

Análisis de la canasta energética nacional: Perspectivas de implementación de la energía nuclear  
y geotérmica como alternativas de diversificación

Catalina Tarazona González y Sarah Valentina Lascarro Castillo

Trabajo de grado para optar el título de Ingeniera Química

Modalidad Trabajo de Investigación

Director

Edgar Mauricio Morales Valencia

Doctor en Ingeniería Química

Codirector

Víctor Gabriel Baldovino Medrano

Doctor en Ingeniería Química

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físicoquímicas Escuela de Ingeniería Química

Bucaramanga

2026

### **Dedicatoria**

*A Dios, por ser el principio y el fin de todo, por guiar mis pasos, sostenerme en la incertidumbre y darme la claridad necesaria para culminar este sueño.*

*A la memoria de mi abuela **Araminta**, quien, aunque ya no está físicamente, celebra conmigo desde la eternidad. Este logro es también un tributo a su memoria y al amor que me heredó.*

*A mi abuelo **Alirio** por ser el cimiento de mis valores y mi inspiración en todo este proceso.*

*A mi mamá, **Yolima Castillo**, por ser mi refugio incondicional, mi motor y mi ejemplo de resiliencia. Gracias por creer en mí con una fe inquebrantable, por tus sacrificios y por recordarme, en cada palabra de aliento, que mi capacidad no tiene límites..*

*A mi fiel compañera, **Pola**, por su presencia reconfortante y por enseñarme que la compañía silenciosa es una de las formas más puras de apoyo durante este trayecto.*

*A mis amigos más cercanos en todo este proceso y quienes fueron el apoyo fundamental en la creación de este trabajo: **Angie, Sarah, Danny, Steff, Adri, Mafe, Angie, Anna, Denis, Andrés, Mildrein, Mariana y Frank**. Gracias por hacer que la carga fuera más ligera.*

*A mis otros amigos que la vida universitaria me regaló y que se convirtieron en parte esencial de este camino. Gracias por motivarme a seguir adelante, por exigirme dar lo mejor de mí y por transformar los pasillos de la universidad en un espacio de crecimiento y alegría inolvidable. Cada uno de ustedes fue una pieza clave para que hoy pueda ver este ciclo cumplido.*

***Sarah Valentina Lascarro Castillo***

*Este logro está dedicado, en primer lugar, a mi familia, porque todo lo que hago es por y para*

*ustedes. Cada esfuerzo, cada sacrificio y cada paso que he dado en este camino tiene como motor el amor que siento por ustedes. Nada de esto habría sido posible sin su apoyo incondicional, sin su paciencia en los momentos difíciles y sin la confianza que siempre depositaron en mí, incluso cuando yo misma dudaba. A ustedes les dedico cada traspaso, cada madrugada en la que el cansancio pesaba más que las ganas, cada momento de estrés, de incertidumbre y de miedo. Porque, aunque muchas veces sentí que no podía más, pensar en ustedes siempre fue mi razón para seguir adelante.*

*Este logro también representa todos esos momentos en los que tuve que ser fuerte sin querer serlo, en los que continuar parecía más difícil que rendirme, pero aun así decidí quedarme, resistir y avanzar. Es el reflejo de un proceso lleno de aprendizajes, de crecimiento personal y de muchas emociones que hoy me permiten valorar aún más lo que significa haber llegado hasta aquí.*

*Pero, sobre todo, quiero dedicarme este logro a mí misma. Por no rendirme. Por levantarme incluso en los días en los que no tenía fuerzas. Por confiar en mí, aun cuando el miedo y la duda estaban presentes. Por seguir adelante cuando sentía que ya había dado todo de mí. Me lo dedico por mi valentía, por mi constancia y por mi capacidad de seguir luchando incluso en silencio. Por creer, aunque fuera un poquito, que sí era capaz. Por demostrarme que puedo lograr lo que me proponga, incluso cuando el camino se torna difícil. Hoy me reconozco como una persona fuerte, capaz y resiliente. Y entiendo que este no es solo el final de una etapa, sino también el comienzo de muchas cosas más grandes y mejores.*

*Este logro es mío, pero también es de todos los que hicieron parte de este camino. Y aunque hoy celebro haber llegado hasta aquí, sé que lo mejor aún está por venir.*

**Catalina Tarazona González**

### **Agradecimientos**

*En primer lugar, agradezco a la Universidad Industrial de Santander y a mi director de tesis, el ingeniero **Mauricio Morales Valencia**, por su orientación, paciencia y por brindarme las herramientas necesarias para desarrollar esta investigación con rigor académico.*

*A mi mamá, **Yolima Castillo**, por su apoyo incondicional y por ser mi refugio en los momentos de mayor exigencia.*

*A mi compañera de tesis, **Catalina Tarazona**, por su constante colaboración y por el trabajo en equipo realizado en este proyecto.*

*De manera especial, quiero expresar mi más profundo agradecimiento a los expertos nacionales e internacionales que participaron en este estudio. Gracias por su generosidad al compartir su tiempo y conocimiento en las entrevistas realizadas. Sus perspectivas sobre la energía nuclear y geotérmica fueron el pilar fundamental que permitió construir este trabajo y proponer soluciones reales para la matriz energética de nuestro país. Sin su disposición y apertura académica, este logro no habría sido posible.*

***Sarah Valentina Lascarro Castillo***

*Quiero comenzar expresando mi más profundo agradecimiento a mis padres, **Román e Ingrid**, por ser mi apoyo incondicional a lo largo de este camino. Gracias por estar siempre presentes, por brindarme calma en los momentos difíciles y por impulsarme a seguir adelante incluso cuando yo dudaba. Todo lo que soy hoy también es gracias a ustedes, jamás en la vida hubiese querido otros papás distintos a ustedes, eternamente agradecida por inculcar cada valor en mi, y ayudar a fortalecer desde niña mis virtudes.*

*A mi hermana **Sary**, por ser una persona tan especial en mi vida. Gracias por tu compañía sincera, por tu amistad y por estar siempre a mi lado de una manera tan genuina, siempre estaré para ella como ella estará para mí, hermanas para siempre. A mis **nonos, Trino, Myriam, Jorge y Tina**, quienes han sido como unos segundos padres para mí. Gracias por su amor constante, por cuidarme y acompañarme durante toda mi vida, sé que han velado siempre por mí, he sentido la consentida de la casa, han apoyado y brindado su casa cuando más lo necesitaba. A **Chía**, mi perrita, quien, aunque ya no está, siempre será parte de mí. Gracias por la paz, la alegría y el amor que me regalaste.*

*A mi director de tesis **Mauro** y a mi compañera de tesis **Sarah**, por su acompañamiento constante, su dedicación y por ayudar a que este trabajo se desarrollara de la mejor manera posible, siempre estarán en mi corazón, gracias por el apoyo y resiliencia en este proyecto.*

*A todos los expertos que hicieron parte de este proceso, por compartir sus conocimientos, su tiempo y sus valiosos aportes, los cuales fueron fundamentales para la construcción de esta tesis. A la Universidad Industrial de Santander, por convertirse en mi segundo hogar durante estos cinco años, por formarme no solo académicamente sino también como persona. Me llevo recuerdos y aprendizajes que marcarán mi vida para siempre.*

*A las personas que conocí durante esta etapa: mis amigos de la carrera, **Stef, Cami Ramos, Cami Reyes, Val**, y todo el grupo de **CEIQ** (que ya no es **CEIQ**, pero siempre lo será para nosotros), así como **AIChE** y la junta que tuve el honor de liderar. Gracias por las experiencias, los momentos compartidos y todo lo vivido juntos. También agradezco a todas aquellas personas con las que coincidí en este camino y con quienes compartí momentos significativos, aunque hoy ya no formen parte de mi día a día. Les deseo a todos mucho éxito y que logren cada una de sus metas.*

*Y de manera muy especial, a **Santiago**, por acompañarme en esta etapa final de la carrera.*

*Gracias por tu apoyo, por tu paciencia, por estar presente en los momentos de estrés, por escucharme, por animarme cuando lo necesitaba y por hacer este proceso más llevadero. Tu compañía fue un gran apoyo para llegar hasta aquí.*

*Del mismo modo, agradezco a aquellas personas que, aunque no están ligadas con la U o mi familia siempre han sido un gran apoyo para mí, a todos los mencionados en esta hoja les agradezco infinitamente.*

**Catalina Tarazona González**

**Tabla de contenido**

	<b>Pág.</b>
Introducción .....	15
1. Objetivos 16	
1.1. Objetivo General .....	16
1.2. Objetivos Específicos .....	16
2. Marco Teórico .....	17
2.1. Términos Clave .....	17
2.1.1. Diversificación Energética Nacional.....	17
2.1.2. Seguridad Energética.....	17
2.1.3. Reactores y Centrales Nucleares .....	17
2.1.3.1. Fisión y Fusión Nuclear .....	18
2.1.4. Energía Geotérmica.....	19
2.1.4.1. Clasificación de tecnologías geotérmicas .....	19
2.1.4.2. Gradiente Geotérmico .....	20
3. Estado del Arte .....	21
4. Descripción Metodológica .....	25
4.1. Etapa I: Recolección y análisis de datos .....	25
4.1.1. Recolección y análisis de datos energéticos.....	25
4.1.2. Procesamiento y visualización de datos .....	25
4.1.3. Análisis de tendencias históricas.....	25
4.2. Etapa II: Viabilidad técnica y económica de nuclear y geotérmica .....	25
4.2.1. Revisión documental .....	25
4.2.2. Consultas Técnicas .....	26
4.2.3. Análisis comparativo.....	26
4.3. Etapa III: Impacto ambiental de las fuentes energéticas .....	26
4.3.1. Revisión de indicadores ambientales .....	26
5. Resultados .....	27
5.1. Distribución y proporcionalidad de la canasta energética nacional .....	27
5.1.1. Participación porcentual por fuente desde hace 10 años.....	28

5.1.2. Concentración geográfica.....	29
5.1.2.1. Energía hidroeléctrica .....	30
5.1.2.2. Energías solar y eólica.....	31
5.1.2.3. Energía térmica .....	33
5.2. Energía Nuclear.....	34
5.2.1. Política y regulación: Marcos regulatorios energía nuclear .....	35
5.2.2. Economía y Mercado: Viabilidad Técnico-Económica .....	36
5.2.2.1. CAPEX y OPEX de la energía nuclear en el contexto colombiano .....	37
5.2.2.2. Reactores Modulares Pequeños (SMRs).....	38
5.2.3. Criterios de localización de una planta nuclear.....	38
5.2.4. Ciencia y Seguridad .....	40
5.2.4.1. Impacto ambiental .....	41
5.2.4.2. El Recurso Hídrico: Mitos, Realidades.....	44
5.2.5. La energía nuclear en Latinoamérica .....	44
5.2.6. Aprovechamiento Térmico y de Radiación de la Energía Nuclear.....	46
5.2.7. Percepción pública de la energía nuclear, una labor de desmitificación.....	47
5.2.7.1. Lecciones de Chernóbil y Fukushima .....	47
5.2.7.2. Superando la barrera de la Licencia Social .....	48
5.3. Energía Geotérmica.....	49
5.3.1. Economía y Mercado: Viabilidad Técnico-Económica .....	50
5.3.2. Zonas Potenciales de Exploración Geotérmica.....	50
5.3.1.2. Estructura del Costo Geotérmico .....	52
5.3.2. Marcos Regulatorios: Energía Geotérmica .....	53
5.3.3. Exploración y Ciencia: Riesgos exploratorios .....	55
5.3.3.1. Proyectos vigentes nacionales de Geotermia .....	55
5.3.3.2. Impacto ambiental en la energía geotérmica.....	56
5.3.3.2.1. Impacto Geotécnico de la Perforación.....	57
5.3.3.2.2. Impacto en el Uso de la Tierra.....	57
5.3.4. Energía Geotérmica en Latinoamérica.....	58
5.3.4.1. Aplicaciones Directas del Calor Geotérmico.....	59

5.4. Análisis comparativo: Perspectiva ambiental .....	60
5.4.1. Análisis comparativo de costos, regulatorio y técnico.....	62
Conclusiones .....	65
Apéndice .....	67
Referencias Bibliográficas .....	76

**Lista de tablas**

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Clasificación y disposición de residuos radiactivos. ....	43
Tabla 2. Análisis comparativo por regulación y política energética. ....	65
Tabla 3. Análisis comparativo por ciencia, tecnología y seguridad energética. ....	65

**Lista de Figuras**

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Funcionamiento de una central nuclear. ....	18
Figura 2. Generación de electricidad nuclear en el continente americano (2024). ....	21
Figura 3. Distribución energética en Colombia 2020-2025. ....	28
Figura 4. Distribución de centrales hidroeléctricas.....	31
Figura 5. Distribución de energías renovables (Solar-Eólica). ....	33
Figura 6. Distribución de plantas térmicas. ....	34
Figura 7. Diagrama de Venn expertos en energía nuclear. ....	35
Figura 8. Plantas de reconversión y propuestas de locación. ....	41
Figura 9. Diagrama de Venn expertos en energía geotérmica. ....	51
Figura 10. Distribución potencial geotérmico nacional. ....	52
Figura 11. Análisis ambiental por fuente de energía. ....	62
Figura 12. Análisis de costos aproximado por fuente de energía (CAPEX – LCOE). ....	64

**Lista de Apéndices**

	<b>Pág.</b>
Apéndice A. Perfiles de Expertos Entrevistados. ....	66
Apéndice B. Entrevistas a Expertos .....	68
Apéndice C. Preguntas a Expertos .....	75
Apéndice D. Memorias de Entrevistas .....	75

## Resumen

**Título:** Análisis de la canasta energética nacional: Perspectivas de implementación de la energía nuclear y geotérmica como alternativas de diversificación\*

**Autores:** Sarah Valentina Lascarro Castillo, Catalina Tarazona González \*\*

**Palabras clave:** Diversificación Energética, Energía Nuclear, Energía Geotérmica, Colombia, Sostenibilidad.

**Descripción:** El trabajo de investigación analiza la vulnerabilidad de la matriz energética colombiana, caracterizada por su alta dependencia de la generación hidroeléctrica (57%), lo que la hace especialmente susceptible a las variaciones climáticas. De acuerdo con lo anterior, fenómenos como El Niño pueden reducir significativamente la disponibilidad de agua y provocar crisis de abastecimiento eléctrico.

Frente a esta situación, el estudio propone la incorporación de fuentes de generación firme como la nuclear y la geotérmica, con el fin de diversificar la canasta energética nacional y fortalecer la seguridad del suministro. A diferencia de otras tecnologías condicionadas por el clima, estas alternativas permiten producir electricidad de manera continua e interrumpida, garantizando estabilidad en el sistema eléctrico.

Mediante un análisis técnico, regulatorio, ambiental y económico, se evidencia que la energía nuclear ofrece alta capacidad de generación en espacios reducidos y costos estables a largo plazo, mientras que la geotermia aprovecha eficientemente el calor del subsuelo colombiano. Los resultados, sustentados en catorce entrevistas a expertos nacionales e internacionales y en la revisión bibliográfica, indican que la combinación de estas fuentes diversifica la matriz energética, fortalece la seguridad ante crisis climáticas y contribuye a reducir la contaminación ambiental.

---

\* Trabajo de grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: Edgar Mauricio Morales Valencia. Doctor en Ingeniería Química. Codirector: Víctor Gabriel Baldovino Medrano. Doctor en Ingeniería Química.

### Abstract

**Title:** Analysis of Colombia's National Energy Mix: Implementation Perspectives for Nuclear and Geothermal Energy as Diversification Alternatives\*

**Authors:** Sarah Valentina Lascarro Castillo, Catalina Tarazona González \*\*

**Keywords:** Energy Diversification, Nuclear Energy, Geothermal Energy, Colombia, Sustainability

The research analyzes the vulnerability of the Colombian energy matrix, which is characterized by its high dependence on hydroelectric generation (57%), making it particularly susceptible to climate variability. Accordingly, phenomena such as El Niño can significantly reduce water availability and lead to electricity supply crises.

In response to this situation, the study proposes the incorporation of firm power sources such as nuclear and geothermal energy in order to diversify the national energy mix and strengthen supply security. Unlike other climate-dependent technologies, these alternatives allow for continuous and uninterrupted electricity production, ensuring stability in the power system.

Through a technical, regulatory, environmental, and economic analysis, nuclear energy is shown to provide high power generation capacity in limited spaces and stable long-term costs, while geothermal energy efficiently harnesses heat from Colombia's subsurface. The findings, supported by interviews with national and international experts and a literature review, indicate that combining these sources diversifies the energy matrix, strengthens security against climate-related crises, and helps reduce environmental pollution.

---

\* Degree Work

\*\* Faculty of Physicochemical Engineering. School of Chemical Engineering. Director: Edgar Mauricio Morales Valencia. Ph.D. in Chemical Engineering. Co-director: Victor Gabriel Baldovino Medrano. Ph.D. in Chemical Engineering.

## Introducción

En promedio, ChatGPT responde a 195 millones de solicitudes diarias, lo que implica un consumo eléctrico estimado de 564 MWh por día (Tucho, F, et al, 2026). El auge de la inteligencia artificial (IA) cumple un papel cada vez más relevante en la demanda energética mundial, junto con otros sectores de alto consumo como la movilidad eléctrica, las criptomonedas y los centros de datos, cuyo uso energético fue cercano a 560 TWh en 2023, con una proyección de 720 TWh para 2026 (de Vries, 2023).

En 2024, la demanda eléctrica mundial alcanzó un récord de 1.080 TWh, con un incremento de 451 TWh (+2%) respecto a 2023, según la Agencia Internacional de la Energía (IEA, 2025). Ante este crecimiento sostenido, diversos países han optado por diversificar su matriz energética mediante la incorporación de tecnologías emergentes. En este contexto, Colombia registró un consumo energético total de 82.084 GWh en 2024, lo que representó un aumento del 14% frente a 2019 (Portal XM, 2024).

Actualmente, la matriz energética nacional está compuesta por 58,59% de generación hídrica, 27,54% térmica y 13,87% de energías limpias (Minenergía, 2025). Sin embargo, la fuerte dependencia de las condiciones ambientales, especialmente de los recursos hídricos, compromete la sostenibilidad del sistema a largo plazo, ya que la variabilidad climática incrementa la vulnerabilidad del suministro eléctrico, intensifica los periodos de sequía y puede generar problemas de abastecimiento que deriven en crisis energéticas (UNAD, 2019).

Esta vulnerabilidad del sistema energético nacional exige, con carácter prioritario, la evaluación de alternativas eficientes que permitan diversificar el portafolio energético y fortalecer la seguridad del suministro. En el contexto internacional, la energía nuclear y la energía geotérmica han incrementado progresivamente su participación en la canasta energética mundial, representando aproximadamente el 9% y el 1%, respectivamente (Graham et al., 2025).

En Colombia, estas tecnologías emergen como opciones estratégicas debido a su potencial para complementar las fuentes renovables existentes. En este marco, el presente trabajo busca analizar ¿Cuáles son los factores técnicos, ambientales, regulatorios y económicos que determinarán la factibilidad de integrar estas tecnologías a la matriz energética nacional?

## **1. Objetivos**

### **1.1.Objetivo General**

Desarrollar una revisión bibliográfica del estado actual de la canasta energética nacional, para evaluar el potencial de implementación de la energía nuclear y geotérmica como fuentes alternativas sostenibles para diversificar el suministro energético.

### **1.2.Objetivos Específicos**

Identificar la distribución y proporcionalidad de las fuentes de energía actuales en la canasta energética nacional.

Analizar la viabilidad técnica y económica de la energía nuclear y geotérmica en el contexto nacional.

Determinar los efectos a largo y corto plazo del impacto ambiental de las fuentes energéticas actuales en conjunto con las posibles contribuciones de la energía nuclear y la geotermia.

