

Energía nuclear en Colombia: una alternativa hacia la sustitución futura de otras fuentes energéticas

Nuclear energy in Colombia:
An alternative towards future
replacement of other energy sources

MARÍA CONSTANZA TORRES TAMAYO¹ - DIEGO ALEJANDRO DÍAZ ACOSTA² -
ÁLVARO HERNANDO CHAVES CASTRO³

1. Magíster en Dirección Financiera. Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1869-6080>

2. Estudiante del programa de Economía. Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito

3. Magíster en Ciencias Económicas. Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1865-3558>

maria.torres@escuelaing.edu.co - diego.diaz-a@mail.escuelaing.edu.co - alvaro.chaves@escuelaing.edu.co

Recibido: 15/02/2025 Aceptado: 27/03/2025

Disponible en http://www.escuelaing.edu.co/es/publicaciones_revista
<http://revistas.escuelaing.edu.co/index.php/reci>

Resumen

En este artículo se explora la viabilidad de incorporar la energía nuclear como alternativa estratégica para diversificar la matriz y fortalecer la seguridad energética del país, ante los crecientes desafíos derivados del cambio climático y la variabilidad climática que afecta la generación hidroeléctrica, que en el año 2024 representó el 64 % de la matriz energética en Colombia.

La investigación se enmarca en los debates contemporáneos sobre transición energética sostenible y seguridad energética, y se articula con teorías de diversificación tecnológica y mitigación de emisiones. Su principal aporte radica en analizar de manera prospectiva el uso de reactores modulares pequeños (SMR, por su sigla en inglés) en el contexto colombiano, una opción poco explorada en la región, lo cual representa una contribución novedosa frente al estado del arte centrado en tecnologías tradicionales o renovables intermitentes.

Metodológicamente, se hace un análisis descriptivo y comparativo que combina revisión documental, análisis del marco normativo actualizado (incluida la Ley Nuclear de 2025) y benchmarking con casos internacionales relevantes (Francia, China y Estados Unidos). Así mismo, se

realiza un ejercicio prospectivo de simulación del valor económico del ahorro en emisiones de carbono mediante energía nuclear. Los hallazgos evidencian que se podría evitar la emisión de entre 5,7 y 9,5 millones de toneladas de CO₂ al año.

Se concluye que la energía nuclear no solo puede complementar otras fuentes bajas en carbono, sino también atraer inversión extranjera, impulsar cadenas productivas nacionales y aportar a una transición energética más resiliente, sostenible y tecnológicamente diversa en Colombia.

Palabras claves: transición energética, energía nuclear, bonos de carbono, reactores modulares pequeños.

Abstract

In light of the growing challenges posed by climate change and the increasing variability of hydroelectric generation—which accounted for 64 % of Colombia's energy matrix in 2024—this article examines the feasibility of incorporating nuclear energy as a strategic alternative to diversify the national energy mix and enhance the country's energy security.

The study is grounded in current debates on sustainable energy transitions and energy security, drawing upon theories of technological diversification and carbon emission mitigation. Its main contribution lies in the prospective analysis of small modular reactors (SMRs) within the Colombian context—an approach scarcely explored in the region—offering a novel perspective compared to the prevailing focus on conventional or intermittent renewable technologies.

Methodologically, the research follows a descriptive and comparative design, combining literature review, analysis of the updated regulatory framework—including the 2025 Nuclear Law—and benchmarking against relevant international experiences (France, China, and the United States). In addition, a prospective simulation exercise estimates the economic value of carbon emission reductions achievable through nuclear deployment. The findings suggest that between 5.7 and 9.5 million tons of CO₂ emissions could be avoided annually.

The study concludes that nuclear energy could not only complement other low-carbon sources, but also attract foreign direct investment, stimulate domestic supply chains, and contribute to a more resilient, sustainable, and technologically diverse energy transition in Colombia.

Keywords: energy transition, nuclear energy, carbon credits, small modular reactors.

INTRODUCCIÓN

El acceso a una energía confiable y sostenible es fundamental para el desarrollo socioeconómico y para el cumplimiento de los objetivos de desarrollo sostenible (ODS) de la Organización de las Naciones Unidas (ONU), en particular el ODS 7 (Energía asequible y no contaminante) y el ODS 13 (Acción por el clima) (United Nations [UN], 2022). En Colombia, la matriz energética depende en gran medida de la hidroelectricidad, que en 2024 representó el 64 % de la generación total; sin embargo, su alta vulnerabilidad frente a fenómenos climáticos extremos (como las sequías ocasionadas por el fenómeno de El Niño en los periodos 2015-2016 y 2023-2024) plantea riesgos significativos para la seguridad energética nacional (Unidad de Planeación Minero Energética [UPME], 2024).

Aun cuando las energías renovables no convencionales, como la solar y la eólica, están en proceso de expansión, su carácter intermitente limita su capacidad para garantizar un suministro continuo. En este contexto, la energía nuclear se presenta como una alternativa de carga base con bajas emisiones, capaz de contribuir a la estabilidad del sistema eléctrico; no obstante, su adopción enfrenta barreras financieras, regulatorias y sociales que se deben considerar.

