

Impactos ambientales globales de los vertidos de aguas residuales y desechos derivados de la energía geotérmica en los ecosistemas naturales

Global environmental impacts of wastewater discharges and waste derived from geothermal energy on natural ecosystems

Nahomy Ayala ^{1,*}, Michelle Muñoz ² y Carlos Banchón ^{3,*}

¹ Escuela Superior Agropecuaria de Manabí Manuel Félix López, Ecuador, Calceta; <https://orcid.org/0009-0009-8068-0723>

² Escuela Superior Agropecuaria de Manabí Manuel Félix López, Ecuador, Calceta; <https://orcid.org/0009-0009-8105-5233>; michelle.munoz.41@espam.edu.ec

³ Escuela Superior Agropecuaria de Manabí Manuel Félix López, Ecuador, Calceta; <https://orcid.org/0000-0002-0388-1988>

* Correspondencia: nahomy.ayala@espam.edu.ec; carlos.banchon@espam.edu.ec

 <https://doi.org/10.70881/hnj/v3/n3/83>

Cita: Ayala, N., Muñoz, M., & Banchón, C. (2025). Impactos ambientales globales de los vertidos de aguas residuales y desechos derivados de la energía geotérmica en los ecosistemas naturales. *Horizon Nexus Journal*, 3(3), 33-51. <https://doi.org/10.70881/hnj/v3/n3/83>

Recibido: 21/04/2025
Revisado: 25/06/2025
Aceptado: 15/07/2025
Publicado: 31/07/2025



Copyright: © 2025 por los autores. Este artículo es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos y condiciones de la Licencia Creative Commons, Atribución-NoComercial 4.0 Internacional (CC BY-NC).

(<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Resumen: La presente revisión sistemática analiza los impactos ambientales de los vertidos de aguas residuales y desechos geotérmicos en ecosistemas naturales, con un enfoque en Ecuador, un país con crisis energética y alto potencial geotérmico. Se examinaron los efectos de los residuos geotérmicos sobre la calidad del agua, el equilibrio ecológico y el ciclo hidrológico, identificando riesgos clave. Se ilustra el funcionamiento de plantas geotérmicas, destacando puntos críticos como la extracción de vapor a 180°C, generación eléctrica y reinyección de fluidos, que puede inducir sismicidad. Los impactos incluyen pérdida de vegetación, emisiones de H₂S y CO₂, contaminación por metales pesados y alteración de hábitats. A pesar de su capacidad global de 19 GW en 2021, la geotermia enfrenta limitaciones en su desarrollo. Se proponen medidas de mitigación como tecnologías avanzadas de tratamiento y monitoreo continuo para garantizar un desarrollo sostenible.

Palabras clave: geotermia; energía; agua residual; desechos; ecosistemas.

Abstract: This systematic review analyzes the environmental impacts of geothermal wastewater discharges and waste on natural ecosystems, focusing on Ecuador, a country with an energy crisis and high geothermal potential. It examines the effects of geothermal residues on water quality, ecological balance, and the hydrological cycle, identifying key risks. The operation of geothermal plants is illustrated, highlighting critical stages such as steam extraction at 180°C, electricity generation, and fluid reinjection, which may induce seismicity. Impacts include vegetation loss, H₂S and CO₂ emissions, heavy metal contamination, and habitat alteration. Despite a global capacity of 19 GW in 2021, geothermal development faces limitations. Mitigation measures, such as advanced treatment technologies and continuous monitoring, are proposed to ensure sustainable development.

Keywords: geothermal energy; energy; wastewater; waste; ecosystems.

1. Introducción

La energía geotérmica se basa en la extracción de energía del vapor de agua o del agua caliente proveniente de zonas cercanas a volcanes, géiseres o fuentes termales (Sharmin et al., 2023; Soltani et al., 2021a). Su generación implica impactos ambientales significativos debido a la liberación de desechos derivados del proceso de explotación, los cuales afectan la calidad del suelo, el agua y la biodiversidad. No obstante, el papel de la energía geotérmica a nivel mundial sigue siendo limitado en comparación con otras fuentes de energía limpia, como la solar, hídrica y eólica (Buscheck et al., 2017). Actualmente, solo el 0,34% de producción mundial de electricidad proviene de la energía geotérmica, utilizada en 32 países, entre los cuales destacan Estados Unidos, Indonesia, Filipinas y Turquía (Ozcelik, 2022). Con el incremento en el desarrollo de este tipo de energía, han surgido preocupaciones ambientales asociadas, entre las que destacan la sismicidad inducida, la pérdida de hábitat y la contaminación de fuentes hídricas por fluidos geotérmicos. Estos impactos han sido ampliamente investigados debido a los desafíos que representan en términos de aceptación social y aprobación regulatoria de los proyectos (Raza et al., 2025). En esta línea, Mott et al. (2022) sostienen que la contaminación de las aguas superficiales y subterráneas con metales pesados tóxicos constituye uno de los efectos más severos de la energía geotérmica. Estudios de caso en plantas geotérmicas ubicadas en Balcova y Alasehir (Turquía occidental), así como en Yangbajain (Tíbet, China), se reporta la presencia de metales como mercurio (Hg) y plomo (Pb), junto con concentraciones elevadas de arsénico (As) y boro (B), alcanzando valores de hasta 729,3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de As y de 3,94 mg/L de B (Zachora-Buławska et al., 2024). Asimismo, se evidencia que la liberación de agua hidrotermal de la planta geotérmica de Bouillante genera altas concentraciones de mercurio (13 $\mu\text{g}/\text{g}$) en sedimentos marinos, afectando a especies marinas como erizos, peces y esponjas (Ruiz et al., 2024). En cuanto a los gases asociados con la exposición a la energía geotérmica, se identifican compuestos como sulfuro de hidrógeno (H_2S), dióxido de carbono (CO_2), nitrógeno (N_2), metano (CH_4) y amoníaco (NH_3) (Rotich et al., 2024).

El presente estudio se alinea con el Objetivo de Desarrollo Sostenible (ODS) número 15, que busca proteger, restaurar y promover el uso sostenible de los ecosistemas terrestres, ya que el objetivo central de esta investigación es minimizar los impactos ambientales sobre los ecosistemas naturales vulnerables frente a la obtención de energía geotérmica (Organización de las Naciones Unidas, 2018). Para mitigar estos impactos, es fundamental adoptar un enfoque integral que priorice tanto la sostenibilidad tecnológica como la protección del entorno natural. Entre los requisitos regulatorios que deben cumplir las plantas de energía geotérmica se incluye la necesidad de limitar las emisiones potenciales de dióxido de carbono (CO_2) y sulfuro de hidrógeno (H_2S), debido a su impacto en la atmósfera y la salud humana (Niknam et al., 2020). Investigaciones recientes destacan el uso de dióxido de carbono supercrítico (sCO_2) como fluido de trabajo (Miranda-Barbosa et al., 2017), ya que esta tecnología innovadora no solo mejora la eficiencia energética, sino que también

presenta una huella ambiental más baja en comparación con el uso de agua (Cui et al., 2017).

