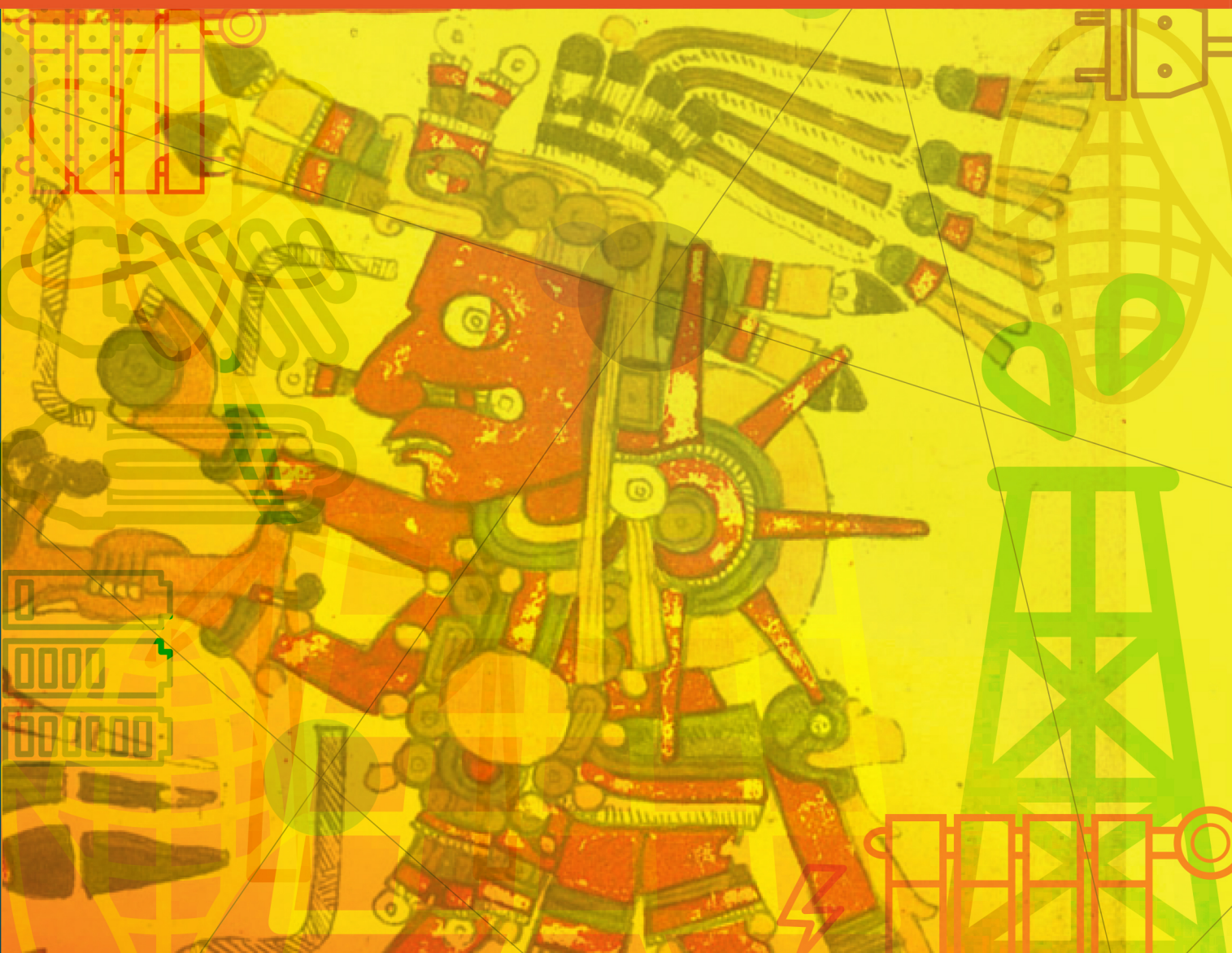


COLECCIÓN  
**TEXTOS  
HUMANÍSTICOS  
Y CIENTÍFICOS  
MEXICANOS**

# Energía y sostenibilidad

**Luca Ferrari**  
**Hipólita Ramajo García**



**CONAHCYT**  
CONSEJO NACIONAL DE HUMANIDADES  
CIENCIAS Y TECNOLOGÍAS

# COLECCIÓN

## TEXTOS HUMANÍSTICOS CIENTÍFICOS MEXICANOS

---

El Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (Conahcyt) fomenta, a través de la colección Textos Humanísticos Científicos Mexicanos, el estudio y la reflexión crítica sobre áreas del conocimiento de alta relevancia para el país entre las nuevas generaciones en formación.

La colección se integra por obras de consulta y estudio en áreas científicas, tecnológicas y humanísticas escritas por personas investigadoras que trabajan en México y está dirigida principalmente a estudiantes de licenciatura y posgrado que buscan materiales especializados de consulta.

Esta iniciativa pone énfasis en áreas del conocimiento que, por su importancia nacional, regional y global, requieren atención prioritaria dentro del panorama académico y editorial. En particular, busca abrir camino en disciplinas poco abordadas por la literatura científica convencional, con el propósito de contribuir a la expansión de los horizontes del saber.

Con esta colección, el Conahcyt y el Fondo de Cultura Económica reafirman su compromiso con la promoción del conocimiento como una herramienta para el desarrollo sostenible, el bienestar social, y el avance científico y cultural de México.



# Energía y sostenibilidad

COLECCIÓN  
**TEXTOS  
HUMANÍSTICOS  
Y CIENTÍFICOS  
MEXICANOS**



# Energía y sostenibilidad

Luca Ferrari  
Hipólita Ramajo García



Primera edición, 2024

Ferrari, Luca e Hipólita Ramajo García

Energía y sostenibilidad / Luca Ferrari, Hipólita Ramajo García. --

México : Conahcyt, Instituto Mora, 2024

408 p. : ilus., maps., figuras, tablas ; 27 x 20 cm - (Colec. Textos

Humanísticos y Científicos Mexicanos)

ISBN en formato impreso: 978-607-8273-89-8

ISBN en formato digital: en trámite

1. Recursos energéticos renovables - Aspectos ambientales
2. Recursos energéticos - México 3. Desarrollo energético - México
4. Desarrollo sustentable - México 5. Política energética - México
6. Medio ambiente - México 6. Divulgación científica I. Ramajo García, Hipólita, coaut. II. t. III. Ser.

LC HD9505.M4

Dewey 333.794 F566e



### *Distribución Nacional*

© Autores: Luca Ferrari, Hipólita Ramajo García

© Diseño de portada: José Salvador Jaramillo Aguilar

D.R. © 2024 Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías  
Av. Insurgentes Sur 1582, col. Crédito Constructor,  
Benito Juárez, Ciudad de México, CP 03940

D. R. © 2024 Instituto de Investigaciones Dr. José María Luis Mora  
Calle Plaza Valentín Gómez Farías 12, col. San Juan Mixcoac, Ciudad  
de México, CP 03730

Todos los derechos reservados. Queda prohibida la reproducción parcial o total de esta obra por cualquier medio o procedimiento, comprendidos la reprografía y el tratamiento informático, la fotocopia o la grabación, sin la previa autorización por escrito del Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías.

Esta publicación forma parte del proyecto "Plataformas de difusión científica: narrativas transmedia para México" del Instituto de Investigaciones Dr. José María Luis Mora, proyecto apoyado por el Conahcyt en el año 2024.

ISBN en formato impreso: 978-607-8273-89-8

ISBN en formato digital: en trámite

*Distribución gratuita, prohibida su venta*

Impreso y hecho en México

# Presentación

---

## Desde un abordaje pedagógico-didáctico

Esta obra pretendía ser, en un inicio, un instrumento para organizar y recopilar el contenido temático de una de las materias de la licenciatura de “Ciencias Ambientales” y la de “Energías Renovables” impartidas por las personas autoras en la Escuela Nacional de Estudios Superiores (ENES) de la Universidad Nacional de México (UNAM); no obstante, a medida que sus páginas iban cobrando vida, se hizo presente la necesidad de ser un medio a través del cual se mostrase, con mayor claridad, la crisis política, energética y de especie en la que nos encontramos sumergidos y con la intención última y quizás utópica de provocar, como sostenía Morín (1999), un cambio fundamental en los estilos de vida y comportamientos en todos los ámbitos –filosóficos, psicológicos, sociológicos y espirituales–. Este libro se concibe como un material de apoyo con un enfoque interdisciplinar y una perspectiva socio-crítica para las escuelas.

Y se preguntarán, ¿por qué para la escuela? Pues porque, además de ser núcleos dinámicos donde se reproducen los sentimientos, pensamientos y acciones de gran escala, desde ella se puede llegar a impactar más profundamente a partir de una concientización de los actores que la conforman aplicando una pedagogía más crítica, como bien argumentaba Giroux (1988). Una pedagogía que permita a la comunidad docente identificar las limitaciones y potenciar las capacidades para conseguir su autosuperación, de manera que se genere un impacto en las prácticas sociales, como argumentaba Freire en el clásico *Pedagogía del oprimido* (1969).

Entre los diversos propósitos de este libro se encuentra el de promover la comprensión de la *energía* a lo largo de la historia. A través de los diferentes periodos de la historia la energía ha determinado el desarrollo, auge y declive de las civilizaciones, su economía y nivel de bienestar. Pero con el descubrimiento y uso de los combustibles fósiles, la humanidad ha tenido acceso a un reservorio de energía concentrada y controlable que ha permitido el desarrollo de la civilización industrial y el crecimiento exponencial de la población mundial.

Sin embargo, el sistema energético global construido sobre los combustibles fósiles está llegando a su límite, tanto por los costos económicos y energéticos crecien-

tes de su extracción, como por el rebasamiento de los límites ecológicos del planeta, entre los que se encuentra el cambio climático. La urgencia por disminuir el uso de los combustibles fósiles ha dado pie a diversas propuestas de sustitución por fuentes renovables; sin embargo, por sus limitaciones intrínsecas, éstas no pueden suministrar el colosal volumen de energía que sostiene al sistema actual, además de que la construcción de su infraestructura depende de manera crítica de las fuentes fósiles y otras materias primas no renovables.

El enfoque de la obra proviene de una perspectiva interdisciplinaria ya que, a pesar de que la energía sea un tema esencialmente multidisciplinario, la temática energética ha sido tradicionalmente abordada de manera parcial por especialistas en las áreas de la geología, ingeniería y física, las ciencias ambientales y sociales, y la economía, sin que exista una interacción sistémica y un entendimiento cabal de todas las facetas del problema en su conjunto.

Esta obra pretende atender esta disociación analizando la problemática del sistema energético actual y sus ramificaciones en la economía y la sociedad de una manera holística, entendiendo que nos encontramos ante uno de los grandes desafíos de la sociedad del siglo XXI. Asimismo, se concibe como material de apoyo para la docencia, con el propósito de subsanar algunos de los vacíos pedagógicos en el ámbito de la praxis educativa con temas tan delicados como es la situación energética actual y sus retos aún pendientes.