Colombia cuenta con una experiencia limitada en tecnología nuclear, centrada en la operación del reactor de investigación IAN-R1 desde 1957, lo cual proporcio-

na una base técnica inicial (International Atomic Energy Agency [IAEA], 2023b). En la recién promulgada Ley Nuclear de 2025 se establece un marco regulatorio alineado con estándares internacionales, lo que abre la puerta a la exploración de generación nuclear con fines comerciales (Ministerio de Minas y Energía de Colombia [MinMinas], 2025).

En este artículo se ofrece un análisis descriptivo y prospectivo de las posibilidades de implementación de la energía nuclear en Colombia, comparándola con otras fuentes energéticas y considerando experiencias internacionales de países líderes, como Francia (65,1 % de generación eléctrica nuclear), China (con una expansión acelerada) y Estados Unidos (con un marco regulatorio robusto) (IAEA, 2023a; Nuclear Energy Agency [NEA], 2023). En la estructura del documento se incluye una descripción técnica de la energía nuclear, sus principales ventajas y desventajas, un análisis económico prospectivo del contexto energético nacional, en el que se derivan algunas implicaciones y recomendaciones de política.

ENERGÍA NUCLEAR: PRINCIPIOS BÁSICOS DE LA ENERGÍA NUCLEAR Y CONSIDERACIONES PARA COLOMBIA

La energía nuclear se genera a partir del proceso de fisión nuclear, en el cual los núcleos de átomos de uranio-235 se dividen y liberan una gran cantidad de energía térmica. Esta energía se transforma en electricidad mediante sistemas de generación que utilizan turbinas de vapor (IAEA, 2023b). Una de las principales ventajas de este proceso es que no produce emisiones directas de gases de efecto invernadero (GEI), lo que posiciona la energía nuclear como una fuente de generación eléctrica de bajas emisiones.

En el caso colombiano, el Plan Energético Nacional 2022-2052 proyecta un crecimiento anual de la demanda eléctrica entre el 2 % y el 3 % hasta mediados de siglo, lo que acentúa la necesidad de contar con fuentes de energía estables y confiables (MinMinas, 2022). En este contexto, los reactores modulares pequeños (SMR), con capacidades que oscilan entre 10 y 300 MWe, se presentan como una opción particularmente adecuada para países con infraestructura limitada. Estos reactores ofrecen ventajas en materia de costos, seguridad operativa, escalabilidad y flexibilidad para integrarse a distintas regiones del territorio nacional (IAEA, 2024).

VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LA ENERGÍA NUCLEAR

En el contexto colombiano, comprender las ventajas y limitaciones de la energía nuclear resulta fundamental para valorar su potencial dentro de una matriz energética más diversificada. Más adelante, se presentan de manera sucinta los principales beneficios y desafíos asociados a esta fuente, con base en estudios internacionales y en las condiciones particulares del sistema energético nacional (tabla 1).

Ventajas

- **Bajas emisiones de carbono:** La energía nuclear emite alrededor de 12 gCO₂ por kWh durante su ciclo de vida, cifra comparable con las fuentes renovables y muy inferior al carbón (490 gCO₂/kWh) (IAEA, 2023c).
- **Alta eficiencia energética:** Los reactores nucleares presentan factores de capacidad superiores al 90 %, superando tecnologías renovables intermitentes como la solar o la eólica (NEA, 2023).
- **Estabilidad del suministro:** Al ofrecer una fuente de carga base continua, la nuclear contribuye a reducir la vulnerabilidad del sistema frente a la variabilidad climática, especialmente en un país como Colombia.
- **Impacto económico positivo:** La construcción y la operación de plantas nucleares pueden generar hasta 200.000 empleos directos e indirectos, al tiempo que impulsan cadenas de innovación tecnológica e industrial (Organisation for Economic Co-operation and Development [OECD], 2022).

Desventajas

- **Altos costos iniciales:** La inversión requerida para una planta nuclear convencional se estima entre 5.000 y 8.000 millones de dólares, superando los costos iniciales de tecnologías hidroeléctricas y renovables (International Renewable Energy Agency [Irena], 2023).
- **Gestión de residuos radiactivos:** Estos residuos requieren sistemas de almacenamiento seguros y a largo plazo, regulados por protocolos técnicos internacionales establecidos por el International Atomic Energy Agency (IAEA, 2023c).

- **Riesgos de seguridad:** Aunque la probabilidad de accidentes es extremadamente baja ($<10^{-6}$ por reactor-año), los eventos históricos han generado una percepción pública de riesgo difícil de revertir (NEA, 2023).
- **Desafíos regulatorios:** Su implementación exige marcos normativos sólidos, que apenas se comienzan a consolidar en Colombia con la reciente Ley Nuclear de 2025 (MinMinas, 2025).