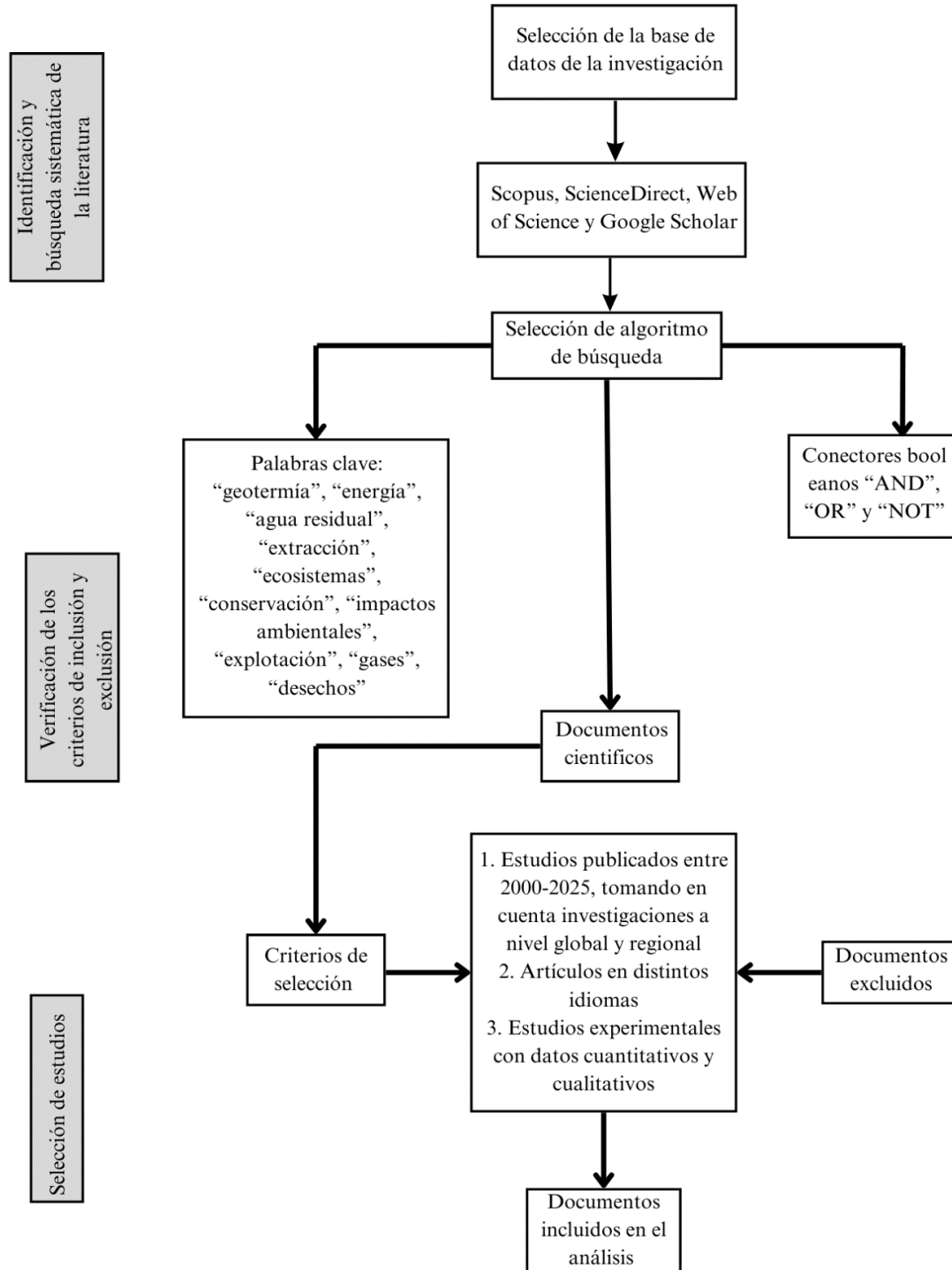
En el contexto ecuatoriano, actualmente el 92 % de la generación eléctrica proviene de centrales hidroeléctricas, el 7 % de plantas termoeléctricas, y el 1 % restante de fuentes no convencionales, como la eólica, la biomasa o la geotermia (Ministerio de Energía y Minas, 2024). El presente estudio tiene como objetivo evaluar de forma sistemática los impactos ambientales y efectos derivados de los desechos generados por la producción de energía geotérmica. El presente artículo de revisión sistemática se centra en comprender cómo los vertidos residuales afectan las propiedades del agua, el equilibrio de los ecosistemas y el ciclo hidrológico, con el fin de identificar los principales riesgos ambientales asociados. Particularmente, se considera su aplicación en Ecuador, un país que ha atravesado una crisis energética. En este contexto, la presente revisión busca evaluar los efectos de los residuos generados por procesos geotérmicos sobre los ecosistemas, identificando las principales afectaciones y proponiendo medidas de mitigación.

2. Materiales y Métodos

La presente revisión sistemática, basada en el esquema de la Figura 1, analizó los impactos ambientales globales de los vertidos de aguas residuales y desechos geotérmicos en ecosistemas naturales. El proceso se desarrolló conforme a las directrices de la declaración PRISMA 2020 (Page et al., 2021), lo que permitió la selección y análisis de estudios de manera rigurosa y transparente. Se recopilaron estudios publicados entre 2000 y 2025 en bases de datos como Scopus, Web of Science, ScienceDirect y Google Scholar, usando palabras clave en español e inglés (e.g., energía, geotermia, agua residual, ecosistemas) y conectores booleanos (AND, OR, NOT) para refinar los resultados. Inicialmente, se identificaron 5.487 artículos, que fueron filtrados según criterios de inclusión y exclusión. Se priorizaron estudios experimentales con datos cualitativos y cuantitativos, excluyendo publicaciones teóricas sin evidencia empírica, como tesis o blogs. Tras la depuración, se seleccionaron 52 artículos que abordaron los impactos de desechos geotérmicos en ecosistemas. Estos se analizaron para identificar patrones, tendencias y enfoques metodológicos. Los resultados revelaron los efectos ambientales de la actividad geotérmica, contribuyendo a estrategias de gestión sostenible. Las variables independientes incluyeron la ubicación de plantas geotérmicas y los tipos de tratamiento de aguas residuales o manejo de desechos, mientras que las dependientes fueron la calidad del agua (pH, metales pesados, temperatura) y la alteración de la biodiversidad, especialmente en especies acuáticas sensibles.

Figura 1

Diagrama del proceso de revisión sistemática de literatura.