## **2. Marco Teórico**

### **2.1. Términos Clave**

#### **2.1.1. Diversificación Energética Nacional**

La diversificación energética se define como la estrategia de integrar múltiples fuentes de energía en la matriz colombiana, con el objetivo de reducir riesgos a raíz de la dependencia de un solo recurso o proveedor, garantizando un suministro estable ante fluctuaciones de demanda o crisis geopolíticas y mitigar impactos ambientales mediante la transición hacia fuentes de bajas emisiones (DelPlata Green, 2024).

#### **2.1.2. Seguridad Energética**

La seguridad energética evalúa la capacidad de garantizar un suministro confiable frente a riesgos externos e internos, considerando factores como diversidad de fuentes, independencia energética y capacidad de almacenamiento y distribución (Marta & Parejo, 2012).

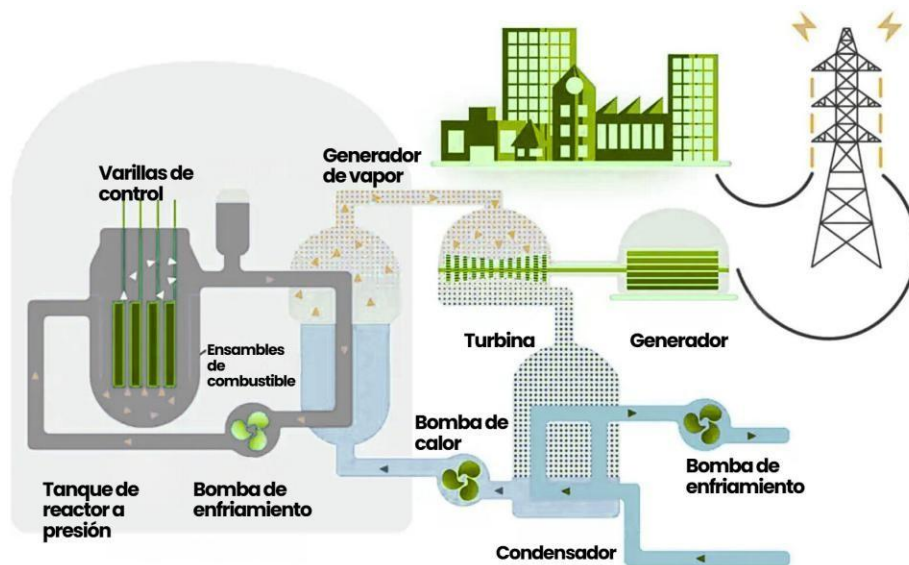
#### **2.1.3. Reactores y Centrales Nucleares**

Las centrales nucleares son instalaciones industriales diseñadas para generar electricidad a gran escala utilizando el calor liberado por la fisión nuclear controlada. De acuerdo con el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA, 2024), el proceso se basa en el uso de un reactor donde se induce una reacción en cadena, generalmente empleando uranio-235, para producir energía térmica que posteriormente se transforma en energía mecánica y, finalmente, eléctrica.

El funcionamiento de estas centrales puede visualizarse a través de tres circuitos independientes que trabajan de manera simultánea:

**Figura 1**

*Funcionamiento de una central nuclear.*



**Circuito Primario (Generación de Calor):** El proceso inicia en el reactor, ubicado dentro de un edificio de contención blindado. Allí, el refrigerante (agua desmineralizada) absorbe el calor de la fisión a altas presiones para evitar su evaporación inmediata.

**Circuito Secundario (Producción de Vapor):** El agua caliente del circuito primario transfiere su energía térmica a un segundo flujo de agua en un generador de vapor. Este vapor a alta presión es conducido hacia las turbinas, cuya rotación activa un alternador encargado de producir la electricidad (García, 2021).

**Circuito Terciario (Condensación):** Finalmente, para cerrar el ciclo, el vapor debe volver a su estado líquido. Esto se logra mediante un condensador que utiliza agua de una fuente externa como ríos o mares para enfriar el sistema sin que exista contacto físico entre los diferentes flujos de agua (García, 2021).

### 2.1.3.1. Fisión y Fusión Nuclear

La fisión nuclear consiste en la división de un núcleo atómico en núcleos más pequeños, liberando energía en forma de calor y radiación. Este proceso produce fragmentos de fisión, neutrones y rayos gamma, los cuales son clave en la generación de energía nuclear (Wagemans, 1991).

La fusión nuclear es el proceso en el que núcleos atómicos ligeros se unen para formar uno más pesado, liberando grandes cantidades de energía. Estas reacciones ocurren en el plasma, un estado de la materia compuesto por iones y electrones libres, con propiedades distintas a los sólidos, líquidos y gases. Las reacciones de fusión producen una cantidad de energía muy elevada cuatro veces superior a la de las reacciones de fisión nuclear y pueden ser la base de los futuros reactores de fusión (Chatzis Irena, 2021).

#### **2.1.4. Energía Geotérmica**

La energía geotérmica se obtiene mediante plantas geotérmicas que extraen agua caliente o vapor del interior de la Tierra para generar electricidad. En ciertos casos, cuando las condiciones lo permiten, el calor puede ser conducido directamente hacia los lugares donde se requiere. El aprovechamiento de esta energía depende en gran medida de las características de la fuente geotérmica, siendo la temperatura uno de los factores más determinantes (AES Colombia, 2023).

##### **2.1.4.1. Clasificación de tecnologías geotérmicas**

La viabilidad técnica de un proyecto geotérmico está intrínsecamente ligada a la temperatura del yacimiento, factor que define la entalpía del recurso y, por ende, el ciclo termodinámico más eficiente para la generación eléctrica. Para ello se distinguen las siguientes tecnologías principales:

**Sistemas de Flasheo (Flash Steam):** Utilizados en yacimientos de alta entalpía (generalmente  $>180^{\circ}\text{C}$ ). En este proceso, el agua a alta presión se transporta a un tanque de expansión (separador) a menor presión, lo que provoca que el fluido se "evapore" instantáneamente o haga flash. Este vapor es el que impulsa directamente las turbinas (Gülden, et al. 2012).

**Ciclos de Rankine Orgánico (ORC):** Ideales para recursos de media y baja entalpía (entre  $90^{\circ}\text{C}$  y  $170^{\circ}\text{C}$ ). Dado que el agua del yacimiento no tiene suficiente energía para convertirse en vapor de forma eficiente, se utiliza para calentar un fluido de trabajo orgánico (como el isopentano o n-pentano) que tiene un punto de ebullición mucho más bajo. El fluido orgánico se evapora, mueve la turbina y luego se condensa para reiniciar el ciclo (Tulenbayev et

al., 2025).

**Bombas de Calor Geotérmicas:** Empleadas en recursos de muy baja entalpía (usualmente  $<30^{\circ}\text{C}$ ). Estas no generan electricidad a gran escala, sino que aprovechan la inercia térmica del subsuelo para sistemas de climatización (calefacción o refrigeración), transfiriendo calor de la tierra al edificio o viceversa (U.S. Department of Energy [DOE], 2023).

Esta diferenciación es crucial para el contexto colombiano, donde la diversidad geológica permite desde aplicaciones industriales de generación con sistemas ORC hasta usos directos en procesos productivos como el secado de lana o aplicaciones turísticas en balnearios.

#### **2.1.4.2. Gradiente Geotérmico**

El gradiente geotérmico se define como el incremento paulatino de la temperatura que se experimenta a medida que se penetra hacia las capas interiores de la corteza terrestre. En la mayor parte del globo, este fenómeno presenta un ritmo promedio de  $2.5^{\circ}\text{C}$  a  $3^{\circ}\text{C}$  por cada 100 metros de profundidad (equivalente a un aumento de  $25^{\circ}\text{C}$  a  $30^{\circ}\text{C}$  por cada kilómetro), lo que se denomina un gradiente geotérmico normal (IDAE e IGME, 2008).

El valor de este gradiente define la entalpía del yacimiento, lo cual es el factor crítico para decidir qué tipo de tecnología de extracción utilizar de las anteriormente definidas. Al determinar qué tan rápido aumenta la temperatura con la profundidad, el gradiente permite identificar áreas con anomalías térmicas donde el recurso es más accesible para la explotación.

### 3. Estado del Arte

Los conceptos expuestos incluyen desde fundamentos técnicos hasta los criterios de integración energética, que constituyen la base para evaluar la viabilidad de la nuclear y geotérmica en la diversificación de la matriz nacional.

La crisis energética se ha consolidado en los últimos años como un fenómeno de alcance global, estrechamente relacionado con los impactos climáticos derivados de los patrones actuales de consumo energético. A nivel mundial, diversos países han respondido a este desafío mediante la incorporación de fuentes de energía alternativa de generación continua, entre las cuales destacan la energía nuclear y la energía geotérmica.

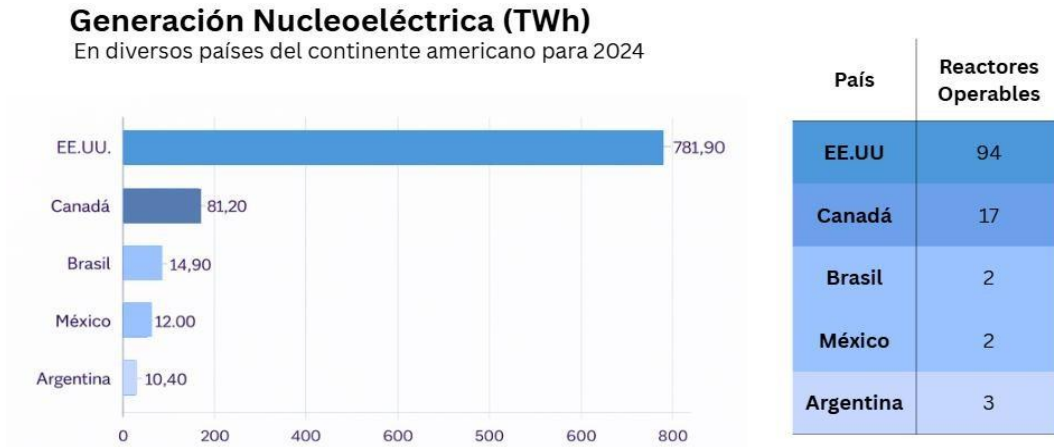
La energía nuclear proporciona actualmente alrededor del 10% de la electricidad del mundo a partir de 403 reactores nucleares (IAEA, 2024). Dentro de sus ventajas de implementación se encuentra una demanda mínima de territorio, un solo reactor nuclear utiliza alrededor de 5,3 hectáreas de espacio terrestre por megavatio, en comparación con la energía eólica (28,7 hectáreas), la energía solar (17,8 hectáreas) y la hidroeléctrica (127,5 hectáreas) (Tubb, 2019). Al igual que una reducción significativa de las emisiones de CO<sub>2</sub> y otros contaminantes durante su operación.

La Figura 2 evidencia la importancia actual de la energía nuclear en el continente americano, resaltando su contribución a la estabilidad y seguridad del suministro eléctrico y permitiendo identificar referentes tecnológicos aplicables a Colombia.

En particular, Estados Unidos ha consolidado esta fuente como eje estratégico de generación base. En ese país, la energía nuclear aporta aproximadamente el 19% de la electricidad nacional mediante la operación de 94 reactores, lo que demuestra su solidez operativa y su capacidad para sostener una elevada demanda industrial gracias a su alta densidad energética (U.S. Energy Information Administration, 2025).

**Figura 2**

*Generación de electricidad nuclear en el continente americano 2024.*



*Nota.* Elaboración propia a partir de datos del World Nuclear Performance Report 2025 (World Nuclear Association, 2025).

El desarrollo de la energía nuclear en América revela contrastes significativos en infraestructura y producción. Mientras Estados Unidos lidera con 781.90 TWh generados por 94 reactores, países como Brasil y Argentina producen 14.90 TWh y 10.40 TWh respectivamente, con solo 2 y 3 reactores operativos. Esto representa aproximadamente el 3 % y 9 % de su matriz eléctrica nacional (Lugones & Vera, 2024), evidenciando una adaptación favorable en términos de eficiencia tecnológica y seguridad energética, según los datos recopilados por el World Energy Council para el año 2024.

Ahora bien, Colombia está en las primeras etapas de exploración de la energía nuclear, evaluando su viabilidad. Para su desarrollo enfrenta desafíos clave como la percepción pública, la necesidad de infraestructura adecuada y el manejo seguro de residuos radiactivos (D. Galeano, 2024). Aunque el país cuenta desde 1965 con el reactor nuclear de investigación IAN-R1, operado por el Servicio Geológico Colombiano y destinado exclusivamente a investigación científica y aplicaciones pacíficas, este no tiene capacidad para generar electricidad (Servicio Geológico Colombiano, 2023).

En el ámbito normativo, actualmente se radicó el proyecto de ley “Nuclear: Átomos para la Vida”, el cual propone la creación de la Agencia Nacional de Seguridad Nuclear (ANSN) para supervisar y garantizar el uso seguro de tecnologías nucleares, promoviendo la investigación, la

innovación y la protección ambiental (Resolución 40320 del 11 de julio de 2025, 2025).

La implementación de la energía geotérmica a nivel mundial responde tanto a metas de descarbonización como a estrategias de soberanía energética. Estados Unidos lidera la producción global con más de 3.900 MW de capacidad instalada, impulsada por el desarrollo de proyectos en la región de la Gran Cuenca (Great Basin, ubicado en el estado de Nevada), una zona con alto flujo de calor, la cual favorece reservorios geotérmicos de alta entalpía y permite un suministro eléctrico continuo con bajos costos operativos (Sass & Walters, 1999).

Por su parte, Indonesia ocupa el segundo lugar mundial con cerca de 2.400 MW instalados, gracias a su localización en el Cinturón de Fuego del Pacífico, región de intensa actividad volcánica que facilita el aprovechamiento geotérmico. Esta condición geológica presenta similitudes con la cordillera Central colombiana, lo que evidencia su potencial para el desarrollo de esta fuente energética (Top 10 Geothermal Countries, 2024).

En Latinoamérica, El Salvador destaca por el uso de la energía geotérmica, con una capacidad cercana a 204 MW que aporta alrededor del 25 % de su electricidad (IGA, 2024). Este avance se debe a políticas energéticas sostenidas y al aprovechamiento de reservorios volcánicos, lo que demuestra su viabilidad en regiones con geología similar, como la andina. Asimismo, la energía geotérmica se presenta como una opción interesante dentro del contexto colombiano, donde se han identificado alrededor de 21 áreas asociadas a sistemas volcánicos con potencial para su implementación (Montes Zuluaga, 2023).

Sin embargo, hasta la fecha solo seis de estas han sido exploradas mediante estudios de geología, geofísica y geoquímica, lo que evidencia que el desarrollo de esta tecnología aún se encuentra en una etapa inicial. Además, la incertidumbre geológica durante la fase de exploración incrementa el riesgo y puede afectar la viabilidad de los proyectos geotérmicos (Servicio Geológico Colombiano, 2025).

La cuantificación de las fuentes energéticas es esencial para evaluar el panorama energético actual y formular proyecciones futuras. En Colombia, esta labor es liderada por la Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME), entidad encargada de planificar y orientar el desarrollo del sector energético nacional.

A partir de sus estudios, la UPME ha proporcionado información clave sobre la diversificación de la matriz energética, incluyendo la posible incorporación de fuentes como la energía nuclear y la geotérmica. No obstante, la adopción de estas tecnologías exige un análisis integral de los desafíos técnicos, económicos, formativos y de seguridad energética que implica su implementación en el contexto colombiano.

## **4. Descripción Metodológica**

### **4.1. Etapa I: Recolección y análisis de datos**

#### **4.1.1. Recolección y análisis de datos energéticos**

La recolección de datos se realizó mediante una revisión documental de fuentes institucionales y técnicas del sector energético colombiano. Se consultaron informes oficiales, bases de datos energéticas y reportes estadísticos publicados por entidades como el Ministerio de Minas y Energía, la Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME), el operador del sistema XM y organismos internacionales del sector energético.

El criterio de búsqueda se enfocó en documentos publicados entre 2015 y 2026 que incluyeran información sobre la composición de la matriz energética nacional, la participación de las fuentes de generación, la capacidad instalada y los niveles de generación eléctrica. Posteriormente, la información recopilada se organizó y clasificó según el tipo de fuente energética y variables como capacidad instalada y generación anual, con el fin de estructurar una base de datos para el análisis de la canasta energética nacional y la evaluación de alternativas de diversificación energética.

#### **4.1.2. Procesamiento y visualización de datos**

Organizar la información en bases de datos y representarla gráficamente mediante diagramas de flujo, tablas comparativas y mapas georreferenciados para identificar patrones de distribución regional y temporal.

#### **4.1.3. Análisis de tendencias históricas**

Evaluar la evolución de la canasta energética en los últimos 5 años mediante series temporales, destacando cambios en la proporcionalidad de las fuentes y factores asociados (políticas, clima, demanda).

### **4.2. Etapa II: Viabilidad técnica y económica de nuclear y geotérmica**

#### **4.2.1. Revisión documental**

Analizar estudios de caso en Latinoamérica para extraer requisitos técnicos y costos estimados basado en artículos científicos.

#### **4.2.2. Consultas Técnicas**

Realizar entrevistas semiestructuradas con expertos vinculados a las áreas de energía nuclear y geotermia (Ver Apéndice A). Las preguntas base empleadas para el desarrollo de las entrevistas se encuentran consignadas en los anexos del trabajo (ver Apéndice B).

#### **4.2.3. Análisis comparativo**

Elaborar un análisis detallado para cada tecnología frente a las fuentes de energía nacionales actuales, en base a los datos recopilados.

### **4.3. Etapa III: Impacto ambiental de las fuentes energéticas**

#### **4.3.1. Revisión de indicadores ambientales**

Recopilar datos de emisiones de CO<sub>2</sub>, consumo de agua y uso de suelo por fuente (ej: termoeléctricas vs. Solar), usando informes oficiales.

### 5. Resultados

A continuación, se presentan los resultados obtenidos a partir del análisis de la canasta energética colombiana actual, la evaluación técnico-económica de fuentes emergentes como la energía nuclear y geotérmica, y el estudio de sus impactos ambientales. Los resultados se organizan en función de los objetivos específicos de la investigación, y se estructuran en cuatro secciones: distribución y proporcionalidad de la matriz energética, viabilidad técnica y económica, impacto ambiental de las fuentes energéticas y la percepción social que se tiene frente a la implementación de estas energías.

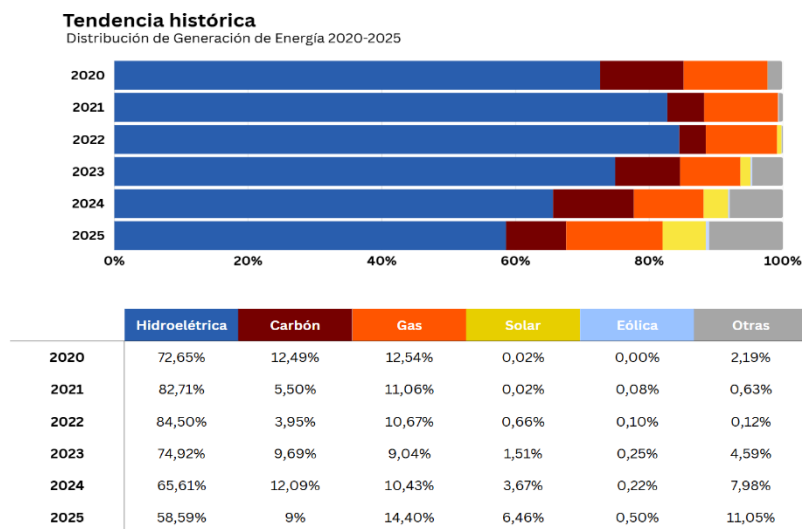
#### 5.1. Distribución y proporcionalidad de la canasta energética nacional

En esta sección se analiza la composición actual de la matriz energética, destacando la participación relativa de cada fuente y su distribución geográfica.

