

Sistema energético metano y salud



ASOCIACIÓN
ARGENTINA DE
ABOGADOS/AS
AMBIENTALISTAS



Título: Sistema energético, metano y salud

Autores: Verzeñassi, Damián

Vallini, Alejandro

Möller, Verónica

Capozzi, Luciana

Failo, Mauro

Diseño de portada y maquetación: Keppl, Gabriel

Rosario, Noviembre 2025



ASOCIACIÓN
ARGENTINA DE
**ABOGADOS/AS
AMBIENTALISTAS**



Sistema energético metano y salud

Autores



Damián Verzeñassi

Médico especialista en Medicina Legal, Director del Instituto de Salud Socioambiental, Responsable Académico de la Materia Salud Socioambiental en la Facultad de Cs. Médicas de la UNR. Profesor Titular en Salud Pública en las Universidades Nacionales de Rosario y Chaco Austral.



Alejandro Vallini

Médico pediatra, docente de la UNR. Director de la Clínica Ambiental Sede Argentina, Coordinador de la Comisión de Salud Socioambiental del Colegio de Médicos 2da Circunscripción de Santa Fe.



Verónica Möller

Técnica en promoción de la Salud, docente de la UNR, responsable de implementación de la Materia Salud Socioambiental de la Fac. Cs. Médicas UNR, integrante del Instituto de Salud Socioambiental de la Fac. Cs. Médicas UNR, Miembro de la Comisión Directiva De la Asoc. Civil Salud Socioambiental



Luciana Capozzi

Médica generalista, trabajadora del sistema de salud en la provincia de Río Negro. Miembro del Instituto de Salud Socioambiental Fac. Cs. Médicas UNR



Mauro Failo

Presidente de la Asoc. Civil Salud Socioambiental, no docente de la UNR, Miembro del Instituto de Salud Socioambiental de la Fac. Cs. Médicas de la UNR

Advertencia a quiénes leen el documento

Este trabajo reúne y organiza evidencia científica sobre los efectos del metano, el ozono troposférico (O_3) y otros contaminantes vinculados a la extracción no convencional de hidrocarburos sobre la salud humana.

Previo a su lectura, una advertencia: el conocimiento aquí presentado, producido en laboratorios, centros de investigación y publicaciones indexadas, constituye solo una de las formas posibles de conocer.

Antes que la ciencia formal reconozca los impactos de la extracción no convencional de hidrocarburos en la salud (como en todos los modos de extractivismos) las comunidades ya lo sabían, denunciaban y defendían su territorio.

Los Pueblos saben por experiencia directa, por la observación cotidiana de los cambios en el aire, en el agua, en los cuerpos. Saben porque el deterioro de su salud y de su territorio es parte de la vida diaria, aunque ese saber no haya sido publicado en revistas científicas.

Ese conocimiento situado, vivido desde la experiencia, la resistencia y la memoria colectiva no puede ser subordinado, deslegitimado o invisibilizado por los lenguajes hegemónicos del conocimiento científico y técnico. Es precisamente en esos saberes donde se reconoce el primer diagnóstico,

la primera alarma y el primer llamado ético ante el daño. La ciencia que aquí se expone llega después: sistematiza, cuantifica y confirma lo que ya estaba siendo dicho, sentido y vivido por los pueblos que habitan los territorios sacrificados.

Desde el Instituto de Salud Socioambiental, pretendemos aportar herramientas que sirvan para acompañar a las comunidades y fortalecer sus resistencias.

Este documento asume la rigurosidad científica como herramienta, pero reivindica la necesidad de una ciencia comprometida con la vida, UNA CIENCIA DIGNA, capaz de dialogar con los saberes comunitarios y reconocer su carácter epistemológicamente legítimo.

Porque comprender los efectos del metano, del ozono y de la extracción no convencional de hidrocarburos en la salud humana, exige mucho más que medir concentraciones o calcular riesgos, requiere escuchar, mirar y aprender del territorio y de quienes lo habitan.

Les autores

Prólogo

El presente documento constituye un aporte clave al debate político sobre las responsabilidades del Estado y de las empresas frente a los impactos del modelo económico y energético vigente. Desde una mirada de los derechos de la naturaleza nos interpela a reconocer que detrás de cada molécula emitida existen derechos vulnerados, territorios dañados y comunidades expuestas sin consentimiento ni resguardo.

El análisis que presenta esta publicación, respaldado en evidencia científica, pone de relieve que las emisiones de metano no son un hecho aislado, sino la consecuencia previsible de decisiones políticas que priorizan la rentabilidad de corto plazo sobre la protección de la salud y del ambiente. Esto debería activar principios claves de la normativa ambiental como, por ejemplo, el principio precautorio, la equidad intergeneracional y el derecho a un ambiente sano, presentes en la Constitución Nacional y en la Ley General del Ambiente, entre otros.

El documento invita a re-pensar la noción de “progreso” cuando sus costos recaen sobre comunidades que nunca participaron en la toma de decisiones que las afectan. Desde el derecho, ello nos impone revisar los límites de la responsabilidad estatal y empresarial ante el daño ambiental colectivo, el acceso a la información pública y la justicia

ambiental en un contexto de regresiones ambientales.

Frente a la expansión del fracking y a la persistente opacidad de los datos oficiales, la evidencia compilada por el Instituto de Salud Socioambiental (INSSA) constituye no solo un insumo técnico, sino un instrumento para la acción.

Que este trabajo sirva como punto de partida para fortalecer las estrategias y diálogos que garanticen la protección de la vida, la salud y el ambiente, recordándonos que el metano (como parte del modelo económico fósil) no es solo un gas: es el síntoma de un modelo que debemos transformar.

Enrique Viale

Presidente de la Asociación Argentina de
Abogados/as Ambientalistas y el Colectivo
de Acción por la Justicia Ecosocial

ÍNDICE

ÍNDICE DE ABREVIATURAS.....	12
RESUMEN EJECUTIVO.....	14
1. INTRODUCCIÓN.....	18
2. MARCO CONCEPTUAL.....	23
2.1. Determinación social de la salud.....	23
2.2. Ecología política de la salud y conflictos energéticos.....	24
2.3. El metano como síntoma de un modelo extractivista.....	25
3. CARACTERÍSTICAS DEL METANO Y LA EXTRACCIÓN NO CONVENCIONAL.....	27
3.1. Propiedades del metano.....	27
3.2. Procesos de extracción no convencional.....	28
3.3. Otros contaminantes asociados.....	29
4. IMPACTOS DEL METANO EN LA SALUD HUMANA.....	31
4.1 Directos.....	31
4.2 Indirectos:	
4.2.1. Ozono troposférico y daño en la salud.....	32
4.2.2. Daño respiratorio.....	33
4.2.3. Daños cardiovasculares.....	37
4.2.4. Efectos reproducción y en el desarrollo.....	41

4.2.5. Metano y cáncer.....	42
4.2.6. Metano, crisis climática y salud.....	43
5. EL FRACKING Y SUS IMPACTOS EN LA SALUD DE LOS TERRITORIOS Y LAS COMUNIDADES.....	45
5.1. Impactos ambientales.....	45
5.2. Extracción no convencional de hidrocarburos y salud reproductiva.....	47
5.3. Fracking y cáncer.....	50
5.3.1. Distancias relevantes en fracking y cáncer.....	52
5.4. Riesgos en la salud de los trabajadores del fracking.....	53
6. DÉFICITS DE REGISTROS PARA LAS EPIDEMIOLOGÍAS DEL FRACKING.....	56
7. REFLEXIONES FINALES.....	59
8. BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA.....	62

Índice de abreviaturas:

AIE — Agencia Internacional de la Energía
ATSDR — Agency for Toxic Substances and Disease Registry
BTEX — Benceno, Tolueno, Etilbenceno y Xilenos
CCAC — Climate and Clean Air Coalition
CH₄ — Metano
CIE-10 — Clasificador Internacional de Enfermedades, 10^a revisión.
CO — Monóxido de carbono
CO₂ — Dióxido de carbono
COVs — Compuestos Orgánicos Volátiles
EPA — Environmental Protection Agency (Agencia de Protección Ambiental de EE. UU.)
EPP — Equipo de Protección Personal
GEI — Gases de Efecto Invernadero
HAP — Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos
IARC — International Agency for Research on Cancer (Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer)
IPCC — Intergovernmental Panel on Climate Change (Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático)
LLA — Leucemia Linfoblástica Aguda
NO_x — Óxidos de nitrógeno
NO₂ — Dióxido de nitrógeno
O₂ — Oxígeno
O₃ — Ozono troposférico
OIT — Organización Internacional del Trabajo.
OPS — Organización Panamericana de la Salud
PM_{2.5} / PM_{2.5} — Partículas en suspensión finas (particu-

late matter $\leq 2.5 \mu\text{m}$)

ppb — partes por billón

ppm — partes por millón

SEI — Stockholm Environment Institute

TENORM — Technologically Enhanced Naturally Occurring Radioactive Material (material radiactivo natural movilizado por actividades tecnológicas)

UV-B — Radiación ultravioleta tipo B

WHO / OMS — World Health Organization / Organización Mundial de la Salud

$\mu\text{g}/\text{m}^3$ — microgramos por metro cúbico (unidad de concentración atmosférica usada)

Resumen Ejecutivo

El metano es un gas de efecto invernadero con un potencial de calentamiento global más de 80 veces superior al del dióxido de carbono, capacidad de daños directos e indirectos en la salud, y al mismo tiempo es precursor del ozono troposférico.

Su creciente emisión se relaciona principalmente con actividades humanas como la ganadería intensiva, los rellenos sanitarios y, de manera especialmente crítica en las últimas décadas, la extracción no convencional de hidrocarburos mediante fractura hidráulica (*fracking*).

Además de su papel en el calentamiento global, el metano actúa como precursor del ozono troposférico, constituyendo un contaminante atmosférico con efectos adversos comprobados sobre la salud respiratoria, cardiovascular, reproductiva entre otros. La exposición al ozono troposférico se asocia a aumento de mortalidad por causas respiratorias y cardiovasculares, exacerbaciones de asma y EPOC, y mayor vulnerabilidad en niños, personas mayores y poblaciones con enfermedades de base. Asimismo, se han documentado alteraciones en la fertilidad masculina y femenina, y efectos negativos en el desarrollo fetal.

A su vez, la evidencia revisada demuestra que la producción de hidrocarburos no convencional genera múltiples

riesgos sanitarios adicionales. Los estudios epidemiológicos en Estados Unidos y Canadá han evidenciado un aumento del riesgo de leucemia linfoblástica aguda infantil en comunidades ubicadas en cercanía de pozos de *fracking*, así como posibles incrementos en linfomas y otros cánceres hematológicos. También se han descrito alteraciones endocrinas, disrupciones reproductivas, entre otras.

Como queda evidenciado en este trabajo, la liberación al ambiente del metano, está estrechamente asociada a prácticas extractivas de alto impacto socioambiental que movilizan además una amplia gama de sustancias químicas y generan múltiples vías de exposición, lo que hace necesario analizar sus impactos en clave de los sinergismos identificados y potenciales.

Salud y enfermedad son parte de un proceso social complejo, en el que intervienen también los procesos de atención y de cuidados, donde interactúan niveles generales (modelo económico extractivista), particulares (formas de organización productiva como el *fracking*) y singulares (condiciones de vida de las comunidades).

Un análisis de los procesos de salud no puede, por lo tanto, disociar el metano de este entramado de contaminantes que operan en sinergia.

Este enfoque permite comprender que los daños en salud asociados al metano no son “accidentes” inevitables, sino consecuencias estructurales de una forma de desarrollo que privilegia la rentabilidad sobre la sustentabilidad socioambiental.