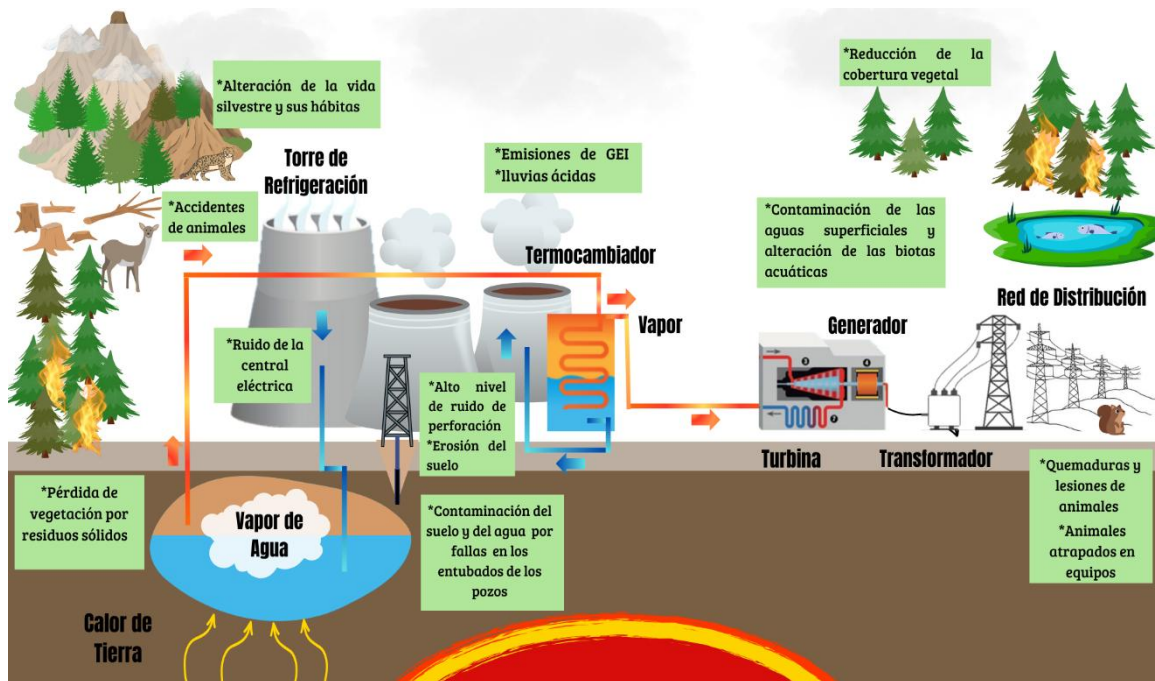


3. Resultados

3.1. Variables operativas de una planta geotérmica

A partir de una revisión de la literatura, se identificaron variables operativas clave que se integraron en un diagrama representativo del funcionamiento de una planta de energía geotérmica (Figura 2). Este esquema, adaptado del modelo de Sharmin et al. (2023), facilita la visualización de los principales impactos negativos de esta tecnología en ecosistemas naturales mixtos. La Figura 2 detalla el proceso operativo, desde la extracción del recurso hasta la generación de electricidad, destacando puntos críticos con potenciales efectos ambientales. Se representan las fuentes geotérmicas subterráneas, la infraestructura de la planta, el sistema de generación eléctrica y los procesos de reinyección y disipación térmica. Las plantas geotérmicas se clasifican en dos tipos según su profundidad: geotermia profunda, con perforaciones de 1 a 5 km, y geotermia superficial, limitada a 250 m (Di Michele et al., 2024). El calor del subsuelo se extrae mediante pozos que capturan vapor a temperaturas superiores a 180 °C (Santos et al., 2022). Este vapor se dirige a un intercambiador térmico, donde se regula su flujo antes de impulsar una turbina. La presión del vapor genera movimiento rotatorio en la turbina, conectada a un generador que convierte la energía mecánica en eléctrica (Zoromba et al., 2025). La electricidad se ajusta en un transformador para su integración a la red de distribución. Posteriormente, parte del vapor se enfría en una torre de refrigeración y, en muchos casos, se reinyecta al subsuelo para mantener la estabilidad térmica del yacimiento y asegurar la sostenibilidad del recurso a largo plazo (Garapati et al., 2017).

En la Figura 2 también se evidencian los impactos ambientales asociados a la explotación geotérmica. Entre los más relevantes se identifican la pérdida de vegetación y la alteración de hábitats naturales, lo que afecta a diversas especies de fauna local. Asimismo, se registran emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), como el sulfuro de hidrógeno (H_2S), que no solo contribuyen al deterioro de la calidad del aire, sino que también provocan olores desagradables en los alrededores de las plantas. El ruido constante de las maquinarias y los eventos de sismicidad inducida, provocados por la inyección de fluidos en el subsuelo, impactan tanto en la biodiversidad como a las comunidades cercanas (Kassem et al., 2025). Otro aspecto que se destaca es la contaminación del agua y el suelo. Los residuos sólidos y los fluidos extraídos del interior de la Tierra contienen compuestos químicos y metales pesados que, en ausencia de un manejo adecuado, comprometen la calidad de los ecosistemas acuáticos y del terreno circundante. Finalmente, el uso de quemadores industriales en algunas instalaciones también genera emisiones que empeoran la calidad del aire en zonas habitadas, intensificando los desafíos ambientales ya existentes.

Figura 2*Principales impactos ambientales de la energía geotérmica*

Nota: Diagrama de las variables operativas y los principales impactos ambientales generados por esta tecnología hacia los ecosistemas naturales. **Fuente:** Elaborado por los autores.

A continuación, la Tabla 1 clasifica las tecnologías geotérmicas según su materia prima utilizada, los productos generados y los vertidos residuales ocasionados. Esta organización identifica situaciones críticas, útiles para el desarrollo de futuras estrategias de mitigación y sostenibilidad en la extracción y producción de energía geotérmica. Se observa que las tecnologías aplicadas están estrechamente relacionadas con las características del fluido geotérmico, como su temperatura y presión. Las principales tecnologías empleadas para generar electricidad a partir de yacimientos geotérmicos fueron las plantas de vapor seco, flash y de ciclo binario (Ivonne, 2017; Røksland, 2017). Por otro lado, hasta el año 2017 se habían implementado diversas innovaciones destinadas a potenciar el uso de esta fuente energética, como las centrales de vapor instantáneo y las centrales de ciclo binario. Para el 2017, la capacidad instalada a nivel mundial alcanzaba los 12.635 MW, lo que permitió una producción estimada de 73.549 GWh de electricidad (Rudiyanto et al., 2017). En el caso de las plantas del tipo flash, se identificó que los gases no condensables eran extraídos del condensador y, aunque los más dañinos suelen tratarse y eliminarse, el dióxido de carbono (CO_2) continúa representando un problema significativo, ya que comúnmente es liberado a la atmósfera (Bonalmi et al., 2017). Asimismo, se reconoció que el fluido geotérmico representa un desafío importante

desde el punto de vista ambiental, no solo por su contenido de CO₂, sino también por la presencia de otros gases en fase gaseosa, como monóxido de carbono (CO), sulfuro de hidrógeno (H₂S) e incluso hidrocarburos.

Tabla 1

Tecnologías Geotérmicas y sus características operativas y ambientales

Tecnologías	Materia prima	Productos	Vertidos residuales	Referencia
Flash Simple	Agua geotérmica alta temperatura (>180°C)	Vapor de alta presión, Energía eléctrica	Gases no condensables (H ₂ S, CO ₂), Salmueras residuales	(Bertani, 2016)
Flash Doble	Agua geotérmica alta entalpía (>200°C)	Vapor de alta y baja presión, Energía eléctrica	Gases no condensables, Sílice precipitada, Salmueras	(DiPippo, 2015)
Ciclo Combinado (Flash-Binario)	Agua geotérmica alta temperatura y presión	Vapor, Energía eléctrica, Agua caliente	Salmueras mixtas, Emisiones reducidas de gases	(Zarrouk y Moon, 2014)
Sistema Híbrido Solar-Geotérmico	Agua geotérmica + Radiación solar	Energía eléctrica, Vapor de alta eficiencia	Salmueras diluidas, Emisiones reducidas	(Zhou, 2014)

Nota: Esta tabla resume las principales tecnologías aplicadas en la generación de la energía geotérmica, organizadas según los recursos utilizados, los productos obtenidos y los residuos generados durante su operación.