Tabla 1
Ventajas y desventajas económicas

Fuente Energética	LCOE Aproximado (USD/MWh, 2023-2025)	Ventajas Económicas	Desventajas Económicas
Nuclear	60-100	Bajo costo operativo, larga vida útil (60+ años), generación de empleo	Alto capital inicial, largos plazos de construcción (5-10 años)
Hidroeléctrica	30-50	Bajo LCOE, almacenamiento natural, madurez tecnológica	Vulnerabilidad climática, impactos en ecosistemas y desplazamientos sociales
Solar	30-50	Costos decrecientes, rápida implementación (1-2 años), escalabilidad	Intermitencia, necesidad de almacenamiento costoso, dependencia de importaciones de paneles
Eólica	40-60	Competitiva en costas, bajo impacto operativo, integración con redes existentes	Intermitencia, altos costos en offshore, conflictos con aves y paisajes

Fuente: Elaboración propia, a partir de International Renewable Energy Agency (Irena) (2023). *Renewable power generation costs in 2023*. Irena y Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD) (2022). *Economic impacts of nuclear energy development*. OECD Publishing.

PANORAMA COMPARATIVO DE COSTOS Y DESEMPEÑO ENERGÉTICO

El costo de instalación de una planta nuclear continúa siendo significativamente superior al de otras fuentes de generación eléctrica, como la hidroeléctrica o la solar. Un reactor nuclear convencional puede requerir una inversión estimada entre 5.000 y 8.000 millones de dólares, mientras que una hidroeléctrica de capacidad

comparable suele situarse entre los 1.000 y 2.000 millones de dólares.

No obstante, al considerar el costo nivelado de electricidad (LCOE, por su sigla en inglés), que refleja el valor real por megavatio-hora generado a lo largo del ciclo de vida del proyecto, la energía nuclear resulta competitiva a largo plazo. Según datos de Irena (2023), el LCOE para la nuclear se ubica entre 60 y 100 USD/MWh en Latinoamérica; en contraste, la energía solar fotovoltaica ha reducido sus costos a un rango de 30-50 USD/MWh, mientras que la eólica se mantiene entre 40 y 60 USD/MWh. En el caso colombiano, la generación hidroeléctrica lidera con un LCOE promedio cercano a los 40 USD/MWh.

En este escenario, la energía nuclear, sobre todo mediante el uso de reactores modulares pequeños (SMR), se podría insertar como una fuente complementaria en la matriz nacional. Con un LCOE proyectado entre 70 y 90 USD/MWh, los SMR podrían aportar estabilidad frente a fenómenos climáticos como las sequías y reducir la dependencia de importaciones de gas natural.

Si bien las fuentes renovables presentan menores costos iniciales, la energía nuclear ofrece beneficios económicos más estables en el tiempo y abre oportunidades estratégicas para el país. En términos macroeconómicos, su incorporación podría contribuir entre un 1 % y 2 % del producto interno bruto (PIB), gracias a la atracción de inversión extranjera directa, el fortalecimiento de cadenas de suministro locales y el desarrollo de sectores complementarios, como la minería de uranio en regiones como el Cesar o Guainía.

El financiamiento de estos proyectos se podría articular mediante alianzas con organismos multilaterales como el Banco Mundial o fondos climáticos internacionales. Un mecanismo clave para amortizar los elevados costos iniciales (5.000-8.000 millones de dólares por planta) radica en los mercados de carbono, que permiten monetizar las reducciones de emisiones inherentes a la nuclear (12 gCO₂/kWh en ciclo de vida).

En Colombia, el marco regulatorio —establecido por la Ley 1931 de 2018 (que crea el Programa Nacional de Cupos Transables de Emisión [PNCTE]) y complementado por el Decreto 926 de 2017 para mercados voluntarios— habilita la generación de créditos de carbono en regímenes obligatorios y voluntarios, alineados con el artículo 6 del Acuerdo de París (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible [MinAmbiente], 2024). Estos

créditos, equivalentes a 1 tCO₂e por unidad, derivan de proyectos que evitan, reducen o captan emisiones, con 208 iniciativas certificadas a junio de 2023 (crecimiento anual del 35 % desde 2018), principalmente en REDD+ y renovables, pero con potencial para energía nuclear con estándares como Verra o Gold Standard (*La República*, 2024c).

El mercado voluntario, impulsado por empresas como Cabify y Postobón para metas de carbononeutralidad, registró un crecimiento del 25 % en 2024, con transacciones superiores a cinco millones de toneladas de CO₂ equivalente a precios promedio de 12.000-14.000 dólares por bono (*Asociación Colombiana de Actores del Mercado de Carbono [Asocarbono]*, 2025). El acuerdo histórico de la COP29 (noviembre de 2024) acelera el comercio global centralizado conforme a las directrices de la ONU, proyectando un mercado de 250.000 millones de dólares anuales para 2030 y compensación de 5.000 millones de toneladas métricas de CO₂ al año, con mecanismos de verificación estricta (registros independientes, intercambio de información) para evitar doble conteo y proyectos fallidos (*La República*, 2024a). Ejemplos locales ilustran la replicabilidad: más de 2.000 caficultores (parte de 15.000 en el programa “Asómbrate”) vendieron bonos por 2.340 millones de pesos en 2024, evitando la emisión de 21.440 toneladas de CO₂ por medio de la siembra de árboles de sombra, certificados vía inteligencia artificial (IA) y satélites de Microsoft (*La República*, 2024b). Aunque persisten controversias —como el *greenwashing* (78 % de proyectos voluntarios globales calificados como “probablemente basura” por *The Guardian*) y la no permanencia de reducciones forestales (Prieto Valderrama, citado en *La República*, 2024c)—, la certificación con estándares del OIEA y metodologías rigurosas (Gold Standard, por ejemplo) garantizaría la integridad de créditos nucleares, posicionando a Colombia como líder regional en financiamiento climático y facilitando la adopción de SMR para descarbonización efectiva.