En cuanto a la estructura de este material educativo, se optó por dividirlo en tres partes. La primera introduce las bases para comprender el uso y el consumo de la energía, con la presentación de conceptos básicos como las leyes de la termodinámica, la eficiencia energética, la tasa de retorno energético y la ley de los rendimientos decrecientes en la producción de energía y de materias primas. La segunda parte presenta un análisis de las fuentes de energía primarias, tanto fósiles como renovables, además de sus limitantes físicas, técnicas y económicas; al final se hace el análisis del caso mexicano. Por último, la tercera parte expone los retos que enfrenta la transición energética al tomarse en cuenta la relación entre energía y economía, transporte y producción de alimentos, su implicación en la geopolítica, así como los posibles escenarios futuros.

El texto está escrito desde el punto de vista del maestro que explica la materia dirigiéndose a sus estudiantes. Por lo anterior, está dirigido a todas las personas participantes del proceso de enseñanza-aprendizaje. Las dos primeras partes han sido desarrolladas por medio de una estrategia pedagógico-didáctica moderna basada en el aprendizaje significativo y se apoya en el uso de recursos didácticos y actividades contextualizadas que permiten explicar, de manera más sencilla, los conceptos expuestos a la vez que sirve de ayuda al personal docente para transformar la dificultad metodológica de su aplicación en el aula, lo que permite que las y los estudian-

tes construyan nuevos conocimientos a partir de la readaptación de los conocimientos previos. Cada capítulo en particular se divide en unidades que comparten una misma estructura, a saber:

1. Aprendizajes esperados.
2. Preguntas e imágenes motivadoras para que los estudiantes empiecen a investigar el tema.
3. Teoría, narrada en primera persona del plural.
4. Actividades y estrategias sugeridas para la construcción del conocimiento.
5. Reflexiones finales.

No obstante, estas dos primeras partes también pueden ser de interés para un público más amplio, puesto que el enfoque crítico y las estrategias planteadas pueden servir para reflexionar y contribuir al aumento de una masa crítica de población consciente de que los enormes retos que enfrentamos requieren soluciones complejas y cambios profundos en todos los niveles.

La tercera parte del libro está pensada no sólo para el ámbito académico, sino para el público en general, a partir de la explicación de los eventos y conceptos energéticos más relevantes del momento, mientras se van rompiendo paradigmas por medio de lo que llamamos “crítica a la narrativa oficial”, que tiende a simplificar y sólo muestra lo que interesa a grupos de poder para continuar con un crecimiento desmesurado y ambientalmente dañino que nos desconecta cada vez más de la naturaleza.



# Agradecimientos

---

Este libro se deriva del material elaborado para un curso impartido desde 2017 en la carrera de Ciencias Ambientales, en la Escuela Nacional de Estudios Superiores (ENES) de la UNAM de Morelia, y en la carrera de Ingeniería en Energías Renovables, en la ENES de la UNAM en Juriquilla, Querétaro, a partir del 2021. La elaboración del curso y de esta obra contó con el apoyo inicial del proyecto PAPIIME UNAM PE105415 y, posteriormente, de Conahcyt, con los proyectos F003 319032 y 322760.







# Primera parte

## Conceptos generales

### 1. Energía y civilización

*No entiendo por qué cuando se destruye algo creado por el ser humano lo llamamos vandalismo, pero cuando destruimos algo creado por la naturaleza lo llamamos progreso.*

ED BEGLEY JR.

There's enough on this planet for everyone's need, but not for everyone's greed.

MAHATMA GANDHI

*Tú eres un invitado, así que deja esta Tierra un poco más bonita, un poco más humana, un poco más amable, un poco más perfumada, un poco más limpia para aquellos huéspedes desconocidos que vendrán después de ti.*

OSHO

#### 1.1 APRENDIZAJES ESPERADOS

El presente capítulo aborda conceptos generales sobre la energía en la historia y en la actualidad. A partir del contenido aquí propuesto, las personas estudiantes o lectoras interesadas sentarán las bases para tener un panorama del estado actual de la energía a nivel global y dimensionar su importancia en la civilización moderna. Entre los aprendizajes esperados se encuentran:

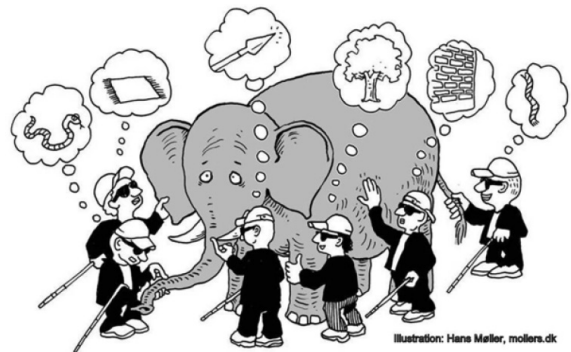
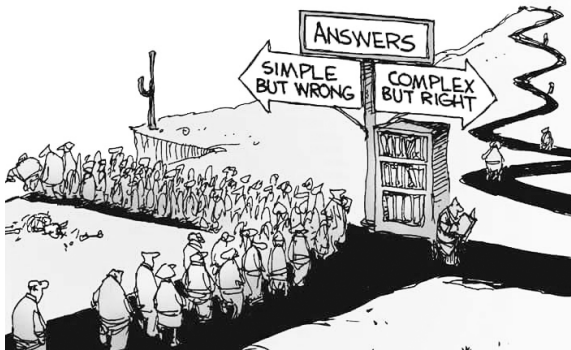
- Entender la importancia de la energía en nuestras vidas.
- Introducir los límites de los recursos del planeta y la situación crítica en que nos encontramos.
- Proporcionar un panorama amplio para que los estudiantes adquieran una mayor conciencia ambiental.

## 1.2 IMPORTANCIA DE LA ENERGÍA EN LA CIVILIZACIÓN

### Preguntas e imágenes motivadoras

#### Imágenes motivadoras

- ¿Qué te sugieren estas imágenes? Relaciónalo con el tema energético.
- Encuentra una palabra o frase y asóciala a cada imagen.



#### Sugerencias:

- Las soluciones a problemas complejos y multifactoriales no pueden ser simples.
- Disciplinariedad versus transdisciplinariedad.

**Preguntas motivadoras:**

- ¿Qué te hace pensar la expresión “crisis ambiental”?
- ¿Qué opinas de la siguiente reflexión?

"Nuestro principal problema ecológico no es el cambio climático. Es el rebasamiento de los límites del planeta del cual el calentamiento global es sólo un síntoma".

Richard Heinberg

**Preguntas motivadoras**

De estas tres perspectivas sobre la problemática energética, ¿con cuál te identificas más y por qué?

1. El agotamiento de los combustibles fósiles y el cambio climático son dos problemas que podemos resolver. Tenemos todavía muchos recursos y aunque cuando una fuente empieza a escasear la tecnología desarrolla un sustituto, el libre mercado selecciona la opción lo más eficiente. Lo que se necesita es más libertad de mercado e inversión en tecnología.
2. El cambio climático es el principal problema que enfrentamos y los hidrocarburos son su causa, por lo que hay que dejarlos en el subsuelo. Las fuentes renovables son la solución para un futuro sustentable ya que pueden proveer energía limpia para continuar con el crecimiento económico.
3. La civilización industrial se construyó gracias a fuentes energéticas de alta densidad como los combustibles fósiles. Sin embargo, estos son recursos no renovables que van declinando y no hay un sustituto con las mismas densidad energética y versatilidad. Por lo tanto, no es posible sostener el sistema actual con fuentes renovables y menos aún continuar con el crecimiento en el consumo. Es necesario un cambio de paradigma para vivir dentro de los límites energéticos y ecológicos del planeta y, al mismo tiempo, reducir la desigualdad en el consumo.

## La energía en la historia y el crecimiento exponencial

Para apreciar la importancia de la energía en la actualidad es útil analizar cómo ha aumentado la cantidad de energía consumida a lo largo de la historia a medida que la humanidad ha construido civilizaciones cada vez más complejas. La figura 1 muestra un recorrido rápido por la historia del consumo de energía per cápita:

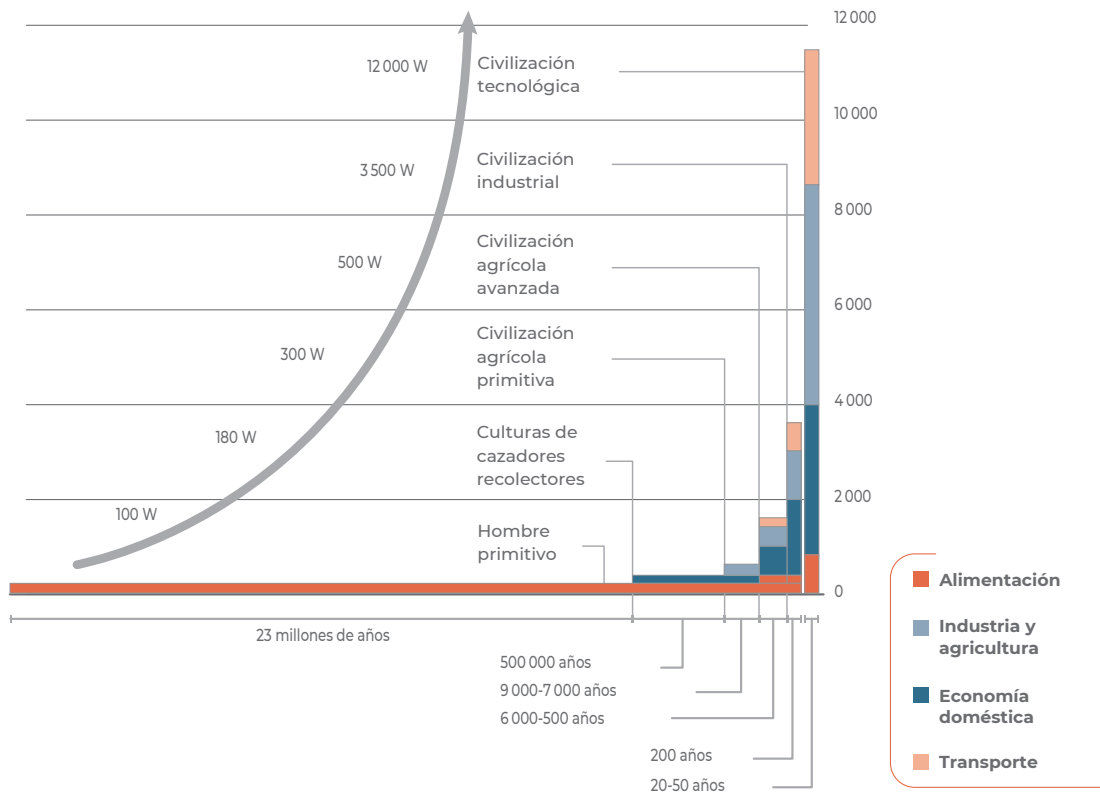
- El hombre primitivo utilizaba en promedio 100 W para sobrevivir, esto es el equivalente a un foco incandescente. La única forma de energía que tenía la humanidad era la energía química que le proporcionaba la comida (energía endosomática).
- La primera fuente de energía exosomática accesible al ser humano consistió en la combustión de leña, al lograrse el uso controlado del fuego. Con el surgimiento de las sociedades de cazadores y recolectores el consumo per cápita subió a 180 W.
- Con la implementación de la agricultura y el comienzo del sedentarismo, la humanidad incrementó su consumo hasta los 300 W per cápita.
- Con el desarrollo de sociedades agrícolas más avanzadas se llegó a los 500 W per cápita.
- Con la Revolución Industrial se alcanzaron los 3 500 W per cápita.
- Finalmente, con la civilización tecnológica actual, alcanzamos los 12 000 W per cápita.