El proceso de “transición verde” del Norte Global, es decir, sus estrategias para recuperar habitabilidad en esas latitudes, implicó el transformar a los territorios del Sur Global (y las comunidades que los habitan) en las zonas (y comunidades) sacrificables.

Todo esto repercute directamente en la salud de poblaciones cercanas, generando exposiciones múltiples y condiciones de vulnerabilidad.

En Argentina, la explotación de Vaca Muerta mediante *fracking* constituye un ejemplo claro: más allá del metano, las comunidades conviven con la contaminación de agua y suelo por químicos, el desmanejo de los residuos de lodos de perforación y las consecuencias sociales a nivel local, con crecientes conflictos socioambientales vinculados a la contaminación y los riesgos para la salud, con carga diferencial en los cuerpos, en estrecha relación a la situación socioeconómica ya que los grupos de bajos ingresos tienen una exposición desproporcionada a la contaminación del aire y sufren impactos más severos su relevancia en términos de salud pública y equidad intergeneracional.

La combinación de incertidumbre científica, exposición múltiple a contaminantes y proximidad extrema entre pozos y comunidades plantea la necesidad de adoptar medidas regulatorias preventivas, expandir los perímetros de resguardo y promover investigaciones epidemiológicas locales que permitan caracterizar con mayor rigor los riesgos para la salud en la región.

En este contexto, la insuficiencia de datos oficiales accesibles y la magnitud de la exposición comunitaria hacen imperativa la aplicación del principio precautorio y las evaluaciones de riesgo integrales en territorios afectados por *fracking*.

1. INTRODUCCIÓN

El metano (CH_4) es un gas de efecto invernadero con un potencial de calentamiento global más de 80 veces superior al del dióxido de carbono (CO_2) en un horizonte de 20 años. Su creciente emisión se relaciona principalmente con actividades humanas como la ganadería intensiva, los rellenos sanitarios y, de manera especialmente crítica en las últimas décadas, la extracción no convencional de hidrocarburos mediante fractura hidráulica (*fracking*).

Desde el punto de vista sanitario, el metano suele considerarse un contaminante de baja toxicidad directa en exposiciones ambientales habituales, dado que no es irritante ni reactivo en concentraciones bajas. Sin embargo, este enfoque resulta insuficiente y reduccionista: el metano debe analizarse en tanto componente de una compleja red de procesos ambientales y sociales que derivan en efectos significativos sobre la salud. Por un lado, es un precursor clave del ozono troposférico (O_3), uno de los contaminantes más nocivos para la salud respiratoria, cardiovascular y cutánea. Por otro, su liberación al ambiente está estrechamente asociada a prácticas extractivas de alto impacto socioambiental como el *fracking*, que movilizan además una amplia gama de sustancias químicas (benceno, tolueno, metales pesados, sílice cristalina, entre otros) y generan múltiples vías de exposición.

La extracción no convencional de hidrocarburos se ha expandido globalmente como respuesta a la demanda energética de los modos de consumo y a la crisis del petróleo convencional. En América Latina, Argentina se ha posicionado como uno de los territorios más relevantes para este tipo de explotación, con el yacimiento de Vaca Muerta en la provincia de Neuquén como emblema de esta expansión. Estas prácticas no solo implican riesgos ambientales —como la contaminación del aire, agua y suelo, o la sismicidad inducida—, sino que además introducen nuevas formas de vulnerabilidad sanitaria en poblaciones ya atravesadas por desigualdades sociales y territoriales (Grosso *et al.* , 2024).

En este marco, asumir el metano exclusivamente como agente químico aislado, no permite dar cuenta de los procesos complejos que configuran la salud-enfermedad en contextos de extractivismo energético. La perspectiva de la determinación social de la salud resulta aquí indispensable: **el metano no es solamente un gas, sino la expresión material de un modelo de desarrollo que produce daños ambientales y sanitarios distribuidos de manera desigual.**

Una de las mayores dificultades que se presentan a partir de la perspectiva de la ciencia positivista, con los modelos de análisis de “causalidad” y “lineales”, es que éstos no tienen en cuenta los procesos sinérgicos que se dan en la realidad de los territorios.

Desde la Organización Panamericana de la Salud (OPS, 2002), se reconoce que los “Sinergismos” son claves a la hora de identificar los impactos de la exposición a combinaciones de sustancias químicas diferentes, ya que los impac-

tos en la salud de esas combinaciones, no son los mismos que aquellos devenidos de “una exposición independiente a las mismas sustancias”. Asimismo, este organismo rector de las políticas en salud para las Américas, explicita que “desconocemos la naturaleza de muchas interacciones. Incluso cuando se conocen los efectos resultantes de la combinación de dos contaminantes, la adición de una tercera variable hace que los efectos finales sean inciertos” (OPS, 2002).

Existe otra dificultad para establecer relaciones lineales de “causalidad”: el espectro de signos y síntomas que pueden presentarse en los seres humanos ante la exposición a sustancias como el metano o el O_3 , es muy variado y, en muchos casos, inespecífico, razón por la cual es frecuente que el personal de salud no siempre indague acerca de los antecedentes de intoxicación aguda (cuyos efectos se manifiestan inmediatamente, o en un corto plazo después de la exposición) y mucho menos crónica (es decir, aquella en la que los efectos se expresan después de meses o años de la exposición, aún en dosis bajas) (Verzeñassi, 2014). Esta situación genera un déficit de registros, lo que dificulta aún más establecer relaciones de causa-efecto exigidas por la lógica positivista (que favorecerían los análisis de daño a la salud de la exposición a las emisiones de gases como Meta-no u O_3).

Asimismo, revisiones bibliográficas permiten apreciar cómo las exposiciones a distintos tipos de sustancias resultantes de la explotación hidrocarburífera no convencional, se relacionan con alteraciones endócrinas de diversos tipos y características.

Tal como plantea la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2002), “el sistema endocrino¹ desempeña un papel esencial y omnipresente tanto en el corto, como en el largo plazo, en la regulación de procesos metabólicos. Procesos nutricionales, conductuales y reproductivos están intrínsecamente regulados por el sistema endocrino, a saber: crecimiento (crecimiento de hueso/remodelación), sistemas gastro-intestinal, cardiovascular y la función renal, así como las respuestas a todas las formas de estrés. Trastornos de cualquiera de los sistemas endocrinos, que implican hormonas hiperactivas e hipoactivas, resultan inevitablemente en la enfermedad, cuyos efectos pueden extenderse a muchos diferentes órganos y funciones y son a menudo debilitantes o mortales. Visto desde esta perspectiva general, la amenaza de los productos químicos ambientales con actividad endocrina (ya sea agonista o antagonista) es potencialmente grave”.

En ese documento, la OMS (Ibíd.) explicita la preocupación incluso ante niveles bajos de exposición a algunos contaminantes, ya que incluso dosis muy pequeñas pueden generar resultados adversos para la salud, como por ejemplo infertilidad o bajo coeficiente intelectual lo que podría tener, potencialmente, un considerable impacto en la salud en general de grandes poblaciones. Los problemas inherentes al comparar problemas en humanos, estudios de laboratorio y estudios epidemiológicos, que se realizaron

1. Sistema endocrino: Conjunto de glándulas y órganos que elaboran hormonas y las liberan a la sangre para que llegue a tejidos y órganos de todo el cuerpo.

en lugares y tiempos diferentes y en diferentes condiciones, dificultan nuestra capacidad para establecer conclusiones firmes acerca de la existencia de alguna tendencia global de la enfermedad, y la falta de datos de exposición adecuada dificulta seriamente la exploración de hipótesis sobre las posibles causas de las tendencias identificadas. Del mismo modo, la falta de datos de la exposición durante períodos críticos de desarrollo que influyen el funcionamiento más adelante en la vida hace difícil establecer asociaciones causales entre exposición y efecto.

Ante esta realidad, la propia OMS (Ibíd.) resalta la importancia y pertinencia, en estos casos, del cruce de datos obtenidos por estudios epidemiológicos y en animales, para construir y de sostener hipótesis en torno a las relaciones entre exposiciones y daños en seres humanos.

El presente informe se propone identificar y sistematizar las consecuencias del metano en la salud, con especial énfasis en su relación con la extracción no convencional de hidrocarburos.

Reiteramos aquí lo dicho en la advertencia al lector, el análisis que sigue de trabajos de la ciencia formal es solo una herramienta, la única aceptada por los decisores y hacedores de políticas, aunque esto no le erija como la única fuente de conocimiento válido.

2. MARCO CONCEPTUAL

2.1. Determinación social de la salud

El análisis de los efectos del metano en la salud no puede limitarse a la lógica biomédica lineal clásica de “un agente = un daño”. Desde América Latina, el modelo de determinación social de la salud (Breilh, 2010) propone comprender la salud-enfermedad como un proceso histórico y colectivo, condicionado por la organización social, la producción y el metabolismo sociedad–naturaleza. En este marco, **los contaminantes, como el metano y sus derivados son expresión material de procesos económicos y políticos más amplios, y no simples agentes aislados.**

Apoyados en las herramientas de análisis que propone la Epidemiología Crítica, desde la Salud Colectiva (Breilh, 2023) entendemos que “las enfermedades” son resultado de un proceso construido a partir de “las relaciones sociales, las inequidades, los modos de vivir, territorios con metabolismos malsanos y patrones culturales alienantes”, es decir, complejos procesos articulados a las relaciones sociales imperantes en una sociedad, y no un simple resultado de la exposición individual a una sustancia.

En estos procesos, **salud y enfermedad son parte de un proceso social complejo, en el que intervienen también los procesos de atención y de cuidados, donde interactúan niveles generales (modelo económico extrac-tivista), particulares (formas de organización productiva**

como el *fracking*) y singulares (condiciones de vida de las comunidades) (Breilh, 2013).

2.2. Ecología política de la salud y conflictos energéticos

Hablar de lesiones o daños en la salud de las personas y comunidades, sobre todo en tiempos en los cuales la hegemonía del pensamiento y el análisis juega a favor de los poderes económicos, y del Norte Global, hace imperioso explicitar desde qué paradigma uno se posiciona para analizar y explicar la realidad.

En ese sentido, quienes trabajamos en el campo de la Salud Socioambiental, asumimos que no es posible estar sanos si se vive en territorios enfermos.

El avance de los extractivismos, de la mano del “Consenso de los Commodities” (Svampa, 2019), significó también una importante fuerza de determinación en los procesos de salud-enfermedad-atención de las comunidades que habitan los territorios señalados como “aptos” para la instalación de agroindustria, megaminería, *fracking*, entre otros, con fuertes impactos negativos en los ciclos vitales de quienes transcurren allí sus vidas.

Esos procesos de inserción de modelos extractivistas que generan daños en la salud de los territorios y comunidades del Sur Global, para garantizar la recuperación de la habitabilidad y las “transiciones verdes” del Norte Global, responden a lo que se conoce como “Geopolítica de la Enfermedad” (Verzeñassi *et al.*, 2023).

Ahí la pertinencia de la **ecología política de la salud** (Porto & Pacheco, 2009; Porto, 2019) que brinda herramientas para analizar cómo las asimetrías de poder y las decisiones sobre modelos energéticos distribuyen de manera desigual los riesgos ambientales y sanitarios. En el caso del metano, su liberación al ambiente no es solo un problema químico, sino el resultado de un modelo energético basado en la dependencia de combustibles fósiles y en tecnologías de alto impacto como el *fracking*.

Este enfoque permite comprender que los daños en salud asociados al metano no son “accidentes” inevitables, sino consecuencias estructurales de una forma de desarrollo que privilegia la rentabilidad sobre la sustentabilidad socioambiental.