CONSIDERACIONES AMBIENTALES EN EL CICLO DE VIDA DE LA ENERGÍA NUCLEAR

Una de las principales ventajas ambientales de la energía nuclear es su bajo nivel de emisiones de dióxido de carbono. A lo largo de su ciclo de vida —que incluye extracción, procesamiento de combustible, construc-

ción, operación y desmantelamiento—, la generación nuclear emite aproximadamente 12 gCO₂ por kWh, una cifra muy inferior a la del carbón (490 gCO₂/kWh) y también menor que la de la energía solar (41 gCO₂/kWh) (IAEA, 2025).

No obstante, uno de los desafíos centrales es la gestión de residuos radiactivos, los cuales se clasifican en residuos de baja, media y alta actividad. Los residuos de alta actividad requieren almacenamientos geológicos profundos, diseñados para asegurar su aislamiento por periodos que pueden ir desde décadas hasta miles de años, de acuerdo con los estándares técnicos del OIEA.

En Latinoamérica, países como Argentina han implementado sistemas de gestión avanzados que han demostrado ser efectivos y seguros. Estas experiencias indican que, con tecnología adecuada y gobernanza técnica, los riesgos ambientales se pueden controlar en forma responsable.

Otro aspecto relevante es el uso de agua para procesos de refrigeración. Las plantas nucleares requieren entre 2.000 y 3.000 litros por MWh generado, una cantidad similar a la utilizada por centrales térmicas de carbón. También existen posibles efectos en ecosistemas locales, aun cuando estos son, en general, inferiores a los asociados a fuentes como las grandes represas hidroeléctricas, que implican alteraciones significativas en cuencas y biodiversidad fluvial.

La adopción de reactores modulares pequeños (SMR) contribuye a mitigar algunos de estos impactos. Los SMR requieren hasta diez veces menos terreno que una planta nuclear convencional y presentan demandas hídricas reducidas. Estas características los hacen especialmente adecuados para su instalación en regiones ambientalmente sensibles, como algunas zonas de Colombia.

En conjunto, el ciclo de vida de la energía nuclear deja una huella ambiental considerablemente baja, lo que la convierte en una herramienta útil para el cumplimiento de las metas climáticas del país. En consonancia con el Acuerdo de París, Colombia se ha comprometido a reducir sus emisiones en un 51 % para 2030, y la inclusión de fuentes de bajas emisiones como la nuclear puede ser un componente estratégico para alcanzar dicho objetivo.

CONSIDERACIONES AMBIENTALES EN EL CICLO DE VIDA DE LA ENERGÍA NUCLEAR

Para analizar las posibilidades de implementación de energía nuclear en Colombia, resulta clave revisar las experiencias de países que han consolidado esta tecnología como parte de sus estrategias energéticas (tabla 2). En el ámbito global, en junio de 2025 se contabilizaron 416 reactores nucleares operativos, con una capacidad neta de 376.261 MWe, distribuidos en más de 30 países. Cuatro naciones concentran cerca del 70 % de esta capacidad: Estados Unidos (94 reactores), China (58), Francia (57) y Rusia (36) (IAEA, 2025).

En Latinoamérica, aun cuando el desarrollo nuclear es más limitado, existen casos relevantes. Argentina opera tres reactores, mientras que Brasil y México cuentan con dos cada uno. Estas experiencias regionales ofrecen ejemplos de cómo la energía nuclear se puede integrar en matrices diversificadas y coexistir con fuentes renovables y convencionales.

Cada uno de los líderes mundiales ha seguido rutas distintas con lecciones valiosas. Francia apostó desde los años setenta por una estrategia de seguridad energética basada en la nuclear, lo que le permitió minimizar la dependencia de combustibles fósiles e incluso estabilizar los precios de la electricidad a largo plazo. China, por su parte, ha demostrado una notable capacidad de ejecución al construir nuevos reactores en plazos de cuatro a cinco años gracias a un modelo de inversión pública sólido y cadenas de suministro locales, lo que ha permitido reducir costos significativamente. Estados Unidos, a su vez, ha enfocado sus políticas en seguridad, especialmente después del accidente de Three Mile Island; ha desarrollado un sistema regulatorio riguroso y ha otorgado licencias de operación extendidas hasta 80 años para algunas de sus plantas.