Como vemos, el consumo tiene un crecimiento exponencial, aunque estemos poco conscientes de ello.

A partir de lo anterior se deduce que la primera transición energética ocurrió con la domesticación del fuego, cuya fuente de energía es la biomasa (leña). La era de la biomasa duró por milenios hasta que, a finales del siglo xvi, el consumo de leña empezó a ser insostenible. En este periodo, Inglaterra enfrentó una crisis energética debida al crecimiento de su población, lo que llevó a la depredación progresiva de sus bosques (figura 2).

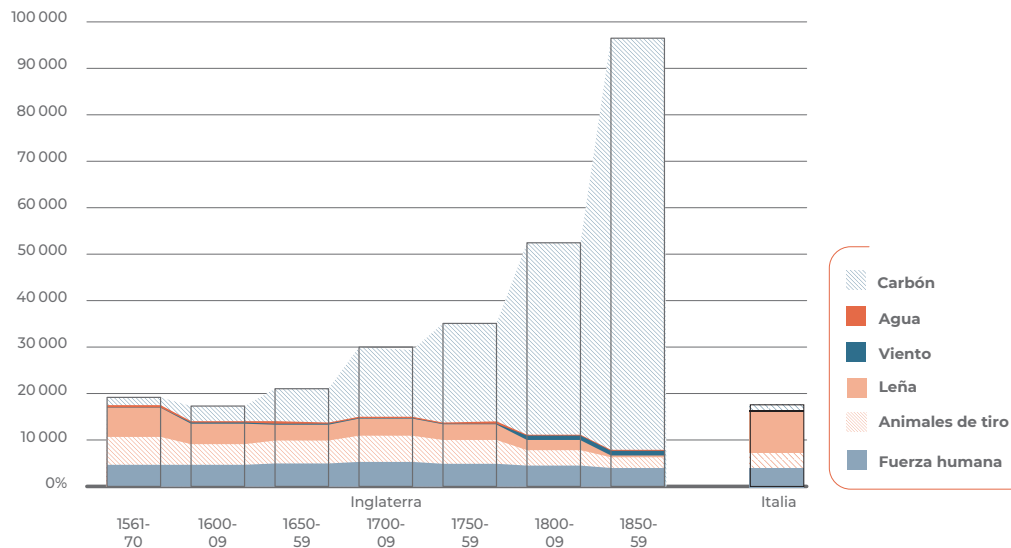
El descubrimiento del carbón fósil, un energético de mayor densidad energética, hizo que Inglaterra se convirtiera en la primera nación de Occidente en explotar el carbón a gran escala. Al principio se usaba sólo de manera directa para producir calor, pero en el siglo xvii la invención de la máquina de vapor convirtió al carbón en la fuente de energía que permitía el transporte a gran escala tanto marítimo y fluvial como terrestre.

**FIGURA 1. EVOLUCIÓN DEL CONSUMO ENERGÉTICO EN LA CIVILIZACIÓN**



Fuente: adaptado de una presentación de Pedro Prieto.

**FIGURA 2. EVOLUCIÓN DE LA MATRIZ ENERGÉTICA DE INGLATERRA EN EL PERIODO 1561-1859 Y COMPARACIÓN CON ITALIA PARA 1861-1870**

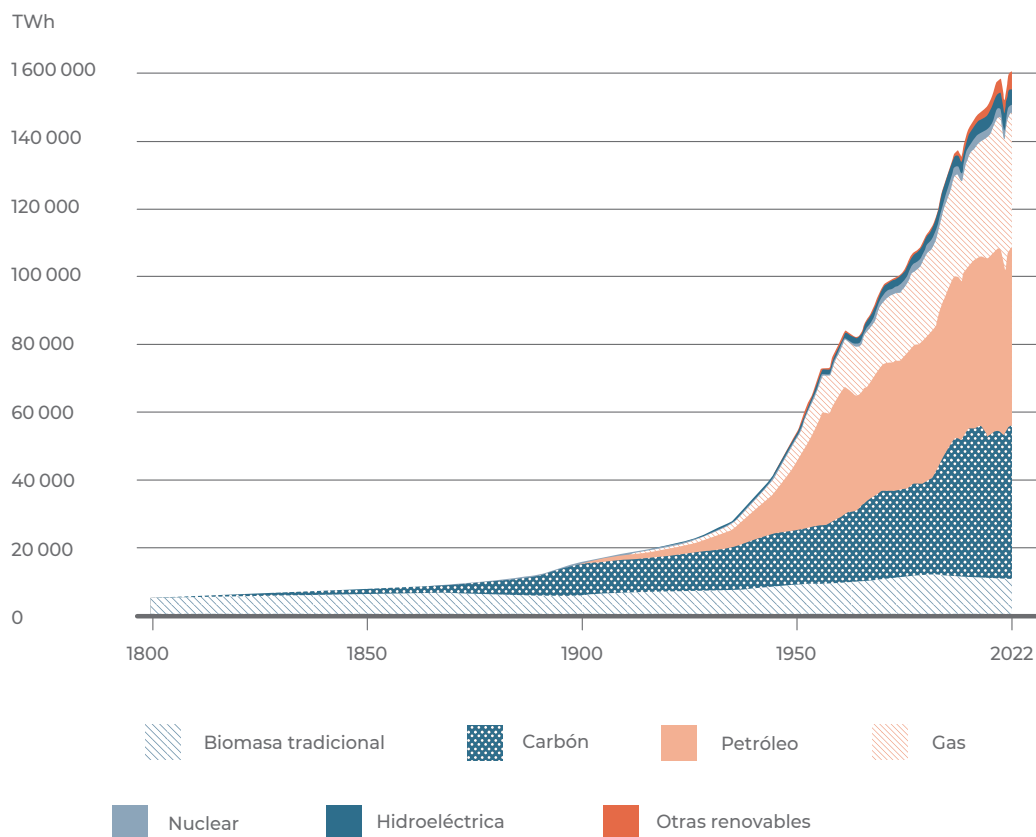


Fuente: Wrigley (2010).

Posteriormente los hidrocarburos, esto es, el petróleo y el gas, sustituyeron al carbón como fuente dominante de energía (figura 3). Ello como consecuencia del pico de su consumo en Europa a principios del siglo xx. Esta transición inició cuando Inglaterra comenzó a usar derivados del petróleo como combustible de barcos y camiones de carga durante la primera guerra mundial, lo que fue determinante para la victoria inglesa –y de la Triple Entente– sobre Alemania, aunque el uso masivo del petróleo y del gas natural se disparó después de la segunda guerra mundial.

A principios del siglo pasado se desplegaron también las primeras fuentes renovables, que fueron la hidroelectricidad y la geotermia. Finalmente, a partir de los años 70 empezó el desarrollo de la energía nuclear y, en las últimas dos décadas, empezó el despliegue de las fuentes renovables modernas, como la eólica y la solar.

**FIGURA 3. EVOLUCIÓN DEL CONSUMO GLOBAL DE ENERGÍA PRIMARIA ABSOLUTA POR FUENTE**

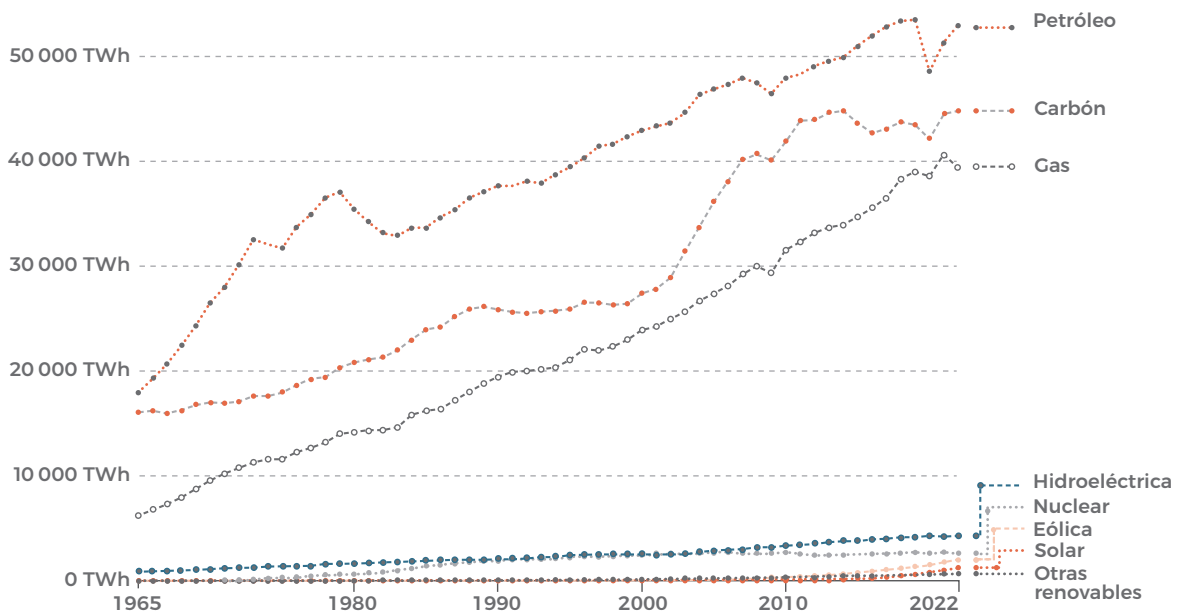


**Fuente:** adaptado del sitio [Our world in data](https://ourworldindata.org).

En la gráfica de la figura 3 se muestra la evolución del consumo de la energía en términos absolutos, desde 1800 a 2022, desglosada por fuente primaria. Lo que se observa, es, por un lado, que existe un incremento exponencial y, por otro, que no ha habido una verdadera transición, sino que las diferentes fuentes se han ido sumando para satisfacer un consumo creciente. Esto tiene relevancia en la situación actual donde se habla de transición energética de fuentes fósiles a renovables.