2.3. El metano como síntoma de un modelo extractivista

Como afirmamos en la Introducción de este trabajo, el metano debe ser analizado no solo como gas de efecto invernadero o precursor de ozono troposférico, sino como síntoma de un modelo energético extractivista. Como señalan Svampa (2019) y Gudynas (2013), el **extractivismo** no se reduce a una técnica de explotación, sino a una lógica de acumulación que expande las fronteras de recursos, externaliza daños y genera desigualdades territoriales.

El vertiginoso proceso de industrialización del Norte Global, acelerado a partir de la segunda mitad del siglo pasado, trajo consigo un también acelerado proceso de contaminación de esos territorios, lo que se acompañó de un agotamiento de bienes comunes vitales y de minerales, que pu-

sieron en vilo su habitabilidad. Esto se sostuvo a partir de un acelerado incremento de la demanda de energías, que, con el “desarrollo” como justificador, encontró en los territorios del Sur Global, una “fuente” de esos bienes comunes ya escasos en el Planeta.

El proceso de “transición verde” del Norte Global, es decir, sus estrategias para recuperar habitabilidad en esas latitudes, implicó el transformar a los territorios del Sur Global (y las comunidades que los habitan) en las zonas (y comunidades) sacrificables.

Todo esto repercute directamente en la salud de poblaciones cercanas, generando exposiciones múltiples y condiciones de vulnerabilidad (Vohra, 2025).

En Argentina, la explotación de Vaca Muerta mediante *fracking* constituye un ejemplo claro: más allá del metano, las comunidades conviven con la contaminación de agua y suelo por químicos, el desmanejo de los residuos de lodos de perforación y las consecuencias sociales a nivel local (FARN, 2021).

3. CARACTERÍSTICAS DEL METANO Y LA EXTRACCIÓN NO CONVENCIONAL

3.1. Propiedades del metano

El metano es el hidrocarburo más simple y el principal componente del gas. Es un gas incoloro e inodoro, más ligero que el aire y relativamente inerte en bajas concentraciones. Desde el punto de vista toxicológico, no suele considerarse peligroso a nivel individual en exposiciones ambientales típicas; sin embargo, en altas concentraciones puede actuar como asfixiante simple, desplazando el oxígeno (O_2) en espacios cerrados (ATSDR, 2016).

Se sabe también hoy en día, que la potencia de este gas varía en las distintas regiones terrestres por la capacidad reflectora de luz solar de la superficie del planeta. “Una vez que el metano está en la atmósfera, interactúa con la luz solar en un proceso conocido como forzamiento radiactivo. El metano absorbe principalmente el calor, o radiación de onda larga, emitida por la atmósfera terrestre. Sin embargo, también absorbe la entrada de energía solar, o radiación de onda corta, convirtiéndola en calor y calentando la atmósfera. Este proceso potencia el efecto invernadero, atrapando más calor en la atmósfera terrestre” (Greenfield, 2024).

Esta participación en el efecto invernadero a su vez tiene implicancias en la contribución con el cambio de los patrones climáticos que afectan los niveles del mar, las sequías y

lluvias intensas, afectando las vidas de las comunidades y los ambientes donde se establecen.

Su relevancia para la salud pública deriva de dos aspectos principales:

1. Su rol como gas de efecto invernadero de corta vida, con un potencial de calentamiento global 84–86 veces mayor que el CO₂ en 20 años (IPCC, 2021).
2. Su condición de precursor del ozono troposférico, formado por reacciones fotoquímicas entre CH₄ y óxidos de nitrógeno (NO_x), un contaminante atmosférico estrechamente vinculado a efectos adversos en la salud humana (OMS, 2021).

A nivel global, el peso de las diferentes fuentes emisoras de ozono troposférico varía de región en región, lo que sugiere la necesidad de estrategias de control de la contaminación atmosférica específicas para cada región (Silva, 2016).

Esto apunta a la necesidad de tratar el ozono en una variedad de escalas, un problema transfronterizo, pero con énfasis en las escalas hemisféricas (Fowler *et al.*, 2013a; Simpson *et al.*, 2014).

3.2. Procesos de extracción no convencional

La extracción no convencional de hidrocarburos mediante fractura hidráulica (*fracking*) consiste en perforar formaciones de lutitas o esquistos a grandes profundidades e inyectar una mezcla de agua, arena y aditivos químicos a alta

presión, con el objetivo de fracturar la roca y liberar el gas o petróleo atrapado en sus poros (Howarth, 2019).

Este proceso se caracteriza por:

- Elevadas fugas y emisiones fugitivas de metano durante la perforación, fractura, venteo, quema y transporte.
- Uso intensivo de agua y químicos (algunos con propiedades cancerígenas o neurotóxicas).
- Riesgos de contaminación de acuíferos y suelos por retorno de aguas residuales (flowback)(CAJE-AA-DeAA, 2025).

En Argentina, el desarrollo de Vaca Muerta se ha convertido en un emblema del *fracking* en América Latina, con un rol estratégico para la política energética nacional pero también con crecientes conflictos socioambientales vinculados a la contaminación y los riesgos para la salud (FARN, 2021).

3.3. Otros contaminantes asociados

Si bien (en este trabajo) el metano es el foco de atención, el *fracking* libera o moviliza múltiples sustancias que deben considerarse en conjunto para comprender los procesos de salud-enfermedad. Entre ellas:

El agua residual generada por el *fracking*, constituye una mezcla compleja de contaminantes con alto potencial de riesgo ambiental y sanitario. Diversos estudios han de-

mostrado la presencia de hidrocarburos y compuestos orgánicos volátiles como benceno, tolueno, etilbenceno y xileno (BTEx), asociados a efectos carcinogénicos y neurotóxicos (Warner, 2013), así como niveles extremadamente elevados de sales (cloruros, bromuros, estroncio y bario) que pueden superar ampliamente la salinidad del agua de mar (Vidic, 2013). Asimismo, se ha documentado la movilización de radionúclidos naturales como radio-226, uranio y radón, que incrementan la radioactividad de aguas residuales y sedimentos (Nelson, 2015). A ello se suma el uso de más de mil compuestos industriales como aditivos en fluidos de fractura, entre los que se incluyen biocidas, surfactantes y anticorrosivos con toxicidad reconocida (Colborn, 2011).

En conjunto, estas evidencias muestran que el agua residual del *fracking* es una fuente relevante de exposición múltiple que puede afectar tanto a ecosistemas como a comunidades humanas cercanas.

Un análisis de los procesos de salud no puede, por lo tanto, disociar el metano de este entramado de contaminantes que operan en sinergia.

4. IMPACTOS DEL METANO EN LA SALUD HUMANA

4.1. Directos:

El metano es un gas inoloro, incoloro, que no tiene gran impacto directo sobre la salud, aunque posee capacidad de desplazar al O_2 . Por este motivo, tiene un potencial riesgo de asfixia, ya que en ambientes cerrados disminuye la proporción del O_2 (el cual es un gas vital) por debajo de 19,5%, generando asfixia hipóxica.

La asfixia, en síntomas clínicos, se divide según el grado de exposición al gas, de la siguiente manera:

- Concentraciones bajas: Somnolencia, mareos, dolor de cabeza, náuseas, debilidad.
- Concentraciones moderadas: Dificultad para respirar, pérdida de coordinación, confusión, visión borrosa, pérdida del conocimiento, taquicardia.
- Concentraciones altas: Pérdida del conocimiento inmediata, convulsiones, paro respiratorio, muerte por asfixia.

El gas metano se licua, alcanzando temperaturas criogénicas ($-161^{\circ}C$) para poder facilitar así su almacenamiento y transporte. En algunos casos este gas licuado se fuga, con impactos en el ambiente (contaminación suelo, aire y agua) y puede generar lesiones por quemaduras al tener contacto

con el gas, las mismas pueden afectar piel, músculo y hueso (Noboa Delgado *et al.*, 2025).

Tal como se desarrolla más adelante, las explosiones y los incendios por acumulación del gas en espacios cerrados es otro efecto directo que tiene sobre los cuerpos que se encuentran en contacto con el gas en cuestión.

4.2 Indirectos:

4.2.1. Ozono troposférico y daño en la salud

El metano comparte con otros gases (como óxido de nitrógeno-NOx-, compuestos orgánicos volátiles -COVs-, monóxido de carbono -CO-) la característica de reaccionar con la luz solar generando ozono troposférico, que no es otra cosa que el ozono que se encuentra a nivel de la capa más baja de la atmósfera terrestre (la “tropósfera”) (Hua et al., 2024).

A diferencia del ozono estratosférico (la capa de ozono) que se encuentra entre los 15 y los 35 kms de altura (estratósfera), que absorbe la radiación ultravioleta (UV-B) dañina del sol y es beneficioso para la vida en la Tierra, el ozono troposférico, es en sí mismo también un potente gas de efecto invernadero (GEI) y actúa como contaminante del aire, componente principal del smog, con fuertes implicancia en la salud de las comunidades (CCAC, 2025). Es un contaminante secundario, tóxico para la salud de las personas y los ecosistemas (genera enfermedades respiratorias, cardiovasculares, agrava patologías preexistentes y daña cultivos).

La exposición ambiental al ozono troposférico constituye un factor de riesgo consolidado para múltiples desenlaces adversos en salud. Su carácter altamente oxidante, junto con su baja solubilidad en agua, le permite penetrar en las vías respiratorias inferiores y desencadenar procesos inflamatorios, oxidativos y sistémicos que impactan más allá del aparato respiratorio (EPA, 2021; Devlin *et al.*, 2012; Mudway & Kelly, 2000).

A continuación, se sintetiza la evidencia epidemiológica y experimental más relevante.

4.2.2. Daño respiratorio

Los daños en la salud del sistema respiratorio del ozono troposférico, han sido ampliamente evidenciados. El aparato respiratorio constituye el principal sistema blanco del ozono troposférico, debido a su capacidad de penetrar hasta las regiones distales del pulmón por su baja solubilidad en agua. La exposición aguda induce estrés oxidativo e inflamación en el epitelio de las vías aéreas, lo que se traduce en broncoconstricción, disminución de la función pulmonar y exacerbación de patologías respiratorias preexistentes.

La Agencia Ambiental de los Estados Unidos, explicita que la exposición al ozono troposférico, se asocia a una serie de signos y síntomas inespecíficos y amplios como ser: tos, dolor o picazón de garganta, dificultad de la respiración profunda y vigorosa, dolor al respirar profundamente, capacidad de inflamar y dañar las vías respiratorias (haciendo que los pulmones sean más susceptibles a las in-

fecciones), así como agravando enfermedades pulmonares como asma,² enfisema³ y bronquitis crónica⁴ y aumentando la frecuencia de los ataques de asma (EPA, 2025).

Desde los años 90, estudios experimentales han documentado con precisión estos efectos. Horstman *et al.* (1990) demostraron que la exposición de adultos sanos a concentraciones de O₃ inferiores a 120 µg/m³ durante 7 horas provocaba reducciones significativas en parámetros espirométricos y aumentos en la reactividad bronquial. El análisis del lavado broncoalveolar mostró un incremento en neutrófilos 18 horas después de la exposición, confirmando una respuesta inflamatoria aguda mediada por estrés oxidativo.

Una explicación de esta capacidad de daño del O₃, está relacionada a la propiedad química y toxicológica del mismo como un oxidante fuerte, capaz de inducir daños oxidativos a las células y los fluidos que recubren las vías respiratorias, así como respuestas inmunoinflamatorias dentro y fuera del pulmón (Zhang, 2019).