La Figura 3 presenta la capacidad instalada de energía geotérmica hasta 2021 (World Economic Forum, 2023). Estados Unidos lidera con 3,7 GW, seguido por Indonesia (2,3 GW) y Filipinas (1,9 GW), pioneros en este recurso. Turquía y Nueva Zelanda alcanzan 1,7 GW y 1,0 GW, respectivamente, mientras que México, Kenia, Italia, Islandia y Japón registran entre 0,9 y 0,6 GW. La Figura 2 indica que la generación global geotérmica totalizó 19 GW en 2021. Esto evidencia que, pese al potencial de la energía geotérmica como fuente renovable, su desarrollo sigue limitado en regiones con condiciones geológicas favorables y la infraestructura necesaria.

Figura 3

Capacidad instalada de generación de energía geotérmica por país hasta el año 2021

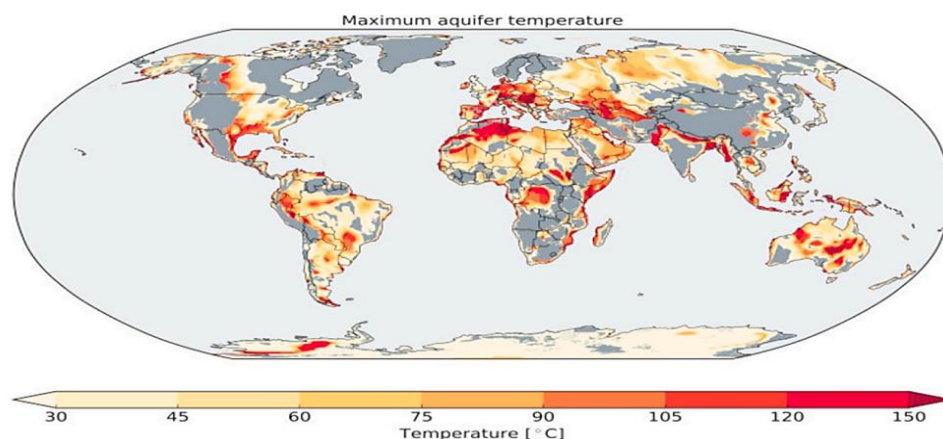


Nota: Comparativa de la capacidad instalada de energía geotérmica (en gigavatios, GW) por país hasta el 2021. **Fuente:** Elaborado por los autores

Por otro lado, el Departamento de Energía de Estados Unidos estimó que la utilización del 0,1% de los recursos geotérmicos del planeta habría sido suficiente para abastecer la demanda energética mundial durante aproximadamente 217 millones de años. Asimismo, se proyectó que la energía geotérmica contribuiría con un 3,5% del suministro energético global para el año 2050, con una producción anual estimada de 1400 TWh y una reducción de emisiones de CO₂ de hasta 800 millones de toneladas métricas (Nath et al., 2024). La Figura 4 ilustra un mapa global que representa las temperaturas máximas calculadas dentro de los acuíferos a nivel mundial, proporcionando una referencia clave para estimar el potencial hidrotermal. Las temperaturas fueron registradas hasta una profundidad máxima de 3 km (Limberger et al., 2018); las zonas en tonos amarillos y naranjas indicaron temperaturas moderadas, entre 30 a 90°C, mientras que las regiones en rojo reflejan temperaturas elevadas de hasta 150°C. Por último, las áreas grises correspondieron a regiones que no fueron consideradas en el estudio.

Figura 4

Temperatura máxima de los acuíferos a nivel mundial

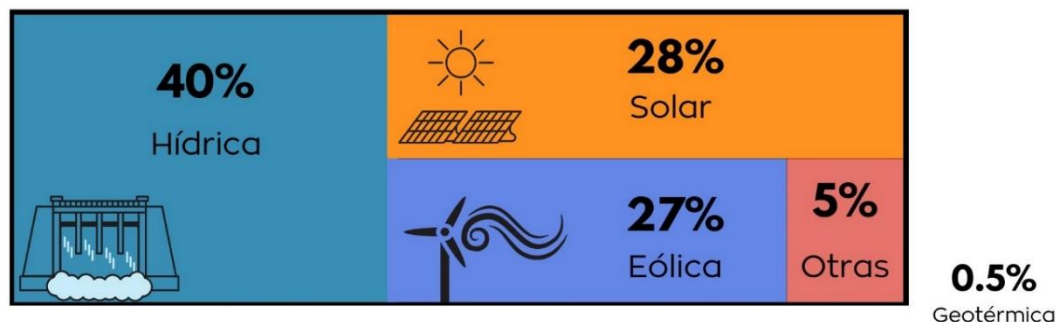


Nota: El mapa muestra las temperaturas máximas estimadas en acuíferos de hasta 3km de profundidad, destacando el potencial geotérmico en distintas regiones del planeta. **Fuente:** Limberger et al.(2018)

Aunque la energía geotérmica es una fuente renovable y limpia, históricamente solo aporta el 0,5% de la capacidad instalada mundial de energías renovables, que totaliza 3.064 GW (Figura 5). En contraste, la hidroeléctrica domina con un 40%, seguida por la solar (28%) y la eólica (27%), evidenciando su mayor desarrollo y adopción global. Otras fuentes renovables representan un 5%. Este escenario subraya el potencial desaprovechado de la geotermia y la urgencia de diversificar las fuentes energéticas para un futuro sostenible. Promover su desarrollo e inversión podría ofrecer beneficios clave, dada su constancia, independencia de variaciones climáticas y capacidad para complementar otras renovables.

Figura 5

Porcentaje de participación de Energías Renovables



Nota: La energía hídrica representa la mayor proporción con un 40%, seguida por la solar (28%) y la eólica (27%). La fuente geotérmica y otras contribuyen con el 0,5% y 5%, respectivamente. **Fuente:** Elaborado por autores.

3.2. Caracterización de los desechos generados en las plantas geotérmicas

La Tabla 2 presentó los impactos ambientales, los parámetros de contaminación y las tecnologías utilizadas en distintos países que aprovecharon la energía geotérmica. Su importancia radicó en que permitió a las empresas y a los entes de control identificar y considerar los efectos negativos antes de llevar a cabo la explotación. Por ejemplo, en Islandia y Kenia se reportaron emisiones de CO₂, H₂S y SO_x, lo que generó contaminación del aire y afectó a los ecosistemas. Turquía y China presentaron altas concentraciones de metales pesado y arsénico, impactando negativamente los acuíferos y la salud humana, mientras que en Francia se detectó mercurio con riesgo de bioacumulación. En conclusión, la Tabla 2 sirvió como guía para anticipar y mitigar los impactos ambientales asociados al aprovechamiento de la energía geotérmica.