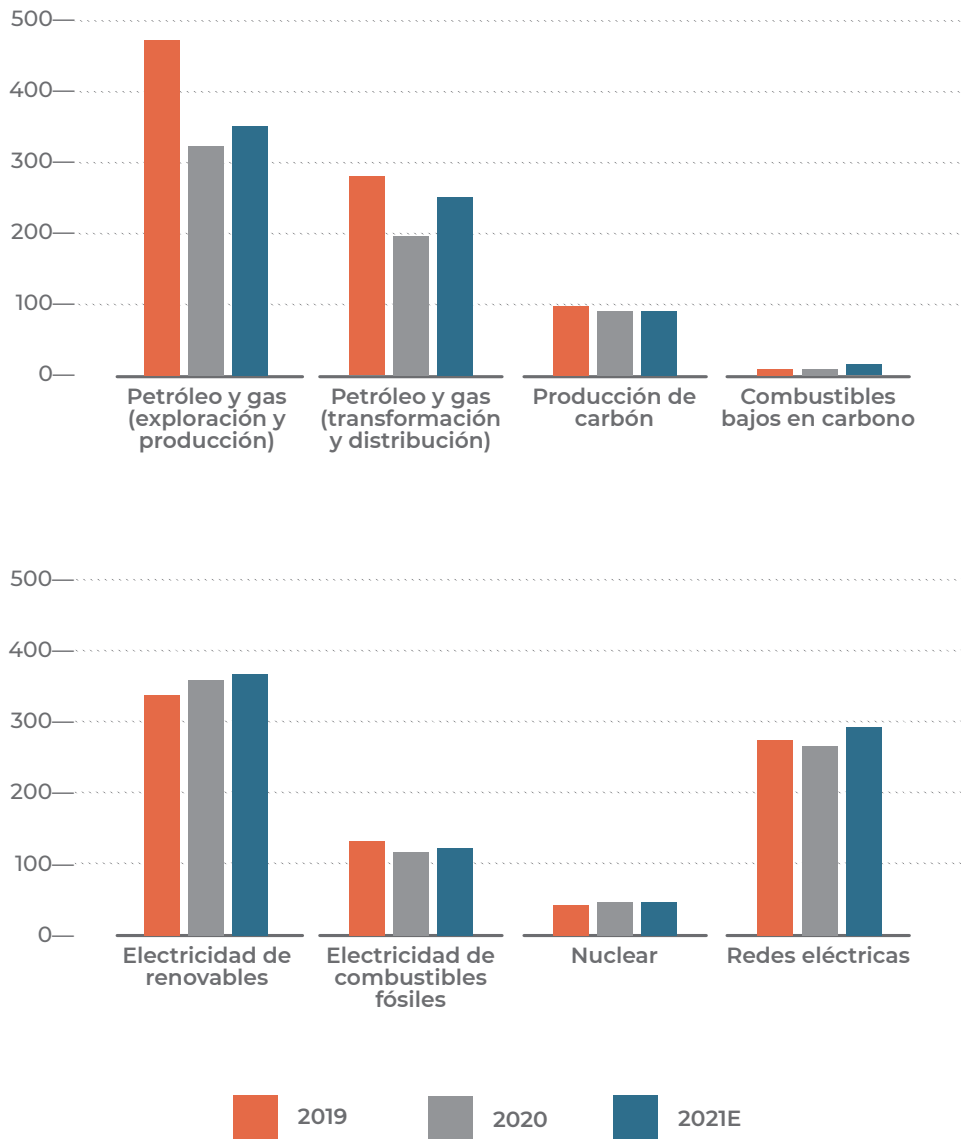
Si bien la energía renovable ha estado creciendo de manera acelerada en la última década, en términos de crecimiento absoluto los combustibles fósiles han crecido aún más (figura 4). De hecho, a pesar del énfasis en las renovables la mayor inversión en los últimos años sigue siendo en infraestructura energética basada en combustibles fósiles (figura 5).

**FIGURA 4. CONSUMO ABSOLUTO DE ENERGÍA POR FUENTE ENTRE 1965 Y 2022**



Fuente: adaptado del sitio [Our world in data](https://ourworldindata.org/).

**FIGURA 5. INVERSIÓN EN NUEVA INFRAESTRUCTURA DE ENERGÍA POR FUENTE ENTRE 2019-2021 EN MILES DE MILLONES DE DÓLARES DE 2019**



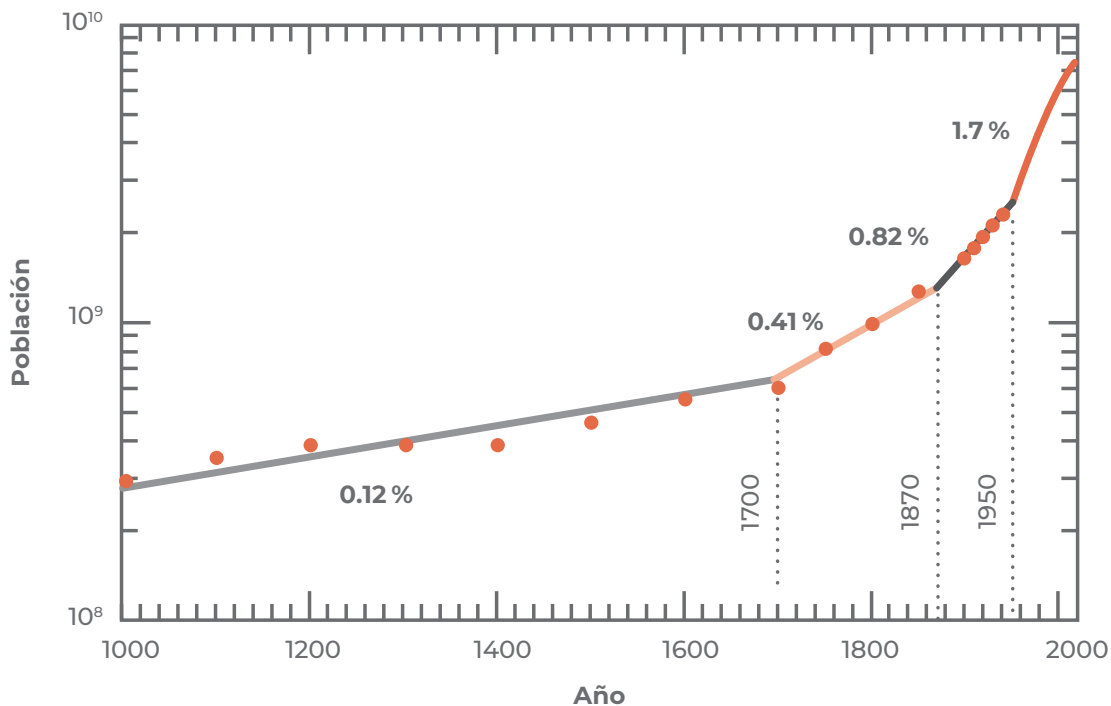
Fuente: IEA (2021).

De acuerdo con los datos de la figura 3, en 2022 los combustibles fósiles en su conjunto representaron todavía el 84% de la energía que consumimos, la biomasa tradicional el 6.9%, la nuclear el 1.6%, y las renovables el 6%. En orden de importancia, las energías renovables que contribuyen más a la matriz energética global son la hidroeléctrica, la eólica y la solar fotovoltaica, mientras que la geotérmica y demás

fuentes renovables aportan porcentajes muy pequeños. A pesar de que en la actualidad las fuentes solar y eólica tienen mayor crecimiento, su contribución es todavía menor en la matriz energética debido a sus limitaciones, un tema que analizaremos en la segunda parte del libro.

Si comparamos el crecimiento poblacional del último milenio (figura 6) podemos deducir que el consumo acelerado de la energía barata y de alta densidad energética que proporcionaron los combustibles fósiles es lo que ha permitido un incremento exponencial de la población mundial.

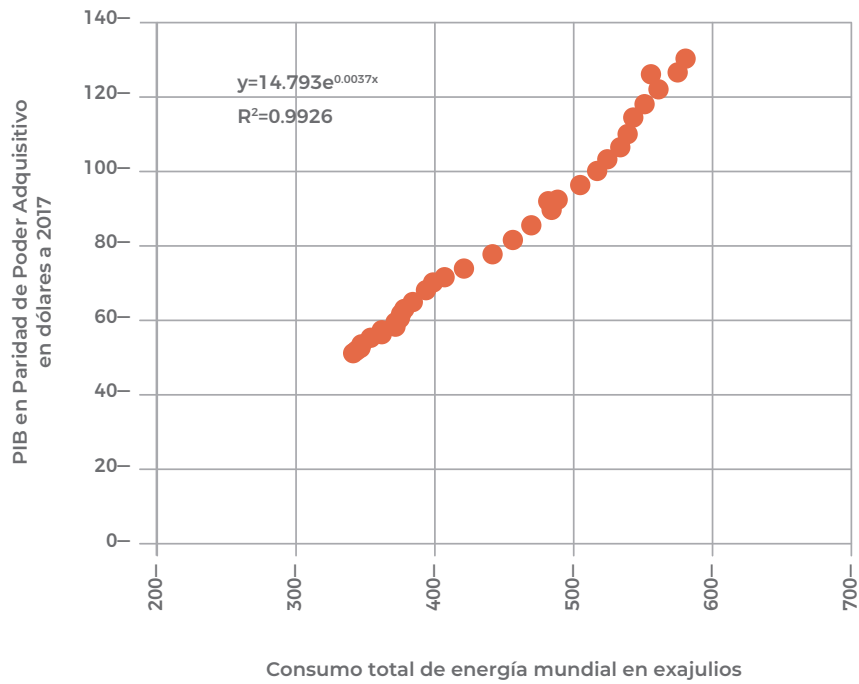
**FIGURA 6. CRECIMIENTO POBLACIONAL DEL AÑO 1000 A 2010 (EN ESCALA LOGARÍTMICA) MOSTRANDO LAS TASAS DE CRECIMIENTO ANUAL POR PERIODOS SELECCIONADOS**



Fuente: Murphy (2021).

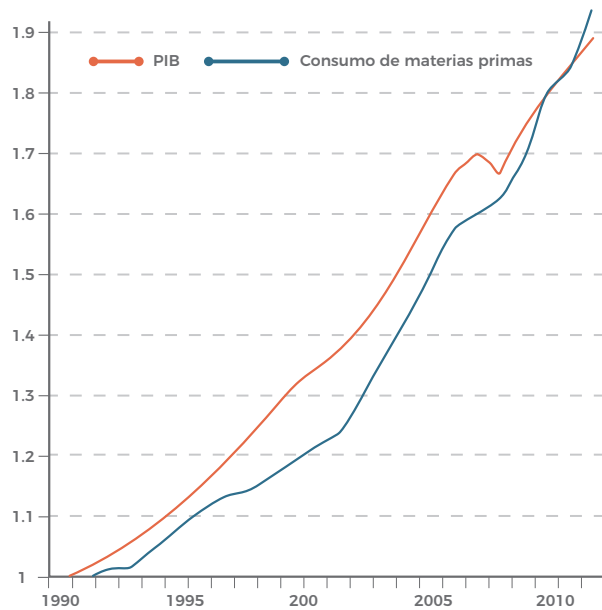
En este mismo tenor se puede observar, a nivel global, una relación estrecha entre el consumo de energía y el crecimiento económico medido con el producto interno bruto (PIB) (figura 7A). Lo que se observa es que cuando la economía crece aumenta el consumo de energía y viceversa. En algunos países desarrollados hay un ligero desacoplamiento entre estas dos variables como consecuencia de que han transferido sus industrias pesadas, con alta intensidad energética, a China y a otros países emergentes, pero a nivel global la correlación es casi perfecta. Una relación similar existe entre crecimiento económico y consumo de materias primas (figura 7 B).