La energía hidroeléctrica domina con 66,4 %, seguida de la termoeléctrica con 30,2 %, mientras que la energía solar representa apenas el 2,5 %, evidenciando la fuerte dependencia del país de la generación hídrica (DNP, 2024).

**Figura 3**

*Distribución energética en Colombia 2020-2025.*



*Nota:* Elaboración propia con base a los datos del Balance Energético Colombiano (BECO).

Colombia presenta una matriz altamente fluctuante. Según los datos del BECO (2025), la disminución del recurso hídrico obliga al país a recurrir a un 23.4% de generación térmica (carbón y gas), reflejando los desafíos pendientes en materia de diversificación y resiliencia frente a la variabilidad climática y riesgos de seguridad energética.

### **5.1.1. Participación porcentual por fuente desde hace 10 años**

A partir de mediados de la década de 2010, la matriz energética de Colombia ha sido objeto de análisis y planificación estratégica mediante ejercicios prospectivos como el Plan Energético Nacional: Ideario Energético 2050, desarrollado por la Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME). Este documento plantea la necesidad de avanzar hacia una matriz más diversa y sostenible, incorporando progresivamente energías renovables no convencionales (eólica, solar, geotérmica y biomasa) junto con las fuentes tradicionales de generación eléctrica.

En los escenarios que se proyectan anteriormente, se estima que estas fuentes podrían alcanzar participaciones relevantes en la capacidad instalada total, dependiendo del desarrollo tecnológico y del fortalecimiento de políticas públicas orientadas a la transición energética (UPME, 2025).

En términos de composición, hacia 2015 la generación eléctrica estaba concentrada principalmente en tecnologías convencionales, donde la combinación de hidroeléctricas y plantas térmicas constituía la mayor parte de la capacidad instalada del país, mientras que las energías renovables no convencionales tenían una presencia marginal dentro del sistema. Esta estructura comenzó a transformarse gradualmente gracias a subastas de energía, incentivos regulatorios y la incorporación de nuevos proyectos de generación renovable (UPME, 2015).

El análisis de la evolución de la matriz energética colombiana evidencia que la generación hidroeléctrica ha mantenido históricamente la mayor participación dentro del sistema eléctrico nacional. Esta alta dependencia ya había sido identificada como un factor de vulnerabilidad desde 2016, cuando el fenómeno de El Niño redujo significativamente los caudales hídricos y tensionó la capacidad de generación eléctrica del país, poniendo en evidencia la necesidad de diversificar las fuentes para fortalecer la seguridad energética nacional (Contreras, 2016).

Para marzo de 2025, los datos del operador del Sistema Interconectado Nacional indican

que la capacidad efectiva neta instalada alcanzó aproximadamente 20 858 MW (Portal XM, 2025), aparte de que se confirman que más de 3 gigavatios (GW) de capacidad de generación limpia ya están conectados al sistema eléctrico nacional, lo que representa más de un 10% de la matriz energética y multiplica por 15 la capacidad instalada frente al 2018 (Minenergía, 2025). Estas cifras reflejan que, aunque las fuentes convencionales continúan desempeñando un papel importante en la estabilidad del sistema, se observa un crecimiento progresivo de tecnologías renovables no convencionales dentro de la matriz eléctrica nacional.

En conjunto, la comparación entre el periodo cercano a 2015 y la situación actual muestra una trayectoria de diversificación gradual de la matriz energética colombiana. Este proceso ha sido impulsado por instrumentos de política pública, planificación sectorial y nuevos desarrollos tecnológicos que buscan reducir riesgos asociados a la variabilidad climática, mejorar la seguridad energética y avanzar hacia un sistema eléctrico más sostenible y resiliente.

Estas cifras evidencian una tendencia gradual hacia la diversificación de la matriz energética del país, impulsada por la incorporación de nuevos proyectos de energías renovables y por las políticas de transición energética. No obstante, la generación hidroeléctrica continúa siendo el pilar principal del sistema eléctrico colombiano, aportando en promedio cerca del 60 % de la generación total de electricidad, lo que confirma la persistente dependencia del país de los recursos hídricos y su exposición a variaciones climáticas prolongadas.

### **5.1.2. Concentración geográfica**

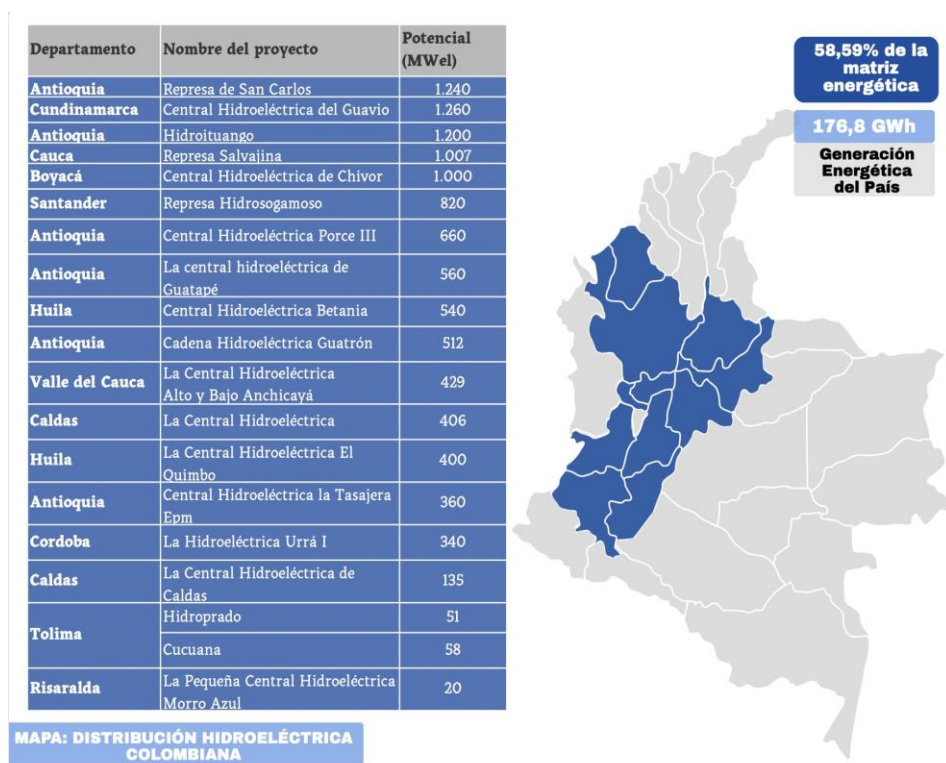
Para el análisis de la concentración geográfica de las fuentes energéticas en Colombia, se organizaron tablas y mapas a partir de la información recopilada sobre la ubicación de los principales proyectos y zonas con potencial energético en el país. Los datos fueron sistematizados según el tipo de fuente energética y su localización regional, permitiendo identificar patrones espaciales de distribución. Posteriormente, esta información se representó mediante mapas y figuras que ilustran la localización de las diferentes tecnologías energéticas, con el fin de facilitar la visualización de las áreas con mayor concentración de recursos y proyectos asociados a cada fuente de generación.

### 5.1.2.1. Energía hidroeléctrica

En el contexto de transición energética global, Colombia presenta una matriz energética predominantemente renovable, sustentada en una alta dependencia de la generación hidroeléctrica (58%). El mapa de distribución de plantas hidroeléctricas (Figura 4) revela que la mayor capacidad instalada se concentra en departamentos como Antioquia (con proyectos masivos como San Carlos de 1,240 MW e Hidro Ituango de 1,200 MW), Cundinamarca (El Guavio de 1,260 MW) y Boyacá (Chivor de 1,000 MW).

**Figura 4**

*Distribución de centrales hidroeléctricas.*



El mapa y la tabla evidencian que la infraestructura hidroeléctrica colombiana se concentra principalmente en la región Andina, especialmente en los departamentos de Antioquia, Cundinamarca, Boyacá, Santander, Huila y Valle del Cauca, donde se ubican las centrales de mayor capacidad instalada del país, como San Carlos, El Guavio e Hidroituango. Esta distribución territorial muestra que la generación hídrica depende en gran medida de zonas con alta disponibilidad de recursos hídricos y condiciones topográficas favorables, lo que explica su aporte mayoritario a la matriz energética nacional (58,59 %).

Se debe destacar que Colombia cuenta con dos tipos principales de configuraciones hidroeléctricas que impactan directamente la seguridad energética del país: centrales de embalse y centrales a filo de agua. Las centrales de embalse, como El Quimbo o San Carlos, permiten almacenar energía en forma de agua mediante grandes reservorios.

Estas instalaciones son fundamentales para la regulación del sistema eléctrico, ya que permiten ajustar la generación de energía según la demanda a través del almacenamiento y la liberación controlada del agua; sin embargo, su construcción enfrenta crecientes barreras sociales y ambientales debido a la intervención del territorio y los ecosistemas (International Hydropower Association, 2020).

Por otro lado, las centrales a filo de agua dependen directamente del caudal instantáneo del río y poseen una capacidad de almacenamiento prácticamente nula, por lo que su generación está más sujeta a las condiciones hidrológicas (International Hydropower Association, 2020).

En Colombia, la matriz hidroeléctrica está compuesta por un número significativo de ambas configuraciones, predominando las centrales de embalse dentro de las grandes plantas de generación del Sistema Interconectado Nacional, mientras que las centrales a filo de agua se presentan con mayor frecuencia en proyectos de menor escala o pequeñas centrales hidroeléctricas.

Mientras la generación hidroeléctrica depende de la disponibilidad hídrica y del nivel de los embalses, tecnologías como la energía nuclear y la geotérmica ofrecen generación firme y constante, con factores de planta superiores al 90 % para nuclear y del 60% para geotérmica (U.S. Department of Energy, 2025), lo que les permite operar de forma continua sin depender del ciclo hidrológico.

#### **5.1.2.2. Energías solar y eólica**

La distribución geográfica de los proyectos de energía solar y eólica en Colombia (Figura 5), revela una concentración crítica en la región Caribe, los llanos y el departamento de La Guajira.

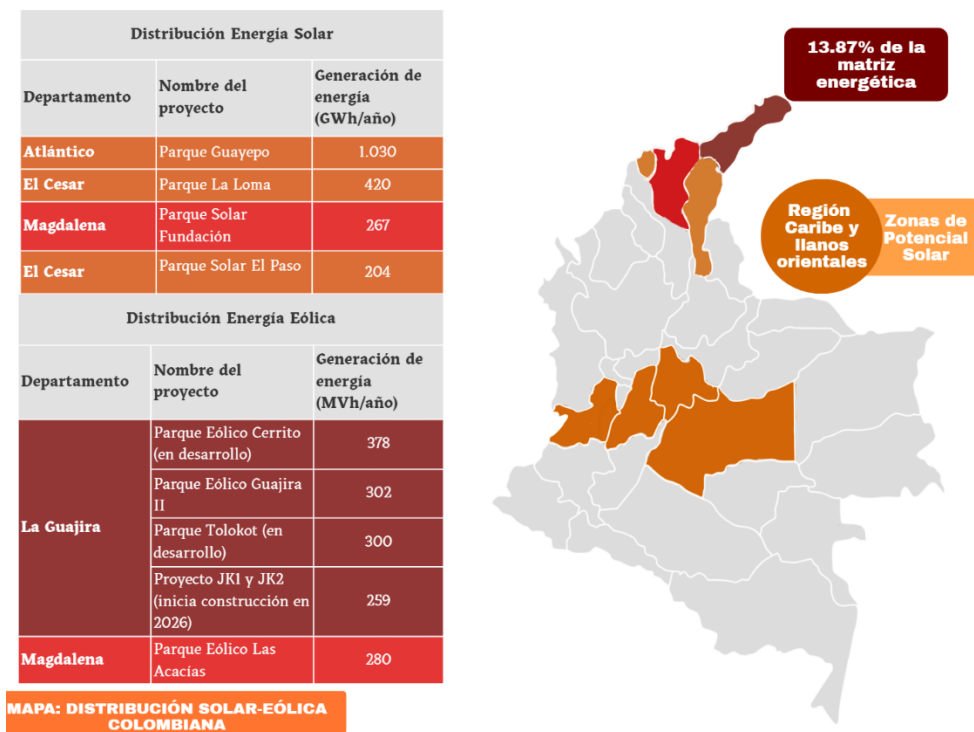
Actualmente, el Sistema Interconectado Nacional (SIN) presenta una estructura que limita la eficiencia de la transición energética del norte y centro del país. El enlace entre la región

Caribe y el interior del país (donde se encuentran los centros de consumo masivo como Bogotá y Medellín) tiene límites técnicos de estabilidad. La saturación de las líneas que conectan estas zonas significa que, aunque La Guajira produzca miles de megavatios eólicos, existe el riesgo de que esa energía no pueda ser "evacuada" hacia el centro del país por falta de capacidad en la red (XM, 2025).

No obstante, el país ha mostrado avances importantes en la incorporación de energías renovables, superando por primera vez los 3 gigavatios (GW) de capacidad de generación limpia conectada al sistema eléctrico nacional, lo que representa más del 10 % de la matriz energética y supone un crecimiento significativo, multiplicando por quince veces la capacidad instalada registrada en 2018. Este incremento refleja el avance de la transición energética en Colombia, aunque también evidencia la necesidad de fortalecer la infraestructura de transmisión para garantizar la integración eficiente de estas nuevas fuentes de generación (Minenergía, 2025).

**Figura 5**

*Distribución de energías renovables (Solar-Eólica).*



Adicionalmente, a partir de la información presentada en la Figura 5 se identificaron los proyectos solares y eólicos con generaciones superiores a 200 GWh/año, entre los que destacan,

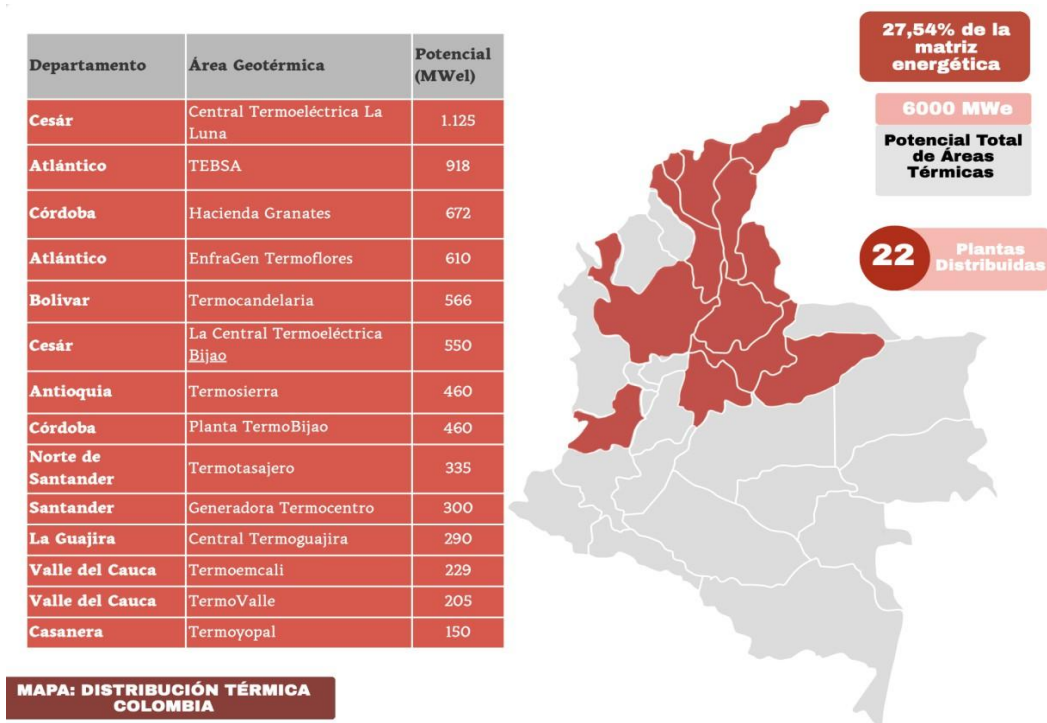
para energía solar, Parque La Loma, Parque Solar El Paso, Parque Guayepo y Parque Solar Fundación, y para energía eólica Parque Eólico Cerrito, Guajira II, Toloket, JK1 y JK2, y Las Acacias. Estos proyectos representan algunos de los desarrollos más relevantes dentro de la expansión reciente de energías renovables en el país.

### 5.1.2.3. Energía térmica

El mapa de Distribución Térmica en Colombia presentado en la figura 6 revela una configuración geográfica estratégica que responde a la necesidad de respaldar el sistema ante la variabilidad climática.

**Figura 6**

*Distribución de plantas térmicas.*



A diferencia de las fuentes renovables y la hidroelectricidad, la generación térmica presenta una distribución más dispersa, con una presencia marcada en regiones clave para el soporte de red. Es importante notar que estas plantas operan principalmente bajo despacho centralizado (su operación es programada por el administrador del sistema según criterios de costo y demanda) y utilizan combustibles como gas natural, carbón o líquidos.

Esta característica las convierte en el complemento necesario de la hidroelectricidad,

aunque su dependencia de combustibles fósiles refuerza la necesidad de búsqueda de alternativas de menor impacto ambiental (Ortiz Jara P. Pérez Arriaga J, et al., 2020).

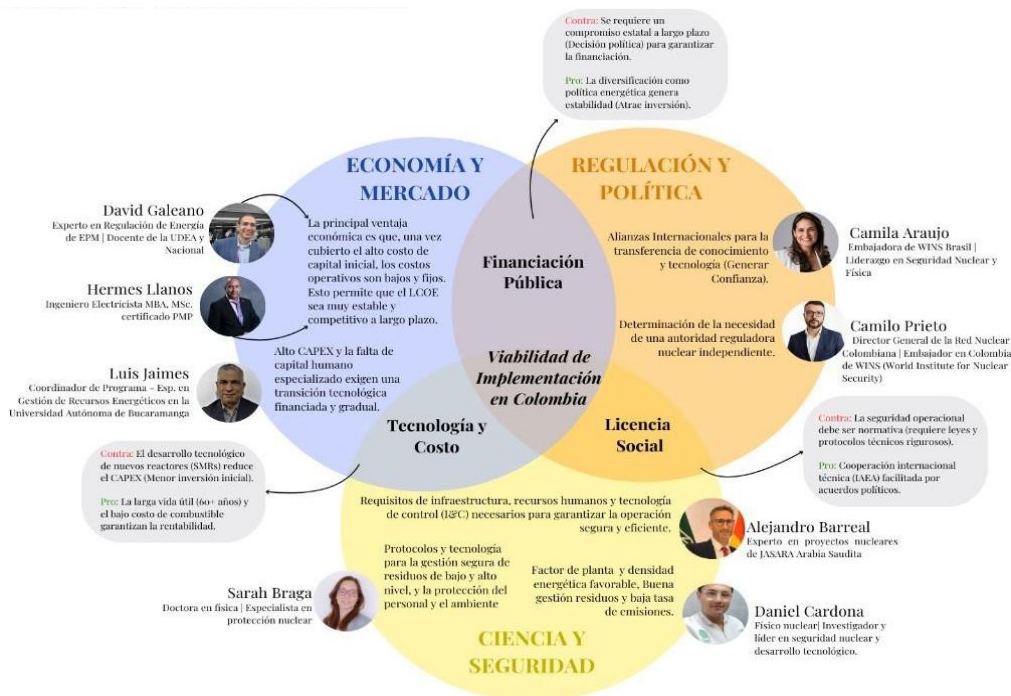
La carencia de una fuente de carga base sólida y descarbonizada en el sur y centro del país constituye el vacío técnico que justifica la integración de la energía nuclear y geotérmica. En este contexto, la incorporación de tecnologías como la energía nuclear y la geotérmica permitiría complementar la generación existente con fuentes firmes y bajas en carbono, equilibrar la red, optimizar la infraestructura de transmisión existente y consolidar una matriz autónoma que no dependa exclusivamente de la geografía del agua o del viento, sino de una planificación tecnológica que se construya sobre una soberanía energética resiliente.