Para Colombia, estas experiencias internacionales ofrecen lecciones estratégicas. Una hoja de ruta realista podría contemplar alianzas bilaterales con Francia o China para procesos de transferencia tecnológica, así como la adopción gradual de reactores modulares pequeños (SMR) como vía de entrada al desarrollo nuclear. Estos modelos, por su menor escala y costos reducidos, le permitirían al país minimizar riesgos financieros y sociales en las etapas iniciales de implementación.

Tabla 2
Comparativo internacional

País	Número de Reactores Operativos (2025)	Capacidad Instalada (GWe)	Porcentaje de Electricidad Nuclear	Lecciones para Colombia
Estados Unidos	94	~95	~20%	Enfoque en regulación estricta y extensión de vida útil de reactores; genera empleo masivo pero enfrenta costos altos en nuevas construcciones.
Francia	57	~63	~70%	Dependencia alta para estabilidad energética; éxito en estandarización de diseños, reduciendo costos operativos.
China	58	~55	~5% (creciendo)	Expansión rápida con costos bajos (hasta 30% menos que en Occidente); énfasis en innovación y SMR para exportación.
Rusia	36	~30	~20%	Integración con exportaciones de tecnología; resiliencia en climas extremos.
Argentina	3	~1.8	~7%	Cooperación regional; gestión de residuos efectiva en contextos similares a Colombia.

Fuente: Elaboración propia, a partir de International Renewable Energy Agency (Irena) (2023). *Renewable power generation costs in 2023*. Irena y Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD) (2022). *Economic impacts of nuclear energy development*. OECD Publishing.

ANÁLISIS DEL MERCADO ENERGÉTICO COLOMBIANO

La matriz energética colombiana se caracteriza por una fuerte dependencia de la generación hidroeléctrica, que representa cerca del 70 % de la producción total de electricidad en la actualidad, seguida por un 20 % de fuentes térmicas (gas y carbón, en especial) y un 10 % de energías renovables no convencionales, como la solar y la eólica. Esta estructura, aunque históricamente ha permitido una generación relativamente limpia, ha demostrado ser vulnerable a condiciones climáticas extremas.

Eventos como las sequías registradas en 2024 — que redujeron en un 30 % la capacidad de generación hidroeléctrica— evidencian los riesgos de contar con una matriz tan concentrada en fuentes sensibles a variaciones hidrológicas. En este contexto, la incorporación de la energía nuclear se plantea como una opción estratégica para fortalecer la resiliencia del sistema eléctrico colombiano mediante la diversificación tecnológica.

El marco regulatorio establecido por la Ley Nuclear de 2025 representa un paso importante en esta dirección. Dicha normativa creó la Autoridad Nacional de Seguridad Nuclear (ANSN), encargada de supervisar el uso pacífico de la energía nuclear en el país y de garantizar el cumplimiento de compromisos internacionales, como el Tratado de No Proliferación Nuclear (TNP).

Las experiencias regionales respaldan esta posibilidad. En México, por ejemplo, los dos reactores operativos de la central nuclear Laguna Verde aportan alrededor del 10 % de la electricidad del país, sin generar interrupciones significativas en la red y con capacidad incluso para exportar excedentes.

En el caso colombiano, proyecciones iniciales indican que un reactor modular pequeño (SMR) de 300 MWe podría ser viable siempre que logre comercializar energía a un precio cercano a 70 USD/MWh. En estas condiciones, se estima que el proyecto podría atraer hasta 2000 millones de dólares en inversión internacional, especialmente si se apalanca en esquemas de financiamiento verde y alianzas multilaterales.

Además, este tipo de iniciativas se alinea con los compromisos adquiridos por Colombia en el marco de la COP29, donde se acordó el objetivo global de triplicar la capacidad nuclear instalada para 2050. En este contexto, la energía nuclear no solo contribuiría a la seguridad energética, sino también al posicionamiento internacional del país como actor comprometido con la transición energética y la mitigación del cambio climático.

Desde una perspectiva social, uno de los principales desafíos será la aceptación pública del desarrollo nuclear. En este sentido, resultará clave implementar campañas de educación y comunicación pública, como las desarrolladas en Francia, que han demostrado eficacia para reducir percepciones negativas, aumentar el conocimiento técnico y generar confianza ciudadana.

SIMULACIÓN DEL VALOR ECONÓMICO DEL AHORRO EN EMISIONES DE CARBONO MEDIANTE ENERGÍA NUCLEAR (2024-2045)

Como parte de las actividades desarrolladas en el semillero “Herramientas computacionales para el análisis económico”, se hizo un ejercicio de simulación prospectiva en R Studio para estimar el beneficio económico derivado del ahorro en emisiones de CO₂ al sustituir

generación térmica a base de carbón por un reactor modular pequeño (SMR) de 300 megavatios eléctricos (MWe)¹.

Metodología

Este análisis, en el que se utilizan precios internacionales del carbono, sirve como insumo técnico para adoptar decisiones de política energética y climática en Colombia.