**FIGURA 7.**  
**A) COMPARATIVA ENTRE EL CONSUMO MUNDIAL DE ENERGÍA Y EL PIB PARA EL PERÍODO DE 1990 A 2020**



Fuente: Tverberg (2022).

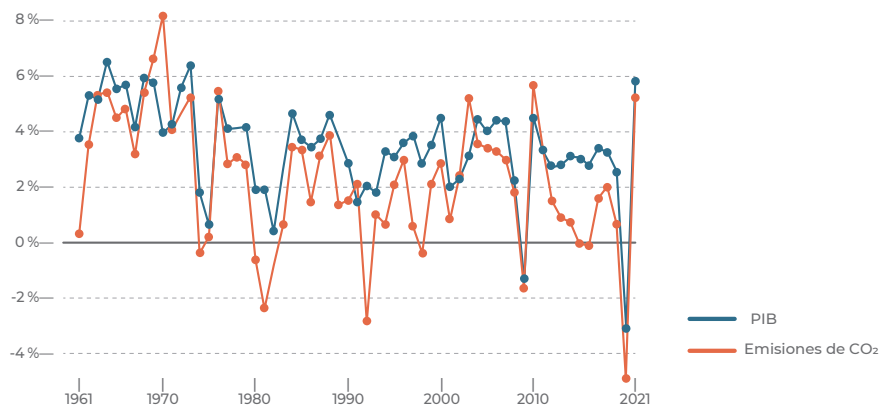
**B) RELACIÓN ENTRE EL CRECIMIENTO DEL CONSUMO DE MATERIAS PRIMAS (HUELLA MATERIAL) Y EL CRECIMIENTO DEL PIB PARA EL PERÍODO 1990-2013**



Fuente: Hickel y Kallis (2019).

Esta relación directa se observa también entre las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y el PIB (figura 8A). En otras palabras, todo crecimiento económico requiere un incremento del consumo de energía, lo que, a la par, genera emisiones de GEI. Las únicas disminuciones en las emisiones que se han dado históricamente corresponden con periodos de recesión económica (figura 8B). Un ejemplo reciente es la pandemia del covid-19, periodo en el que las emisiones de CO<sub>2</sub> bajaron entre un 6 y un 8%. Una de las conclusiones que es posible obtener de estas gráficas es que no se pueden disminuir las emisiones de GEI si no se reduce nuestro consumo energético.

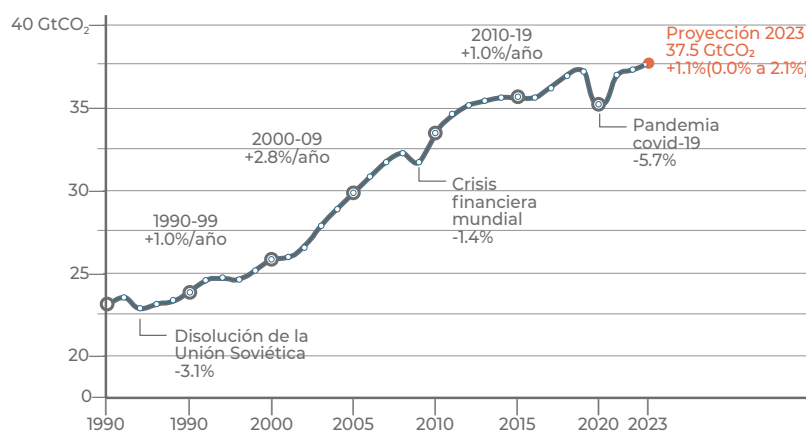
**FIGURA 8.**  
**A) VARIACIÓN PORCENTUAL ANUAL DE LAS EMISIONES DE CO<sub>2</sub> Y DE LA ECONOMÍA GLOBAL (PIB) EN EL PERIODO 1961 A 2021**



**Nota:** véase la estrecha relación entre los dos parámetros.

**Fuente:** Our World in Data.

**B) VARIACIONES DE LAS EMISIONES Y EVENTOS ECONÓMICOS Y GEOPOLÍTICOS**



**Nota:** véase cómo los pocos periodos de disminución de las emisiones se asocian a una disminución del crecimiento económico.

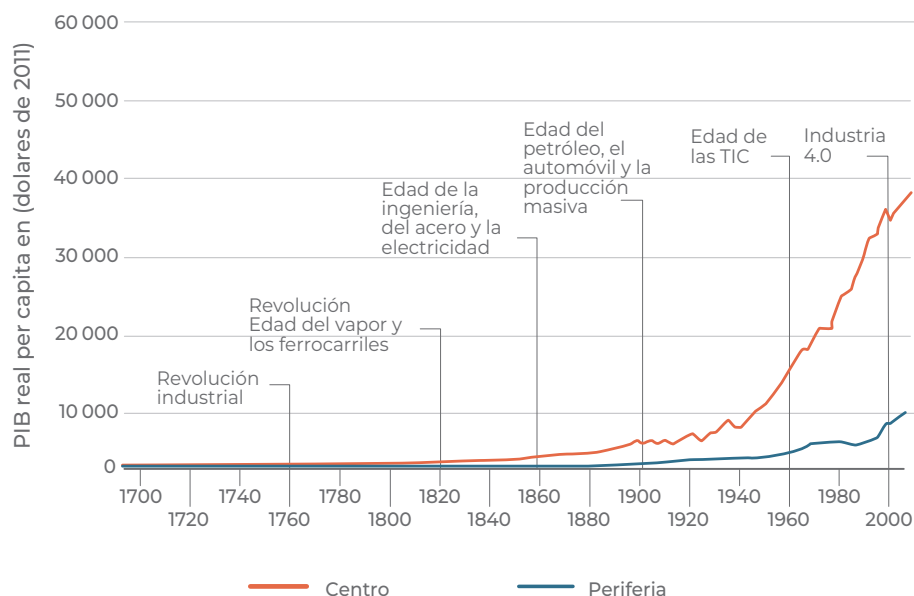
**Fuente:** Global Carbon Project (2021).

## Crisis civilizatoria

¿Qué tanto puede continuar este crecimiento acelerado del consumo de energía, materias primas, economía, pero también de emisiones de GEI y de otros impactos ambientales? Desde hace décadas la ciencia nos ha estado avisando que hay límites al crecimiento en un planeta finito (Meadows et al., 1973). En la actualidad este crecimiento nos está llevando a lo que ha sido definida como una crisis civilizatoria que tiene tres componentes:

- *Crisis energética y material:* como se explicará en detalle en la segunda parte de este libro, estamos alcanzando el máximo de la producción de recursos no renovables como los combustibles fósiles y otras materias primas, que son también necesarias para la infraestructura de aprovechamiento de las fuentes renovables. Esto se traduce en costos crecientes para su extracción que van mermando la posibilidad de continuar con el crecimiento económico.
- *Crisis ecológica:* en la actualidad ya hemos rebasado seis de los nueve límites planetarios considerados críticos (Richardson et al., 2023) con la deforestación, la sobreexplotación de los recursos hídricos, la extinción masiva de especies, la destrucción de la biodiversidad y la contaminación de suelos, agua y aire por plásticos y químicos. Hemos superado la capacidad del planeta de absorber los desechos de la actividad humana y regenerar lo que dañamos. En este contexto el cambio climático es sólo una de las consecuencias del problema causado por el crecimiento acelerado de la civilización industrial.
- *Crisis social:* tenemos una creciente inequidad en el consumo de energía y materiales entre países y al interior de cada país. Si bien se afirma que el crecimiento económico y el avance tecnológico pueden reducir la pobreza esto no se observa históricamente. La figura 9 muestra que el crecimiento económico (PIB) en los últimos 150 años ha sido muy desigual y que la brecha entre los países de mayor consumo energético –EE. UU., Canadá, Europa occidental, Australia, Nueva Zelanda y Japón– y el resto del mundo ha crecido de forma constante.

**FIGURA 9. CRECIMIENTO ECONÓMICO DIFERENCIAL DE LOS PAÍSES DEL CENTRO (ESTADOS UNIDOS, CANADÁ, EUROPA OCCIDENTAL, AUSTRALIA, NUEVA ZELANDIA Y JAPÓN) VERSUS LA PERIFERIA (RESTO DEL MUNDO)**

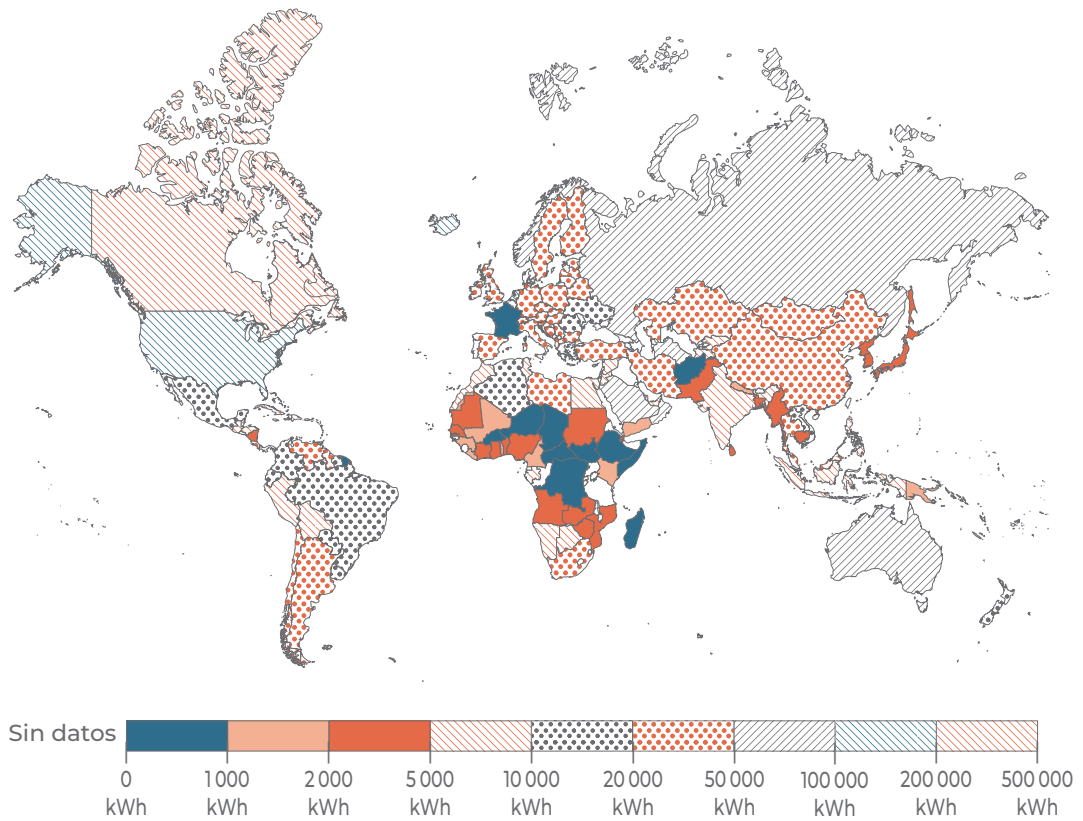


**Fuente:** adaptado de ONU Comercio y Desarrollo (UNCTAD, por sus siglas en inglés) (2021).

Si comparamos esto con la figura 10 se observa cómo los países que más han crecido su economía son también los que tienen el mayor consumo de energía per cápita.