### 5.2. Energía Nuclear

Esta sección introduce el estudio de los pilares fundamentales para la implementación de la energía nuclear en Colombia, esto se efectuó mediante la recopilación de información por medio de entrevistas a expertos, en dónde se recalcaron ideas clave según los enfoques de evaluación de los Marcos Regulatorios, la viabilidad técnico-económica, el impacto ambiental y el proceso para la implementación de la energía nuclear a nivel nacional e internacional.

**Figura 7**

*Diagrama de Venn expertos en energía nuclear.*



En la figura 7 se expone en forma de *Diagrama de Venn* el desglose de los distintos enfoques analíticos y los expertos que participan en cada una de ellas. A continuación, la profundización correspondiente a cada enfoque.

### **5.2.1. Política y regulación: Marcos regulatorios energía nuclear**

El análisis de los marcos regulatorios es fundamental para entender las posibilidades reales de introducir la energía nuclear en el país. En Colombia, el Proyecto de Ley 466 de 2024, que enuncia la creación de la Autoridad Nacional de Seguridad Nuclear (ANSN) bajo la necesidad de contar con un ente regulador independiente con el fin de garantizar seguridad, transparencia y confianza pública.

Además de lo anteriormente comentado, la cooperación internacional especialmente con organismos como el OIEA (Organismo Internacional de Energía Atómica) y países con experiencia nuclear se vuelve clave para fortalecer capacidades técnicas, normativas y de supervisión.

La implementación de un proyecto nuclear a gran escala en un país con nula experiencia previa, como Colombia, exige un proceso regulatorio estructurado y bien definido. Al respecto, Alejandro Barreal, experto en análisis de riesgos de JASARA (compañía líder en la gestión de los proyectos de infraestructura más complejos y estratégicos de Arabia Saudita) detalla que el primer y más crítico paso es la creación de una ley nuclear a nivel nacional.

Alejandro Barreal subraya que este proceso no es un ejercicio de invención desde cero. Los países emergentes se apoyan en la experiencia y las guías de organismos internacionales como la Agencia Internacional de Energía Atómica (IAEA). Además, se nutren de la colaboración con los consejos reguladores de países con una larga trayectoria nuclear, como Estados Unidos, Francia, China, Rusia y el Reino Unido. Este modelo permite a las nuevas naciones establecer un marco sólido, tomando lo mejor de las prácticas existentes y adaptándolas a sus propias necesidades.

El marco regulatorio está en proceso de maduración para el despliegue a gran escala. El Proyecto de Ley 466 de 2024, presentado en el Congreso, tiene como objetivo establecer la Autoridad Nacional de Seguridad Nuclear (ANSN) con funciones de control regulatorio para el

uso seguro y pacífico de las tecnologías nucleares, en línea con los estándares del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) (LEY NUCLEAR | Cámara de Representantes, 2024).

Este proyecto, que ha mostrado avances positivos en su tramitación legislativa, incluye disposiciones para la gestión de residuos radiactivos, la regulación de la exposición a la radiación con un enfoque riguroso en la seguridad física y cibernética de las instalaciones.

El fortalecimiento institucional necesario para aplicar este marco regulatorio no depende únicamente de la normativa, sino también del desarrollo de capacidades técnicas nacionales. En ese sentido, Luis Jaimes, docente de la Universidad Autónoma de Bucaramanga (UNAB), señala la escasez de profesionales especializados en el sector nuclear y la necesidad de formar ingenieros con estudios de maestría y doctorado para garantizar la capacidad técnica del país. Asimismo, destaca la importancia de impulsar la divulgación científica y la educación pública para disminuir la percepción de riesgo y favorecer la aceptación social de esta tecnología.

Colombia ha fortalecido su cooperación internacional en el ámbito nuclear. En febrero de 2026, el Ministerio de Minas y Energía suscribió un Memorando de Entendimiento con el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) para evaluar la viabilidad de la energía nuclear como alternativa de diversificación energética y fortalecimiento de la seguridad eléctrica. El acuerdo incluye cooperación técnica, adopción de buenas prácticas regulatorias, planificación energética y análisis de pequeños reactores modulares, en concordancia con estándares internacionales (Ministerio de Minas y Energía, 2026).

En coherencia con estos avances, la ley colombiana “Átomos para la Vida” se consolida como la base institucional sobre la cual deberá estructurarse la política nuclear nacional. Esta normativa busca sentar los fundamentos regulatorios para el desarrollo de esta fuente energética en el país, priorizando la seguridad sobre consideraciones de costo, tiempo u otros factores operativos.

### **5.2.2. Economía y Mercado: Viabilidad Técnico-Económica**

La viabilidad técnico-económica de la energía nuclear constituye uno de los elementos más determinantes para comprender su potencial dentro de la transición energética nacional. Este análisis abarca indicadores clave como lo son: su Costo Nivelado de la Energía (LCOE), los

requerimientos de inversión inicial (CAPEX), los costos de operación y mantenimiento (OPEX) y la vida útil de las instalaciones, que en conjunto permiten evaluar la competitividad real de esta tecnología frente a otras fuentes de generación.

En el contexto de los reactores modulares pequeños (SMR), la economía del despliegue, entendida como la reducción de costos lograda mediante la estandarización y la fabricación en serie de múltiples unidades, adquiere nuevas dinámicas, ya que estos diseños prometen menores riesgos de capital, escalabilidad y oportunidades de reconversión industrial según las necesidades del sistema eléctrico. Este subcapítulo examina estos factores de manera integral para determinar en qué condiciones la energía nuclear puede ser una opción económicamente viable y estratégica para países en desarrollo tal y como lo es el caso de Colombia.

#### **5.2.2.1. CAPEX y OPEX de la energía nuclear en el contexto colombiano**

Desde el punto de vista económico, la energía nuclear se caracteriza por presentar altos costos de inversión inicial (CAPEX) y costos operativos (OPEX) relativamente bajos, lo que permite a largo plazo que el costo nivelado de la energía (LCOE) resulte competitivo

En términos de operación, las centrales nucleares están diseñadas para una vida útil de entre 60 y 80 años (Endesa, 2024), lo que representa una ventaja estructural frente a tecnologías como la solar fotovoltaica, cuya vida útil promedio es cercana a 25 años. Esta característica favorece la amortización de la inversión inicial y contribuye a la estabilidad del suministro eléctrico a largo plazo. En cuanto al OPEX, diversos estudios reportan que este representa una fracción reducida del costo total del proyecto, generalmente inferior al 20–30 % del costo nivelado de la energía (LCOE), lo cual impacta positivamente la competitividad de estas tecnologías (IRENA, 2024).

En particular, el análisis de costos evidencia que la mayor proporción del LCOE en fuentes como la solar y la eólica está asociada a la inversión inicial (CAPEX), mientras que los costos operativos son relativamente bajos. (IRENA, 2024)

Estos resultados son consistentes con los aportes de Hermes Orlando Llanes Rincón, Ingeniero Electricista quien, a partir de su experiencia en planeación, ejecución y gerencia de proyectos energéticos incluyendo energía nuclear y energías renovables, resalta que la reducción

progresiva de costos observada en la tecnología nuclear se debe principalmente a la estandarización de diseños, los avances tecnológicos y la optimización en la gestión de proyectos.

#### **5.2.2.2. Reactores Modulares Pequeños (SMRs)**

La viabilidad económica de los pequeños reactores modulares (SMRs) en Colombia se sustenta en el análisis del Costo Nivelado de la Energía (LCOE). Un estudio basado en simulaciones de Monte Carlo estima un LCOE mediano de 77,71 USD/MWh para un SMR de 300 MW en el periodo 2038-2042 (Prieto Camilo, 2025), valor comparable con el de las plantas de carbón, cuyo LCOE se aproxima a 78 USD/MWh (Idel, 2022). Aunque las centrales nucleares presentan una alta inversión inicial (CAPEX), su competitividad a largo plazo radica en menores costos de operación y combustible.

Alejandro Barreal, con su experiencia en reactores de gran potencia, ofrece una perspectiva crucial sobre la transición de la industria hacia los Reactores Modulares Pequeños (SMR). Los reactores de gran potencia son centrales nucleares diseñadas para producir enormes cantidades de electricidad de forma continua y abastecer grandes ciudades o regiones completas. Sin embargo, su construcción exige inversiones muy elevadas, largos tiempos de desarrollo y complejos procesos regulatorios.

Esta magnitud los convierte en proyectos financieramente riesgosos para los inversionistas, situación que ha provocado retrasos y la cancelación de varios proyectos a nivel internacional. Por ello, Barreal señala que el cambio hacia los SMR responde no solo a una innovación tecnológica, sino también a la necesidad de contar con alternativas más flexibles y viables. La transición hacia esta tecnología se debe analizar no solo desde una perspectiva técnica, sino también como una solución a los fracasos financieros de los proyectos de gran escala. El modelo de negocio de los SMRs, con su menor perfil de riesgo de inversión, podría ser particularmente apropiado para un mercado emergente como el de Colombia.

#### **5.2.3. Criterios de localización de una planta nuclear**

Como detalla Camilo Prieto, director de la Red Nuclear Colombiana y profesor de Energía y Sostenibilidad en la Pontificia Universidad Javeriana, los factores cruciales para seleccionar una ubicación en Colombia para una central nuclear, que aplican a cualquier proyecto

energético, comprenden:

- Control territorial robusto por parte del Estado.
- Nivel de conflictividad socioambiental en el lugar.
- Sismicidad.
- Proximidad a una fuente de agua (si se opta por un reactor refrigerado por agua).
- Conectividad al sistema de transmisión nacional.

Al hacer un análisis de los factores mencionados anteriormente, se proponen 2 zonas potenciales para la implementación efectiva de la energía nuclear en el país, Puerto Gaitán y Puerto Berrío, minimizando la dispersión de puntos de generación nucleoelectrónica en Colombia, por asuntos de seguridad, debido a que el país aún se encuentra en conflicto armado, esto infiere la necesidad de reducir la complejidad de un protocolo de seguridad concentrando en menos lugares la ubicación de reactores SMR.

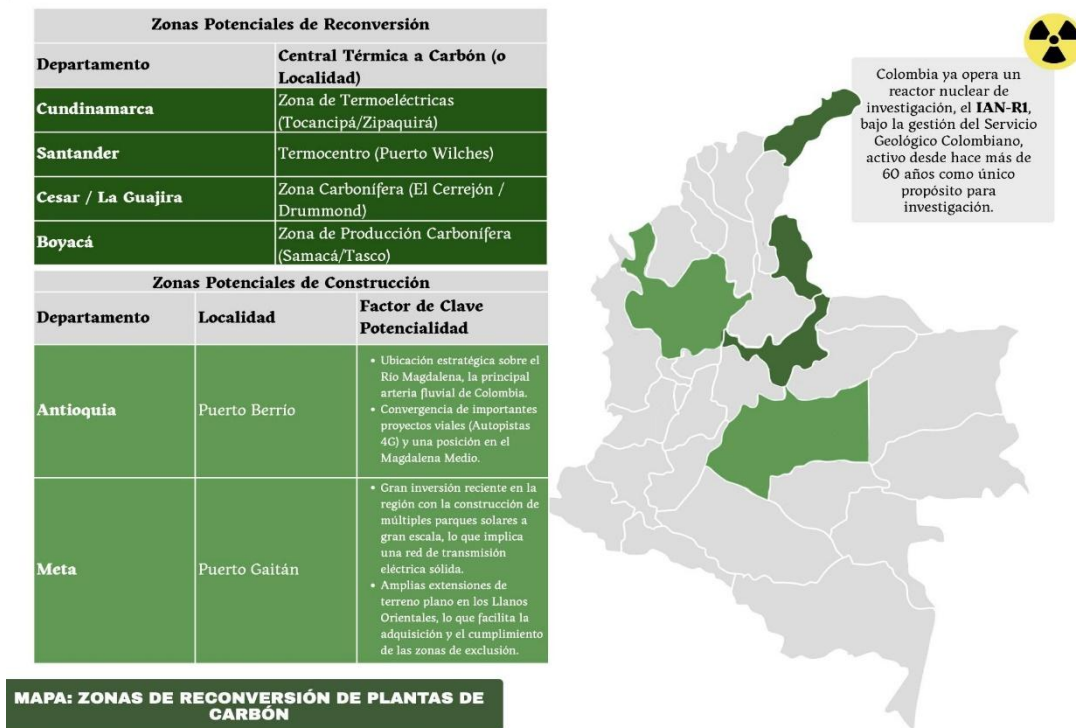
Estas dos zonas clave cuentan con sismicidad baja, recursos hídricos provenientes del Río Magdalena, Río Meta y Río Manacacías, cercanía a la red nacional de transmisión eléctrica, accesibilidad mediante la ruta nacional 40, baja densidad poblacional y ausencia de fallas geológicas e hidrometeorológicas (Enrique et al., 2025).

Camilo Prieto plantea una estrategia que podría facilitar la implementación de proyectos nucleares en el país, la cual consiste en la reconversión de centrales térmicas a carbón actualmente existentes. Estas infraestructuras cuentan con ventajas estratégicas importantes tales como: control territorial previamente establecido, conexión al sistema eléctrico nacional susceptible de fortalecimiento, información histórica sobre condiciones sísmicas y un uso del suelo ya orientado a la generación de energía, factores que pueden ser aprovechados para optimizar la transición tecnológica.

En la figura 8 se representan las zonas con potencial para procesos de reconversión y construcción, identificando los departamentos donde se ubican las centrales térmicas, así como su localización específica y los factores técnicos que determinan su viabilidad para futuros proyectos energéticos.

**Figura 8**

*Plantas de reconversión y propuestas de locación.*



Esta estrategia de transición encuentra un sólido respaldo en el estudio "Modeling the transition from coal to SMRs in Colombia" (Prieto Valderrama & Patiño, 2025). Dicha investigación cuantifica que el reemplazo progresivo de las plantas de carbón por Reactores Modulares Pequeños (SMRs), podría evitar emisiones acumuladas de aproximadamente 76.04 millones de toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente, entre 2035 y 2052 (Prieto Valderrama & Patiño, 2025).

La viabilidad de esta propuesta radica en que las centrales térmicas existentes ya reúnen de base muchos de los requisitos críticos (Prieto Valderrama & Patiño, 2025). Este enfoque no solo mitiga los desafíos de localización y licenciamiento, sino que también representa una oportunidad estratégica para revitalizar territorios energéticos existentes, acelerando una transición técnicamente viable y ambientalmente crucial para el país.

### 5.2.4. Ciencia y Seguridad

Estos factores constituyen pilares técnicos esenciales en cualquier proyecto nuclear, ya que determinan los procedimientos de gestión integral de residuos radiactivos según su nivel de

actividad (baja, media y alta), así como los sistemas de confinamiento, almacenamiento temporal y disposición final del combustible gastado. Asimismo, definen la aplicación de protocolos de protección radiológica basados en el principio ALARA (As Low As Reasonably Achievable), que establece límites estrictos de exposición para trabajadores ocupacionalmente expuestos y para el público en general (CDC, 2024).

Desde el punto de vista operativo, el control del agua utilizada en los sistemas de enfriamiento resulta crítico para garantizar la estabilidad térmica del reactor y evitar liberaciones no controladas de material radiactivo. Estos sistemas incorporan circuitos cerrados de refrigeración, torres de enfriamiento y monitoreo continuo de temperatura, presión y niveles de radiación.

De manera complementaria, el cumplimiento de normativas internacionales como las establecidas por el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) exige la implementación de múltiples barreras de seguridad física, sistemas redundantes de respaldo eléctrico y protocolos de respuesta ante emergencias, asegurando que las instalaciones operen bajo estándares globales de seguridad nuclear y protección ambiental.

#### **5.2.4.1. Impacto ambiental**

El impacto ambiental de la energía nuclear se caracteriza por presentar emisiones muy bajas durante su operación, aunque requiere una gestión rigurosa de los residuos radiactivos y del uso del agua en los sistemas de enfriamiento. Los análisis de ciclo de vida muestran que esta tecnología produce en promedio 9 g CO<sub>2</sub>-eq/kWh, valor considerablemente inferior al de las fuentes fósiles convencionales (Ministerio de Minas y Energía, 2025).

En comparación, tecnologías como el carbón y el gas natural registran emisiones promedio de 1290 y 1234 g CO<sub>2</sub>-eq/kWh respectivamente, lo que indica que la energía nuclear puede emitir entre 143 y 137 veces menos gases de efecto invernadero por unidad de electricidad generada.

Cuando se cumplen las normas internacionales de seguridad y protección, la huella ecológica total resulta significativamente menor en comparación con tecnologías basadas en carbón o gas natural. No obstante, siguen existiendo desafíos asociados al almacenamiento

seguro de residuos de alta actividad a largo plazo y a la protección de los ecosistemas cercanos a las instalaciones nucleares.

**5.2.4.1.1. Clasificación y manejo de los residuos radiactivos**

Los residuos radiactivos se definen como aquellos materiales que contienen radionucleidos, es decir, átomos con núcleos inestables que emiten radiación ionizante. A diferencia de los desechos convencionales, el riesgo en la gestión de estos materiales no se limita a peligros químicos o biológicos, sino que emana de su capacidad para liberar energía en forma de radiación, durante un período de tiempo que puede extenderse desde minutos hasta cientos de miles de años.

La Tabla 1 consolida los criterios y las características de las cinco categorías de clasificación del OIEA, ilustrando la progresión de los requisitos de gestión a medida que aumenta el nivel de peligro y la persistencia de los residuos.

**Tabla 1**

*Clasificación y disposición de residuos radiactivos.*

<b>Categoría</b>	<b>Criterios Principales</b>	<b>Requisitos de Gestión</b>
VSLW (Muy Corta Vida)	Período de semidesintegración corto ( $\leq 1$ año).	Almacenamiento temporal para decaimiento.
VLLW (Muy Bajo Nivel)	Nivel de radiactividad bajo.	Aislamiento y confinamiento básicos.
LLW (Bajo Nivel)	Alta radiactividad, pero vida media corta.	Aislamiento por hasta varios cientos de años.
ILW (Intermedio)	Alta radiactividad, vida media larga, no genera calor.	Aislamiento a largo plazo.
HLW (Alto Nivel)	Alta radiactividad, vida media larga, genera calor.	Máximo grado de contención y aislamiento.

*Nota.* Adaptado de Clasificación de los desechos radiactivos: Guía de seguridad, por el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA), 2015.

Una de las principales fuentes de desinformación y temor público es la gestión de los residuos radiactivos. Alejandro Barreal identifica este tema como un "desconocimiento muy grande que tiene la población". La estrategia de comunicación debe abordar este punto con total transparencia, explicando cómo se gestionan, almacenan y aseguran estos residuos para evitar cualquier riesgo radiológico a la población.

La especialista Sarah Braga Käser refuerza el punto anterior, subrayando que la gestión de residuos es muy importante y debe planificarse desde el inicio de cualquier proyecto. Hace hincapié en que el país es responsable de los residuos "para siempre", especialmente por los materiales de vida larga, lo que requiere un compromiso de monitoreo y gestión a muy largo plazo de los sitios de disposición final.

Es importante aclarar que la gestión de los residuos es un costo operativo que se incluye en la planificación económica de un proyecto nuclear. Además, el 97 % de los residuos producidos se clasifican como residuos de actividad baja o intermedia (RBI o RBMI). Estos residuos se han eliminado ampliamente en depósitos superficiales durante muchos años.

En Francia, donde se reprocesa el combustible, solo el 0,2 % de todos los residuos radiactivos por volumen se clasifican como residuos de actividad alta (RBA) en comparación con los volúmenes masivos de desechos de la generación con combustibles fósiles, como las cenizas de carbón o los gases de efecto invernadero (World Nuclear Association, 2025).

A diferencia de los residuos de combustibles fósiles, que se liberan de manera continua a la atmósfera, los residuos nucleares son contenidos y gestionados de forma segura. Sarah Braga añade que, con una gestión técnica estricta y responsable, los residuos nucleares presentan un riesgo mucho menor comparado con la contaminación continua de otras fuentes, ya que su radiotoxicidad está concentrada y es manejable con contención técnica.