En el presente ejercicio de simulación, en el que se toma como año base el 2024, se utilizaron los siguientes supuestos técnicos y de precios:

- Capacidad instalada: 300 MWe
- Factor de capacidad: 90 %
- Energía generada al año:

$$E_{\text{anual}} = 300 * 0,9 * \frac{8760}{1000} = 2365,2 \text{ GWh / año}$$

- Factores de emisión:
- Carbón: 820
- Nuclear: 12

$$\Delta \text{CO}_2 = 1,939 * 10^6 - 0,028 * 10^6 \approx 1,91 \text{ millones de toneladas}$$

En relación con el precio del carbono², se utilizaron los siguientes escenarios:

- Escenario bajo: 30 USD/ton
- Escenario medio: 50 USD/ton
- Escenario alto: 70 USD/ton

En la figura siguiente (figura 1) se muestra la evolución del precio del carbono para la Unión Europea (UE)

1. Un megavatio equivale a un millón de vatios. Así, un MWe indica la *potencia eléctrica generada, no térmica* y se usa en contextos de generación de energía, especialmente en centrales nucleares, para distinguir entre la potencia eléctrica neta que se entrega a la red (MWe) y la potencia térmica generada por el reactor (MWt), antes de las pérdidas por conversión.
2. No se debe confundir el *precio del carbono* (USD/ton CO₂), que representa el valor asignado a las emisiones de dióxido de carbono en mercados de carbono o impuestos ambientales, con el *precio del carbón* (USD/ton), que corresponde al valor comercial del combustible fósil utilizado para generación térmica. Ambos términos son distintos en significado, unidad y propósito.

durante el periodo 2010-2025. Se destaca el incremento sostenido del precio a partir del año 2016, debido a la reforma estructural del European Union Emissions Trading System (EU ETS), en el que la Unión Europea implementó reformas profundas en el diseño del mercado; esto incluyó:

- Reserva de estabilidad del mercado para retirar el exceso de permisos que había deprimido los precios y redujo significativamente la oferta en el mercado, lo que incrementó el precio por tonelada de CO₂.
- Disminución del tope anual de emisiones, lo que permitió reducir el número total de permisos disponibles a un ritmo más acelerado; esto creó escasez relativa y generó subidas adicionales en los precios.

La subida en los precios del carbono también se explica por el incremento en la ambición climática en la UE, donde se anunciaron objetivos más exigentes en la reducción de emisiones para el 2030 y la meta de carbononeutralidad en 2050 hizo que los agentes del mercado anticiparan mayores precios futuros, lo cual trajo consigo una mayor demanda de permisos y otra elevación de precios. De igual manera, el mayor interés de los inversionistas por considerar como activos financieros los derechos de emisión atrajo la atención de los fondos de inversión y *traders*, que inyectaron liquidez y presión alcista al mercado.

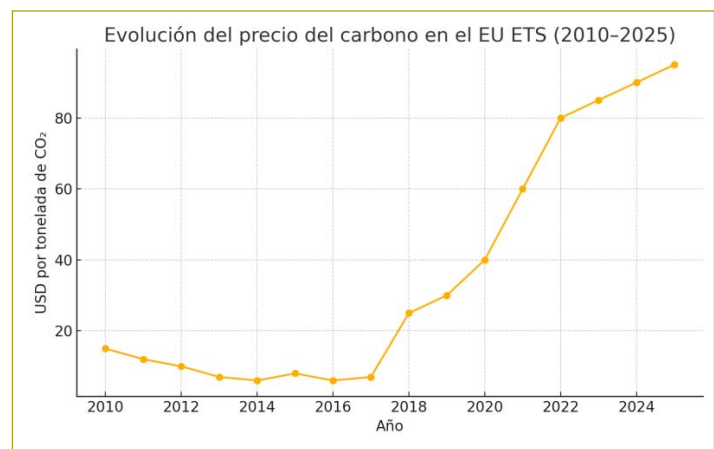


Figura 1. Dinámica del precio del carbono en la Unión Europea.

Fuente: Elaboración propia, a partir del Sistema de Transacción de Emisiones de la Unión Europea (European Union Emissions Trading System, EU ETS).

A continuación, se revela la comparación internacional de precios del carbono en el año 2024 para un conjunto seleccionado de países, en el que se encuentra Colombia (figura 2).