2. Asma: afección crónica de las vías aéreas que se estrechan e hinchan, lo que puede producir mayor mucosidad. Esto puede dificultar la respiración y provocar tos, un silbido (sibilancia) al exhalar y falta de aire.

3. Enfisema: Trastorno que afecta a los alvéolos (bolsas pequeñas de aire de los pulmones donde se produce el intercambio O₂ - CO₂), dañando sus paredes, volviendo dificultosa la respiración. Es un tipo de Enfermedad pulmonar obstructiva crónica (EPOC).

4. Bronquitis crónica: Afección pulmonar crónica, en la que los bronquios (conductos grandes de aire de los pulmones) se inflaman y producen cicatrices. Esto hace que los bronquios producen grandes cantidades de moco causando tos crónica y problemas respiratorios. Es un tipo de EPOC.

El estudio MOSES-1 (Rich, 2020) que expuso de manera controlada a adultos mayores sanos a niveles bajos de O_3 , mostró disminuciones en la función pulmonar dependientes de la concentración, junto con evidencia de inflamación y daño en las vías respiratorias.

La exposición a ozono troposférico es responsable incrementos de mortalidad por enfermedades respiratorias (Krewski, *et al*, 2009; Jerret, 2009). En 2017, un equipo de investigadores del Instituto de Medio Ambiente de Estocolmo, estimaban que exposiciones prolongadas al ozono eran responsables de más de un millón de muertes anuales por enfermedades respiratorias (Malley, 2017;Zhang, 2019).

A nivel global, Vicedo-Cabrera *et al.* (2020) demostraron que la exposición a corto plazo a O_3 está asociada con un aumento en la mortalidad diaria por todas las causas y, en particular, por enfermedades respiratorias, en un estudio que incluyó 406 ciudades de 20 países.

La evidencia epidemiológica muestra que la mortalidad por causas respiratorias es el desenlace más robustamente vinculado al ozono troposférico. En Corea del Sur, un estudio de cohorte nacional reveló que cada incremento de 1 ppb en exposición crónica a O_3 se asociaba con mayor mortalidad por EPOC y asma. (Kim, 2024). En Estados Unidos, Kazemiparkouhi *et al.* (2020) analizaron a más de 22 millones de beneficiarios de Medicare y observaron riesgos elevados de mortalidad por enfermedades respiratorias, así como por insuficiencia cardíaca y cáncer de pulmón; estos resultados persistieron incluso tras ajustar por material particulado fino ($PM_{2.5}$), dióxido de nitrógeno (NO_2) y temperatura.

En conjunto, la evidencia epidemiológica, clínica y experimental converge en señalar que la exposición al O_3 constituye un determinante ambiental clave de la salud respiratoria. Su efecto es particularmente crítico en grupos vulnerables, niños, ancianos, personas con asma o EPOC y en contextos donde coexiste con otros contaminantes como $PM_{2.5}$ o NO_2 , que pueden amplificar los efectos adversos.

En poblaciones con enfermedades de base, la susceptibilidad es aún mayor. Revisiones sistemáticas mostraron que elevaciones transitorias en O_3 se asocian con hospitalizaciones por EPOC, (Gao, 2020) de igual modo un meta-análisis evidenció que la exposición a corto plazo a O_3 incrementa el riesgo de visitas a emergencias y hospitalizaciones por asma, con un efecto más marcado en niños (Anenberg, 2018; Zheng, 2021) consolidando la relevancia clínica de la susceptibilidad individual.

La literatura también documenta impactos en niños y adolescentes, grupos altamente vulnerables por el desarrollo incompleto del sistema respiratorio y la mayor frecuencia de exposición al aire libre. Holm y Balmes (2022), en una revisión sistemática, sintetizaron la evidencia entre 2013 y 2020 mostrando que O_3 reduce de manera consistente la función pulmonar en niños, incluso a concentraciones por debajo de los estándares internacionales actuales. En Asia, hallaron que la exposición temprana a O_3 y partículas en suspensión incrementa el riesgo asma en niños de 0 a 2 años (Bai, 2023).

Son numerosos los trabajos que identifican disparidades en la exposición a contaminación del aire y las cargas en la salud, en virtud de las características étnicas y socioeconó-

micas, en casi todas las etapas del ciclo vital. En Estados Unidos, son claras las disparidades absolutas en lo que respecta a $PM_{2.5}$, NO_2 y hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) y, en cuanto a las desigualdades relativas, las mismas son extremas en las actividades de refinación de hidrocarburos (Vohra, 2025).

Como ejemplo de las desigualdades de los daños en la salud de la contaminación ambiental en relación a la situación socioeconómica, en ciudades de América Latina se ha demostrado que los grupos de bajos ingresos tienen una exposición desproporcionada a la contaminación del aire y sufren impactos más severos (Mardoñez-Balderrama *et al.*, 2025).

4.2.3. Daños cardiovasculares

Las enfermedades cardiovasculares son las principales causas de morbilidad a nivel global (Liang, 2022).

Un creciente número de estudios epidemiológicos ha demostrado que la exposición al O_3 aumenta la incidencia y la mortalidad por enfermedades cardiovasculares (ECV), como por ejemplo cardiopatía isquémica,⁵ hipertensión e insuficiencia cardíaca⁶ (Bell, 2004; Huang, 2005; Ren, 2009; Zhou, 2011; Chen, 2018; Hua, 2024).

5. Cardiopatía isquémica: afección del corazón causada por arteroesclerosis (endurecimientos de los vasos sanguíneos) que reducen el flujo sanguíneo al órgano.

6. Insuficiencia cardíaca: es el desequilibrio que se produce entre la capacidad del corazón de bombear sangre y la necesidad del organismo.

La evidencia epidemiológica sugiere que la exposición al O_3 puede contribuir a incrementar el riesgo de mortalidad cardiovascular y cerebrovascular, con efectos particularmente relevantes en poblaciones vulnerables como adultos mayores. En Shenyang (China), un estudio de series temporales encontró un aumento del riesgo relativo ($RR = 1,005$) en la mortalidad cardiovascular por cada incremento de $10 \mu g/m^3$ de O_3 , efecto que se amplificaba en presencia de $PM_{2.5}$, mostrando una interacción sinérgica entre contaminantes (Wang, 2025). De manera similar, una revisión reciente en contextos urbanos chinos confirmó la asociación entre O_3 y mortalidad cardiovascular, destacando la importancia de considerar su impacto en ambientes con alta carga de contaminación (Sun *et al.*, 2024). Sun *et al.* (2024) documentaron que cada aumento de $10 \mu g/m^3$ en O_3 se asociaba con un incremento del 0,81% en la mortalidad cardiovascular, con efectos más marcados en ancianos y durante periodos cálidos, reforzando la vulnerabilidad de grupos sensibles.

Los estudios experimentales aportan mecanismos plausibles que sustentan estas asociaciones epidemiológicas. Devlin *et al.* (2012) demostraron que la exposición controlada de voluntarios a concentraciones moderadas y altas de O_3 durante ejercicio físico. El ejercicio se asociaba con incrementos en los marcadores vasculares de inflamación y cambios en los marcadores de fibrinólisis y en los marcadores que afectan el control autónomo de la frecuencia cardíaca y la repolarización con alteraciones en la variabilidad de esta, indicando un efecto inflamatorio sistémico y disfunción autonómica que pueden favorecer desenlaces cardiovasculares adversos (Devlin *et al.*, 2012).

Existen evidencias de la asociación entre exposición a contaminantes aéreos como el O_3 troposférico, con los riesgos de presentación de diversos tipos de arritmias utilizadas como marcadoras de morbilidad cardíaca futura (Bartell, 2013).

Mientras la acción de las partículas en suspensión (como elemento contaminante del aire) actúan inmediatamente en los indicadores cardiovasculares como presión arterial, la acción dañina del O_3 aparece retardada respecto a la exposición (Chiarelli, 2011).

Otros estudios han asociado la concentración media de ozono con un aumento del 1.8% en la mortalidad por enfermedades cardiovasculares, identificando que la asociación del ozono con la mortalidad cardiovascular se fortaleció después de ajustar por NO_2 y $PM_{2.5}$ (Borja-Aburto, 1998).

Ciertas poblaciones muestran una mayor vulnerabilidad a estos efectos, en particular los niños, los ancianos, las personas obesas y las personas con afecciones preexistentes (Cakmak, 2007; Hua, 2024).

Sin embargo, la relación entre O_3 y mortalidad cardiovascular sigue siendo objeto de debate. Jerrett *et al.* (2009), en una cohorte de más de medio millón de personas, hallaron asociaciones sólidas entre O_3 y mortalidad respiratoria, pero no observaron un vínculo claro con mortalidad cardiovascular, mientras que el $PM_{2.5}$ mostró efectos consistentes en ambos desenlaces. Por el contrario, estudios más recientes, sugieren que el O_3 mantiene un efecto independiente sobre insuficiencia cardíaca y arritmias incluso al controlar por

otros contaminantes (Kazemiparkouhi, 2020). En su último Integrated Science Assessment, la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos concluyó que la evidencia es “sugereente pero no suficiente” para establecer una relación causal entre O_3 y mortalidad cardiovascular, en contraste con los efectos respiratorios, cuya asociación se considera firme y causal (EPA, 2020).

Estas controversias reflejan las dificultades metodológicas de aislar el impacto de un único contaminante en entornos donde las poblaciones están expuestas simultáneamente a mezclas complejas. Este punto es particularmente relevante en regiones de extracción no convencional de hidrocarburos, como Vaca Muerta, donde las emisiones de metano (precursor de O_3) coexisten con $PM_{2.5}$, NO_2 , compuestos orgánicos volátiles y metales pesados. En tales contextos, los efectos adversos sobre la salud no pueden atribuirse exclusivamente a un agente aislado, sino que deben interpretarse como resultado de sinergismos entre múltiples contaminantes.

Esta perspectiva de exposición combinada refuerza la necesidad de aplicar el principio precautorio y de desarrollar evaluaciones de riesgo integrales en territorios afectados por *fracking*.

4.2.4. Efectos reproducción y en el desarrollo

La exposición al O_3 también ha sido vinculada con alteraciones en la salud reproductiva y en los resultados del desarrollo fetal, aunque la evidencia disponible es más reciente y aún se encuentra en consolidación. En el ámbito

masculino, se ha descrito que niveles ambientales de O_3 se asocian **con reducciones en la concentración y la calidad del espermatozoides**, comprometiendo la fertilidad (Chiang , 2017).

En mujeres embarazadas, la evidencia más sólida proviene de una revisión sistemática y metaanálisis reciente que incluyó 65 estudios epidemiológicos. Zhao *et al.* (2025) reportaron que la exposición al O_3 durante el primer trimestre del embarazo se asocia con un aumento significativo en el riesgo de preeclampsia, así como con un mayor riesgo de parto prematuro y de recién nacidos pequeños para la edad gestacional, tanto en exposiciones tempranas como durante todo el embarazo.

Además, revisiones sistemáticas han subrayado que O_3 y las $PM_{2.5}$ constituyen los principales contaminantes atmosféricos capaces de afectar la gametogénesis masculina y femenina, comprometiendo no solo la cantidad sino también la calidad genética y epigenética de los gametos. Este tipo de hallazgos advierte, asimismo, sobre la dificultad metodológica de aislar el papel de un contaminante específico en contextos de exposiciones múltiples (Carré, 2017).