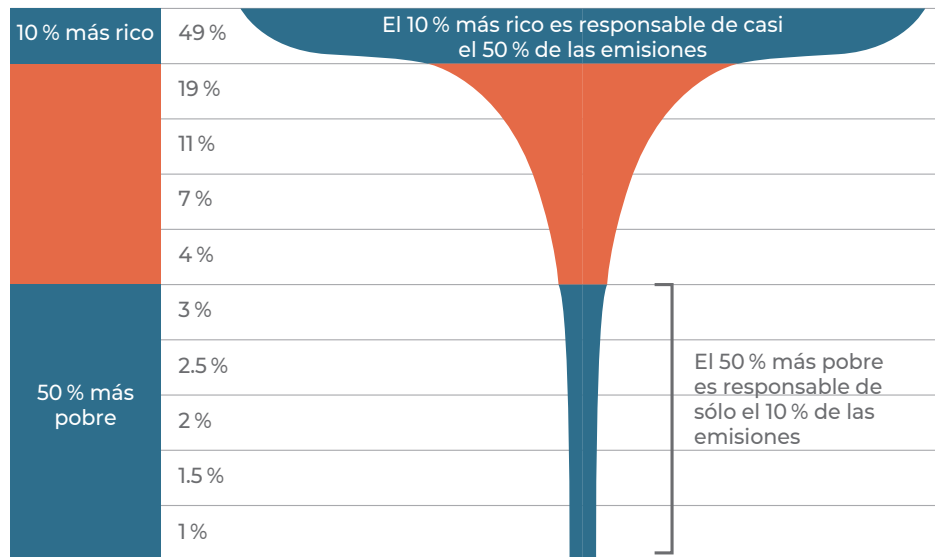
A su vez, esto se refleja en las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), donde no todos tienen la misma responsabilidad (figura 11): el 10 % más rico de la población mundial es causante de casi el 50 % de las emisiones y, por el contrario, el 50 % más pobre sólo emite el 10 %. Es importante hacer hincapié en que la inequidad se encuentra también al interior de cada país; esto es, lo que sucede a nivel de la macro escala tiene su reflejo en la micro escala. En el caso de México aproximadamente 37 % de los hogares están en pobreza energética, particularmente en lo que respecta a necesidades básicas como la calefacción y la cocción de alimentos (García-Ochoa y Graizbord, 2016) y el decil más rico de la población emite 5.3 veces lo que emite el de menor ingresos (Santillán y de la Vega, 2018).

**FIGURA 10. CONSUMO DE ENERGÍA PER CÁPITA EN 2022**



Fuente: adaptado del sitio Our world in data.

**FIGURA 11. INEQUIDAD EN LAS EMISIONES GEI A NIVEL MUNDIAL**



Fuente: tomado del reporte de Oxfam Media Briefing (2015).

## Resumen

En este primer capítulo hemos visto que el uso de fuentes de energía con alta densidad, como los combustibles fósiles, ha permitido un crecimiento exponencial de la población y de la economía global hasta alcanzar la actual civilización industrial, donde una parte de la población vive mucho mejor que los reyes de la antigüedad. Sin embargo, este crecimiento no puede continuar para siempre dado que los recursos energéticos y materiales sobre el que se basó son finitos y además hemos rebasado la biocapacidad del planeta de reciclar nuestros desechos.

El crecimiento exponencial basado en un modelo extractivista de la naturaleza es físicamente imposible y ambientalmente dañino. Pero es intrínseco a la mayoría de las teorías económicas. Estamos entonces en una situación de extrema fragilidad, cuya solución no está sólo en cambios tecnológicos o pequeñas acciones que pueda realizar la mayoría de la población mundial con menor poder adquisitivo –las cuales, sin embargo, son relevantes cuando se suman sus efectos–, sino sobre todo en cambios que debe realizar aquella parte de la población y los sectores económicos con mayor huella ecológica y material.

Estas acciones de mayor escala pasan, necesariamente, por un cambio de paradigma, que implica una reducción del consumo energético y material y una mayor equidad en la distribución de los recursos. En este sentido, el objetivo de una transición energética debe ser apoyar la construcción de una sociedad más equitativa, en armonía con el ambiente, descentralizada, basada en la cooperación, en la autogestión local y en un consumo sustentable (Ferrari y Masera, 2020).

### 1.3 ACTIVIDADES Y ESTRATEGIAS SUGERIDAS

#### *Actividad 1. Eras históricas de acuerdo con las fuentes explotadas*

Explica, mediante una línea de tiempo, la evolución de las diferentes fuentes energéticas que dominaron en distintas eras: la leña, el carbón, el petróleo, etc. Muestra la tecnología principal de cada era.

Muestra los usos donde se transforma energía térmica en energía mecánica, como por ejemplo la extracción de agua de las minas, la industria cementera, la papelera y de aluminio, las siderurgias, las locomotoras y las termoeléctricas.

## Actividad 2. Era del petróleo y de las fuentes renovables

Por parejas, realicen una tira cómica en la que se representen los inicios de la industria del petróleo y otra en la que se exhiban los comienzos de la industria de las fuentes renovables. ¿Qué similitudes encuentran?

### Sugerencias sobre el contenido:

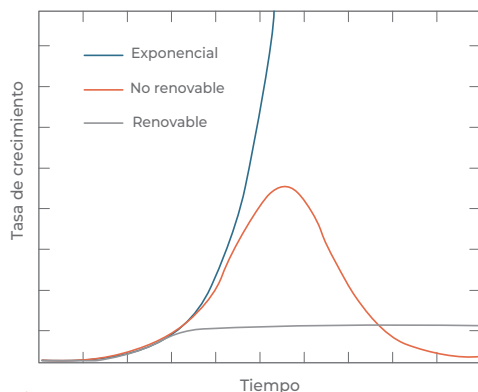
Pueden incorporar, en dicha tira cómica, los errores que se cometieron entonces y los que se están cometiendo en la actualidad desde tu punto de vista. Posibles respuestas:

La escuela económica dominante (economía neoclásica) persigue un crecimiento continuo del tamaño de la economía, medido como un porcentaje de crecimiento del PIB. Esto es un crecimiento exponencial perpetuo como el que se muestra en la figura 12. Se trata de una curva matemática que no puede darse en un planeta finito. Incluso los virus y las células cancerígenas crecen exponencialmente, pero sólo por un tiempo, antes de matar al huésped. En la realidad lo que se observa es que:

- La producción de cualquier recurso no-renovable se incrementa hasta llegar a un máximo, al que le sigue un declive (curva gaussiana).
- En el caso de fuentes renovables, idealmente, sube hasta una meseta donde se estabiliza con base en la máxima eficiencia de explotación del flujo del recurso.

Es importante hacer hincapié en que, en términos absolutos, la cantidad de energía que podemos aprovechar de los flujos de fuentes renovables es mucho menor de la que actualmente obtenemos de fuentes no renovables, dado que estas últimas son almacenes geológicos que se han acumulado y concentrado durante millones de años a partir de flujos de energía renovables.

**FIGURA 12. TRES TIPOS DE TASA DE CRECIMIENTO**



Fuente: elaboración propia.

### Actividad 3. Crecimiento exponencial

Para entender mejor el concepto de crecimiento exponencial y la problemática asociada a él se propone la siguiente actividad.

#### Procedimiento:

Revisar los siguientes videos:

- Una de mates - Crecimiento exponencial: <https://www.youtube.com/watch?v=25HUYfYnpqw>
- Superpoblación y crecimiento exponencial. Ejemplo con bacterias en botella: <https://www.youtube.com/watch?v=Z5X2eGpYZHA>

#### Preguntas guía:

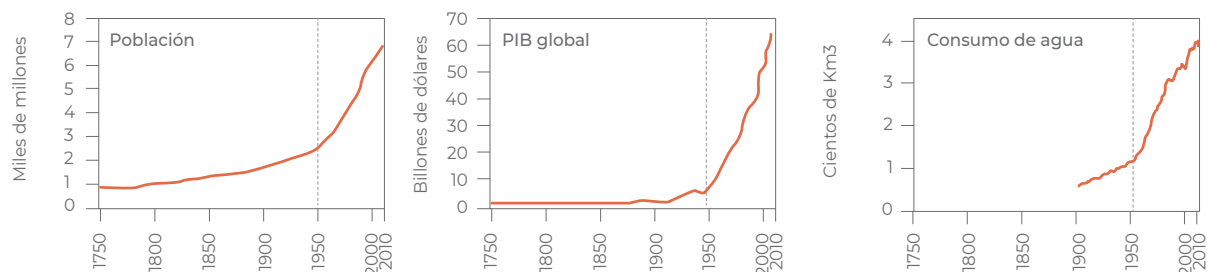
- ¿Cuánto podemos crecer verdaderamente?
- ¿Cuándo nos damos cuenta de que hemos llegado al punto de no retorno de acuerdo con el ejemplo del video? ¿Qué implica esto?

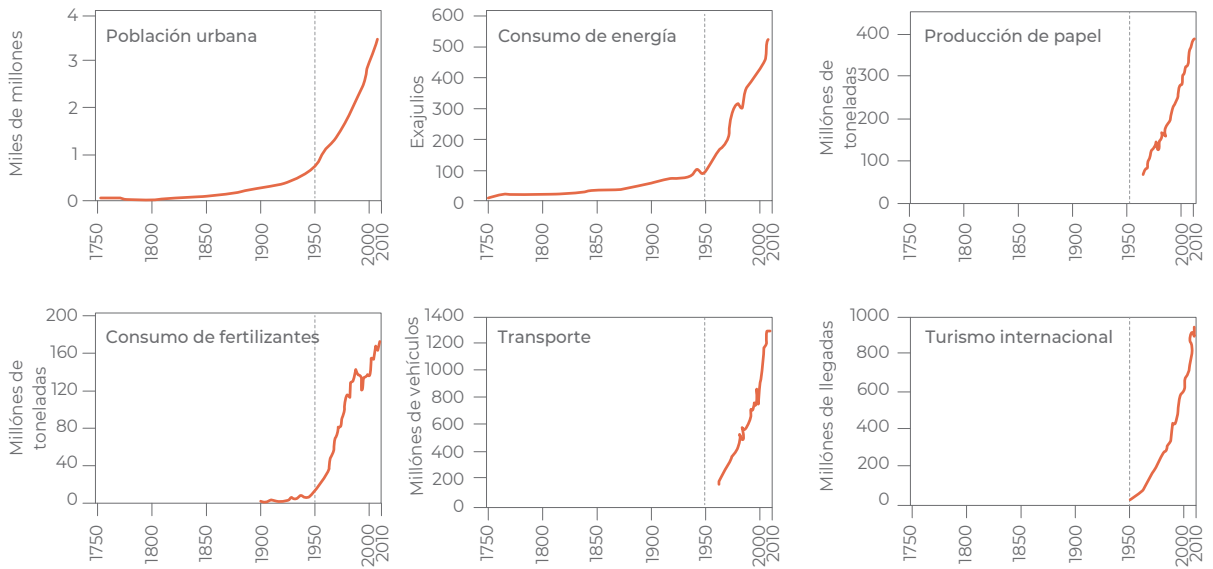
### Actividad 4. Crecimiento exponencial

#### Consumo energético y crecimiento exponencial

Observa la evolución de parámetros relevantes del sistema mundial (figura 13).