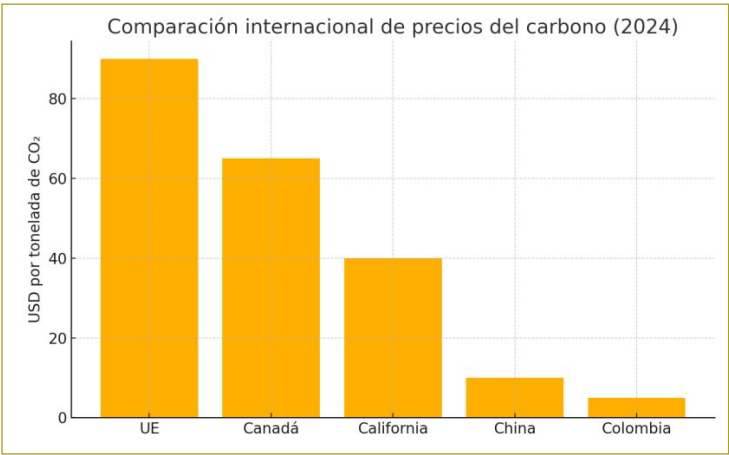


Figura 2. Cotización internacional del carbono (2024).
Fuente: Elaboración propia, a partir del Sistema de Transacción de Emisiones de la Unión Europea (European Union Emissions Trading System, EU ETS).

En la figura se puede apreciar una clara disparidad en los precios del carbono entre diferentes regiones en el año 2024. La Unión Europea (UE) encabeza la lista con más de 85 USD/ton CO₂, seguida por Canadá (~70 USD) y California (~40 USD), esta última considerada individualmente debido a su robusto mercado estatal de emisiones, independiente del sistema federal estadounidense. En contraste, China y Colombia presentan precios significativamente más bajos, inferiores a los 10 USD/ton, que reflejando mercados aún en desarrollo.

En el caso colombiano, esta baja valorización limita el atractivo financiero para tecnologías bajas en carbono, como los reactores modulares pequeños (SMR). Sin embargo, también representa una ventana de oportunidad: si el país fortalece su sistema de precios —ya sea mediante expansión del impuesto al carbono o participación en mercados voluntarios—, se podría aumentar la competitividad de tecnologías limpias y atraer financiamiento internacional.

En ese contexto, alinear el precio del carbono con estándares globales se podría convertir en una herramienta clave de política energética y climática. Esto no solo generaría incentivos económicos para nuevas tecnologías, sino que también facilitaría el cumplimiento de los compromisos de reducción de emisiones adquiridos por Colombia en el marco del Acuerdo de París y otras iniciativas multilaterales.

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

A partir de los supuestos y los parámetros utilizados, los resultados de la simulación realizados en R Studio se presentan a continuación (tablas 3 y 4):

Tabla 3
Resultados de simulación

Escenario precio	Emisiones Evitadas (ton)	Valor monetario anual (USD)
Bajo	1,91 millones	57.300
Medio	1,91 millones	95.550
Alto	1,91 millones	133.775

Fuente: Cálculos propios, a partir de Banco Mundial, ICAP, EEX, IEA y OECD Nuclear Energy Agency.

El análisis computacional demuestra que, incluso con una sola planta, el valor ambiental del ahorro en emisiones es tangible (hasta 134.000 USD/año en 2024). Hacia 2045, una expansión moderada a 3-5 SMR podría generar entre 500.000 y 1,4 millones de dólares anuales solo por concepto de bonos de carbono. Esta “renta ambiental” se debe considerar dentro de estrategias de financiamiento climático, instrumentos de mercado y políticas energéticas que premien la descarbonización efectiva y sostenible.

Por otro lado, se hizo un ejercicio adicional de prospectiva para el año 2045 con escenarios de expansión nuclear en Colombia, los cuales se muestran a renglón seguido (tabla 4).

Tabla 4
Proyección prospectiva al 2025

Reactores SMR	Precio (USD/ton)	Emisión evitada (Mt CO ₂)	Valor anual (USD)
3	100	5.73	573.000
5	150	9.55	1.432.500

Fuente: Cálculos propios, a partir de Banco Mundial, ICAP, EEX, IEA y OECD Nuclear Energy Agency.

En razón del interés nacional por la diversificación energética y los compromisos de reducción de emisiones, se proyectó un escenario moderado en el que Colombia incorpora entre tres y cinco reactores

SMR hacia 2045, sumando una capacidad de entre 900 y 1500 MWe. Así mismo, se supuso un precio del carbono en 2045 entre 100-150 USD/ton, que refleja un escenario climático agresivo (ver Banco Mundial e IEA), se supuso un número de reactores entre 3 y 5 y, finalmente, un ahorro de emisiones por cada SMR de 1,91 Mt CO₂/año.

El ejercicio de proyección muestra que, con precios internacionales del carbono entre 100 y 150 dólares por tonelada, un conjunto de entre tres y cinco reactores SMR en operación podría evitar entre 5,7 y 9,5 millones de toneladas de CO₂ al año. Esto se traduce en un valor potencial de entre 573.000 y 1,43 millones de dólares anuales en créditos de carbono, dependiendo del escenario. Aunque estas cifras no cubren por completo los costos operativos de una planta nuclear, sí representan una fuente complementaria de ingresos que podría ser significativa en esquemas de financiamiento verde o acuerdos multilaterales de descarbonización.

CONCLUSIONES

A lo largo de este artículo se analizó, desde una perspectiva descriptiva y prospectiva, el papel potencial de la energía nuclear como alternativa dentro de una matriz energética colombiana en transformación. A partir del análisis de tendencias globales, características técnicas de los reactores modulares pequeños (SMR) y un ejercicio de simulación económica basado en bonos de carbono, se identificaron oportunidades y desafíos para su futura implementación.