Tabla 2

Impactos ambientales asociados al uso de tecnologías geotérmicas en distintos países

País	Tecnología utilizada	Parámetros de contaminación	Identificación de Impactos ambientales	Autor
Islandia	Flash	Emisiones de CO ₂ y H ₂ S	Efecto invernadero y lluvia ácida	(Kjeld et al., 2022)
Turquía	Ciclo Binario	Concentraciones de minerales y metales pesados: Al = 41-233ppb As= 13-153 ppb Sb= 1238 ppb Li=4,96-7,04ppm	Contaminación de acuíferos, impacto en el suelo, bioacumulación	(Tonkul et al., 2021)

Kenia	Vapor Flash	Temperaturas >130 °C Emisiones de CO2 y SOx Exposición al H2S de 4,40ppm	Efectos en la vida acuática, alteración de ecosistemas, contaminación del aire, olores desagradables.	(Rotich et al., 2024b)
Alemania	Ciclo Binario	Sismicidad inducida, magnitudes de entre 1.8- 2.1 ML	Alteraciones a los cuerpo de agua subterráneos y en la estabilidad del suelo.	(Keil et al., 2022)
Francia	Flash Simple	concentraciones de Hg ≤13 µg g ⁻¹	Bioacumulación, contaminación de sedimentos	(Ruiz et al., 2024)
China	Ciclo de Vapor Seco	concentraciones de (As) ≥3,18 mg/L	Amenaza para la salud, contaminación de ecosistemas acuáticos	(Guo et al., 2015)

Nota: Esta tabla resume los principales parámetros de contaminación, tecnologías utilizadas e impactos ambientales identificados en diversos países que explotan energía geotérmica con base en estudios recientes

4. Discusión

En el caso de Ecuador, su situación geográfica lo convierte en un territorio con un alto potencial geotérmico. Sin embargo, hasta el momento no se desarrollan proyectos para aprovechar este recurso. Se estima que la primera planta geotérmica del país entra en funcionamiento en un periodo de 5 a 10 años (Izquierdo y Carcelén, 2022). Por otro lado, en el campo geotérmico de Hellisheidi, en Islandia, se reportan casos de sismicidad inducida como resultado de la reinyección de aguas residuales geotérmicas. Durante los años 2011 y 2012 se registran desplazamientos de hasta 2 cm y eventos sísmicos de magnitud 4 (Juncu et al., 2020). En Suiza, por ejemplo, se reporta un sismo de magnitud 3,5 durante la perforación de un pozo geotérmico profundo en St. Gallen, ocurrido mientras se contenía una sobrepresión en las tuberías de perforación (Omodeo-Salé et al., 2020). La reinyección de agua en un sistema geotérmico no solo busca optimizar la recuperación de recursos, sino también eliminar las aguas residuales. No obstante, cuando únicamente se reinyecta salmuera geotérmica, pueden producirse alteraciones térmicas y químicas que provocan un aumento repentino de presión, lo cual conlleva riesgos operativos y posibles fugas de salmuera (Buscheck et al., 2013). Además, este proceso puede inducir actividad sísmica, levantar el terreno o causar hundimientos no deseados (Rivera et al., 2016). En Dinamarca, las plantas geotérmicas de Margretheholm y Sønderborg enfrentan problemas de inyectividad, principalmente debido a la precipitación de plomo metálico. Además, presentan niveles de agua de formación altamente salinos, con

concentraciones iónicas que oscilan entre 3,4 y 5,8 mol kgw⁻¹ (Holmslykke et al., 2019).

Teniendo en cuenta el estudio de Ruiz et al.(2024) se ha evidenciado que la descarga de efluentes hidrotermales provenientes de la Planta geotérmica de Bouillante, ha derivado la acumulación y transferencia de mercurio (Hg) en ecosistemas costeros adyacentes, donde se documentaron concentraciones de Hg de hasta 13 µg g⁻¹ en sedimentos y especies marinas. Los resultados obtenidos demuestran que la descarga de aguas hidrotermales por la planta Bouillante presentan niveles elevados de mercurio, lo que genera una contaminación en la zona que podría resultar en implicaciones ecotoxicológicas. Durante el funcionamiento de una planta geotérmica, uno de los principales contribuyentes a los impactos ambientales son las emisiones directas e indirectas de CO₂ y H₂S. Se estima que por cada MWh de electricidad generada a partir de energía geotérmica se emiten aproximadamente unos 0,08kg de H₂S lo cual representa una ventaja medioambiental en comparación con las centrales eléctricas de petróleo y gas natural, que producen 814kg y 550 kg de H₂S por MWh, respectivamente (Goosen et al., 2010).

En el año 2022, se realizó una evaluación del ciclo a la planta de energía geotérmica de Theistareykir, en Islandia. El estudio concluye que la generación de electricidad en Theistareykir emite 13,9 g de CO₂-eq por kWh entregado, y un total de 14,8 g de CO₂-eq por kWh considerando la transmisión. A lo largo de 40 años de vida útil de la planta, el 78% de huella de carbono corresponde a emisiones directas de CO₂ provenientes del fluido geotérmico(Kjeld et al., 2022).

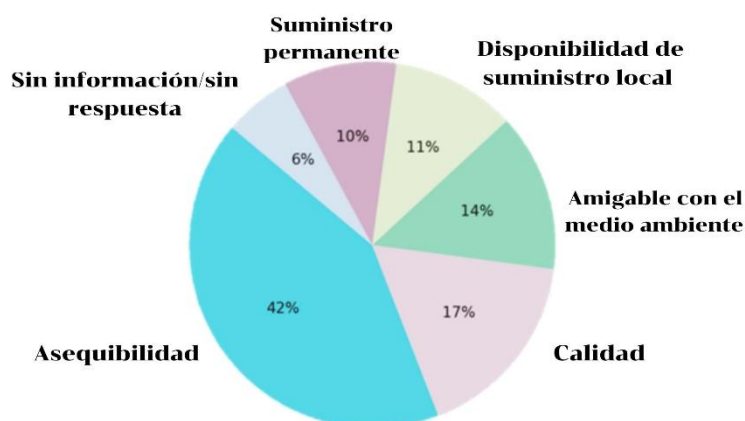
Otro desafío relevante derivado de la explotación de la energía geotérmica es la formación de minerales incrustantes, como hidróxidos metálicos, plomo metálico, sulfuros de metales pesados (Tonkul et al., 2021), los cuales generan impactos tanto ambientales como operativos (Kazmierczak et al., 2022). Además, se evidencia que las interacciones entre los minerales presentes en las rocas graníticas y fluidos geotérmicos provocan una alteración geoquímica que afecta afectando la permeabilidad y porosidad de las formaciones geológicas(Smith et al., 2024).

En Kenia, el Proyecto Geotérmico Olkaria IV implementó en el 2009 un Plan de Acción para el Reasentamiento (PAR), actualizado en el 2012 (Ayieta, 2020). El informe inicial del PAR identifica que la calidad del aire puede deteriorarse por las emisiones de H₂S y la presencia de oligoelementos como arsénico (As), boro (B) y mercurio (Hg), además del ruido generado por las plantas geotérmicas, lo cual podría afectar la calidad de vida de las comunidades locales (Schade, 2017). Por otra parte, Soltani et al. (2021b) reporta una encuesta realizada en Turquía, motivada por el rápido crecimiento en el consumo energético. En ella, se destaca que el factor más valorado por los encuestados es la asequibilidad de la energía (42%) como se puede apreciar en la figura 4, mientras que la compatibilidad ambiental ocupa el tercer lugar en importancia.