Complementando esta idea, el físico Daniel Cardona afirma que la energía nuclear destaca por su alta densidad energética, lo que permite generar grandes cantidades de electricidad con una pequeña cantidad de combustible. Esta característica se traduce en una de las menores tasas de emisiones de gases de efecto invernadero a lo largo de todo su ciclo de vida, incluso al compararse con otras tecnologías de generación de gran escala como ya se mencionó anteriormente.

Adicionalmente, la industria nuclear se distingue por ser la única que gestiona de manera integral sus residuos, asumiendo su responsabilidad desde la generación hasta la disposición final, bajo estrictos estándares de seguridad, lo que refuerza su desempeño ambiental y su confiabilidad como fuente energética de largo plazo.

#### **5.2.4.2. El Recurso Hídrico: Mitos, Realidades.**

La energía nuclear se clasifica como una tecnología intensiva en agua en comparación con otras opciones de baja emisión de carbono, como la energía eólica y la solar fotovoltaica (Davis & Clemmer, 2014). El Instituto de Energía Nuclear estima que un reactor nuclear requiere entre

1.514 y 2.725 litros de agua por MWh generado, lo que equivale a miles de millones de galones de agua al año en centrales de gran potencia (Globaqua, 2022). Esta elevada demanda hídrica se debe principalmente a los sistemas de enfriamiento del reactor, donde el agua debe ser continuamente filtrada y tratada para mantener condiciones seguras de operación. Al igual que todas las centrales termoeléctricas (incluidas las de carbón y muchas de gas natural); este proceso se traduce en grandes volúmenes de uso de agua. Por esto, Camilo Prieto aclara que no todos los reactores dependen del agua para la refrigeración; algunos utilizan gas o plomo.

#### **5.2.5. La energía nuclear en Latinoamérica**

La energía nuclear en América Latina ha experimentado un desarrollo heterogéneo, con países como Argentina y Brasil liderando la implementación de reactores nucleares comerciales, mientras que otras naciones exploran esta tecnología como una opción estratégica para diversificar su matriz energética y fortalecer la seguridad energética.

A pesar de los avances, la región enfrenta desafíos significativos relacionados con la infraestructura, la regulación y la aceptación pública, que condicionan la expansión de esta fuente energética. Este contexto regional es fundamental para entender las perspectivas y limitaciones de la energía nuclear en Colombia, donde la adopción de tecnologías emergentes como los Reactores Modulares Pequeños (SMRs) podría representar una oportunidad contribuir a la diversificación del sector energético nacional.

El proyecto argentino CAREM-25 se destaca como un ejemplo pionero, al ser uno de los SMR más avanzados a nivel mundial, con la ventaja de ser un diseño completamente nacional y de utilizar uranio de bajo enriquecimiento (LEU), lo que lo hace más accesible para la región (Zappino, 2023.); además, cuenta con una capacidad de generación de 32 megavatios eléctricos (Argentina.gob.ar, 2022). Este avance tecnológico no solo posiciona a Argentina como referente regional en innovación nuclear, sino que también refuerza la importancia de los marcos de

cooperación internacional que garantizan el uso pacífico de esta tecnología.

Bajo el argumento del párrafo anterior, resulta pertinente fortalecer el Tratado de Tlatelolco, firmado en 1967, el cual estableció la primera zona libre de armas nucleares en una región densamente poblada y promovió la seguridad y la confianza entre los países de América Latina y el Caribe (UNESCO, 2016). El fortalecimiento de este acuerdo facilitaría la atracción de inversión extranjera y permitiría que países sin experiencia nuclear, como Colombia, puedan desarrollar programas nucleares bajo estándares internacionales de seguridad y transparencia.

Asimismo, Brasil cuenta actualmente con dos reactores en operación en Angra dos Reis (Angra 1 y Angra 2), mientras que Angra 3 se encuentra en construcción; la experiencia brasileña es particularmente relevante para Colombia, ya que, como señala la especialista Sarah Braga, ambos países comparten una similitud fundamental en su matriz energética, la cual está predominantemente basada en la hidroeléctrica. Sarah Braga, basándose en esta similitud, destaca que contar con un reactor de investigación operativo, como es el caso de Colombia, constituye "un buen inicio" y una base valiosa sobre la cual se puede "continuar mejorando y creciendo el proyecto" nuclear.

La especialista también enfatiza la importancia del papel de los organismos internacionales en el desarrollo nuclear regional, señalando que los países pueden solicitar misiones del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) que muestren, expliquen y analicen el área donde se ubicarán las instalaciones, destacando que este apoyo es fundamental para países que inician sus programas nucleares. Este modelo de cooperación técnica ya ha sido implementado con éxito en varios países de la región y representa una vía eficaz para transferir conocimiento y mejores prácticas.

Sarah Braga identifica un desafío regulatorio crucial para la región: la necesidad de crear "una autoridad reguladora independiente y competente" que sea "totalmente independiente del gobierno o aspectos militares". Esta independencia, según la experta, es esencial para garantizar que las decisiones técnicas prevalezcan sobre consideraciones políticas, especialmente en contextos donde los cambios de gobierno pueden afectar la continuidad de los proyectos energéticos de largo plazo.

La integración regional de esfuerzos en formación de capital humano especializado representa otra área de oportunidad. Sarah Braga observa que el conocimiento nuclear suele quedar restringido a "un grupo pequeño que decide estudiar esto", lo que limita la base de expertos disponibles. Programas de formación conjuntos entre países latinoamericanos podrían optimizar recursos y acelerar el desarrollo de capacidades técnicas necesarias para operar y regular instalaciones nucleares de manera segura y eficiente.

América Latina ha quedado rezagada en el desarrollo de la energía nuclear en comparación con otras regiones. Una de las razones principales, aunque a menudo subestimada, es la fragmentación y la falta de estandarización en los marcos regulatorios. Destacando a su vez, que las variaciones nacionales en las regulaciones de seguridad presentan un obstáculo significativo para los diseños de reactores estandarizados internacionalmente. Cada país opera con sus propias reglas y procedimientos de concesión de licencias, lo que obliga a los proveedores a someterse a revisiones separadas, duplicadas y costosas para cada mercado.

#### **5.2.6. Aprovechamiento Térmico y de Radiación de la Energía Nuclear**

La energía nuclear ofrece un aprovechamiento térmico y de radiación con aplicaciones no eléctricas que pueden contribuir significativamente a la diversificación de la matriz energética colombiana, más allá de la generación de electricidad. Según Camilo Prieto, experto en seguridad nuclear y embajador del Instituto Mundial de Seguridad Nuclear en Colombia, estas aplicaciones incluyen usos industriales donde el calor residual de los reactores se aprovecha para procesos que requieren altas temperaturas, como la reformación de metano para producir hidrógeno o la desalinización de agua mediante destilación multietapa, lo que mejora la eficiencia energética y reduce emisiones en sectores como la petroquímica y el tratamiento de agua.

Adicionalmente, gracias a la producción de isótopos radioactivos se despliegan aplicaciones en medicina (por ejemplo, en radioterapia para tratamientos oncológicos) y agricultura, donde la radiación gamma se emplea para el tratamiento fitosanitario de frutas a fin de eliminar patógenos y extender la vida útil (Liou, 2022), el fitomejoramiento de semillas mediante mutagénesis inducida para desarrollar variedades resistentes (IAEA, 2025), o la esterilización de insectos machos en técnicas de control de plagas como la técnica del insecto estéril (SIT) (OIEA, 2025), promoviendo prácticas agrícolas sostenibles y seguras.

Estas aplicaciones no solo diversifican el uso de la energía nuclear en contextos como el colombiano, donde la transición energética prioriza fuentes limpias y multifuncionales, sino que también alinean con estándares internacionales de seguridad y eficiencia ambiental.

### **5.2.7. Percepción pública de la energía nuclear, una labor de desmitificación**

El desconocimiento generalizado sobre la energía Nuclear en Colombia es un obstáculo importante. A pesar de que el país ha operado un reactor nuclear con fines de investigación durante 60 años, su función es poco conocida, y el público no está preparado para el rol que esta tecnología podría desempeñar en el futuro del país. La perspectiva popular asocia erróneamente la energía nuclear con el armamento, lo que requiere un cambio de paradigma y una estrategia de comunicación enfocada en sus usos pacíficos.

Este desconocimiento contrasta fuertemente con la realidad global, donde la energía nuclear no es una fuente marginal. En 2024, la energía nuclear representó cerca del 10% de la electricidad generada a nivel mundial (International Energy Agency, 2024). Este contexto global demuestra que la energía nuclear es una tecnología probada y una piedra angular de la producción de energía eléctrica en muchos países.

Camilo Prieto aborda la percepción de riesgo, a menudo subjetiva, al compararla con datos objetivos. Él cita el indicador de muertes por Tera vatio-hora, que es una métrica utilizada para comparar la seguridad de las diferentes fuentes de energía. Los datos muestran que la energía nuclear y la solar tienen los números más bajos, disputándose el primer puesto como las fuentes de energía más seguras (Burgueño Erick, 2025).

La especialista Sarah Braga aborda directamente este desafío de percepción, señalando que la población inmediatamente correlaciona la energía nuclear con accidentes como Chernóbil y Fukushima, generando rechazo. Para superar esto, Sarah Braga es enfática en la necesidad de "crear una cultura para explicar a la población primero", mediante un trabajo "realmente arduo" de educación y divulgación que permita "compartir el conocimiento con todos" y así ganar aceptación social.

#### **5.2.7.1. Lecciones de Chernóbil y Fukushima**

Camilo Prieto contextualiza acerca de los accidentes de Chernóbil y Fukushima. Explica

que el de Chernóbil fue un caso de "operaciones antitécnicas" y falta de un "edificio de contención," que es un requisito de diseño estándar en todos los reactores actuales. Si el reactor de Chernóbil hubiese implementado un edificio de contención, "de pronto ni nos hubiéramos enterado del accidente". La industria ha aprendido de estos eventos, lo que ha llevado a mejoras significativas en la seguridad nuclear, un campo que ahora es un ejemplo para todas las otras industrias.

La educación debe ser un pilar central, redefiniendo la narrativa para enfatizar que la tecnología nuclear no es sinónimo de armamento nuclear. La meta es promover un "acceso más equitativo a la energía, en el que tener el servicio deja de ser un privilegio y se convierte en derecho", y la energía nuclear, con su capacidad de proveer energía limpia y constante, puede ser un componente clave de esta visión.

#### **5.2.7.2. Superando la barrera de la Licencia Social**

David Galeano, Doctor físico e ingeniero electricista y actualmente docente de la universidad de Antioquia y Nacional con enfoque en energía nuclear, ha explicado los usos de la energía nuclear más allá de la generación de electricidad revela que la aceptación social, referida como la "licencia social," representa la barrera más significativa para la implementación de la energía nuclear en Colombia.

A pesar de que las barreras técnicas y económicas son notables, la viabilidad de un proyecto de esta magnitud depende, en última instancia, de la voluntad pública y política. La falta de un consenso social informado puede detener el progreso de cualquier iniciativa, independientemente de su solidez técnica o financiera.

La labor de divulgación es un pilar central para desmitificar la tecnología y desvincularla del armamento nuclear, un error común en la percepción popular. La educación y la comunicación deben ser proyectos de largo plazo, integrados en la política educativa y económica del país, ya que una central nuclear tiene una vida útil de 60 a 80 años. La confianza pública no se construye con una única campaña de marketing, sino con un compromiso generacional de transparencia y conocimiento.

La aceptación social se convierte en un prerrequisito para el avance de las otras etapas del

proyecto. Sin una base de apoyo social, es poco probable que la inversión internacional llegue o que el marco regulatorio progrese de manera fluida. Por lo tanto, el proyecto no se determina únicamente por modelos económicos o ingeniería, sino por la capacidad del sistema para construir confianza y generar un diálogo informado con la sociedad. La no consideración de esta barrera social podría condenar el proyecto desde sus primeras fases.

Camila Araujo, quien fue una figura instrumental en la organización de un simposio para la organización Women in Nuclear (WiN), habla sobre otro punto importante y es que también existen barreras relacionadas con la formación de profesionales especializados, especialmente en las áreas de seguridad radiológica y física. Estos aspectos son cruciales para garantizar la operación segura y confiable de las instalaciones.

### **5.3. Energía Geotérmica**

Esta sección presenta un análisis integral de los elementos esenciales para entender el desarrollo de la energía geotérmica en Colombia, basado en información recopilada a través de entrevistas con expertos. Tal como se hizo con la energía nuclear, se utilizaron sus aportes para identificar los aspectos más relevantes desde el enfoque técnico, económico y ambiental.

La información se organizó mediante un *Diagrama de Venn* que permitió resaltar tres áreas centrales: la viabilidad técnico-económica, donde se discutieron clústeres geotérmicos, costos de exploración, CAPEX y ventajas estratégicas del país; la dimensión regulatoria, que incluye el marco legal, licencias e incentivos fiscales; y finalmente la exploración y la ciencia, centradas en los riesgos, las limitaciones tecnológicas y el potencial real de los recursos, incluyendo la puesta en marcha de proyectos como Azufral y Nereidas.

**Figura 9**

*Diagrama de Venn expertos en energía geotérmica.*



**5.3.1. Economía y Mercado: Viabilidad Técnico-Económica**

La evaluación económico-técnica de la energía geotérmica es fundamental para determinar su competitividad dentro de la matriz energética colombiana. Este análisis considera aspectos como la presencia de clústeres geotérmicos, los costos asociados a la exploración, el CAPEX, los gastos operativos y las ventajas estratégicas que ofrece el país. Asimismo, la ubicación de zonas potenciales y la información cartográfica disponible en el mapa geotérmico permiten estimar con mayor precisión la factibilidad de aprovechar estos recursos.

**5.3.2. Zonas Potenciales de Exploración Geotérmica**

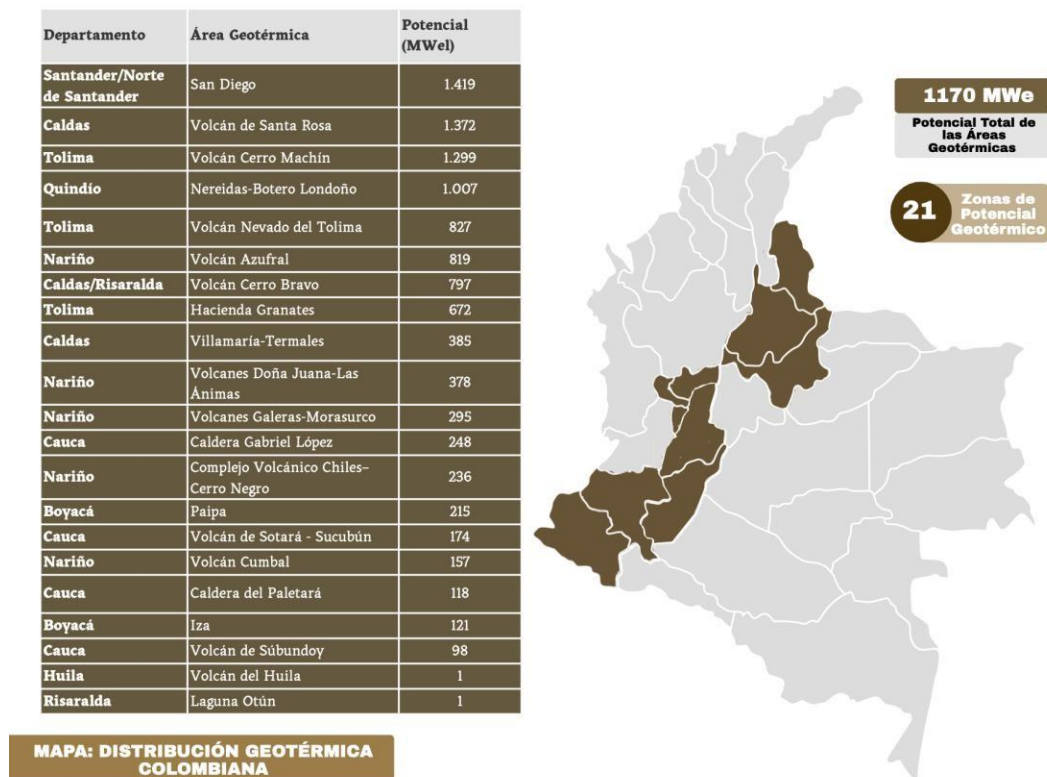
Colombia se encuentra en las etapas iniciales de exploración de su potencial geotérmico, reconociéndose un total estimado de 1170 MWe en 21 áreas asociadas a sistemas volcánicos con posibilidades de aprovechamiento (Ser Colombia, 2021). No obstante, a la fecha, solo siete de estas áreas han sido objeto de una exploración detallada en términos de geología, geofísica y geoquímica, lo que subraya la fase incipiente de su desarrollo (Servicio Geológico Colombiano, 2024). La incertidumbre geológica inherente a esta fase aumenta el riesgo y puede afectar la viabilidad e implementación de los proyectos iniciales.

El experto en geotermia, César Patiño, destaca que la tecnología a emplear en la exploración y explotación de este recurso depende directamente de la temperatura del yacimiento, un factor que define la entalpía del recurso (alta, media o baja). Esta clasificación térmica determina si se utilizarán sistemas de flasheo, ciclos de Rankine orgánico (ORC) o bombas de calor para generar electricidad.

Ejemplos de estos usos ya existen en el país, como en los balnearios termales de Paipa y Rivera (Huila) y en el secado de lana en Boyacá. La geotermia se presenta así, como un motor de desarrollo local y diversificado, capaz de generar clústeres energéticos en regiones aisladas o no interconectadas.

**Figura 10**

*Distribución potencial geotérmico nacional.*



Los datos muestran que el potencial geotérmico de Colombia se concentra en la región andina y zonas volcánicas activas, especialmente en Tolima, Caldas, Nariño y Cauca, donde varias áreas superan los 1.000 MWe de capacidad estimada. Esta distribución confirma que la geotermia puede convertirse en una fuente estratégica de generación firme.

La existencia de 21 zonas con potencial geotérmico evidencia una oportunidad real para diversificar la matriz energética con una fuente renovable continua, capaz de complementar la generación hidroeléctrica y reducir la vulnerabilidad ante variaciones climáticas. Sin embargo, el recurso aún se encuentra en etapas tempranas de exploración, lo que implica incertidumbre técnica y financiera. Por ello, su desarrollo requiere mayor inversión en estudios geo científicos y marcos regulatorios sólidos que permitan convertir el potencial identificado en capacidad instalada efectiva, alineándose con la necesidad de diversificar la canasta energética nacional.

### 5.3.1.2. Estructura del Costo Geotérmico

El factor de firmeza y la estabilidad de su combustible confieren un valor de seguridad energética que las fuentes variables no ofrecen. Esta firmeza permite a la geotermia desplazar a la generación térmica, que es la más costosa y volátil en el mercado, especialmente durante las épocas de escasez hídrica, aportando un beneficio macroeconómico al sistema.

El principal obstáculo financiero es el CAPEX (Inversión de Capital) elevado y la necesidad de asumir un riesgo significativo en la fase exploratoria, donde el éxito geológico aún no está garantizado. A continuación, se dará contexto de lo que es la inversión exploratoria y de desarrollo para esta energía:

**Inversión Exploratoria:** La fase crítica de perforación de dos pozos exploratorios, esenciales para confirmar el potencial del yacimiento, se estima entre \$25 y \$35 millones (Martínez-Ruiz et al., 2021). Esta es una inversión de capital de alto riesgo que debe asumirse antes de que haya cualquier garantía de retorno.