De igual modo, investigaciones recientes han ampliado la mirada hacia las malformaciones fetales. Un estudio nacional multicéntrico en China reportó que **la exposición materna a O_3 durante el embarazo se asociaba con un incremento en el riesgo de defectos cardíacos congénitos**, lo que refuerza la hipótesis de que el contaminante puede interferir con procesos críticos del desarrollo embrionario (Wang, 2025). De manera complementaria, un estudio de casos y controles en el este de China mostró que la expo-

sición prenatal combinada a O₃ y olas de calor aumentaba significativamente la incidencia de cardiopatías congénitas neonatales, mientras que la presencia de espacios verdes atenuaba parcialmente este riesgo, sugiriendo un papel modulador del entorno ambiental (Zhang, 2025).

En conjunto, estos hallazgos emergentes señalan que **la exposición al ozono troposférico también ha sido vinculada con alteraciones en la salud reproductiva y en los resultados del desarrollo fetal**. Aunque la solidez de la evidencia en este campo es menor que en los desenlaces respiratorios y de mortalidad, **su relevancia en términos de salud pública y equidad intergeneracional justifica su inclusión en los debates regulatorios y la aplicación del principio precautorio en territorios afectados**.

4.2.5. Metano y cáncer:

La Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer (IARC) no ha clasificado ni al metano, ni al ozono troposférico en ninguno de sus grupos de carcinogenicidad (Grupo 1, 2A, 2B, etc.).

Según el listado oficial de agentes evaluados por la institución, ambos permanecen en la Categoría 3: “No clasificable como carcinogénico para los humanos” (IARC, 2019). Esto implica que actualmente no existe evidencia suficiente para evaluar su potencial carcinogénico.

En contraste, la IARC **sí ha clasificado la contaminación atmosférica ambiental** en su conjunto como **carcinogénica para los humanos (Grupo 1)**, basándose en evidencia

epidemiológica, experimental y mecánica que demuestra una asociación con el cáncer de pulmón y, en menor medida, con el cáncer de vejiga (Loomis *et al.*, 2013; IARC, 2013). **Esta clasificación se aplica a la mezcla compleja de contaminantes atmosféricos, donde el ozono troposférico puede estar presente como componente indirecto junto a PM_{2.5}, NO₂ y COVs.**

4.2.6. Metano, crisis climática y salud

La bibliografía científica que evidencia específicamente los impactos en la salud de la crisis climática es extensa. Para no desviar la atención del lector, en este apartado solo enumeraremos algunos de esos impactos, invitando a la lectura de las bibliografías de referencia para su profundización.

Tal como fue explicitado en el primer párrafo de este documento, el metano es un elemento clave si queremos comprender la magnitud de la crisis climática, entre otras cosas por su potencial de calentamiento global (hasta 80 veces mayor que el CO₂).

Este es un dato sustantivo para poder identificar otros daños indirectos en la salud del metano, como parte de los gases de efecto invernadero. Si tenemos en cuenta que la crisis climática que hoy transitamos tiene consecuencias en la salud de los territorios y las comunidades que los habitan, no es difícil identificar aquí otro aporte negativo del metano.

Entre los impactos negativos en la salud de la crisis climática podemos mencionar: golpes de calor, daños neuroló-

gicos, alteraciones en la capacidad de termorregulación, daños cardiovasculares, daño renal, entre otros (OPS, 2020). Enfermedades neurológicas (trastornos de aprendizaje, demencia, alzheimer, parkinson, crisis epilépticas, entre otras) han sido vinculadas con los golpes de calor (Belanger *et al.*, 2019).

Desde el campo de la salud mental, se ha identificado que el evento mas extremo asociado a las crisis climáticas es el suicidio. En el caso de Australia, por ejemplo, en familias rurales (Hanigan *et al.* 2012).

En lo referido a enfermedades respiratorias como disnea, asma, alergias, cáncer de pulmón y su vínculo con la crisis climática, las revisiones bibliográficas son contundentes (Fernandez *et al.*, 2025; Oyarzun *et al.*, 2021).

El informe del Lancet Countdown 2024 advierte que “de los 15 indicadores que monitorean los riesgos, la exposición y los impactos para la salud relacionados con el cambio climático, 10 alcanzaron récords preocupantes en su último año de datos” (Romanello, 2024).

Teniendo en cuenta que el metano tiene una permanencia de 20 años en la atmósfera, abordar procesos de reducción drástica de su liberación puede resultar una estrategia que aporte significativamente, y a corto plazo, a niveles de reducción del calentamiento global.

5. EL FRACKING Y SUS IMPACTOS EN LA SALUD DE LOS TERRITORIOS Y LAS COMUNIDADES

5.1. Impactos ambientales

La explotación de los pozos petrolíferos de manera no convencional ha llevado a consecuencias ambientales complejas para los territorios cercanos a las áreas de explotación.

El avance del *fracking*, que ha revolucionado la industria energética, no se acompañó de una evaluación de riesgos tanto en la salud como en el ambiente. Como consecuencia, se genera actividad sísmica inducida, contaminación acústica, alteración de la biodiversidad, ocupación de territorios para la extracción, entre otros fenómenos.

El “Compendio de hallazgos científicos, médicos y de medios de comunicación que demuestran los riesgos y daños del *fracking* (extracción no convencional de gas y petróleo” (CHP-NY, 2019), es una referencia ineludible a la hora de identificar consecuencias negativas de este proceso extractivo.

Brevemente, compartimos algunas de las consecuencias ambientales más relevantes:

Contaminación del agua: Si bien se conoce que se utilizan químicos en la fractura hidráulica los mismos no son reportados por las empresas que lo emplean, éstos mismos quedan acumulados en pozos sumideros con baja reutilización del agua. (Gonzalez, 2024).

La cercanía de pozos no convencionales a pozos convencionales en desuso y la actividad sísmica inducida produce fisuras en los viejos pozos provocando migración de los contaminantes químicos (como hidrocarburos cancerígenos (benceno) y elementos radiactivos (radio), y el mismo petróleo alcanzando napas subterráneas lo que supone una amenaza para fuentes de agua potable (Álvarez Mullally, 2023 citado en Gonzalez, 2024). En 2025, noticias periodísticas han dado cuenta del hallazgo de petróleo en las perforaciones realizadas para abastecer de agua subterránea a escuelas⁷. Por otro lado es importante destacar que “los volúmenes de agua necesarios para generar las fracturas de manera artificial son típicamente provistos por caudales de arroyos, lagos, ríos y fuentes subterráneas. Muchos autores han reportado que esto ha traído como consecuencia la reducción del caudal estacional, la degradación en la calidad del agua regional y la reducción del nivel freático; además, ha generado conflictos ligados a la competencia del recurso con la agricultura, ganadería y suministro de agua potable” (Charry-Ocampo, 2018).

Contaminación acústica: generada tanto por las perforaciones y el desplazamiento de vehículos que generan efectos negativos tanto en poblaciones cercanas como sobre la fauna local.

Contaminación del suelo: la inyección a alta presión

7. <https://www.patagonia.press/regionales/2025/3/20/encontraron-petroleo-en-el-patio-de-una-escuela-rural-de-neuquen-15858.html>

de agua, arena y químicos para la formación de poros en la estructura de la roca produce liberación de sustancias tóxicas que se encuentran en capas profundas de la tierra como, por ejemplo, el arsénico (un cancerígeno demostrado). La contaminación del agua y el movimiento de la tierra produce que el aporte de nutrientes a la vegetación y las coberturas naturales se vean perjudicadas.

Contaminación del aire: se produce al comenzar la fractura del suelo por emisión de gas metano al ambiente, se ha comprobado que este continúa emanando durante su traslado y almacenamiento. El metano liberado al ambiente, en contacto con los rayos UV-B vale recordar, forma el ozono troposférico, un gas contaminante que se encuentra en los niveles más bajos de la atmósfera y tiene efectos negativos sobre las poblaciones de forma directa por afectar distintos sistemas del cuerpo humano e indirecta por afectar negativamente la vegetación, interfiriendo con la fotosíntesis, reduciendo la producción de cultivos, afectando doblemente la calidad del aire y generando escasez de alimentos.

5.2. Extracción no convencional de hidrocarburos y salud reproductiva

La extracción no convencional de hidrocarburos, particularmente la fractura hidráulica, ha suscitado creciente preocupación por sus posibles efectos adversos en la salud reproductiva y perinatal. La literatura ha evolucionado desde las primeras revisiones sistemáticas con evidencia limitada, hasta análisis más recientes con bases de datos epidemiológicas amplias y con un creciente sustento mecanístico.

Las primeras revisiones sistemáticas dedicadas específicamente a la reproducción como la publicada por Balise *et al.* (2016) que evaluaron estudios sobre extracción de petróleo y gas (tanto convencional como no convencional) y desenlaces reproductivos humanos, identificaron asociaciones preliminares entre la proximidad a instalaciones extractivas y anomalías congénitas, bajo peso al nacer y parto prematuro, así como indicios en fertilidad masculina y femenina. Sin embargo, destacaron la escasez de estudios bien diseñados, la heterogeneidad de las métricas de exposición y la ausencia de biomarcadores, limitaciones que dificultaban inferencias causales sólidas.

Posteriormente en una revisión de alcance de Deziel *et al.* (2020) sistematizó la literatura epidemiológica publicada entre 2010 y 2019, encontrando que la evidencia más consistente se concentraba en resultados adversos del nacimiento, especialmente parto prematuro, bajo peso y anomalías congénitas. Los hallazgos sobre fertilidad e infertilidad fueron más heterogéneos, y los autores remarcaron las limitaciones en la caracterización de exposición, en general basada en métricas de distancia o índices de actividad.

Más recientemente, la revisión de Aker *et al.* (2024) amplió el espectro a más de un centenar de estudios, confirmando que la proximidad y densidad de pozos de *fracking* se asocian de manera consistente con parto prematuro, restricción del crecimiento intrauterino y bajo peso al nacer. Este trabajo subrayó la magnitud clínica de los riesgos, comparable a contaminantes atmosféricos clásicos de alta preocupación ($\text{PM}_{2.5}$, NO_2), y destacó la vulnerabilidad de embarazadas de bajos recursos y en áreas con flaring (que-

ma controlada de gas). Tanto Deziel *et al.* (2020) como Aker *et al.* (2024) coinciden en recomendar diseños longitudinales, con biomarcadores de exposición y métodos cuasi-experimentales, para fortalecer la inferencia causal.

La plausibilidad de los efectos reproductivos parece estar respaldada por revisiones de contaminantes ambientales y de mezclas químicas específicas de la extracción no convencional de hidrocarburos. Chiang *et al.* (2017) sintetizaron evidencia sobre la influencia de estos contaminantes, incluido el ozono troposférico, material particulado y químicos provenientes del proceso de fractura hidráulica, en la fertilidad masculina y femenina, documentando reducciones en la calidad espermática, alteraciones hormonales y disfunción ovárica.

Más recientemente, Siegel *et al.* (2024) revisaron estudios experimentales sobre mezclas químicas utilizadas en fractura hidráulica, confirmando su potencial como disruptores endocrinos con efectos sobre la espermatogénesis, la ovulación y la implantación. En ambos trabajos (Chiang, 2017; Siegel, 2024) se documentan mecanismos convergentes como estrés oxidativo, inflamación placentaria, alteraciones en la esteroidogénesis y disfunción vascular uterina, que pueden derivar en pérdida gestacional, anomalías congénitas y restricción del crecimiento fetal. La evidencia toxicológica también muestra posibles alteraciones epigenéticas transgeneracionales, lo que añade preocupación respecto a los impactos a largo plazo.

5.3. Fracking y cáncer:

La evidencia epidemiológica que vincula la exposición comunitaria al desarrollo no convencional de hidrocarburos con la incidencia de cáncer es todavía limitada, pero muestra señales consistentes en el caso de la leucemia linfoblástica aguda (LLA) infantil. Para otros cánceres pediátricos y en adultos, la información disponible sigue siendo insuficiente o inconsistente, en parte por la dificultad de caracterizar con precisión las exposiciones, los períodos de latencia y los factores de confusión (Deziel *et al.*, 2020; Aker *et al.*, 2024).

