansfield, M. (2018). Organic compound emissions from a landfarm used for oil and gas solid waste disposal. *Journal of the Air & Waste Management Association, 68*(7), 637-642. doi:https://doi.org/10.1080/10962247.2018.1459327

Ma, L., Hurtado, A., Eguilior, S., & Llamas-Borrajo, J. (2024). Acute and chronic risk assessment of BTEX in the return water of hydraulic fracturing operations in Marcellus Shale. *Science of the total environment, 906*(1). doi:https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167638

Mandal, A., Jana, A., Datta, A., Sarma, P., Lal, B., & Datta, J. (2014). Monitoring ground water quality and heavy metals in soil during large-scale bioremediation of petroleum hydrocarbon contaminated waste in India: case studies. *Journal of Natural Resources and Development*. doi:https://doi.org/10.5027/jnrd.v4i0.10

Márquez, G., Sánchez, F. J., Martín-del-Río, J. J., Arribas, R., & Blasco-López, F. J. (2011). Attack of carbonic anhydride and hydrogen sulfide on API class Hcement slurries exposed to saline formation waters. *Materiales De Construcción, 61*(303), 371-384. doi:https://doi.org/10.3989/mc.2010.54509

Mesa, S., Orjuela, J., Ortega, A., & Sandoval, J. (2018). Revisión del panorama actual del manejo de agua de producción en la industria petrolera colombiana. *Gestión y Ambiente, 21*(7), 87 - 98. doi:http://doi.org/10.15446/ga.v21n1.69792

Morales-Bautista, C., Dominguez-Rodríguez, V., & Adams, R. H. (2011). Estudio cinético del intercambio catiónico con Ca(OH)2 y evaluación de la fertilidad en un suelo arcilloso contaminado con aguas congénitas. *Bioagro, 23*(2), 129-134. Obtenido de http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1316-33612011000200008&lng=es&tlng=es.

Neff, J., Lee, K., & DeBlois, E. (2011). Produced water: Overview of composition, fates, and effects. En K. Lee, & J. Neff, *Produced Water* (págs. 3 - 54). New York: Springer. doi:https://doi.org/10.1007/978-1-4614-0046-2_1

Newman, K., McCosh, K., Woolsey, G., & Boodhay, M. (2009). Multistage centrifugal pumps for drilling and production waste injection operations. *Asia Pacific Health, Safety, Security and Environment Conference.* Jakarta: Society of Petroleum Engineers. doi:https://doi.org/10.2118/122415-ms

Ochoa-Caballero, J., & Rivera-Parra, L. (2021). Mapping of potential environmental risks associated to formation water in the Oriente Basin, Ecuador. *Groundwater for Sustainable Development, 13*. doi:https://doi.org/10.1016/j.gsd.2021.100566

Pan, S., Zhang, Y., Lu, P., Yang, D., Huang, Y., Wu, X., . . . Guo, D. (2025). Environmental Impacts of Shale Gas Development on Groundwater, and Flowback and Produced Water Treatment Management: A Review. *Sustainability, 17*(11). doi:https://doi.org/10.3390/su17115209

PEMEX, P. M. (2023). *Informe de Sostenibilidad 2023.* Obtenido de https://www.Pemex.com/etica_y_transparencia/transparencia/informes/Documents/informe_sostenibilidad_2023_esp.pdf

Reis, J. C. (1996). *Environmental Control in Petroleum Engineering.* Houston: Gulf Professional Publishing.

Rivera, E. (2021). Agua e hidrocarburos: un acercamiento a su interacción bajo el enfoque del derecho humano al agua. Cuestiones Constitucionales. *Revista Mexicana de Derecho Constitucional*, 107-147. doi:https://doi.org/10.22201/iij.24484881e.2021.45.16659

Siagian, U. W., Widodo, S., Khoiruddin, Wardani, A. K., & Wenten, I. G. (2018). Oilfield Produced Water Reuse and Reinjection with Membrane. *MATEC Web of Conferences*. doi:10.1051/matecconf/201815608005

Silva, L., Alves, F., & França, F. (2012). A review of the technological solutions for the treatment of oily sludges from petroleum refineries. *Waste Management & Research the Journal for a Sustainable Circular Economy, 30*(10), 1016-1030. doi:https://doi.org/10.1177/0734242x12448517