**Inversión de Desarrollo:** Una vez confirmado el recurso, la inversión para la construcción de una planta de generación (por ejemplo, la primera fase de en Nereidas) se proyecta entre \$120 y \$150 millones con un potencial de 30 megavatios (Piensa en Geotermia, 2024). El CAPEX total estimado para un proyecto geotérmico en Colombia es de entre \$120 y \$200 millones por planta (Castaño A, et. al, 2020).

Se estima que el costo de inversión en el país es hasta 1.5 veces mayor que el estándar internacional (que oscila entre \$2.5 y \$5 por MW) (Martínez-Ruiz et al., 2021). Este sobrecosto se debe principalmente a la complejidad logística, la ubicación remota de los prospectos y la

necesidad de desarrollar infraestructura vial y de conexión, además de los costos elevados asociados a la gestión ambiental y social.

En este contexto, la participación de entidades gubernamentales en el financiamiento de la fase exploratoria, así como la creación y desarrollo de proyectos, se visualiza como prioridad la formación de asociaciones tanto públicas como privadas y el impulso a la promoción de un clúster geotérmico colombiano, los cuales permiten reducir el riesgo inicial del proyecto, facilitando que, una vez confirmado el recurso, el sector privado participe en las etapas de desarrollo y operación de las plantas, este argumento lo sostiene la geóloga y embajadora de WING Elizabeth Torio.

### **5.3.2. Marcos Regulatorios: Energía Geotérmica**

En el caso de la energía geotérmica, el experto César Patiño subraya que, aunque se han logrado avances, el marco regulatorio aún necesita ser desarrollado y articulado para integrar la geotermia al mercado energético nacional. Se requiere la creación de leyes, resoluciones y mecanismos de mercado específicos, como subastas de energía, para proporcionar la certeza regulatoria necesaria para atraer la inversión.

La estabilidad jurídica y el marco de incentivos son fundamentales para atraer el capital. La Ley 1715 de 2014 ofrece incentivos cruciales para las Fuentes No Convencionales de Energía Renovable (FNCER), incluyendo la geotermia, lo que optimiza la tasa de impuestos del proyecto. Estos incentivos incluyen: Deducción especial sobre el impuesto de renta (hasta de la inversión). Exclusión del IVA y exención de gravamen arancelario a la importación de maquinaria y equipos (Martínez-Ruiz et al., 2021).

La estabilidad jurídica es un factor determinante para atraer el gran capital necesario para el desarrollo geotérmico. Una modificación reciente, el Decreto 1598 de 2024, ajustó el marco regulatorio (Decreto 1073 de 2015) para imponer obligaciones de gestión social a cargo del desarrollador, incluso en la etapa de exploración (Decreto 1598 de 2024 Nivel Nacional, 2024).

La imposición de cargas sociales significativas durante la fase de exploración es un desafío que ralentiza la viabilidad financiera de los proyectos. Esta etapa se caracteriza por la máxima incertidumbre geológica y la ausencia de retorno de inversión. La necesidad de invertir

fuertemente en infraestructura social antes de que el recurso sea confirmado aumenta el riesgo para los inversionistas. Una política pública que flexibilice o traslade estas obligaciones sociales a la etapa de producción, cuando el retorno de la inversión ya está garantizado, podría acelerar la entrada de capital y el desarrollo del potencial nacional.

María Cristina Higuera, abogada y cofundadora del Clúster de Geotermia en Colombia, ofrece una perspectiva crucial sobre la evolución y las barreras del marco legal y regulatorio, que son determinantes para la viabilidad de la geotermia en el país.

Resalta que, aunque el potencial geotérmico identificado por el Servicio Geológico Colombiano (SGC) es de aproximadamente 1,170 a 1,200 megavatios eléctricos (MWe), distribuidos en 21 áreas a nivel nacional (Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia., 2024), el potencial geotérmico actual (Aproximadamente 1.2 GW) es significativamente inferior a las estimaciones de recurso variable, como la eólica costa afuera (offshore), cuyo potencial técnico total es de aproximadamente 110 GW. Esta disparidad subraya la necesidad de que el marco regulatorio compense esta limitación cuantitativa mediante la certeza jurídica y mecanismos que atraigan la inversión.

María Cristina Higuera sostiene que el potencial total del país podría ser sustancialmente mayor si se consideran los llamados "recursos ciegos". Estos recursos son reservorios geotérmicos profundos que no tienen manifestaciones térmicas en la superficie, pero que podrían existir dado que Colombia es parte del Anillo de Fuego del Pacífico (Botero- Gómez et al., 2025). Sin embargo, el país aún no ha avanzado lo suficiente en la investigación científica y la perforación para confirmar y cuantificar este potencial adicional.

Los recursos geotérmicos son definidos en el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables (Decreto-Ley 2811 de 1974) como un recurso natural renovable y energético primario cuyo dominio pertenece a la Nación. El recurso puede utilizarse para la producción de energía. Según el decreto 852 de 2024, los proyectos geotérmicos con una capacidad instalada superior a 10MW requieren obligatoriamente el trámite y obtención de una Licencia Ambiental. Esta licencia es expedida por la autoridad ambiental competente tras la evaluación de un Estudio de Impacto Ambiental (EIA) (Decreto 1598 de 2024 - Gestor Normativo - Función Pública, 2024).

El Decreto 1318 de 2022 contempló un régimen de transición para aquellos desarrolladores que ya tenían proyectos geotérmicos en marcha. Este tipo de disposiciones son esenciales para dar seguridad a las inversiones preexistentes.

### **5.3.3. Exploración y Ciencia: Riesgos exploratorios**

La exploración geotérmica implica altos niveles de incertidumbre relacionados con la naturaleza del recurso y las características del subsuelo. Factores como los riesgos exploratorios, las limitantes técnicas, la existencia de recursos ciegos, y las barreras tecnológicas influyen directamente en la probabilidad de éxito y en los costos del proyecto. Paralelamente, el análisis del potencial geotérmico total del país permite proyectar el alcance real de esta fuente renovable y orientar decisiones estratégicas.

#### **5.3.3.1. Proyectos vigentes nacionales de Geotermia**

##### **Proyecto en Azufral, Nariño**

Una de las zonas con un alto potencial geotérmico por sus avances en caracterización está asociada al volcán Azufral, en Nariño. Durante más de 15 años, el Servicio Geológico Colombiano (SGC) ha desarrollado investigaciones con el fin de entender el sistema geotérmico del Azufral. Para el presente año el gobierno otorgó la autorización a Ecopetrol para la exploración detallada de esta área con el fin de dar un paso hacia la ejecución de un proyecto que emprende la ruta de la transición energética mediante el aprovechamiento del calor de la tierra (Servicio Geológico Colombiano, 2025a).

Con una inversión inicial de US\$10-17 millones, destinada a la perforación de pozos dentro del volcán para los procesos de extracción de calor y vapor con la finalidad de un potencial de generación eléctrica de unos 80 MW (Resolución 40320 del 11 de julio de 2025, 2025), suficiente para cubrir la demanda de Nariño y consolidar a Colombia en el ámbito de la energía limpia.

##### **Proyecto Nereidas, Villa María**

El Proyecto Nereidas (ubicado en Villamaría, Caldas) representa el caso de estudio más avanzado en Colombia. Sus orígenes exploratorios datan de la década de 1970, asociado al

complejo volcánico del Nevado del Ruiz, impulsado por un convenio de cooperación con ENEL de Italia. Tras cartografía y estudios sistemáticos en los 80s, Villamaría fue identificado como el prospecto más prometedor.

La primera perforación de prueba se ejecutó en 1997. El pozo alcanzó de profundidad y registró una temperatura de 200° C en el fondo. Estos datos revelaron un gradiente geotérmico excepcional, superior a 130° C/km confirmando la existencia de una fuente de calor de alta calidad.

El desafío en la evaluación de la viabilidad económica de la geotermia en Colombia radica en equilibrar la gran inversión de capital inicial y el alto riesgo exploratorio con el valor estratégico a largo plazo que ofrece como fuente de energía firme.

Para mitigar tanto el riesgo financiero como el geotécnico, CHEC (Grupo EPM) ha establecido alianzas estratégicas con Ecopetrol y la empresa de servicios petroleros Baker Hughes. Ecopetrol y otros aliados están buscando financiación con bancos de desarrollo (BID, Banco Mundial) para dividir este capital de riesgo. La vinculación de Baker Hughes es crucial, ya que aplica el know-how de perforación profunda y compleja, típico del sector de hidrocarburos, directamente a los desafíos de la geología volcánica, aumentando la probabilidad de éxito y superando los obstáculos geotécnicos que detuvieron el proyecto en 1997.

### **5.3.3.2. Impacto ambiental en la energía geotérmica.**

La geotermia se clasifica como una de las fuentes energéticas con mejor desempeño ambiental. Su huella de carbono es notablemente baja, con emisiones de aproximadamente 37 g CO<sub>2</sub>-eq/kWh, en contraste con las centrales termoeléctricas a gas natural (486 g CO<sub>2</sub>-eq/kWh) y carbón (1001 g CO<sub>2</sub>-eq/kWh), lo que implica que puede emitir entre 13 y 27 veces menos CO<sub>2</sub> que estas tecnologías convencionales (National Renewable Energy Laboratory, 2021).

En cuanto al recurso hídrico, el proceso es altamente sostenible, ya que utiliza aguas hidrotermales profundas y opera en un ciclo cerrado con reinyección de los fluidos condensados o residuales al yacimiento. Esta reinyección garantiza que el ciclo hidrogeológico que alimenta el yacimiento geotérmico no se vea alterado, lo que confiere al recurso su carácter renovable.

#### **5.3.3.2.1. Impacto Geotécnico de la Perforación.**

El experto Julián López destaca que uno de los desafíos técnicos y ambientales más importante es el riesgo de sismicidad inducida, asociado a la reinyección de fluidos a alta presión en el subsuelo, lo cual ha sido monitoreado en proyectos geotérmicos a nivel global. Los estudios en Centroamérica han detectado que la posibilidad de generar microsismos es mínima, ya que la mayoría de los pozos de inyección de aguas residuales no se asocian con sismos percibidos. Se requiere una combinación de diversos factores para que la inyección los induzca (Ground Water Protection Council, 2020).

La regulación colombiana, a través de los Términos de Referencia para el Estudio de Impacto Ambiental (EIA), exige la identificación y valoración explícita de este riesgo. Se deben presentar análisis de riesgo que contemplen protocolos de prevención, mitigación, contingencia, y el manejo de escenarios concatenados, donde un evento natural preexistente (como un sismo tectónico) podría materializar un evento tecnológico (falla en la reinyección o liberación de gases) (Autoridad Nacional de Licencias Ambientales, 2023).

La existencia de estos marcos regulatorios, en conjunto con la experiencia institucional de Colombia en la gestión de riesgos sísmicos, indica que el riesgo de sismicidad inducida es conocido y susceptible de ser gestionado y controlado mediante el monitoreo estricto de las presiones de reinyección.

La fase exploratoria es la más costosa y riesgosa. Una metodología para reducir el costo y el riesgo es la implementación de Inteligencia Artificial (IA). La empresa Zanskar en Estados Unidos, que utiliza una herramienta especializada de IA con datos del subsuelo para construir modelos y predecir los "puntos dulces" de calor, lo que optimiza la exploración geotérmica (Arteaga, 2024).

#### **5.3.3.2.2. Impacto en el Uso de la Tierra.**

La energía geotérmica se destaca por su bajo requerimiento de suelo superficial en comparación con otras fuentes no convencionales de energía renovable (FNCR), como la solar fotovoltaica y la eólica. Con un uso de tierra estimado entre 18 y 74 km<sup>2</sup> por TWh generado, frente a los 28-64 km<sup>2</sup>/TWh de la solar PV y 72 km<sup>2</sup>/TWh de la eólica (Li,2014)

(LowCarbonPower, 2024).

Esta eficiencia en el uso del suelo minimiza la degradación del paisaje, reduce la competencia con usos agrícolas o de conservación, y facilita una mayor armonización con el entorno natural, aspectos particularmente relevantes en Colombia donde las zonas de alto potencial geotérmico, como el Nevado del Ruiz o el volcán Azufra, se ubican en áreas volcánicas remotas y montañosas que exigen una gestión ambiental estricta para mitigar impactos en ecosistemas sensibles y recursos hídricos.

Además, a diferencia de las instalaciones solares o eólicas que pueden alterar visual y ecológicamente vastas extensiones de terreno, los proyectos geotérmicos concentran su infraestructura en perforaciones profundas (hasta 2-3 km), permitiendo un menor disturbio superficial y una integración más sostenible en la diversificación de la matriz energética colombiana, alineada con regulaciones que priorizan la protección ambiental y la obtención de licencias integrales.

Julián López señala que la presencia de recursos geotérmicos de alta entalpía en la Cordillera Central exige una gestión rigurosa de ecosistemas sensibles como los páramos. El proyecto Nereidas ejemplifica esta planificación, ya que su planta fue ubicada por debajo de la línea de páramo en terrenos previamente intervenidos por actividades ganaderas, reduciendo la sensibilidad ambiental y los conflictos por uso del suelo. Esto demuestra que los proyectos geotérmicos deben superar estrictos filtros ambientales que prohíben intervenciones en áreas protegidas (Ortiz G3nzales & L3pez Palacio, 2025).

#### **5.3.4. Energ3a Geot3rmica en Latinoam3rica.**

Gabrijel Grubac, ingeniero con experiencia en ingenier3a petrolera y enfocado ahora en geotermia de pr3xima generaci3n en Estados Unidos, proporciona una perspectiva global que matiza el concepto de potencial geot3rmico ligado al desarrollo econ3mico. Gabrijel refuta la noci3n de que la geotermia avanza m3s r3pido solo en pa3ses desarrollados.

Argumentando que el factor determinante es la disponibilidad y facilidad de acceso al recurso. Pa3ses como Filipinas, Kenia (el mayor actor en 3frica) e Indonesia son grandes jugadores geot3rmicos a nivel mundial, a pesar de no tener una econom3a tan fuerte (Cariaga

Carlo, 2025).

La viabilidad económica está directamente ligada a la facilidad de encontrar calor. En lugares como Islandia, se perfora solo 1 kilómetro gracias a la actividad tectónica de la zona. Esto permite que, con perforaciones relativamente superficiales, se obtenga una gran cantidad de energía (Generación de electricidad de alrededor de 5.311TWh) (Low-Carbon Power, 2024). En contraste, Colombia requiere perforar más profundo para obtener el calor necesario. Si se debe perforar más profundo, el costo aumenta significativamente, dificultando el desarrollo económico de los proyectos.

Sin embargo, América Latina ha demostrado un fuerte desarrollo geotérmico, con México y El Salvador destacando en la región. México tiene uno de los potenciales más grandes del mundo y cuenta con el campo geotérmico Los Azufres, que es el segundo más importante del país en capacidad eléctrica (Capacidad instalada de 927 MW) (Morelia, 2023). Por su parte, El Salvador es líder en Centroamérica en generación de energía geotérmica, cubriendo aproximadamente el 30.3% de su matriz energética, y está expandiendo su capacidad con proyectos como el de Chinameca (Capacidad Instalada de 25MW) (Portillo, 2023).

#### **5.3.4.1. Aplicaciones Directas del Calor Geotérmico.**

El verdadero valor estratégico de la energía geotérmica reside en su capacidad de aprovechar el calor residual de los fluidos después de la generación eléctrica. Estos fluidos, que pueden descender hasta temperaturas entre 80° C y 90°C, aún conservan calor suficiente para ser usados en desarrollos encadenados de la generación eléctrica, transformando el proyecto en un motor de desarrollo productivo local y articulando energía industrial con el desarrollo cultural y económico del territorio.

Esta capacidad de producir calor además de electricidad posiciona a la geotermia como una herramienta clave para la descarbonización de procesos industriales que requieren altas temperaturas, dándole una ventaja competitiva sobre otras fuentes renovables intermitentes que solo generan electricidad.

Las aplicaciones directas del calor son diversas y se adaptan a la vocación económica regional. El experto Julián López menciona algunas de las aplicaciones directas de este tipo de

energía, que incluyen:

- El calor puede utilizarse para la pasteurización de leche, apoyando la industria láctea de Caldas, y para el secado de frutas y otros alimentos agrícolas locales, agregando valor a la producción primaria.
- La energía térmica residual es útil para la calefacción de espacios, el funcionamiento de invernaderos y los sistemas de refrigeración por absorción.
- El calor residual de menor temperatura puede destinarse a balnearios y sitios turísticos, siguiendo modelos exitosos internacionales (como Islandia) y generando un nicho turístico y cultural alrededor de la planta.
- Otra oportunidad a nivel global es la Extracción de Minerales Críticos (como el Litio) directamente de las salmueras geotérmicas, creando un flujo de ingresos adicional y una fuente sostenible del mineral crucial para la electromovilidad (Jorquera, 2020).

El desarrollo de los usos en cascada es fundamental para la sostenibilidad social de los proyectos geotérmicos. Al generar beneficios económicos tangibles y localizados (pasteurización, turismo, secado) que pueden ser gestionados por terceros en el territorio, el proyecto geotérmico trasciende la función de simple generador de electricidad para el consumo nacional. Este enfoque legitima la presencia industrial ante las comunidades, ya que les permite desarrollar sus propias capacidades productivas, fortaleciendo la economía regional y asegurando la licencia social a largo plazo.

Finalmente, Julián López resalta la importancia para la viabilidad final de los proyectos que depende de la obtención de la licencia social, la cual requiere un trabajo intensivo de pedagogía, capacitación de talento humano, y la construcción de confianza con las comunidades. Este proceso exige una posición activa por parte del Gobierno en los diálogos sociales para asegurar que la sociedad entienda los riesgos controlables y los beneficios tangibles que la energía geotérmica puede aportar.

#### **5.4. Análisis comparativo: Perspectiva ambiental**

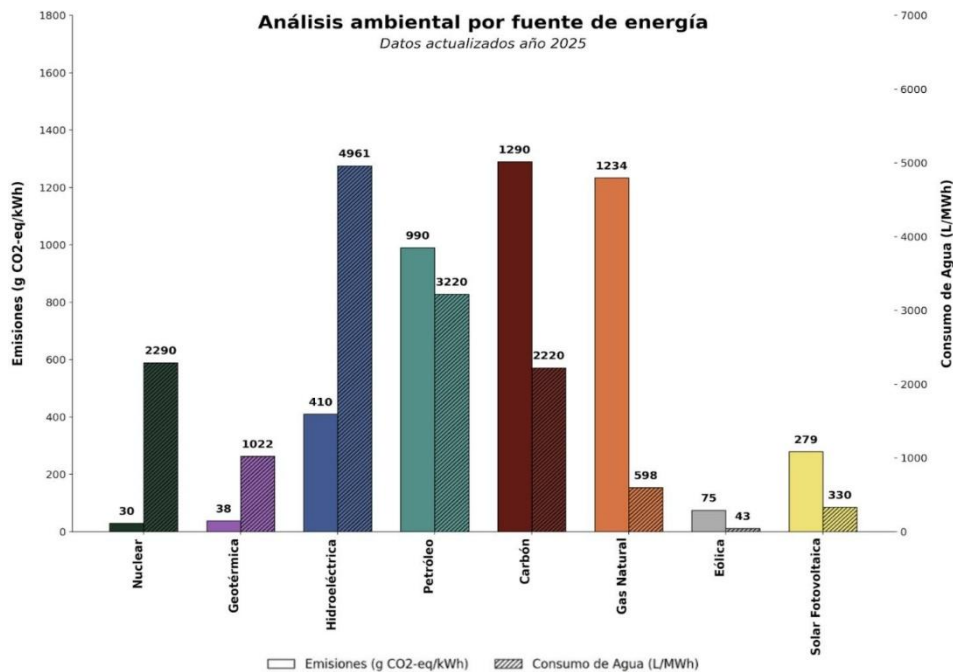
La energía nuclear y la geotérmica destacan por sus bajas emisiones de gases de efecto

invernadero (como se puede visualizar en la gráfica) y su capacidad de generación continua; no obstante, la primera enfrenta desafíos asociados a la gestión de residuos radiactivos y al elevado consumo de agua para refrigeración, mientras la segunda posee disponibilidad geográfica limitada y posibles afectaciones al subsuelo. A su vez, la energía hidroeléctrica es renovable y de bajas emisiones en operación, aunque produce alteraciones en ecosistemas fluviales y depende de la variabilidad climática.