Los estudios más robustos publicados hasta la fecha en Estados Unidos, particularmente en Pensilvania y Colorado, han mostrado una asociación positiva entre la cercanía a pozos de *fracking* y el riesgo de LLA infantil. Clark *et al.* (2022), en un estudio de casos y controles en Pensilvania entre 2009 y 2017, observaron que los niños expuestos en ventanas periconcepcionales y perinatales tenían mayor riesgo de LLA cuando residían en áreas con elevada actividad de extracción no convencional de hidrocarburos, tanto al considerar métricas de exposición por aire como por agua. De manera similar, McKenzie *et al.* (2025), en Colorado, analizaron datos de casi tres décadas (1992–2019) e identificaron un incremento gradual del riesgo de LLA en niños que vivían en radios de 5 a 13 km respecto de pozos en producción, con un claro gradiente de exposición–respuesta. Estos hallazgos refuerzan resultados previos de menor calidad metodológica, pero apuntan en la misma dirección respecto de los riesgos hematológicos en población infantil (McKenzie *et al.*, 2017).

Otras fuentes de evidencia, como el informe técnico de Pensilvania (University of Pittsburgh, 2023), señala un posible aumento de linfomas infantiles en comunidades cercanas a pozos, aunque estos resultados no fueron publicados en revistas arbitradas y deben interpretarse con cautela. En adultos, hasta el momento no se dispone de evidencia epidemiológica sólida que permita establecer un vínculo entre la extracción no convencional de hidrocarburos y cáncer en general, aunque las revisiones de alcance recientes coinciden en que es necesario el seguimiento de cohortes de largo plazo y con métodos más rigurosos de estimación de exposición (Deziel *et al.*, 2020; Aker *et al.*, 2024).

Desde la perspectiva mecanística, la plausibilidad biológica de un efecto carcinogénico asociado a la extracción no convencional de hidrocarburos es elevada. El *fracking* libera mezclas que incluyen compuestos bien establecidos como carcinógenos, entre ellos el benceno, clasificado por la IARC como carcinógeno para humanos (Grupo 1), con evidencia robusta de genotoxicidad y de relación causal con leucemias (IARC, 2018). Adicionalmente, se ha documentado que la actividad no convencional puede incrementar la radiactividad particulada ambiental mediante la movilización de materiales radiactivos de origen natural (TENORM), lo que aporta otra vía plausible de exposición con potencial carcinogénico (Li *et al.*, 2020). Estos mecanismos se integran coherentemente con la señal epidemiológica de mayor riesgo de LLA infantil en poblaciones cercanas a áreas de *fracking* (Clark *et al.*, 2022; McKenzie *et al.*, 2025).

En síntesis, **la literatura actual permite afirmar que existe una asociación consistente entre la exposición**

comunitaria a la extracción no convencional de hidrocarburos y la leucemia infantil, mientras que para otros tipos de cáncer la evidencia sigue siendo insuficiente. La congruencia entre estudios epidemiológicos recientes, gradientes exposición–respuesta y plausibilidad biológica vinculada a compuestos carcinógenos conocidos refuerza la necesidad de aplicar medidas precautorias, ampliar los perímetros de resguardo alrededor de pozos y desarrollar cohortes longitudinales de seguimiento.

5.3.1. Distancias relevantes en fracking y cáncer

El siguiente cuadro compara diferentes trabajos científicos que han analizado los riesgos de distintos tipos de cáncer con las distancias de los diagnosticados a los pozos de *fracking*.

Estudio / Informe	Tipo de cáncer	Distancias evaluadas	Distancias significativas	Riesgo observado
Clark <i>et al.</i> 2022 (Pensilvania)	LLA infantil	2 km y 5 km	≤2 km	Riesgo aumentado en exposición prenatal/perinatal
McKenzie <i>et al.</i> 2025 (Colorado)	LLA infantil	5 km y 13 km	5 km y 13 km	OR ≈ 2.0 (5 km) y OR ≈ 2.6 (13 km)
Univ. Pitt / Pensilvania 2023	Linfoma infantil	≤1 milla y >5 millas	≤1 milla (1.6 km)	Riesgo 5–7 veces mayor
McKenzie <i>et al.</i> 2017 (Colorado)	LLA infantil	0.5, 1, 2.5 millas	0.5 millas (800 m)	Riesgo aumentado cerca de pozos densos

Tabla 1: Tipos de cáncer en relación a las distancias de los pozos de *fracking*.
Fuente: Elaboración propia

Lo que se observa es que los riesgos no se restringen a cortas distancias (ej. 800 m o 1 km), sino que incluso a 5–13 km persiste un exceso significativo de leucemia infantil. Esto es especialmente crítico para el caso argentino, donde muchos pozos no convencionales se instalan a menos de 2–3 km de poblaciones rurales o periurbanas, un rango en el que los estudios de Estados Unidos. ya documentaron riesgos elevados.

5.4. Riesgos en la salud de los trabajadores del fracking

En la regulación internacional con respecto a la extracción no convencional de hidrocarburos, existen directrices de organismos internacionales (la Agencia Internacional de Energía -AIE- y la Organización Internacional del Trabajo -OIT) para “minimizar los riesgos ocupacionales”. Las mismas giran en torno a la evaluación, monitoreo y control de exposiciones a las sustancias tóxicas, exigiendo como obligatorio el uso de Equipo de Protección Personal (EPP) por parte del trabajador.

Las normas ISO 45001 (referida a riesgos laborales) e ISO 14001 (referida a impacto ambiental) establecen los estándares de referencia en este campo.⁸

En el ámbito laboral, en Argentina, el sistema de salud, dentro de los predios de extracción del crudo y gas, se encuentra en manos de agentes privados. Si bien la regulación

8. www.iso.org

de leyes laborales se encuentra bajo legislación nacional, cada provincia adapta la legislación en salud.

En manos de agentes privados, los trabajadores petroleros cuentan con controles periódicos de salud, los que se basan en la reglamentación vigente. Si bien no existe una reglamentación toxicológica con respecto al gas metano, sí la hay para los agentes químicos acompañantes como son el tolueno, benceno, xileno. El seguimiento por equipo médico varía según la exposición a los productos químicos o el tipo de trabajo en terreno. Se realizan controles médicos y bioquímicos que varían entre 6 meses a 1 año (SRT, 2022).

En entrevistas informales mantenidas con profesionales médicos del sector privado, que han atendido a personal de la industria petrolera, éstos manifestaron que, en general, las consultas atendidas respondían a demandas de baja complejidad, lesiones de índole traumatológicas asociadas a trabajos que implican el uso de la fuerza corporal.

Si bien no se han conseguido registros oficiales, en el sector salud, se reconoce que en la industria petrolera año a año se pierden vidas por accidentes dentro y fuera del ejido industrial. Son habituales noticias donde se comunican las muertes de trabajadores a causa de accidentes automovilísticos, por lesiones letales con maquinaria o por explosiones en los pozos.⁹

9. “Cuántos petroleros murieron en los dos últimos años en Vaca Muerta” <https://www.rionegro.com.ar/gremios/cuantos-petroleros-murieron-en-los-dos-ultimos-anos-en-vaca-muerta-3829252/>

En ese sentido, anuncios de “mejoras” en la infraestructura del sistema de atención y diagnósticos, pueden leerse también como resultantes de un incremento de demandas asistenciales de las comunidades afectadas por el *fracking* (externalizadas por las industrias) que terminan siendo asumidas por los Estados e, incluso, las organizaciones de los trabajadores.^{10, 11, 12}

10.<https://www.rionegro.com.ar/contenido-de-marca/anelo-refuerza-su-sistema-de-salud-con-obras-nuevo-centro-de-dia-mamografo-y-mas-consultorios/>

11.<https://www.neuqueninforma.gob.ar/noticias/2025/09/30/251589-figuerroa-inauguro-la-ampliacion-del-hospital-de-rincon-de-los-sauces>

12.<https://www.minutoneuquen.com/neuquen/2025/10/16/el-gremio-petrolero-sumo-una-ambulancia-equipada-como-terapia-intensiva-movil-398827.html>

6. DÉFICITS DE REGISTROS PARA LAS EPIDEMIOLOGÍAS DEL METANO Y EL FRACKING

La expansión acelerada de la producción de hidrocarburos no convencionales en la cuenca de Vaca Muerta ha ocurrido en un contexto de regulación fragmentada y con limitaciones significativas en el acceso a datos ambientales y de salud.

En la provincia de Neuquén, el sistema de registro de salud pública se realiza por un sistema propio, basado en CIE- 10,¹³ y si bien la atención de salud se encuentra digitalizada, los registros sanitarios, son de difícil acceso, lo que complejiza la posibilidad de conocer las consultas a nivel local de afecciones de salud que pudieran estar relacionadas con la cercanías a pozos de extracción. Asimismo, la falta de contacto entre equipos de salud de áreas cercanas, así como dificultades propias del sistema de salud del subsector público (que se encuentra colapsado por la alta demanda de la población en general) contribuyen a que se carezca de datos de regiones cercanas a las plataformas de perforación.

13. CIE-10: Clasificador internacional de enfermedades. https://www.sssalud.gob.ar/hospitales/archivos/cie_10_revi.pdf

Frente a esta carencia, el Stockholm Environment Institute (SEI), en colaboración con la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad del Comahue, desarrolló un esfuerzo sistemático de recopilación y procesamiento de datos cuantitativos y cualitativos, combinando información geoespacial (Planet®, Sentinel-2), estudios locales, registros oficiales e insumos provenientes de entrevistas con actores comunitarios y de la sociedad civil. Este trabajo se materializó en la plataforma de acceso abierto OBSERVAR (2024), diseñada con Google Earth Engine, que ofrece mapas interactivos e indicadores de riesgo ambiental para apoyar la toma de decisiones (Forni, 2024).

Entre los hallazgos más relevantes, la plataforma reporta que **en las provincias de Río Negro y Neuquén, al menos 3017 pozos de fracking se ubican a menos de 1 km de ríos, escuelas, canales de riego agrícola y áreas pobladas, mientras que 2430 pozos adicionales se localizan en un radio de 1 a 2 km.** Estas cifras son particularmente significativas cuando se las compara con la evidencia epidemiológica internacional presentada anteriormente de estudios en Estados Unidos que han mostrado aumentos de riesgo de leucemia infantil y linfoma en distancias que van desde los 800 metros hasta los 13 km (Clark *et al.*, 2022; McKenzie *et al.*, 2025; University of Pittsburgh, 2023). La proximidad de los pozos a poblaciones y recursos hídricos en Vaca Muerta se encuentra por lo tanto dentro de los rangos donde se ha documentado un aumento del riesgo de cáncer y otros efectos adversos en la salud.

En este contexto, la insuficiencia de datos oficiales accesibles y la magnitud de la exposición comunitaria

hacen imperativa la aplicación del principio precautorio. La combinación de incertidumbre científica, exposición múltiple a contaminantes y proximidad extrema entre pozos y comunidades plantea la necesidad de adoptar medidas regulatorias preventivas, expandir los perímetros de resguardo y promover investigaciones epidemiológicas locales que permitan caracterizar con mayor rigor los riesgos para la salud en la región.

7. REFLEXIONES FINALES

Con este trabajo creemos haber aportado elementos para comprender que la liberación de metano es resultado de un modelo energético basado en la dependencia de combustibles fósiles y en tecnologías de alto impacto como el *fracking*.