En cuanto a las preocupaciones ambientales, la contaminación atmosférica es identificada como el principal problema energético (41%), seguida por la salud humana (20%), el cambio climático (17%), la alteración de la vida vegetal (6%), la destrucción del suelo (5%) y la contaminación del agua (4%). A partir de estos hallazgos, se concluye que una mejor planificación y mayor concienciación sobre los impactos ambientales puede incrementar la aceptación pública de la instalación de plantas de energía geotérmica.

Figura 6

Percepción pública sobre los factores más importantes en relación con la energía en Turquía



Nota: Resultados de una encuesta en la que se consultó a la población sobre los aspectos más relevantes vinculados al consumo energético

4.1. Propuestas de mitigación

Las medidas de mitigación para enfrentar los impactos negativos se incluyen en los informes de Estudios de Impacto Ambiental (EslA), y deben ser implementadas por las empresas operadoras de los proyectos (Mahamoud Abdi et al., 2024). En general, los informes de EslA resultan fundamentales para los proyectos de energía geotérmica, ya que su desarrollo, extracción y distribución puede generar efectos adversos tanto en el medio ambiente como en la sociedad. Aunque la normativa exige evaluaciones de impacto ambiental para los proyectos geotérmicos, también es crucial considerar el impacto social. Una evaluación social rigurosa permite anticipar conflictos y reducir los daños a las comunidades locales. Además, recopilar información sobre los posibles cambios sociales, culturales, políticos y económicos antes, durante y después de la implementación del proyecto fortalece su sostenibilidad y aceptación. Actualmente, se espera que los recursos geotérmicos ofrezcan una ventaja competitiva endógena (Kurek et al., 2020). Entre los requisitos reglamentarios para las plantas de energía geotérmica se encuentra la limitación de emisiones potenciales de CO₂ y H₂S, incluyendo la reinyección de gases no condensables (GNC), una estrategia que contribuye al cumplimiento de las directrices ambientales y al objetivo de alcanzar emisiones netas cero (Niknam et al., 2020).

La técnica de tratamiento NR-FO de dos etapas se plantea como una solución prometedora para maximizar la eliminación de microcontaminantes presentes en las aguas residuales derivadas de la energía geotérmica, ya que estas aguas suelen contener niveles de mineralización superiores a 6 g/L. En una investigación a escala de laboratorio, la aplicación este tratamiento logró eliminar microcontaminantes con los siguientes niveles de eficiencia: 96% para boro (B), 86% para cromo (Cr^{3+}), 94% para plomo (Pb^{2+}), 67% para níquel (Ni^{2+}), 99% para hierro (Fe^{2+}) y 93% para arsénico (As^{3+}). Además, comprueba que el uso de membranas NF270 no resulta efectivo para la eliminación de microcontaminantes en aguas geotérmicas altamente mineralizadas (Tyszer et al., 2020).

La implementación de dióxido de carbono supercrítico (scCO_2) como fluido de trabajo emerge como una tecnología innovadora en la generación de energía geotérmica (Gupta y Vashistha, 2016). Al no ser corrosivo ni inflamable, este sistema avanzado contribuye a mitigar la formación de subproductos nocivos y reduce el riesgo de contaminación de aguas subterráneas. Además, presenta una huella ambiental menor en comparación con el uso de agua Nkinyam et al., 2025). Por otra parte, el desarrollo de análisis exergoambientales mejorados resulta clave para identificar oportunidades de optimización en eficiencia y sostenibilidad. Cuando la planta opera en condiciones óptimas, es posible reducir las emisiones de CO_2 hasta en un 8,4% (Gürbüz et al., 2022). En la actualidad, la producción de energía geotérmica crece en función de la rigurosidad de las políticas climáticas, y muestra un mayor alineamiento con el objetivo de limitar el calentamiento global a 2°C , establecido en el Acuerdo de París. No obstante, incluso en los escenarios más sensibles, el impacto global de este crecimiento continúa siendo moderado (Dalla Longa et al., 2020).

Para mitigar los impactos ambientales derivados de los vertidos de aguas residuales y desechos generados por la explotación de la energía geotérmica, es fundamental adoptar un enfoque holístico que equilibre la sostenibilidad tecnológica con la conservación de los ecosistemas. Una estrategia clave consiste en implementar tecnologías avanzadas para el tratamiento de aguas geotérmicas, orientadas a eliminar de manera eficiente metales pesados, sales disueltas y compuestos tóxicos antes de su retorno al medio ambiente. Asimismo, la reinyección controlada de los fluidos geotérmicos en los reservorios subterráneos constituye una medida esencial para reducir la contaminación superficial y preservar la integridad estructural del subsuelo a largo plazo. Estas acciones requieren el respaldo de programas de monitoreo ambiental continuo, que permitan evaluar de manera sistemática la calidad del agua y el estado de los ecosistemas circundantes, facilitando la detección temprana de alteraciones ecológicas. Además, resulta crucial fortalecer la normativa ambiental mediante marcos legales más estrictos y mecanismos de fiscalización eficaces. Paralelamente, es necesario promover la educación ambiental en las comunidades locales y en los sectores industriales, fomentando una conciencia colectiva sobre la importancia de armonizar el desarrollo energético con la preservación de los recursos naturales que sustentan la vida y el bienestar humano.

5. Conclusiones

La presente revisión sistemática sobre los impactos ambientales globales de los vertidos de aguas residuales y desechos derivados de la energía geotérmica en ecosistemas naturales concluye que, aunque esta fuente energética reduce las emisiones de carbono, genera efectos adversos significativos que requieren gestión rigurosa. Los desechos líquidos y gaseosos afectan la calidad del agua, alteran ecosistemas y desequilibran el subsuelo, con compuestos tóxicos que se bioacumulan e impactan cadenas tróficas. Además, la reinyección de fluidos, esencial para la sostenibilidad del recurso, puede inducir sismicidad y modificar las condiciones físico-químicas subterráneas. El estudio, basado en experiencias internacionales, adopta un enfoque ecosistémico, identificando tecnologías, tipos de residuos y sus efectos, y subraya la necesidad de tratamientos especializados y monitoreo continuo. Se proponen medidas de mitigación como tecnologías avanzadas para aguas residuales, fluidos menos contaminantes y planificación territorial que proteja áreas vulnerables, especialmente en países como Ecuador, donde la geotermia está en desarrollo. La presente investigación aporta una visión integral, y destaca el costo ecológico de su expansión. Se recomiendan estudios de aplicación de energía geotérmica, enfatizando que la transición energética priorice compromisos éticos y ambientales para garantizar un desarrollo sostenible.

Contribución de los autores: Conceptualización, C.B.; metodología, N.A., M.M. y C.B.; software, N.A., M.M. y C.B.; validación, C.B.; análisis formal, C.B.; investigación, N.A., M.M. y C.B.; recursos, N.A., M.M. y C.B.; redacción del borrador original, N.A. y M.M.; redacción, revisión y edición, C.B.; visualización, N.A. y M.M.; supervisión, C.B.. Todos los autores han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito.