Las plantas térmicas de carbón y gas ofrecen generación estable y disponen de infraestructura ampliamente desarrollada; pese a ello, constituyen la mayor fuente de emisiones contaminantes y de gases de efecto invernadero. En contraste, la energía eólica y la solar fotovoltaica corresponden a fuentes renovables con emisiones operativas muy bajas; su principal limitación radica en la intermitencia del recurso. Sumado a esto, la energía eólica puede ocasionar impactos visuales y ruido, mientras que la solar fotovoltaica requiere grandes extensiones de superficie y genera residuos tecnológicos al finalizar su vida útil.

**Figura 11**

*Análisis ambiental por fuente de energía (Emisiones de CO2 – Consumo de agua).*



*Nota:* Elaboración propia a partir de datos del Catálogo Tecnológico Colombiano (Ministerio de Minas y Energía, 2025).

Los combustibles fósiles lideran las emisiones, la energía nuclear y la geotérmica destacan por ser las opciones con menor huella de carbono (30 y 38 g CO<sub>2</sub>-eq/kWh respectivamente), consolidándose como alternativas altamente eficientes para la descarbonización, aunque con un consumo de agua moderado en comparación con las fuentes no convencionales. En contraste, la hidroeléctrica registra un consumo hídrico crítico de casi 5000 L/MWh, lo que plantea desafíos importantes para la gestión de cuencas.

Desde el punto de vista ambiental, ambas tecnologías se destacan por sus bajas emisiones de gases de efecto invernadero a lo largo de todo su ciclo de vida. La energía nuclear sobresale por su alta densidad energética, lo que permite generar grandes cantidades de electricidad con una mínima cantidad de combustible y un uso del suelo significativamente inferior al de otras tecnologías de gran escala.

Adicionalmente, la industria nuclear se distingue por ser la única que gestiona de manera integral sus residuos en todo el ciclo, esto bajo estrictos estándares internacionales de seguridad. Por otra parte, la geotermia presenta una huella ambiental reducida, aunque enfrenta desafíos asociados a la exploración del recurso y a la gestión local de fluidos geotérmicos, los cuales pueden mitigarse mediante una regulación ambiental adecuada.

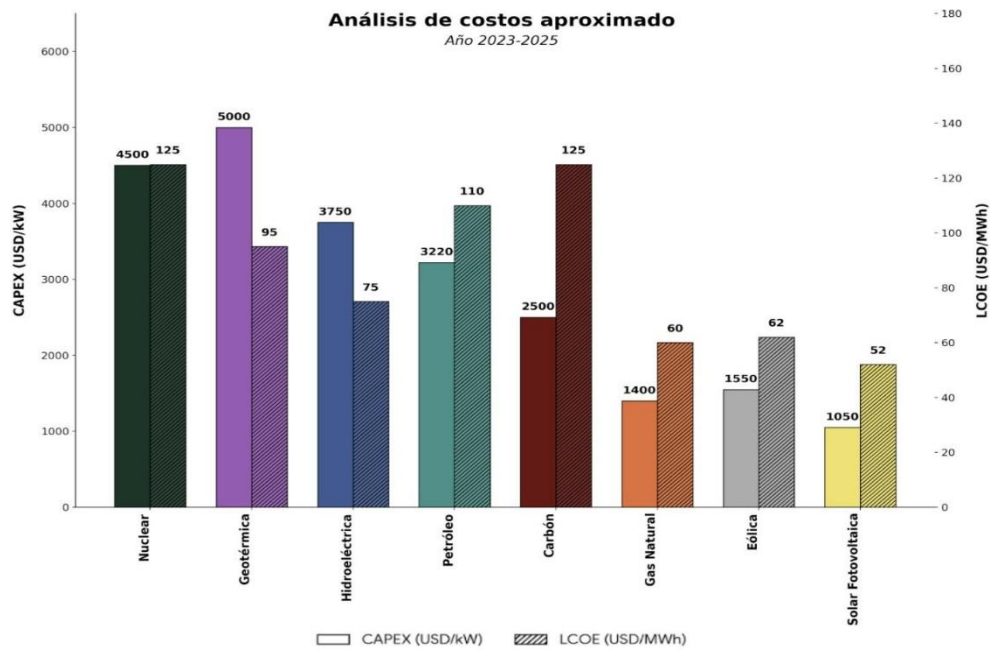
#### **5.4.1. Análisis comparativo de costos, regulatorio y técnico.**

Con el fin de complementar el análisis ambiental presentado en la sección anterior, este apartado desarrolla una comparación integral de las principales fuentes de energía en Colombia desde tres perspectivas clave: costos de inversión y generación, marco regulatorio y político, y desempeño técnico en términos de seguridad energética. Este enfoque permite identificar no solo la viabilidad económica de cada tecnología, sino también su capacidad de integración dentro del sistema energético nacional y su contribución a la transición energética.

En primer lugar, desde la perspectiva de costos, se analiza la relación entre el CAPEX (costo de inversión inicial) y el LCOE (costo nivelado de la energía), como variables determinantes en la competitividad de cada fuente:

**Figura 12.**

*Análisis de costos aproximado por fuente de energía (CAPEX – LCOE).*



*Nota.* Elaboración propia a partir de datos del RENEWABLE POWER GENERATION COSTS IN 2023 (IRENA, 2024) y Projected Costs of Generating Electricity (NEA, 2020)

El análisis evidencia que la energía geotérmica presenta uno de los CAPEX más altos debido a la perforación profunda y al riesgo geológico asociado a la fase exploratoria. Por su parte, la energía nuclear también requiere altas inversiones iniciales, principalmente por sus estrictos estándares de seguridad y largos tiempos de construcción.

En contraste, las tecnologías solares y eólicas destacan por sus menores costos iniciales y tiempos de implementación más cortos, lo que favorece retornos de inversión más rápidos, aunque con limitaciones en estabilidad de generación. Desde el punto de vista regulatorio y político, las diferencias entre tecnologías reflejan su grado de aceptación social y nivel de dependencia externa:

**Tabla 2**

*Análisis comparativo por regulación y política energética.*

Fuente	Aceptación Social	Dependencia Geopolítica (Dependencia con otros países)	Incentivos estatales	Rol en Transición Energética
Nuclear	Baja-media	Baja (alto autoabastecimiento)	Alta en países desarrollados	Clave como energía firme descarbonizada
Geotérmica	Media-baja	Muy baja (recurso local)	Media	Estratégica para soberanía energética
Solar	Muy alta	Media (paneles importados)	Muy alta	Fundamental en diversificación
Eólica	Alta	Media (tecnología importada)	Alta	Complementaria a renovables
Térmica	Baja	Alta combustibles fósiles	Decreciendo (Políticas climáticas)	En transición de salida
Hidroeléctrica	Media	Muy baja	Media	Base histórica de muchos sistemas eléctricos

Este análisis muestra que las energías renovables no convencionales cuentan con alta aceptación social e incentivos crecientes, mientras que la energía nuclear enfrenta principalmente barreras de percepción. No obstante, tanto la nuclear como la geotérmica presentan ventajas estratégicas en términos de soberanía energética al depender menos de recursos importados.

Por otra parte, desde la perspectiva técnica y de seguridad energética, se comparan las capacidades de generación continua y los principales riesgos asociados a cada tecnología:

**Tabla 3.**

*Análisis comparativo por ciencia, tecnología y seguridad energética.*

Fuente	Generación Continua	Riesgos y Limitaciones	Seguridad Energética
Nuclear	Sí (24/7)	Residuos radiactivos, accidentes severos poco probables	Muy alta
Geotérmica	Sí (24/7)	Riesgo geológico local, corrosión	Muy alta
Solar	No	Intermitencia, almacenamiento costoso	Media-baja
Eólica	No	Intermitencia del viento	Media
Térmica	Sí	Emisiones, contaminación, dependencia combustible	Media
Hidroeléctrica	No	Sequías, impacto ecosistemas, sedimentación	Alta

En conjunto, los resultados evidencian que, aunque las energías solar y eólica son fundamentales para la diversificación de la matriz energética, su intermitencia limita su capacidad para suplir la demanda base de manera autónoma. Por el contrario, las energías nuclear y geotérmica destacan por su capacidad de generación continua, alta confiabilidad y baja huella de carbono, lo que las posiciona como tecnologías clave para garantizar la estabilidad del sistema eléctrico.

De esta manera, la integración de estas fuentes permitiría complementar las energías renovables existentes, reducir la vulnerabilidad climática del sistema y avanzar hacia una matriz energética más resiliente, diversificada y sostenible.

El análisis de costos indica que la viabilidad de las energías de carga base depende principalmente de su estructura de inversión. La energía geotérmica presenta el CAPEX más alto debido a la perforación profunda y al riesgo geológico en la fase exploratoria. En contraste, la energía nuclear y el carbón registran LCOE elevados por razones distintas: la nuclear por exigencias de seguridad y largos tiempos de construcción, y el carbón por altos costos operativos y de control de emisiones.

En comparación, fuentes no convencionales como la solar muestran una ventaja competitiva al combinar menor inversión inicial y costos de generación más eficientes, lo que permite un retorno de inversión más rápido frente a tecnologías que, aunque ofrecen mayor estabilidad, requieren capitales iniciales y operativos considerablemente superiores.

### **Conclusiones**

El análisis de la canasta energética colombiana permitió identificar que la matriz eléctrica nacional continúa presentando una alta dependencia de la generación hidroeléctrica, la cual aporta cerca del 60 % de la electricidad del país. Aunque se ha considerado como una matriz baja en emisiones de CO<sub>2</sub>, también representa una vulnerabilidad y dependencia directa de las condiciones hidrológicas. Eventos climáticos como el fenómeno de El Niño evidencian que la seguridad energética nacional puede verse comprometida por periodos prolongados de sequía, afectando la estabilidad del suministro eléctrico y aumentando la necesidad de generación térmica basada en combustibles fósiles, lo cual no es beneficioso para el país debido al impacto directo de la huella de carbono.

A partir del análisis técnico y económico realizado, se concluye que tanto la energía nuclear como la geotérmica poseen características que podrían contribuir de manera significativa a la diversificación energética del país, a pesar de poseer un CAPEX inicial elevado. Destacan por su alta densidad energética, capacidad de generación continua y estabilidad operativa a largo plazo, especialmente en la nuclear mediante tecnologías emergentes como los Reactores Modulares Pequeños (SMR), los cuales presentan una alternativa más flexible para un país como Colombia. Por otro lado, tenemos la energía geotérmica, que representa una oportunidad estratégica debido al potencial geológico asociado a la cordillera volcánica andina, usando el Ciclo Orgánico de Rankine como tecnología más pertinente debido a sus características geológicas.

Asimismo, el estudio permitió evidenciar que la implementación de estas tecnologías no depende exclusivamente de su viabilidad técnica, sino del enfoque institucional, regulatorio y social del país para desarrollar proyectos de largo plazo. En el caso de la energía nuclear, Colombia aún enfrenta retos importantes relacionados con la consolidación de un marco normativo robusto y la aceptación social frente a una tecnología históricamente sesgada a accidentes que crean temor en la población. De manera similar, la geotermia enfrenta barreras vinculadas al alto riesgo exploratorio, la limitada inversión en investigación y la ausencia de proyectos comerciales consolidados en el territorio nacional.

De igual forma, el análisis ambiental comparativo evidenció que la energía nuclear y la geotérmica presentan ventajas relevantes frente a tecnologías fósiles tradicionales, particularmente en términos de emisiones de CO<sub>2</sub>, uso eficiente del suelo y estabilidad de generación. Aunque ambas tecnologías poseen impactos ambientales y desafíos específicos, estos pueden ser mitigados mediante marcos regulatorios adecuados, monitoreo técnico especializado y estrategias de planificación territorial sostenibles.

Desde nuestro punto de vista, y con base en los resultados obtenidos y las entrevistas realizadas, la transición energética en Colombia no debe enfocarse únicamente en la expansión de energías renovables intermitentes como la solar y la eólica, sino en la construcción de una matriz energética más diversificada y resiliente que integre fuentes de generación firme como la nuclear y la geotérmica. Considerando a Colombia como un país con capacidad de avanzar gradualmente hacia la incorporación de estas tecnologías; sin

embargo, esto requiere fortalecimiento regulatorio y desarrollo científico. En este sentido, la diversificación energética representa no solo una necesidad frente a la variabilidad climática y el crecimiento de la demanda, sino también una oportunidad para fortalecer la seguridad y soberanía energética del país.

## Apéndice

### Apéndice A. Perfiles de Expertos Entrevistados

#### Expertos en Energía Nuclear

**Camilo Prieto Valderrama:** director de la Red Nuclear Colombiana y profesor de Energía y Sostenibilidad en la Pontificia Universidad Javeriana.

**David Galeano:** Doctor en Física, ingeniero electricista y docente en las universidades de Antioquia y Nacional con enfoque en energía nuclear.

**Camila Araujo:** Embajadora del Instituto Mundial para la Seguridad Nuclear (WINS) Brasil y especialista en marcos de gobernanza y género en el sector nuclear.

**Sarah Braga Kaser:** Física médica y consultora internacional experta en protección radiológica, salvaguardias y gestión de residuos radiactivos.

**Alejandro Barreal Adrán:** Ingeniero experto en instrumentación, control y gestión de riesgos técnicos en proyectos de infraestructura energética masiva.

**Luis Jaimes Reatiga:** Docente e investigador de la UNAB, especializado en sistemas de potencia y la prospectiva de implementación nuclear en Colombia.

**Daniel Herrera:** Consultor senior en transición energética y analista de políticas públicas para la adopción de Reactores Modulares Pequeños (SMR).

**Hermes Llanes:** Doctor en Física Nuclear y profesor universitario con amplia trayectoria en investigación de aplicaciones tecnológicas de la radiación.

#### Expertos en Energía Geotérmica

**Cesar Patiño:** Ingeniero de Petróleos y líder de geociencias aplicadas, con amplia experiencia en la exploración y producción de yacimientos geotérmicos.

**Flover Rodríguez Portillo:** Director ejecutivo de la Asociación Colombiana de Geólogos y Geofísicos (ACGP) y promotor clave de la geotermia en el país.

**Julián López Palacio:** Ingeniero líder de proyectos en ISAGEN, encargado del desarrollo y ejecución del primer piloto geotérmico en Colombia.

**Gabrijel Grubac:** Especialista senior en energía del Banco Mundial, experto en financiamiento y estructuración de proyectos renovables y geotérmicos.

**María Cristina Higuera Cardozo:** Abogada investigadora del Servicio Geológico Colombiano (SGC) enfocada en la evaluación del potencial geotérmico nacional.

**Elizabeth Torio Henríquez:** Geóloga salvadoreña experta en exploración de reservorios y consultora técnica para la empresa estatal de geotermia LaGeo.

### Apéndice B. Entrevistas a Expertos

Debido a la ubicación geográfica y las agendas de los expertos internacionales y nacionales, la recolección de información se realizó mediante modalidades mixtas (sincrónica y asincrónica), garantizando en todos los casos la trazabilidad y veracidad de los testimonios.

#### Figura B.1.

*Evidencia de la entrevista realizada a David Galeano vía Microsoft Teams.*



*Nota.* Captura de pantalla realizada por las autoras (Sarah Lascarro y Catalina Tarazona) en la plataforma Microsoft Teams el 26 de agosto de 2025.

**Figura B.2.**

*Evidencia de la entrevista realizada a Cesar Patiño vía Google Meet.*



*Nota.* Captura de pantalla realizada por las autoras (Sarah Lascarro y Catalina Tarazona) en la plataforma Microsoft Teams el 26 de agosto de 2025.

**Figura B.3.**

*Evidencia de la entrevista realizada a Camila Araujo vía correo electrónico.*



**Figura B.4.**

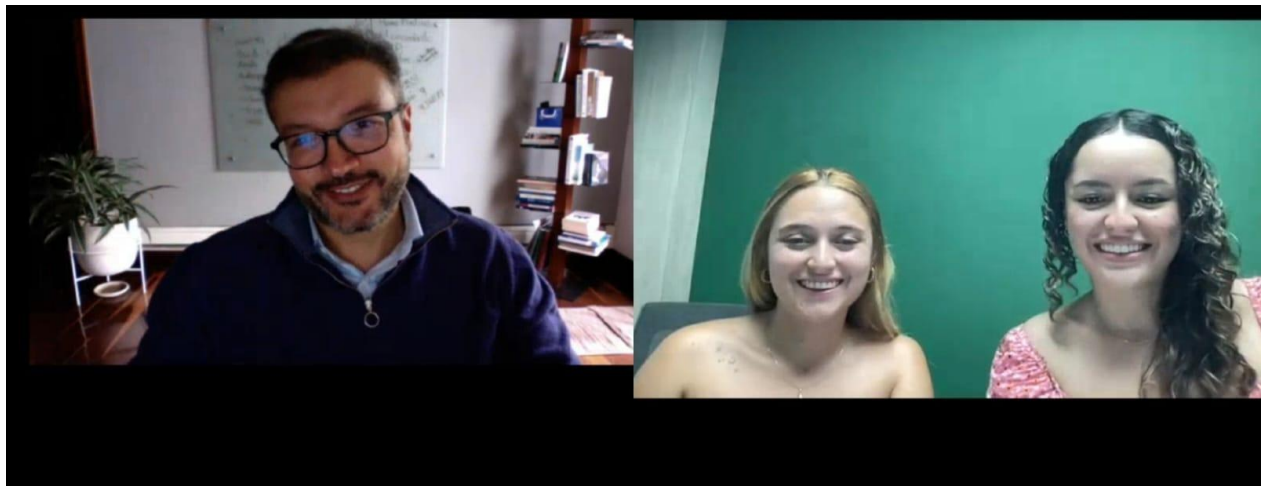
*Evidencia de la entrevista realizada a Alejandro Barreal vía Microsoft Teams.*



*Nota.* Captura de pantalla realizada por la autora (Sarah Lascarro) en la plataforma Microsoft Teams el 8 de septiembre de 2025.

**Figura B.5.**

*Evidencia de la entrevista realizada a Camilo Prieto Valderrama vía Microsoft Teams.*



*Nota.* Captura de pantalla realizada por las autoras (Sarah Lascarro y Catalina Tarazona) en la plataforma Microsoft Teams el 11 de septiembre de 2025.

**Figura B.6.**

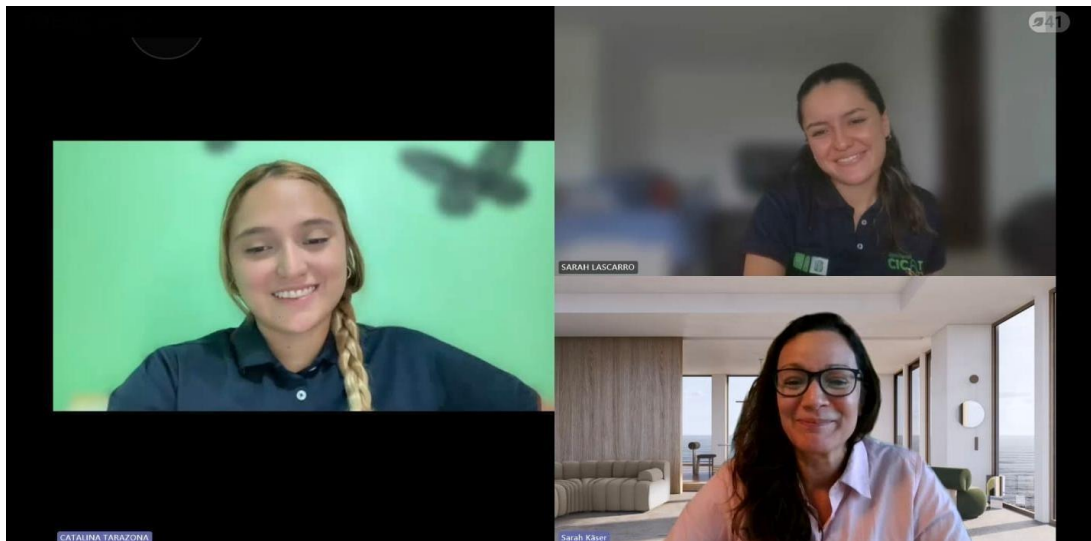
*Evidencia de la entrevista realizada a Flover Rodríguez vía Microsoft Teams.*



*Nota.* Captura de pantalla realizada por las autoras (Sarah Lascarro y Catalina Tarazona) en la plataforma Microsoft Teams el 18 de septiembre de 2025.