La energía nuclear, aunque todavía marginal en Colombia, representa una opción viable de diversificación, especialmente ante los riesgos de desabastecimiento que enfrenta el país por su alta dependencia hidroeléctrica. El avance normativo reciente —en particular, la Ley Nuclear de 2025— crea condiciones iniciales favorables para explorar esta fuente en forma responsable. Experiencias internacionales como las de Francia, China y Argentina demuestran que la adopción de SMR puede reducir barreras financieras y sociales, así como ofrecer mayor flexibilidad, menores requisitos territoriales y mejor adaptabilidad a sistemas eléctricos en expansión.

El ejercicio de simulación realizado, tomando como base un reactor de 300 MWe con un factor de planta del 90 % y precios internacionales del carbono en torno a los 50 dólares por tonelada, proyectó la posibilidad de

generar más de 95.000 dólares anuales en ingresos por bonos de carbono. Si bien estas cifras no son determinantes por sí solas, ilustran cómo la valorización de las emisiones evitadas puede contribuir a amortiguar parte de los costos operativos o servir como instrumento de atracción de inversión internacional mediante mecanismos verdes. En un escenario en el que Colombia avance en mercados voluntarios o regulados de carbono, estos ingresos podrían escalar, particularmente si se amplía la participación nuclear en la matriz.

Las implicaciones de política apuntan hacia una estrategia gradual que combine pilotos regionales de SMR, alianzas internacionales para transferencia tecnológica, esquemas de financiación híbrida y una estrategia comunicativa orientada a mejorar la percepción social. Así mismo, será clave continuar avanzando en investigación aplicada, simulación de escenarios energéticos y evaluación de impactos en el ámbito local, que permita integrar esta fuente dentro de un sistema energético más resiliente, sostenible y alineado con los compromisos climáticos nacionales al 2030 y al 2050.

REFERENCIAS

- Asocarbono (2025). *Informe del estado actual del mercado de carbono*. <https://asocarbono.org/wp-content/uploads/2025/09/Informe-del-Estado-Actual-del-Mercado-de-Carbono-...>
- DeepL GmbH (2023). DeepL Translator [Software]. <https://www.deepl.com/translator>
- International Atomic Energy Agency (IAEA) (2023a). *Nuclear power and the clean energy transition*. IAEA.
- International Atomic Energy Agency (IAEA) (2023b). *Nuclear Technology Review 2023*. IAEA.
- International Atomic Energy Agency (IAEA) (2023c). *Life cycle assessment of electricity generation systems*. IAEA.
- International Atomic Energy Agency (IAEA) (2024). *Advances in small modular reactor technology developments*. IAEA.
- International Atomic Energy Agency (IAEA) (2025). *Power Reactor Information System (PRIS) Database*. IAEA.
- La República (2024a). COP29 llega a un acuerdo para ejecutar el comercio mundial de créditos de carbono. <https://www.larepublica.co/globoeconomia/cop29-llega-a-un-acuerdo-para-ejecutar-el-comercio-mundial-de-creditos-de-carbono-4005723>
- La República (2024b). Más de 2000 productores de café venden bonos de carbono. <https://www.larepublica.co/empresas/mas-de-2-000-productores-de-cafe-venden-bonos-de-carbono-3716079>
- La República (2024c). Bonos de carbono: solución y controversia. <https://www.larepublica.co/especiales/bonos-sostenibles/bonos-de-carbono-solucion-y-controversia-3722164>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MinAmbiente) (2024). *Contexto de mercados de carbono*. <https://www.>

- minambiente.gov.co/mercados-de-carbono/contexto-mercados-de-carbono/
- Ministerio de Minas y Energía de Colombia (2022). *Plan Energético Nacional 2022-2052*. Gobierno de Colombia.
- Ministerio de Minas y Energía de Colombia (2025). *Ley Nuclear: marco regulatorio para el uso pacífico de tecnologías nucleares*. Gobierno de Colombia.
- Nuclear Energy Agency (NEA) (2023). *The costs of decarbonisation: system costs with high shares of nuclear and renewables*. OECD Publishing.
- OpenAI (2023). ChatGPT (Mar 14 version) [Large language model]. <https://chat.openai.com/>
- Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD) (2022). *Economic impacts of nuclear energy development*. OECD Publishing.
- International Renewable Energy Agency (Irena) (2023). *Renewable power generation costs in 2023*. Irena.
- Organización Latinoamericana de Energía (Olade) & International Atomic Energy Agency (IAEA) (2024). *Perspectivas para la energía nuclear en América Latina y el Caribe*. Olade.
- Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) (2024). *Informe Anual del Sector Eléctrico Colombiano 2024*. Gobierno de Colombia.
- United Nations (UN) (2022). *Sustainable Development Goals Report 2022*. UN.
- xAI (2025). Grok (versión 4) [Inteligencia artificial generativa]. <https://grok.x.ai>