Financiamiento: Los autores no han recibido fondos externos para esta investigación.

Agradecimientos: A la Escuela Superior Agropecuaria de Manabí Manuel Félix López.

Conflicto de intereses: Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

Referencias Bibliográficas

Allahvirdizadeh, P. (2020). A review on geothermal wells: Well integrity issues. *Journal of Cleaner Production*, 275, 124009. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124009>

Ayieta, J. (2020). Geothermal Prospecting of Olkaria Dome Areas in Naivasha, Nakuru County Kenya using Gravity Method. *Journal of Earth and Environmental Sciences*. <https://doi.org/10.29011/2577-0640.100190>

Bayer, P., Rybach, L., Blum, P., & Brauchler, R. (2013). Review on life cycle environmental effects of geothermal power generation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 26, 446-463. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.05.039>

Bertani, R. (2016). Geothermal power generation in the world 2010–2014 update report. *Geothermics*, 60, 31-43. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2015.11.003>

- Bonalumi, D., Bombarda, P. A., & Invernizzi, C. M. (2017). Zero Emission Geothermal Flash Power Plant. *Energy Procedia*, 126, 698-705. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.08.302>
- Buscheck, T. A., Bielicki, J. M., & Randolph, J. B. (2017). CO₂ Earth Storage: Enhanced Geothermal Energy and Water Recovery and Energy Storage. *Energy Procedia*, 114, 6870-6879. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.1615>
- Buscheck, T. A., Elliot, T. R., Celia, M. A., Chen, M., Sun, Y., Hao, Y., Lu, C., Wolery, T. J., & Aines, R. D. (2013). Integrated Geothermal-CO₂ Reservoir Systems: Reducing Carbon Intensity through Sustainable Energy Production and Secure CO₂ Storage. *Energy Procedia*, 37, 6587-6594. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2013.06.591>
- Cui, G., Zhang, L., & Ren, S. (2017). Assessment of Heat Mining Rate for Geothermal Exploitation from Depleted High-temperature Gas Reservoirs via Recycling Supercritical CO₂. *Energy Procedia*, 105, 875-880. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.404>
- Dalla Longa, F., Nogueira, L. P., Limberger, J., Wees, J.-D. V., & Van Der Zwaan, B. (2020). Scenarios for geothermal energy deployment in Europe. *Energy*, 206, 118060. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118060>
- Di Michele, N., Talluri, L., Ungar, P., & Fiaschi, D. (2024). Energy, exergy and exergo-economic analyses of supercritical CO₂ cycles for the exploitation of a geothermal resource in the Italian water dominant Amiata site. *Energy*, 313, 133743. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.133743>
- DiPippo, R. (2015). Geothermal power plants: Evolution and performance assessments. *Geothermics*, 53, 291-307. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2014.07.005>
- Garapati, N., Adams, B. M., Bielicki, J. M., Schaedle, P., Randolph, J. B., Kuehn, T. H., & Saar, M. O. (2017). A Hybrid Geothermal Energy Conversion Technology—A Potential Solution for Production of Electricity from Shallow Geothermal Resources. *Energy Procedia*, 114, 7107-7117. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.1852>
- Goosen, M., Mahmoudi, H., & Ghaffour, N. (2010). Water Desalination Using Geothermal Energy. *Energies*, 3(8), 1423-1442. <https://doi.org/10.3390/en3081423>
- Guo, Q., Cao, Y., Li, J., Zhang, X., & Wang, Y. (2015). Natural attenuation of geothermal arsenic from Yangbajain power plant discharge in the Zangbo River, Tibet, China. *Applied Geochemistry*, 62, 164-170. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2015.01.017>
- Gupta, N., & Vashistha, M. (2016). Carbon Dioxide Plume Geothermal (CPG) System- A New Approach for Enhancing Geothermal Energy Production and Deployment of CCUS on Large Scale in India. *Energy Procedia*, 90, 492-502. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.11.216>

- Gürbüz, E. Y., Güler, O. V., & Keçebaş, A. (2022). Environmental impact assessment of a real geothermal driven power plant with two-stage ORC using enhanced exergo-environmental analysis. *Renewable Energy*, 185, 1110-1123. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.12.097>
- Holmslykke, H. D., Schovsbo, N. H., Kristensen, L., Weibel, R., & Nielsen, L. H. (2019). Characterising brines in deep Mesozoic sandstone reservoirs, Denmark. *Geological Survey of Denmark and Greenland Bulletin*, 43. <https://doi.org/10.34194/GEUSB-201943-01-04>
- Ivonne, G. A. Z. (2017). La sustentabilidad de la energía geotérmica y sus impactos ambientales.
- Izquierdo Apolo, C., & Carcelen, J. (2022). Energía geotérmica en Ecuador, condiciones actuales y necesidad de una legislación específica. *Iuris Dictio*, 16. <https://doi.org/10.18272/iu.v29i29.2527>
- Juncu, D., Árnadóttir, Th., Geirsson, H., Guðmundsson, G. B., Lund, B., Gunnarsson, G., Hooper, A., Hreinsdóttir, S., & Michalczywska, K. (2020). Injection-induced surface deformation and seismicity at the Hellisheidi geothermal field, Iceland. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 391, 106337. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2018.03.019>
- Kassem, M. A., Moscariello, A., & Holmuller, P. (2025). Navigating risk in geothermal energy projects: A systematic literature review. *Energy Reports*, 13, 696-712. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2024.12.052>
- Kazmierczak, J., Marty, N., Weibel, R., Nielsen, L. H., & Holmslykke, H. D. (2022). The risk of scaling in Danish geothermal plants and its effect on the reservoir properties predicted by hydrogeochemical modelling. *Geothermics*, 105, 102542. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2022.102542>
- Keil, S., Wassermann, J., & Megies, T. (2022). Estimation of ground motion due to induced seismicity at a geothermal power plant near Munich, Germany, using numerical simulations. *Geothermics*, 106, 102577. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2022.102577>
- Kjeld, A., Bjarnadóttir, H. J., & Olafsdóttir, R. (2022). Life cycle assessment of the Theistareykir geothermal power plant in Iceland. *Geothermics*, 105, 102530. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2022.102530>
- Kurek, K. A., Heijman, W., Van Ophem, J., Gędek, S., & Strojny, J. (2020). The impact of geothermal resources on the competitiveness of municipalities: Evidence from Poland. *Renewable Energy*, 151, 1230-1239. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.11.126>
- Limberger, J., Boxem, T., Pluymaekers, M., Bruhn, D., Manzella, A., Calcagno, P., Beekman, F., Cloetingh, S., & Van Wees, J.-D. (2018). Geothermal energy in deep aquifers: A global assessment of the resource base for direct heat utilization.

Renewable and Sustainable Energy Reviews, 82, 961-975.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.084>

Mahamoud Abdi, A., Murayama, T., Nishikizawa, S., Suwanteep, K., & Obuya Mariita, N. (2024). Determinants of community acceptance of geothermal energy projects: A case study on a geothermal energy project in Kenya. *Renewable Energy Focus*, 50, 100594. <https://doi.org/10.1016/j.ref.2024.100594>

Ministerio de Energía y Minas. (2024). <https://www.recursosyenergia.gob.ec/ecuador-consolida-la-produccion-electrica-a-partir-de-fuentes-renovables/>

Miranda-Barbosa, E., Sigfússon, B., Carlsson, J., & Tzimas, E. (2017). Advantages from combining CCS with geothermal energy. *Energy Procedia*.