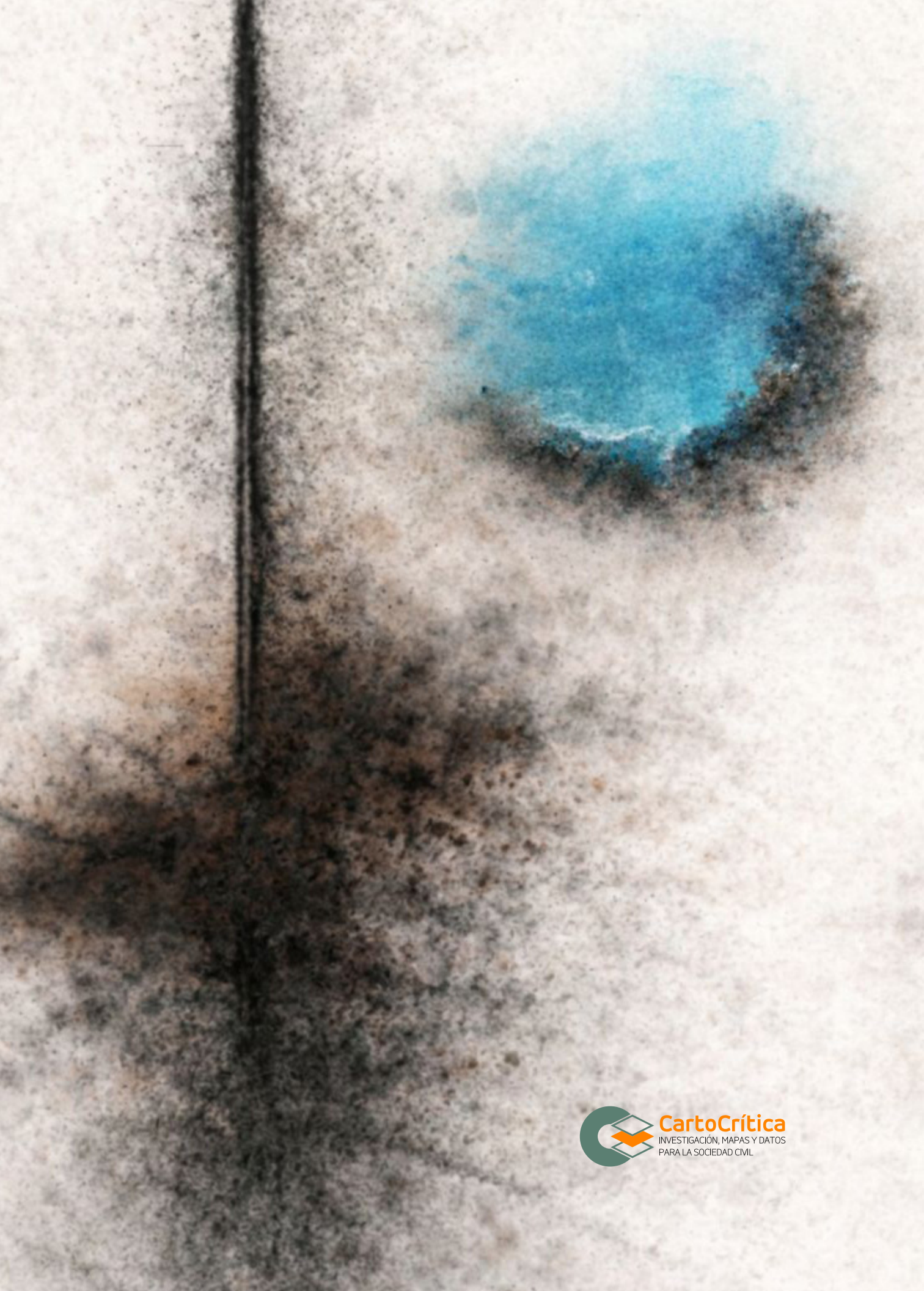
Usla, H. (12 de febrero de 2025). A Pemex 'se le filtra' agua en el petróleo por sobreexplotar yacimientos, señalan especialistas. *El Financiero*. Obtenido de https://www.elfinanciero.com.mx/economia/2025/02/12/a-Pemex-se-le-filtra-el-agua-en-el-petroleo-especialistas-explican-por-que/

Veil, J. (2020). *U.S. Produced Water Volumes and Management Practices in 2017.* Ground Water Research and Education Foundation.

Villegas, R., Rivera, P., Herrera, J., & González, C. (2014). Manejo integral de los recortes de perforación de la industria petrolera en tabasco. *Ciba. Revista Iberoamericana De Las Ciencias Biológicas Y Agropecuarias, 2*(4), 18. doi:https://doi.org/10.23913/ciba.v2i4.22

Wojtanowicz, A. (2008). Environmental control of drilling and production operations. En S. Orszulik, *Environmental Technology in the Oil Industry.* Dordrecht: Springer. doi:https://doi.org/10.1007/978-1-4020-5472-3_5

Zhang, T., Hammack, R. W., & Vidic, R. D. (2015). Fate of Radium in Marcellus Shale Flowback Water Impoundments. *Environmental Science & Technology, 49*(15), 9347-9354. doi:https://doi.org/10.1021/acs.est.5b01393



CartoCrítica
INVESTIGACIÓN, MAPAS Y DATOS
PARA LA SOCIEDAD CIVIL