**FIGURA 13. LA GRAN ACELERACIÓN**





**Fuente:** modificado de Steffen et al. (2015).

**Procedimiento:**

- Analiza las variables mostradas en las gráficas anteriores.
- ¿Te ha sorprendido alguna de las imágenes? Explica por qué.
- ¿Encuentras alguna relación entre el uso de los combustibles fósiles y lo que se ha llamado la “era de la gran aceleración”?
- ¿Qué conclusiones extraes?

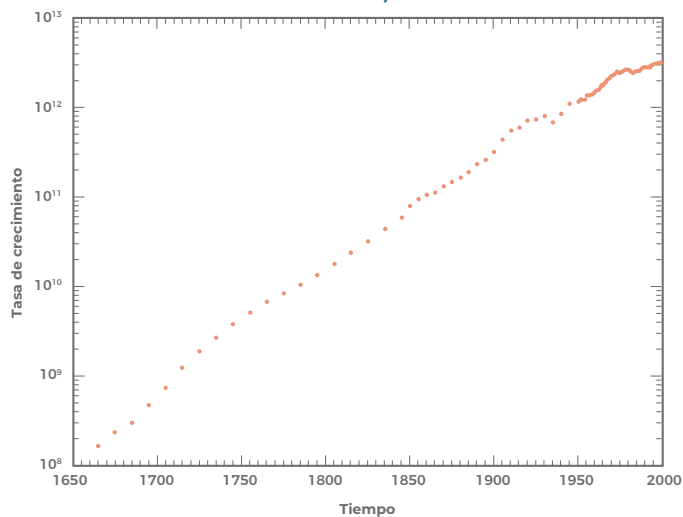
Observa en la siguiente página un ejemplo para reflexionar.

## Consumo energético exponencial

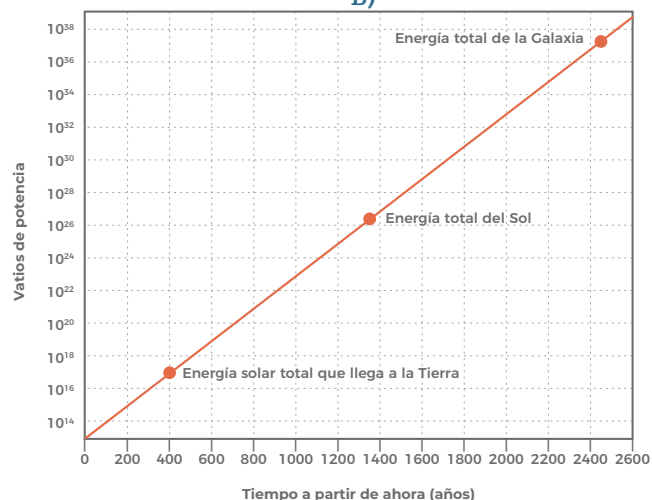
El siguiente ejemplo da cuenta de lo absurdo que es sostener energéticamente un sistema que tiene un crecimiento exponencial:

El consumo de energía de los Estados Unidos desde 1650 ha crecido a un ritmo del 2.3 % por año de acuerdo a la siguiente figura (14A):

**FIGURA 14. CONSUMO DE ENERGÍA DE ESTADOS UNIDOS DESDE 1650**  
A)



B)



Si los Estados Unidos quisieran continuar creciendo a este ritmo (figura 14B), en 345 años necesitaría toda la energía solar que llega a la Tierra; en 1350 años toda la energía del Sol; y en 2450 años toda la energía de la galaxia (Murphy, 2021).

### Actividad 5. Tres crisis principales

#### Síntesis de la información

Tomando en cuenta las tres crisis que enfrentamos realiza la siguiente actividad.

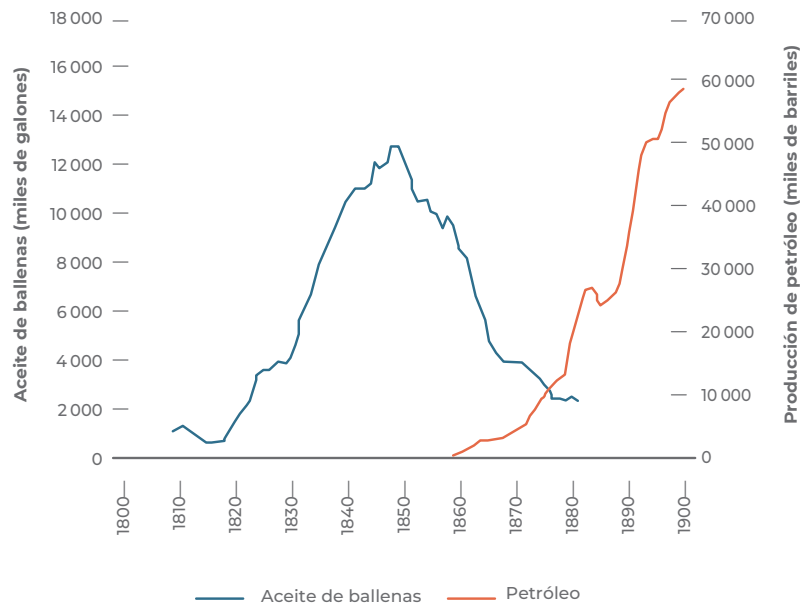
#### Procedimiento:

- Organizar tres grupos para analizar una de las tres crisis expuestas en el apartado 1.2.3.
- ¿Encuentras ejemplos que las confirmen en tu vida cotidiana, en las noticias que lees y en los conocimientos que posees? Cada equipo buscará ejemplos de una de las tres.
- Socializar los ejemplos encontrados.
- Elaborar un *collage*, en soporte digital o físico, que muestre gráficamente ejemplos de cada una de estas tres situaciones críticas que enfrenta el planeta y la humanidad, con el fin de reflexionar de manera sostenida en el tiempo acerca de las acciones o mejoras que podemos hacer en colectivo.

## 1.4 DIARIO REFLEXIVO

A partir de lo revisado en esta unidad reflexiona de qué manera te reconoces en lo expuesto. ¿Quiénes son los responsables de las crisis? ¿Cómo crees que te afectan en el corto, mediano y largo plazo? ¿Qué consideraciones de orden político, ecológico y espiritual crees que merezca el momento histórico en el que nos encontramos? A continuación, se presentan unas reflexiones como guía:

- ¿Qué te dice esta imagen?
- ¿Qué similitudes hay con la producción energética de la actualidad?

**FIGURA 15. USO DEL ACEITE DE BALLENA VERSUS PRODUCCIÓN DE PETRÓLEO**

**Fuente:** adaptado del sitio [Environmental History](https://environmentalhistory.org/).<sup>1</sup>

De alguna forma el hallazgo del carbón fue la salvación de los bosques y el descubrimiento del petróleo salvó a las ballenas de la extinción.

### Cita para reflexionar

La gravedad de la situación requiere cambios fundamentales en el capitalismo global, la educación y la igualdad, que incluyen, entre otras cosas, la abolición del crecimiento económico perpetuo, la fijación de precios adecuados a las externalidades, una salida rápida del uso de combustibles fósiles, una estricta regulación de los mercados y adquisición de propiedades y el empoderamiento de las mujeres. Estas opciones necesariamente implicarán debates difíciles sobre el crecimiento de la población y la necesidad de niveles de vida de menor consumo, pero más equitativos (Bradshaw et al., 2021).

<sup>1</sup> Environmental History. <https://environmentalhistory.org/wp-content/uploads/2023/02/DC-WhaleOil-Graphic-550.jpeg>

## REFERENCIAS

Bradshaw, C. J. A. et al. (2021). Underestimating the Challenges of Avoiding a Ghastly Future. *Frontiers in Conservation Science*. 1, 1–10.





## 2. Energía y termodinámica

### 2.1 Aprendizajes esperados

El capítulo actual aborda conceptos generales sobre termodinámica. A partir del contenido propuesto las y los estudiantes o lectores interesados serán capaces de recuperar conceptos previamente descritos de la termodinámica, así como aprender nuevos, lo que les permitirá analizar con mejores herramientas el tema energético.

Entre los aprendizajes esperados se encuentran:

- Conocer o recordar las leyes de la termodinámica.
- Propiciar que las y los estudiantes apliquen en la práctica los conocimientos construidos en esta unidad.
- Dotar a las y los estudiantes de una creciente autonomía intelectual para resolver problemas cuantitativos.

### Recuperación de conceptos

En círculo de estudios elabora la definición de los conceptos que se presentan a continuación.

<b>DEFINICIÓN PROPIA</b>	Energía térmica:
	Calor:
<b>DEFINICIÓN DE INTERNET O DE LIBROS</b>	Trabajo:
	Energía:
<b>DEFINICIÓN DE INTERNET O DE LIBROS</b>	Energía térmica:
	Calor:
<b>DEFINICIÓN DE INTERNET O DE LIBROS</b>	Trabajo:
	Energía térmica:

En un círculo de estudios clasifica la energía ordenándola en una tabla según su disponibilidad, forma y por ser convencional o no.

<b>CLASIFICACIÓN DE LA ENERGÍA</b>	Indicadores
	Por disponibilidad:
<b>CLASIFICACIÓN DE LA ENERGÍA</b>	Por forma:
<b>CLASIFICACIÓN DE LA ENERGÍA</b>	Por convencionalidad:

Por parejas, completen la siguiente tabla.