**Figura B.7.**

*Evidencia de la entrevista realizada a Sarah Braga vía Microsoft Teams.*



*Nota.* Captura de pantalla realizada por las autoras (Sarah Lascarro y Catalina Tarazona) en la plataforma Microsoft Teams el 19 de septiembre de 2025.

**Figura B.8.**

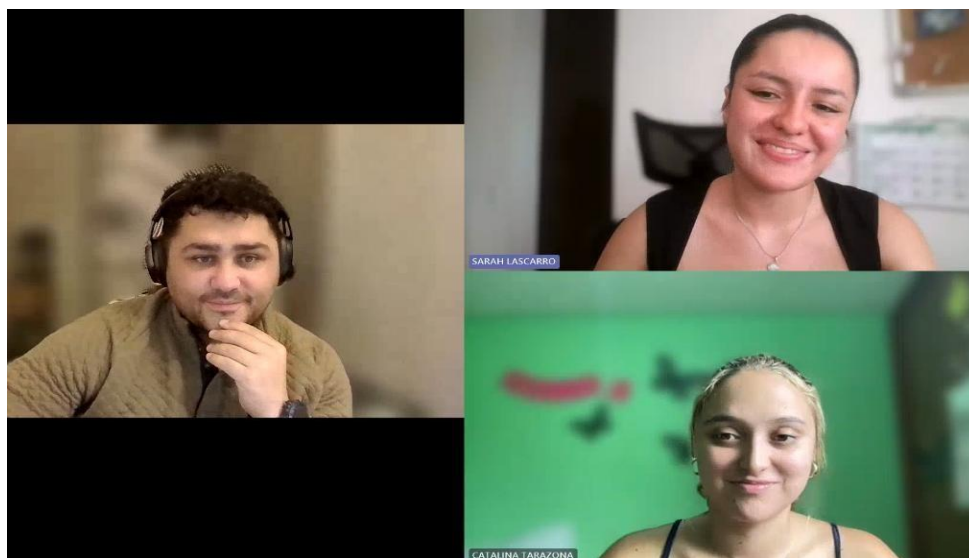
*Evidencia de la entrevista realizada a Julián Lopéz vía Microsoft Teams.*



*Nota.* Captura de pantalla realizada por las autoras (Sarah Lascarro y Catalina Tarazona) en la plataforma Microsoft Teams el 29 de septiembre de 2025.

**Figura B.9.**

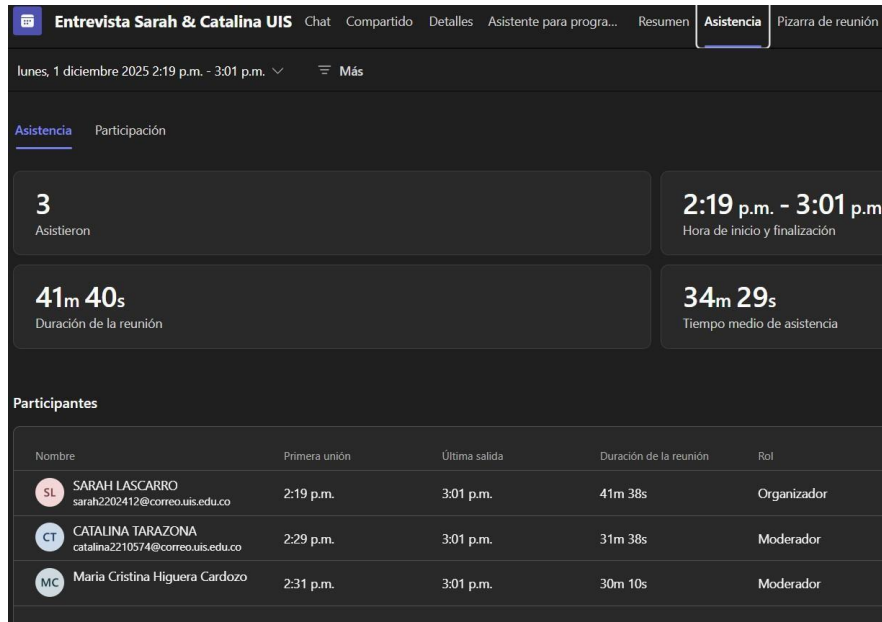
*Evidencia de la entrevista realizada a Gabrijel Grubac vía Microsoft Teams.*



*Nota.* Captura de pantalla realizada por las autoras (Sarah Lascarro y Catalina Tarazona) en la plataforma Microsoft Teams el 17 de noviembre de 2025.

**Figura B.10.**

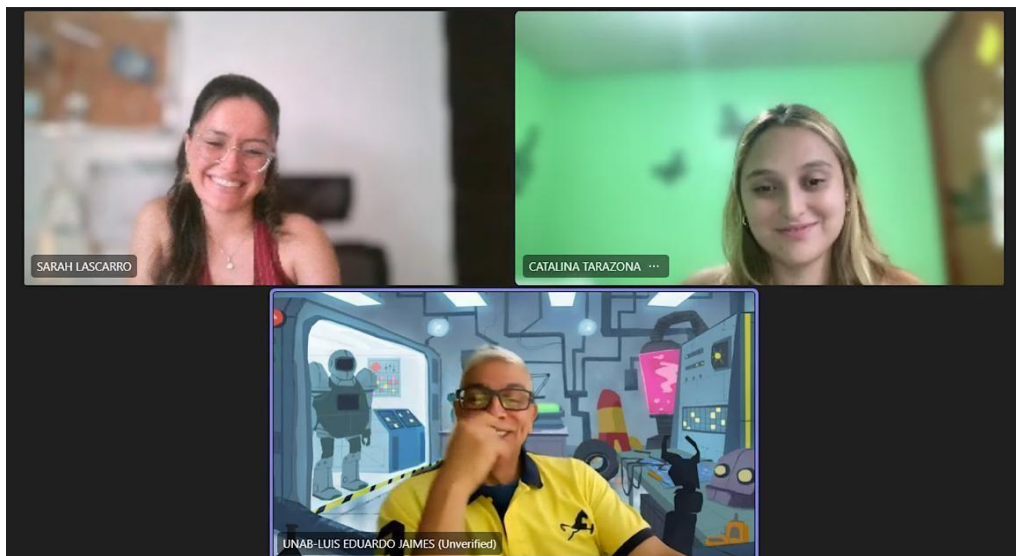
*Evidencia de la entrevista realizada a María Cristina Higuera vía Microsoft Teams.*



*Nota.* Captura de pantalla realizada por las autoras (Sarah Lascarro y Catalina Tarazona) en la plataforma Microsoft Teams el 1 de diciembre de 2025.

**Figura B.11.**

*Evidencia de la entrevista realizada a Luis Jaimes Reatiga vía Microsoft Teams.*



*Nota.* Captura de pantalla realizada por las autoras (Sarah Lascarro y Catalina Tarazona) en la plataforma Microsoft Teams el 05 de diciembre de 2025.

**Figura B.12.**

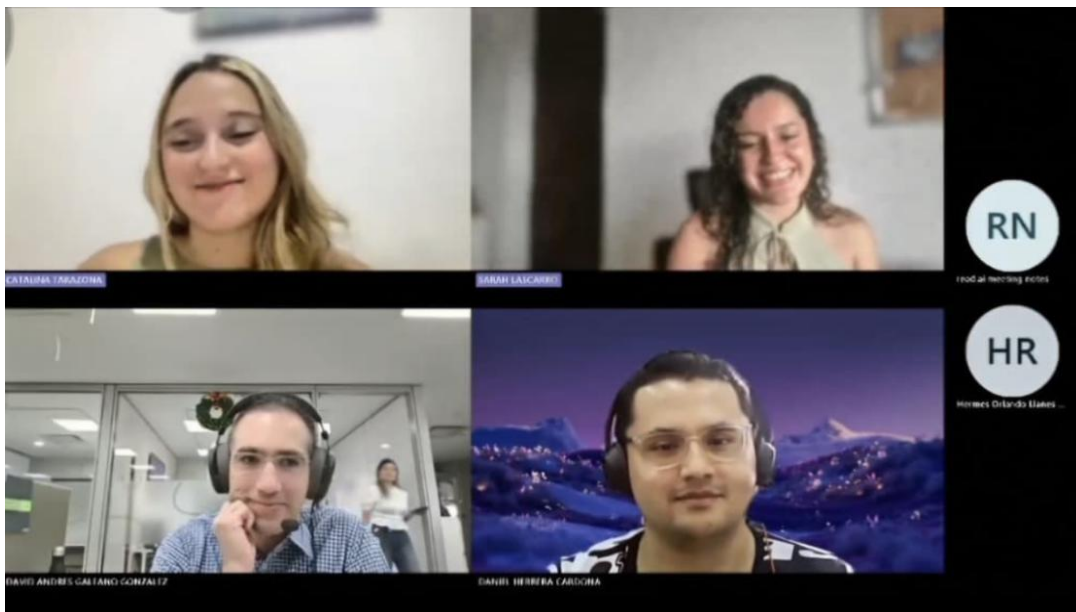
*Evidencia de la entrevista realizada a Elizabeth Torio Henríquez vía Google Meet.*



*Nota.* Captura de pantalla realizada por la autora (Sarah Lascarro) en la plataforma Google Meet el 16 de diciembre de 2025.

**Figura B.13.**

*Evidencia de la entrevista realizada a miembros de la Red Nuclear Colombiana vía Microsoft Teams.*



*Nota.* Captura de pantalla realizada por las autoras (Sarah Lascarro y Catalina Tarazona) en la plataforma Microsoft Teams el 19 de diciembre de 2025.

### Apéndice C. Preguntas a Expertos

Como se estableció en el marco metodológico de esta investigación (ver Sección 4.2.2), las interacciones con los especialistas de los sectores nuclear y geotérmico se estructuraron bajo un modelo de entrevista semiestructurada. Este enfoque permitió que los diálogos se desarrollaran de manera flexible, orgánica y conversacional, adaptando las líneas de profundización técnica de acuerdo con la trayectoria, experticia y aportes específicos que surgían durante el intercambio con cada entrevistado.

Por lo tanto, el proceso no obedeció a un cuestionario predefinido. En su lugar, cada sesión se articuló a partir de una pregunta generadora o eje orientador, la cual sirvió como punto de partida para explorar los desafíos, viabilidades e implicaciones de estas tecnologías en el contexto colombiano. A continuación, se presentan las preguntas base utilizadas para abrir la discusión técnica en cada especialidad:

- **Para expertos en energía nuclear:**

*¿Cuáles considera usted que son los principales puntos de quiebre, desafíos y oportunidades para la implementación de la energía nuclear en Colombia?*

- **Para expertos en energía geotérmica:**

*¿Qué hoja de ruta considera necesaria para integrar la energía geotérmica dentro de la matriz energética colombiana?*

### Apéndice D. Grabación de Entrevistas

Con el propósito de garantizar la transparencia investigativa, la fidelidad de la información recolectada y facilitar la verificación del soporte empírico de este trabajo, a continuación, se presentan algunas de las sesiones de entrevista que fueron grabadas bajo el consentimiento informado de los participantes.

Debido al carácter dinámico y conversacional de los encuentros, estos archivos multimedia constituyen la memoria viva del análisis implementativo de la tesis.



### Referencias Bibliográficas

- AES Colombia. (2023). ¿Cuál es la energía geotérmica y cómo podemos aprovecharla?
- Argentina.gob.ar, (2022). Filmus visitó la obra del CAREM25, primer reactor diseñado y construido en el país.
- Botero-Gómez, L. A., Murcia, H., Sánchez, J. J., Gómez-Vasconcelos, M. G., López-Palacio, J., Botero-Gómez, L. A., Murcia, H., Sánchez, J. J., Gómez-Vasconcelos, M. G., C López-Palacio, J. (2025). Métodos de exploración y sistemas geotérmicos en Colombia con énfasis en el volcán Nevado del Ruiz, proyecto geotérmico Valle de Nereidas. Boletín de Geología, 47(1), 63-91.
- Burgueño Erick. (2025). Global deaths per energy source. Cariaga Carlo. (2025). Top 10 Geothermal Countries 2024.
- CDC. (2024). Guidelines for ALARA – As Low As Reasonably Achievable.
- Chatzis Irena, B. M. (2021). ¿Qué es la fusión y por qué es tan difícil de lograr? | OIEA.
- Contreras, D. (2016). El impacto de El Niño en Colombia. Revista Fasecolda, (163), 42–46.
- De Vries, A. (2023). The growing energy footprint of artificial intelligence. Joule, 7(10), 2191-2194.
- Decreto 1598 de 2024 - Gestor Normativo - Función Pública (2024). Decreto 1598 de 2024 Nivel Nacional.
- DelPlata Green. (2024). La importancia de diversificar el portafolio energético para un futuro sostenible - DelPlata Green.
- Endesa, (2024). ¿Cuál es la vida útil de una central nuclear?
- Enrique, J., Fernández, S., Andrés, F., Sánchez, M., Autónoma, U., C Bucaramanga, D. E. (2025). PROPUESTA DE UN MODELO CONCEPTUAL DE DESARROLLO DE ENERGÍA NUCLEAR PARA LA AMPLIACIÓN DE LA CANASTA ENERGÉTICA EN COLOMBIA.
- Galeano, D. (2024). El éxito de la era nuclear en Colombia dependerá de la articulación entre la academia, la industria.
- Galeano, D. (2023). La Energía Nuclear en el Sector Eléctrico Colombiano: Una Alternativa Técnica y Sostenible. Rev. ion, 3c (3), 7-14.

- García, A. (2021). La energía nuclear salvará el mundo. Editorial Planeta. Globaqua. (2022). Energía nuclear y el consumo del agua.
- Graham, E., Fulghu, N., C Altieri, K. (2025). Global Electricity Review 2025 | Ember.
- Gülden Gökçen Akkurt, & Tümcen Şen. (2012). Optimization of Single Flash Geothermal Power Plants based on Resource Temperature.
- IAEA. (2024). ¿Qué es la energía nuclear? ¿Qué es la energía atómica? Definición | OIEA. IAEA. (2023). United States - Countries & Regions.
- IAEA. (2024). Electricity 2024 – Analysis - IEA.
- IAEA. (2020). Clean Energy: Nuclear Power’s Role in Decarbonization (IAEA-TECDOC-1986).
- IAEA. (2015). Normas de seguridad del OIEA para la protección de las personas y el medio ambiente.
- IGA. (2025). Geothermal Energy Database - International Geothermal Association. IEA. Electricity – Global Energy Review 2025 – Analysis IEA.
- International Atomic Energy Agency. (2024). El OIEA publica los datos sobre energía nucleoelectrica y experiencia operacional correspondientes a 2023.
- International Hydropower Association. (2020). Hydropower Status Report.
- Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE) y el Instituto Geológico y Minero de España (IGME). (2008). Manual de Geotermia.
- IRENA. (2024). RENEWABLE POWER GENERATION COSTS IN 2023.
- Jorquera, C. (2020). Extracción directa de litio ambientalmente amigable en la geotermia.
- Lugones, M. J., C Vera, N. (2024). Los programas nucleoelectricos de Argentina, Brasil y México.
- Revista Iberoamericana de Ciencia, Tecnología y Sociedad - CTS, 1S(57), 79-104.
- Marta, E., C Parejo, C. (2012). El trilema energético Cuadernos de Energía.
- Martínez-Ruiz, Y., Manotas-Duque, D. F., C Ramírez-Malule, H. (2021). Análisis de opciones reales para la valoración financiera de proyectos de energía geotérmica en Colombia.
- Revista CEA, 7(15), e1944.

Matriz Energética de Islandia 2024/2025 | Datos Low-Carbon Power. (2025).

Minenergía, (2025). Colombia supera los 3 gigavatios de energías limpias en su matriz energética. Minenergía, (2025). Catálogo Tecnológico Colombiano

Minenergía, (2025). Plan 6GW Plus: del 2% al 13,87% Colombia da un salto histórico hacia las energías limpias.

Minergia. (2026). Colombia firma acuerdo con el Organismo Internacional de Energía Atómica para evaluar energía nuclear y fortalecer su seguridad eléctrica.

Montes Zuluaga, R. (2023). Avances de la Geotermia en Colombia para la Generación de Energía Eléctrica.

Morelia, M. (2023). Estado del desarrollo de la Geotermia en México.

National Renewable Energy Laboratory (2021). Life Cycle Greenhouse Gas Emissions from Electricity Generation.

NEA (2020). Projected Costs of Generating Electricity. Portal XM. (2024). Informe Anual de Demandas.

Portillo, K. (2023). Guía sectorial Energía Contacto El Salvador.

Prieto Valderrama, C., C Patiño, D. (2025). Modeling the transition from coal to SMRs in Colombia: emissions avoidance under deterministic and probabilistic frameworks. *Frontiers in Energy Research*, 13, 1618696.

Ropero Santiago. (2024). Energía renovable en Colombia: resolver el trilema energético.

Sass, Walters (1999). Thermal regime of the Great Basin and its implications for enhanced geothermal systems and off-grid power.

Servicio Geológico Colombiano. (2023). El único reactor nuclear que hay en Colombia. <https://www2.sgc.gov.co/Noticias/tpaginas/Hoja-informativa-Reactor-Nuclear-SGC.pdf>

Servicio Geológico Colombiano. (2024). Lo que debe saber sobre la energía geotérmica en Colombia y el volcán Azufral.

Servicio Geológico Colombiano. (2025). Potencial de áreas geotérmicas | Portal de Datos Abiertos : SGC.

Top 10 Geothermal Countries. (2024). ThinkGeoEnergy.

- Tubb, K. (2019). La energía nuclear podría ser la fuente de energía limpia que el mundo necesita | CNN.
- Tucho, F., & García-de-Madariaga, J.-M. (2026). Impacto medioambiental de la inteligencia artificial: un debate pendiente. *Infonomy*, 4(1).
- Tulenbayev, Z., Zhanpeisova, A., Omarova, A., Tleshova, A., & Abdlakhatova, N. (2025). Prospects of using organic Rankine cycle for geothermal power generation. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*, 16(1), 575–583.
- UNAD. (2019). Colombia frente a una posible crisis energética: desafíos y soluciones - Noticias UNAD.
- Unesco. (2016). Tratado para proscripción de las armas nucleares en la América Latina y el Caribe (Tratado de Tlatelolco), 1Sc7 - Memory of the World - Latin America and the Caribbean.
- Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. (2024). Atlas de áreas de interés para la exploración de energía geotérmica en Colombia.
- UPME. (2015). PLAN ENERGETICO NACIONAL COLOMBIA: IDEARIO NACIONAL 2050.
- UPME, Power BI Report. (2026).
- U.S. Department of Energy. (2023). Geothermal Heat Pumps.
- U.S. Department of Energy. (2025). What is Generation Capacity?
- Wagemans, C. (1991). The nuclear fission process.
- World Nuclear Association. (2026). Nuclear Power in the World Today.
- XM. (2025). Informe riesgos operativos.
- Zappino, J. S. (2023). Ingeniería y desarrollo en el sector nuclear El CAREM-25: primer reactor nuclear de potencia íntegramente argentino.