Nuestra intención es mostrar que existe una vasta evidencia científica, que se acumula en estantes de bibliotecas y repositorios, a menudo pasada por alto.

¿Será tal vez porque el estudio de los impactos del metano, del ozono troposférico y de los residuos de la extracción no convencional sobre la salud humana, revela la imposibilidad de considerar estos contaminantes como agentes aislados? ¿Será que su comprensión exige inscribirlos en una trama más amplia de procesos socioambientales, productivos y políticos que configuran verdaderos entramados de riesgo? ¿Será que desentrañar esos entramados está vedado?

Desde la perspectiva de la determinación social de la salud, los daños asociados a la extracción no convencional de hidrocarburos no pueden reducirse a una relación lineal entre exposición y enfermedad, sino que responden a procesos complejos de producción social del ambiente, atravesados por relaciones de poder, intereses corporativos y marcos regulatorios fragmentados.

El proceso de extracción no convencional no solo libera metano (lo que le convierte en un actor central de la crisis climática). Su modelo de desarrollo genera y libera además una diversidad de contaminantes (ozono, material particulado, benceno, metales pesados, radionúclidos) que interactúan en sinergias aún poco analizadas, potenciando riesgos respiratorios, cardiovasculares, reproductivos y oncológicos, tal como se describe en este trabajo.

Estas exposiciones ocurren en territorios atravesados por desigualdades estructurales, donde comunidades vulnerabilizadas asumen los costos en términos de enfermedad y degradación ambiental, mientras los beneficios económicos se concentran en corporaciones transnacionales y en la geopolítica energética global.

Desde la salud socioambiental, esta realidad puede leerse como parte de una geopolítica de la enfermedad, en la cual los territorios y poblaciones locales se convierten en cuerpos-territorios de sacrificio para sostener un modelo de acumulación basado en combustibles fósiles. Así, los daños a la salud no son externalidades inevitables, sino el resultado de decisiones políticas y económicas que naturalizan la inequidad ambiental y sanitaria.

De esta forma, el *fracking*, el metano y la crisis socioambiental global constituyen el “elefante blanco” de la salud pública contemporánea: una realidad conocida, documentada y científicamente comprobada, pero sistemáticamente silenciada por intereses económicos y políticos, que pone en serio riesgo la habitabilidad del presente y de las generaciones por venir.

En síntesis, el abordaje del metano y del ozono troposférico asociados al *fracking* muestra que la salud humana no puede analizarse fuera de los procesos socioecológicos y políticos que la determinan. Reconocer esta complejidad no solo amplía la comprensión científica, sino que abre el camino a una ciencia crítica y reparadora, comprometida con la justicia ambiental y sanitaria.

Avanzar hacia políticas responsables implica superar el paradigma reduccionista de la toxicología clásica y asumir la complejidad de las exposiciones múltiples, las sinergias, la variabilidad individual y las determinaciones sociales. La aplicación del principio precautorio, la generación de información transparente y accesible, y el fortalecimiento de la participación comunitaria son pasos esenciales para revertir una dinámica que hoy compromete la salud de las generaciones presentes y futuras.

8. BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA

Anenberg SC, Henze DK, Tinney V, Kinney PL, Raich W, Fann N, Malley CS, Roman H, Lamsal L, Duncan B, Martin RV, van Donkelaar A, Brauer M, Doherty R, Jonson JE, Dávila Y, Sudo K, Kuylenstierna JCI. (2018) *Estimates of the Global Burden of Ambient PM_{2.5}, Ozone, and NO₂ on Asthma Incidence and Emergency Room Visits*. Octubre de 2018; 126(10):107004. doi: 10.1289/EHP3766. PMID: 30392403; PMCID: PMC6371661.

Aker AM, Friesen M, Ronald LA, Doyle-Waters MM, Takaro TK, Thicks W, Levin K, Meyer U, Caron-Beaudoin E, McGregor MJ. (2024) *The human health effects of unconventional oil and gas development (UOGD): A scoping review of epidemiologic studies*. Can J Public Health. 2024 Jun;115(3):446-467. doi: 10.17269/s41997-024-00860-2. Epub 2024 Mar 8. Erratum in: Can J Public Health. 2024 Aug;115(4):699. doi: 10.17269/s41997-024-00913-6. PMID: 38457120; PMCID: PMC11133301.

Alvarez Mullally, M. (2023) *Algo cruje en el subsuelo de la Patria*. Revista Crisis #57 5 de mayo 2023. Buenos Aires <https://revistacrisis.com.ar/notas/algo-cruje-en-el-subsuelo-de-la-patria>

Balise VD, Meng CX, Cornelius-Green JN, Kassotis CD, Kennedy R, Nagel SC. *Systematic review of the association between oil and natural gas extraction processes and human reproduction*. Fertil Steril. 2016 Sep 15;106(4):795-819. doi: 10.1016/j.fertnstert.2016.07.1099. Epub 2016 Aug 25. PMID: 27568524; PMCID: PMC7528095.

Bartell, S; Longhurst, J; Tjoa, T; Sioutas, C; Delfino, R; (2013) *Particulate Air Pollution, Ambulatory Heart Rate Variability, and Cardiac Arrhythmia in Retirement Community Residents with Coronary Artery Disease*. Environmental Health Perspectives. Volume 121, Issue 10 <https://doi.org/10.1289/ehp.1205914>

Belanger, D; Gosselin, P; Bustinza, R; Campagna C (2019) *Change-*

ments climatiques et santé. Prévenir, soigner et s'adapter. <https://doi.org/10.2307/j.ctv1g247d3>

Bell ML, McDermott A., Zeger SL, *et al.* (2004) *Ozone and short-term mortality in 95 U.S. urban communities, 1987–2000.* JAMA. 2004;292(19):2372–2378. doi: 10.1001/jama.292.19.2372.

Borja-Aburto VH, Castillejos M., Gold DR, *et al.* (1998) *Mortality and ambient fine particles in southwest Mexico City, 1993–1995.* Environmental Health Perspective. Vol 106(12) doi: 10.1289/ehp.106-1533229. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC1533229/>

Breilh, J. (2010) *Epidemiología crítica: Ciencia emancipadora e interculturalidad.* Buenos Aires: Lugar Editorial.

Breilh, J. (2013) *La determinación social de la salud como herramienta de transformación hacia una nueva salud pública (salud colectiva).* Revista Facultad Nacional de Salud Pública, 31(Supl. 1), 13–27.

Breilh, J. (2022). *La determinación social de la salud y la transformación del derecho y la ética. Metodología meta-crítica para una ciencia responsable y reparadora.* Revista Redbioética/UNESCO, 13(1), 12–39. <https://repositorio.uasb.edu.ec/bitstream/10644/9377/1/Breilh%20J-CON-268-La%20determinacion.pdf>

Breilh, J. (2023) *Epidemiología Crítica y Salud de los Pueblos. Ciencia ética y valiente en una civilización malsana.* Quito. Ecuador. Edit.Universidad Andina Simón Bolívar Sede Ecuador

CAJE-AADeAA, (2025) *Metano 101 La influencia del gas fósil en el caos climático.* Colectivo de Acción por la Justicia Ecosocial / Asociación Argentina de Abogados/as Ambientalistas. <https://aadeaa.org/wp-content/uploads/2025/09/Metano101.pdf>

Cakmak S., Dales RE, Vidal CB.(2007) *Air Pollution and Mortality in Chile: Susceptibility among the Elderly.* Environmental Health Perspective Vol 115(4) doi: 10.1289/ehp.9567. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC1852651/>

CCAC, (2025). *Climate and Clear Air Coalition, Informe sobre contaminantes climáticos de vida corta,* en <https://www.ccacoalition.org/es/short-lived-climate-pollutants/tropospheric-ozone> revisado 20/09/2025

CEJIL. (2025) *Metano. Salud y derechos Humanos.* Washington DC:

Charry-Ocampo, S; Perez, A (2018) *Efectos de la estimulación hidráulica (fracking) en el recurso hídrico: Implicaciones en el contexto colombiano*. DOI: <https://doi.org/https://dx.doi.org/10.18359/rcin.2549>

Chiang C, Mahalingam S, Flaws JA. (2017) *Environmental Contaminants Affecting Fertility and Somatic Health*. Semin Reprod Med. 2017 May;35(3):241-249. doi: 10.1055/s-0037-1603569. Epub 2017 Jun 28. PMID: 28658707; PMCID: PMC6425478.

Chen K., Wolf K., Breitner S., et al. (2018) *Two-way effect modifications of air pollution and air temperature on total natural and cardiovascular mortality in eight European urban areas*. Environmental International-Vol.116 doi: 10.1016/j.envint.2018.04.021. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2018.04.021>

Chiarelli P., Amador Pereira LA, Nascimento Saldiva PH, et al. (2011) *The association between air pollution and blood pressure in traffic controllers in Santo André, São Paulo, Brazil* Environmental Research Vol 111(5) doi: 10.1016/j.envres.2011.04.007. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0013935111001162?via%3Dihub>

CHPNY (2019) *Compendio de hallazgos científicos, médicos y de medios de comunicación que demuestran los riesgos y daños del fracking (extracción no convencional de gas y petróleo)*. Concerned Health Professionals of New York, Pysicians for Social Responsibility. Heinrich Boll Stiftung, México. https://mx.boell.org/sites/default/files/2019-11/Fracking_libro_2019.pdf

Clark CJ, Johnson NP, Soriano M Jr, Warren JL, Sorrentino KM, Kadan-Lottick NS, Saiers JE, Ma X, Deziel NC. *Unconventional Oil and Gas Development Exposure and Risk of Childhood Acute Lymphoblastic Leukemia: A Case-Control Study in Pennsylvania, 2009-2017*. Environ Health Perspect. 2022 Aug;130(8):87001. doi: 10.1289/EHP11092. Epub 2022 Aug 17. PMID: 35975995; PMCID: PMC9383266.

Deziel NC, Brokovich E, Grotto I, Clark CJ, Barnett-Itzhaki Z, Broday D, Agay-Shay K. (2020) *Unconventional oil and gas development and health outcomes: A scoping review of the epidemiological research*. Environ Res. 2020 Mar;182:109124. doi: 10.1016/j.envres.2020.109124. Epub 2020 Jan 8. PMID: 32069745.

EPA (2025) *Health Effects of Ozone Pollution*. Environmental Protection Agency. <https://www.epa.gov/ground-level-ozone-pollution/health-effects-ozone-pollution>

FARN (2021). *Efectos, impactos y riesgos socioambientales del megaproyecto Vaca Muerta*. https://farn.org.ar/wp-content/uploads/2021/02/DOC_IMPACTOS-VACA-MUERTA_links.pdf

Fernandez, F.; Verzeñassi, D. *et al.* (2025). *Salud en contextos de Cambio Climático*. Colegio de Médicos 2da Circunscripción de Santa Fe, Rosario, Argentina

Forni, L. M. (2024). *Balancing energy security and a healthy environment*. Stockholm Environment Institute (SEI). <https://www.sei.org/wp-content/uploads/pdfs/183788/balancing-energy-security-and-a-healthy-environment.pdf>

Fowler, D., Brunkreef, B., Fuzzi, S., Monks, P. S., Sutton, M. A., Brasseur, G. P., Friedrich, R., Passante, L. G., and Jimenez Mingo, J. M. (2013) *Research Findings in support of the EU Air Quality Review*, Publications office of the European Union, Luxembourg, 2013.