Mott, A., Baba, A., Hadi Mosleh, M., Ökten, H. E., Babaei, M., Gören, A. Y., Feng, C., Recepoğlu, Y. K., Uzelli, T., Uytun, H., Morata, D., Yüksel, A., & Sedighi, M. (2022). Boron in geothermal energy: Sources, environmental impacts, and management in geothermal fluid. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 167, 112825. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112825>

Nath, F., Mahmood, M. N., Ofosu, E., & Khanal, A. (2024). Enhanced geothermal systems: A critical review of recent advancements and future potential for clean energy production. *Geoenergy Science and Engineering*, 243, 213370. <https://doi.org/10.1016/j.geoen.2024.213370>

Niknam, P. H., Talluri, L., Fiaschi, D., & Manfrida, G. (2020). Gas purification process in a geothermal power plant with total reinjection designed for the Larderello area. *Geothermics*, 88, 101882. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2020.101882>

Nkinyam, C. M., Ujah, C. O., Asadu, C. O., & Kallon, D. V. V. (2025). Exploring geothermal energy as a sustainable source of energy: A systemic review. *Unconventional Resources*, 6, 100149. <https://doi.org/10.1016/j.uncres.2025.100149>

Omodeo-Salé, S., Eruteya, O. E., Cassola, T., Baniasad, A., & Moscariello, A. (2020). A basin thermal modelling approach to mitigate geothermal energy exploration risks: The St. Gallen case study (eastern Switzerland). *Geothermics*, 87, 101876. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2020.101876>

Ozcelik, M. (2022). Environmental and social impacts of the increasing number of geothermal power plants (Büyük Menderes Graben—Turkey). *Environmental Science and Pollution Research*, 29(11), 15526-15538. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-16941-5>

Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J. M., Hróbjartsson, A., Lalu, M. M., Li, T., Loder, E. W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., ... Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, n71. <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>

- Raza, M. A., Al-Khasawneh, M. A., Alharthi, Y. Z., Faheem, M., Haider, R., & Kumar, L. (2025). Power generation expansion planning with high penetration of geothermal energy – Potential, prospects and policy. *Environmental and Sustainability Indicators*, 26, 100614. <https://doi.org/10.1016/j.indic.2025.100614>
- Rivera Diaz, A., Kaya, E., & Zarrouk, S. J. (2016). Reinjection in geothermal fields – A worldwide review update. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 53, 105-162. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.151>
- Røksland, M. (2017). Geothermal Energy Extraction from Abandoned Wells. *Energy Procedia*.
- Rotich, I. K., Chepkirui, H., Musyimi, P. K., & Kipruto, G. (2024a). Geothermal energy in Kenya: Evaluating health impacts and environmental challenges. *Energy for Sustainable Development*, 82, 101522. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2024.101522>
- Rotich, I. K., Chepkirui, H., Musyimi, P. K., & Kipruto, G. (2024b). Geothermal energy in Kenya: Evaluating health impacts and environmental challenges. *Energy for Sustainable Development*, 82, 101522. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2024.101522>
- Rudiyanto, B., Illah, I., Pambudi, N. A., Cheng, C.-C., Adiprana, R., Imran, M., Huat Saw, L., & Handogo, R. (2017). Preliminary analysis of dry-steam geothermal power plant by employing exergy assessment: Case study in Kamojang geothermal power plant, Indonesia. *Case Studies in Thermal Engineering*, 10, 292-301. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2017.07.006>
- Ruiz, E., Lacoue-Labarthe, T., Churlaud, C., Brault-Favrou, M., & Pascal, P.-Y. (2024). Mercury Accumulation and Transfer in Hydrothermal Coastal Environment: The Case of the Geothermal Plant of Bouillante. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 87(3), 209-221. <https://doi.org/10.1007/s00244-024-01082-w>
- Santos, L., Dahi Taleghani, A., & Elsworth, D. (2022). Repurposing abandoned wells for geothermal energy: Current status and future prospects. *Renewable Energy*, 194, 1288-1302. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.05.138>
- Schade, J. (2017). Kenya 'Olkaria IV' Case Study Report: Human Rights Analysis of the Resettlement Process. (COMCAD Working Papers, 151). Bielefeld: Universität Bielefeld, Fak. für Soziologie, Centre on Migration, Citizenship and Development (COMCAD). <https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:0168-ssnar-51409-6>
- Sharmin, T., Khan, N. R., Akram, M. S., & Ehsan, M. M. (2023). A State-of-the-Art Review on Geothermal Energy Extraction, Utilization, and Improvement Strategies: Conventional, Hybridized, and Enhanced Geothermal Systems. *International Journal of Thermofluids*, 18, 100323. <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2023.100323>
- Smith, T., Awolayo, A. N., Grasby, S. E., & Tutolo, B. M. (2024). Investigation of geochemically induced permeability alteration in geothermal reservoirs and its implications for sustainable geothermal energy production. *Applied Geochemistry*, 175, 106193. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2024.106193>

- Soltani, M., Moradi Kashkooli, F., Souri, M., Rafiei, B., Jabarifar, M., Gharali, K., & Nathwani, J. S. (2021a). Environmental, economic, and social impacts of geothermal energy systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 140, 110750. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110750>
- Soltani, M., Moradi Kashkooli, F., Souri, M., Rafiei, B., Jabarifar, M., Gharali, K., & Nathwani, J. S. (2021b). Environmental, economic, and social impacts of geothermal energy systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 140, 110750. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110750>
- Tonkul, S., Baba, A., Demir, M. M., & Regenspurg, S. (2021). Characterization of Sb scaling and fluids in saline geothermal power plants: A case study for Germencik Region (Büyük Menderes Graben, Turkey). *Geothermics*, 96, 102227. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2021.102227>
- Tyszer, M., Tomaszewska, B., & Bodzek, M. (2020). Comparison of the efficiency of micro-pollutant removal from geothermal water on a laboratory and a semi-industrial scale. *Desalination and Water Treatment*, 186, 155-164. <https://doi.org/10.5004/dwt.2020.25466>
- Zachora-Buławaska, A., Kędzior, R., & Operacz, A. (2024). Spent geothermal water discharge to rivers: Risk or environmental benefit? *Science of The Total Environment*, 954, 176527. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.176527>
- Zarrouk, S. J., & Moon, H. (2014). Efficiency of geothermal power plants: A worldwide review. *Geothermics*, 51, 142-153. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2013.11.001>
- Zhou, C. (2014). Hybridisation of solar and geothermal energy in both subcritical and supercritical Organic Rankine Cycles. *Energy Conversion and Management*, 81, 72-82. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.02.007>
- Zoromba, M. S., Abdel-Aziz, M. H., Attar, A., Bassyouni, M., Al-Qabandi, O. A., & Elhenawy, Y. (2025). Hybrid system for water desalination and electricity generation powered by geothermal energy. *Energy Conversion and Management: X*, 26, 100979. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2025.100979>