González, D. A., Roca, J. C., Orrego, L., Frabotta, A., Davies, C., Diaz Gómez, R., ... Forni, L. (2024). *Equilibrar la seguridad energética y un ambiente sostenible: Recomendaciones estratégicas para el desarrollo de Vaca Muerta*. Boletín Digital De La FaCA, 2(2), 13–22. Recuperado a partir de https://revele.uncoma.edu.ar/index.php/boletin_electronico_FCA/article/view/5700

Greenfield, E. (2024) *¿Cómo afecta el metano al calentamiento global?* <https://sigmaearth.com/es/how-does-methane-affect-global-warming/>

Grosso, J; Di Ferdinando, M; OPSur, (2024) *Atlas Ambiental de Vaca Muerta. Cartografías de lo Oculto*. Edti. OPSur, Argentina. <https://opsur.org.ar/wp-content/uploads/2024/07/ATLAS-AMBIENTAL-Vaca-Muerta.-OPSur.pdf>

Gudynas, E. (2013) *Extracciones, extractivismos y extrahecciones. Un marco conceptual sobre la apropiación de recursos naturales*. Observatorio del Desarrollo, CLAES.

Hanigan, I.C.; Butler, C.D; Kokic, P.N; Hutchinson, M.F, (2012) *Suicide and drought in New South Wales*. Australia. 1970-2007. Proceeding of

the National Academy of Sciences. 109(35). 13950

Hua Q, Meng X, Gong J, Qiu X, Shang J, Xue T, Zhu T. (2024) *Ozone exposure and cardiovascular disease: A narrative review of epidemiology evidence and underlying mechanisms*. Fundam Res. 2024 Mar 23;5(1):249-263. doi: 10.1016/j.fmre.2024.02.016. PMID: 40166088; PMCID: PMC11955045.

Huang Y., Dominici F., Bell ML. (2005) *Bayesian hierarchical distributed lag models for summer ozone exposure and cardiorespiratory mortality*. Environmetrics. 2005;16(5):547–562. doi: 10.1002/env.721. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/env.721>

ISO 14001:2015 *Sistemas de gestión ambiental — Requisitos con orientación para su uso*. <https://www.iso.org/es/norma/14001#amendment>

ISO 45001:2018 *Sistemas de gestión de la seguridad y salud en el trabajo — Requisitos con orientación para su uso*. <https://www.iso.org/es/contents/data/standard/06/37/63787.html>

Jerrett M, Burnett RT, Pope CA 3rd, Ito K, Thurston G, Krewski D, Shi Y, Calle E, Thun M. (2009) *Long-term ozone exposure and mortality*. New England Journal Medicine. Vol 360(11) doi: 10.1056/NEJMoa0803894. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC4105969/>

Krewski, D., Jerrett, M., Burnett, R. T., Ma, R., Hughes, E., Shi, Y., Turner, M. C., Pope, C. A., Thurston, G., Calle, E. E., and Thun, M. J. (2009) *Extended follow-up and spatial analysis of the American Cancer Society study linking particulate air pollution and mortality*, Health Effects Institute, Boston. Res Rep Health Eff Inst. 2009 May;(140):5-114; discussion 115-36. PMID: 19627030.

Liang R., Feng X., Shi D., et al. (2022) *The global burden of disease attributable to high fasting plasma glucose in 204 countries and territories, 1990-2019: An updated analysis for the Global Burden of Disease Study 2019*. Diabetes Metabolism Research Revue. 2022 Nov;38(8):e3572. doi: 10.1002/dmrr.3572. Epub 2022 Sep 3. PMID: 36001650. doi: 10.1002/dmrr.3572.

Malley, C; Henze, D; Kuylenstierna, J; Vallack, H; Davila, Y;Anenberg, S; Turner, S; Ashmore, M; (2017) *Updated Global Estimates of Respiratory Mortality in Adults ≥30 years of Age Attributable to Long-Term Ozone Exposure*, Environmental Health Perspectives Volume 125, Issue 8 CID:

087021 <https://doi.org/10.1289/EHP1390>

McKenzie LM, Allshouse WB, Byers TE, Bedrick EJ, Serdar B, *et al.* (2017) *Childhood hematologic cancer and residential proximity to oil and gas development*. PLOS ONE 12(2): e0170423. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0170423>

Mardoñez-Balderrama, V; Rojas, N; Pineda Rojas, A; Puliafito, S; Ca-zorla, M; Nogueira, T; Wikuats, C; (2025) *Health impacts of air pollution in South America: Recent advances and research gaps*. Current Opinion in Environmental Science & Health. Volume 45, June 2025, 100627 <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2025.100627>

McKenzie LM, Allshouse WB, Johnson DR, DeVoe CC, Cockburn M, Ghosh D. (2025) *Exposures from Oil and Gas Development and Childhood Leukemia Risk in Colorado: A Population-Based Case-Control Study*. Cancer Epidemiol Biomarkers Prev. 2025 May 2;34(5):658-668. doi: 10.1158/1055-9965.EPI-24-1583. PMID: 40067119; PMCID: PMC12046330.

Noboa Delgado, R. A., Morante Lopez, J. G., Jacome Alarcon, L. F., Eudoro Salomon, M. G., & Angulo Vera, J. N. (2025) *Risk analysis in the handling of cryogenic fluids in industry*. LATAM Revista Latinoamericana De Ciencias Sociales Y Humanidades, 6(3), 1760 – 1775. <https://doi.org/10.56712/latam.v6i3.4070>

OMS. (2002) *Global assessment of the state-of-the-science of endocrine disruptors*. Organización Mundial de la Salud.

OPS (2020) *Cambio Climático para profesionales de la salud. Un libro de bolsillo*. <https://doi.org/10.37774/9789275321843>

OPS. (2002) *Curso de Introducción a la Toxicología de la contaminación del Aire*. Lima: OPS-OMS.

Oyarzún, M; Lanás, F.; Wolff, M; Quezada, A. (2021) *Impacto del cambio climático en la salud*. Revista médica de Chile 149(5):738-746 DOI: 10.4067/s0034-98872021000500738

Porto, M. F., & Pacheco, T. (2009) *Riscos, injustiça ambiental e saúde: o caso do setor químico*. Ciência & Saúde Coletiva, 14(6), 1995–2004.

Porto, M. F. (2019) *Ecologia política da saúde: interfaces para a promoção da saúde e da justiça ambiental*. Fiocruz.

Ren C., Williams GM, Mengersen K., *et al.* (2009) *Temperature enhanced effects of ozone on cardiovascular mortality in 95 large US communities, 1987-2000: Assessment using the NMMAPS data*. Arch. Environ. Occup. Health. 2009;177-184. doi: 10.1080/19338240903240749.

Romanello, M. *et al* (2024) *The 2024 report of the Lancet Countdown on health and climate change: facing record-breaking threats from delayed action*. The Lancet, Volume 404, Issue 10465, 1847 – 1896 [https://www.thelancet.com/journals/lancet/article/PIIS0140-6736\(24\)01822-1/abstract](https://www.thelancet.com/journals/lancet/article/PIIS0140-6736(24)01822-1/abstract)

Siegel KR, Bérubé R, Day M, Heldman S, Daley C, Murray BR, Hecht R, Caron-Beaudoin É, Kassotis CD. (2024) *Impact Of Real-Life Environmental Exposures On Reproduction: Evidence for reproductive health effects following exposure to hydraulic fracturing chemical mixtures*. Reproduction. 2024 Sep 5;168(4):e240134. doi: 10.1530/REP-24-0134. PMID: 39074054; PMCID: PMC11377158.

Silva RA, Adelman Z, Fry MM, West JJ. (2016). *The impact of individual anthropogenic emissions sectors on the global burden of human mortality due to ambient air pollution*. Environ Health Perspect 124:1776-1784; <http://dx.doi.org/10.1289/EHP177>.

Simpson, D., Arneth, A., Mills, G., Solberg, S., and Uddling, J. (2014): *Ozone — the persistent menace: interactions with the N cycle and climate change*, Curr. Opinion Environ. Sustain., 9–10, 9–19, doi:10.1016/j.cosust.2014.07.008

Sun, F, Gong, X, Wei, L, Zang, Y, Ge, M, Xion, L; (2024) *Assessing the impact of short-term ozone exposure on excess deaths from cardiovascular disease: a multi-pollutant model in Nanjing, China's Yangtze River Delta*. Front. Public Health, 12 June 2024 Sec. Environmental Health and Exposome. Volume 12 - 2024 | <https://doi.org/10.3389/fpubh.2024.1353384> <https://www.frontiersin.org/journals/public-health/articles/10.3389/fpubh.2024.1353384/full>

Svampa, M. (2019) *Las fronteras del neoextractivismo en América Latina: Conflictos socioambientales, giro ecoterritorial y nuevas dependencias*. México: CALAS.

SRT (2022) *Toxicología laboral: criterios para el monitoreo de la salud de los trabajadores expuestos a sustancias químicas peligrosas*. 5ta edición. Superintendencia de Riesgos del Trabajo

UNEP & CCAC. (2021) *United Nations Environment Programme (UNEP) & Climate and Clean Air Coalition Global Methane Assessment: Benefits and Costs of Mitigating Methane Emissions*. Nairobi: United Nations Environment Programme, Climate and Clean Air Coalition UNEP. https://www.ccacoalition.org/sites/default/files/resources/2021_Global-Methane_Assessment_full_0.pdf.

University of Pittsburgh, School of Public Health. (2023). *Environmental health research on unconventional natural gas development in Southwestern Pennsylvania: Childhood cancer case-control study*. Report prepared for the Pennsylvania Department of Health. University of Pittsburgh. https://paenv.pitt.edu/assets/Report_Cancer_outcomes_2023_August.pdf

Verzeñassi, D. (2014) “*Agroindustria, Salud y Soberanía. El modelo agrosojero y su impacto en nuestras vidas*”. En D. Melón (Coord.) *La Patria Sojera: el modelo agrosojero en el Cono Sur* (pp. 31-48). Buenos Aires: El Colectivo

Verzeñassi, D. Vallini, A., Möller, V., Zamorano, A. (2023) *El rol de los cuidados en los tiempos de la Geopolítica de la Enfermedad* en Shiva, V. “tramando un nuevo rumbo”, Vicente Lopez, Argentina, Red Editorial.

Vohra, K et al. (2025) *The health burden and racial-ethnic disparities of air pollution from the major oil and gas lifecycle stages in the United States*. Sciences Advances Vol 11, N°34, DOI:10.1126/sciadv.adu2241 <https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.adu2241>

Wang, Y., Ruan, Y., Wan, X., Wang, H., Guo, J., Wei, J., Ma, S., He, Y., Zou, Z., & Li, J. (2025). *Maternal exposure to ambient ozone and fetal congenital heart defects: a national multicenter study in China*. Journal of exposure science & environmental epidemiology. DOI:10.1038/s41370-024-00716-4

Zhang JJ, Wei Y, Fang Z. (2019) *Ozone Pollution: A Major Health Hazard Worldwide*. Frontiers in Immunology. vol10 doi: 10.3389/fimmu.2019.02518 PMID: 31736954; PMCID: PMC6834528. <https://www.frontiersin.org/journals/immunology/articles/10.3389/fimmu.2019.02518/full>

Zheng XY, Orellano P, Lin HL, Jiang M, Guan WJ. (2021) *Short-term*

exposure to ozone, nitrogen dioxide, and sulphur dioxide and emergency department visits and hospital admissions due to asthma: A systematic review and meta-analysis. Environ Int. Mayo de 2021;150:106435. doi: 10.1016/j.envint.2021.106435. Epub 15 de febrero de 2021. PMID: 33601224.

Zhou J., Ito K., Lall R., *et al.* (2011) *Time-series analysis of mortality effects of fine particulate matter components in Detroit and Seattle.* Environ. Health Perspect. 2011;119(4):461–466. doi: 10.1289/ehp.1002613.