SISTEMA	FÓRMULA	UNIDADES (S.I.)	DIMENSIONES
Longitud			
Masa			
Tiempo			
Velocidad			
Aceleración			
Fuerza			
Presión			
Trabajo			
Calor			
Potencia			

## 2.2 Termodinámica

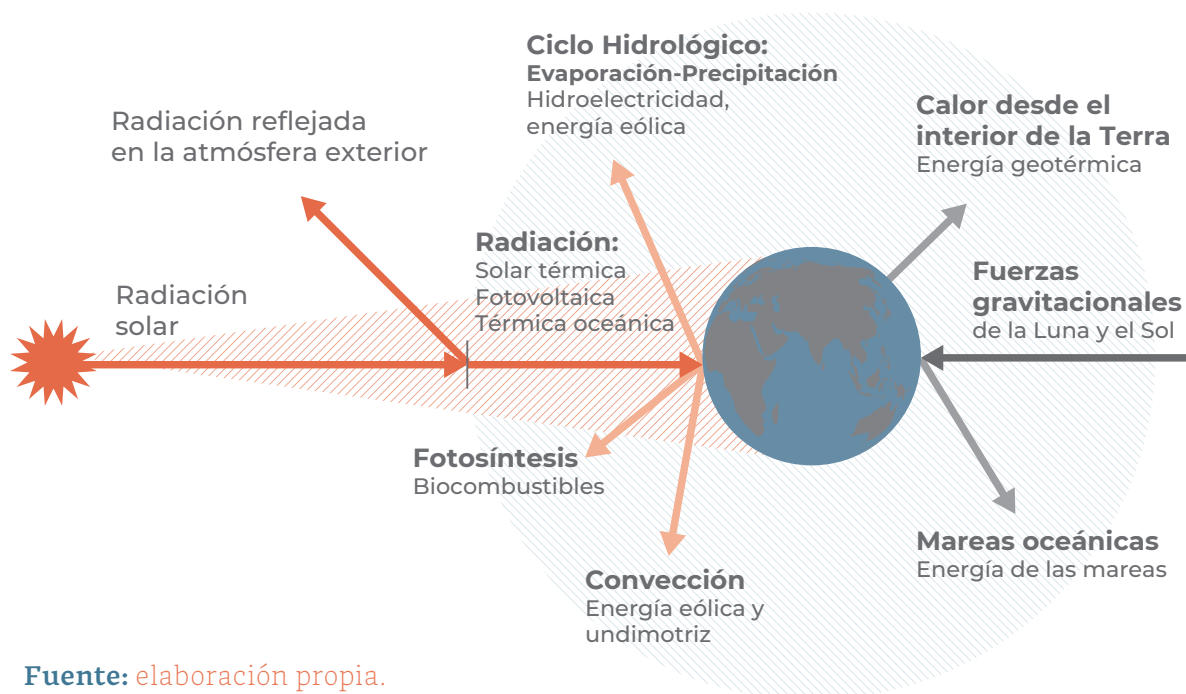
### Variables relacionadas con la termodinámica

#### Clasificación de la energía del planeta

La Tierra cuenta con tres fuentes principales de energía (figura 16):

- Solar directa e indirecta.
- Calor interno de la Tierra: el calor residual de la formación de la Tierra que procede del núcleo interno y el calor generado por el decaimiento radiactivo de tres isótopos, esto es: potasio (K), uranio (U) y torio (Th).
- Efecto de la atracción gravitacional de la luna (mareas).

**FIGURA 16. PROCEDENCIA DE LA ENERGÍA EN EL PLANETA TIERRA**



**Fuente:** elaboración propia.

En este apartado se trazan vínculos entre cada una de las variables que se presentaron en el primer ejercicio de recuperación de conceptos con una explicación más completa. Además, se las relaciona con variables más complicadas.

Una de las definiciones que se solicitaba en dicha actividad era la de la energía térmica, que en su origen fue reconocida como calor. Esta teoría, hoy obsoleta, estuvo basada en la hipótesis de un fluido al que se dio el nombre de “calórico”. Aunque se han hecho esfuerzos por dejar atrás el término de “calor” y reemplazarlo por el de “energía térmica”, éstos no han tenido mucho éxito y la gran mayoría de los científicos siguen nombrándolo de esa manera.

La energía térmica, en una de sus definiciones, es el movimiento interno de las partículas de un cuerpo, es decir, energía cinética asociada a la velocidad de las partículas; esto es, moléculas, átomos o iones en traslación, rotación o vibración. El nivel de energía interna que posee un cuerpo se encuentra midiendo su temperatura variable, que se mide en tres tipos de escala: Celsius, Kelvin y Fahrenheit.

La energía térmica no es la única contenida en los cuerpos, éstos pueden tener también:

- *Energía potencial:* asociada con la posición en el espacio en presencia de un campo gravitacional.
- *Energía elástica:* relacionada con la vibración entre partículas.

- *Energía química*: almacenada en los enlaces que forman las moléculas de dicho cuerpo.
- *Energía nuclear*: almacenada a nivel del núcleo.

Estas energías se dan a nivel microscópico, y cuando se manifiestan en el nivel macroscópico se les denomina energía interna ( $U$ ). La energía interna es una de las variables de estado de la termodinámica y se abordará al explicar la Primera Ley de la termodinámica.

La termodinámica es una rama de la física que relaciona las dos formas en las que un sistema puede intercambiar su energía: el calor y el trabajo. Dicho esto, ya no podemos recurrir a la definición tradicional de energía en la que se le define como “la capacidad de realizar un trabajo” puesto que no estaría abarcando la totalidad del concepto de energía.

### Leyes de la termodinámica

A continuación, se presentarán una serie de conceptos íntimamente relacionados con el postulado de la ley cero de la termodinámica, que se explicará más adelante.

El primero de estos conceptos es el de capacidad calorífica, es decir la capacidad de un material de acumular energía. Veámoslo con un ejemplo.

#### **Ejemplo didáctico**

En un día soleado de playa, a las 12:00 pm, mientras caminas, sientes que la arena te quema los pies y comienzas a correr hasta llegar al agua donde encuentras alivio.

¿Por qué hay tanta diferencia de temperatura entre la arena y el agua? Ambos se encuentran expuestos a la misma fuente de calor y en la misma medida.

Así que ¿cuál tiene mayor capacidad calorífica?

Es necesario invertir mucho menos energía para que la arena aumente su temperatura porque almacena la energía en menor medida que el agua y la disipa, y por lo tanto su capacidad calorífica es menor. Dado que el agua posee una gran capacidad para almacenar energía térmica, ha sido usada desde hace mucho tiempo con ese fin, por ejemplo, al interior de bolsas de agua, que se calientan antes de ir a dormir para mantener la cama caliente durante las noches de invierno.

Para saber cómo se transmite la energía, es menester describir los mecanismos de transferencia de la energía térmica. Entre las principales formas de propagarse de la energía térmica se encuentran:

- *Conducción*: ocurre cuando dos cuerpos en contacto directo intercambian energía por encontrarse a temperaturas distintas. Por ejemplo, en una olla que se calienta en la estufa transmite el calor que absorbe hasta el mango. La conductividad térmica es un parámetro que mide el tiempo que tarda en transferirse la energía térmica de un cuerpo a escala molecular. Los metales tienen alta conductividad térmica y por esa razón se calientan más rápido.
- *Convección*: tiene lugar únicamente en los fluidos. A diferencia de la conducción, en ésta el calor se transporta a través del flujo de materia, formándose lo que se conoce como corrientes o celdas de convección. Como ejemplo podemos considerar el calentamiento del aire por encima de una vela que la impulsa verticalmente mientras el aire más fresco fluye hacia la llama.
- *Radiación*: consiste en la propagación de calor a través de energía electromagnética en el espacio. Está asociada a la temperatura de cada cuerpo, y se emite en todo el rango del espectro electromagnético. El horno de microondas es un ejemplo de cómo se transmite el calor por radiación.

Llegados a este punto es posible exponer la ecuación fundamental de la termología, que relaciona el calor específico de una sustancia ( $J/kg \cdot K$ ), con la cantidad de sustancia ( $kg$ ) y con la variación de la temperatura ( $K$ ) que experimenta dicha sustancia durante los procesos de intercambio de energía:

$$Q = m \cdot C_p \cdot \Delta T$$

donde  $Q$  es la capacidad calorífica,  $m$  la masa,  $C_p$  la capacidad calorífica y  $\Delta T$  la diferencia de temperatura.

El concepto de equilibrio térmico está directamente vinculado con la *Ley cero de la termodinámica*. El fenómeno del equilibrio térmico tiene lugar cuando dos cuerpos que se encontraban a distinta temperatura en un inicio, tras el transcurrir del tiempo y con la transferencia de energía térmica entre ambos, alcanzan un estado en el que las temperaturas se igualan, esto es, sus variables de estado permanecen constantes.

## Ley cero de la termodinámica

Establece que cuando dos cuerpos se encuentran en equilibrio con un tercero, éstos, a su vez, se encuentran en equilibrio térmico entre sí.

Nota: este evento físico se relaciona con la relación lógica platónica que sostiene que:

$$\text{si } A = B \text{ y } C = B, \text{ entonces } A = C$$

## Primera Ley de la Termodinámica

En la *Primera ley de la termodinámica* (PLT) se indica que, en un proceso de transferencia de energía, ésta ni se crea ni se destruye, sólo se transforma, lo que se conoce con el nombre de “Principio de la conservación de la energía”.

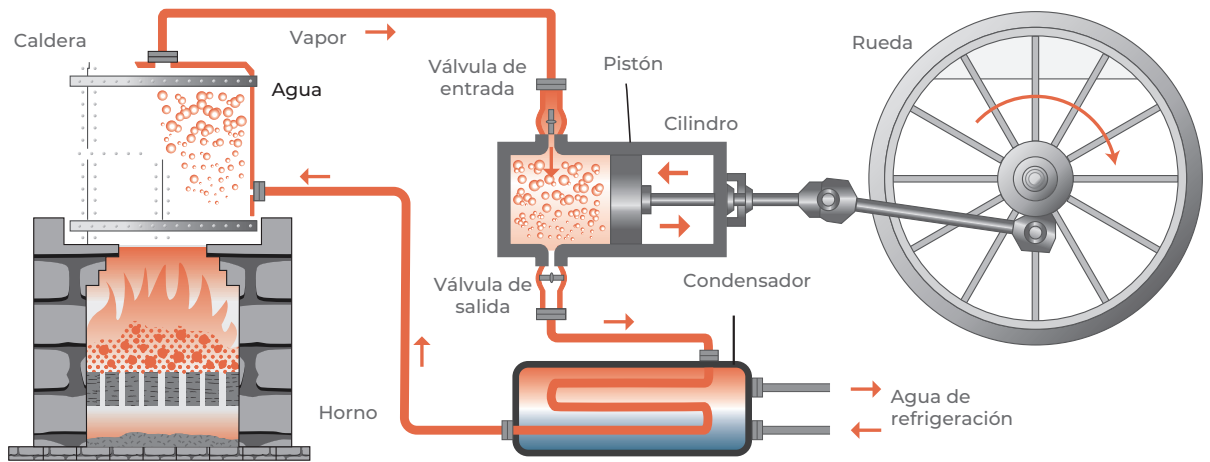
La PLT establece que la energía interna ( $U$ ) de un sistema aumenta cuando se le transfiere calor ( $Q$ ) o se realiza trabajo sobre él ( $W$ ). Se expresa de la siguiente manera:

$$\Delta U = Q + W$$

Nota: se representa con un signo positivo (+) todo lo que aumenta la energía interna del sistema, en caso contrario el signo será el de negativo (-).

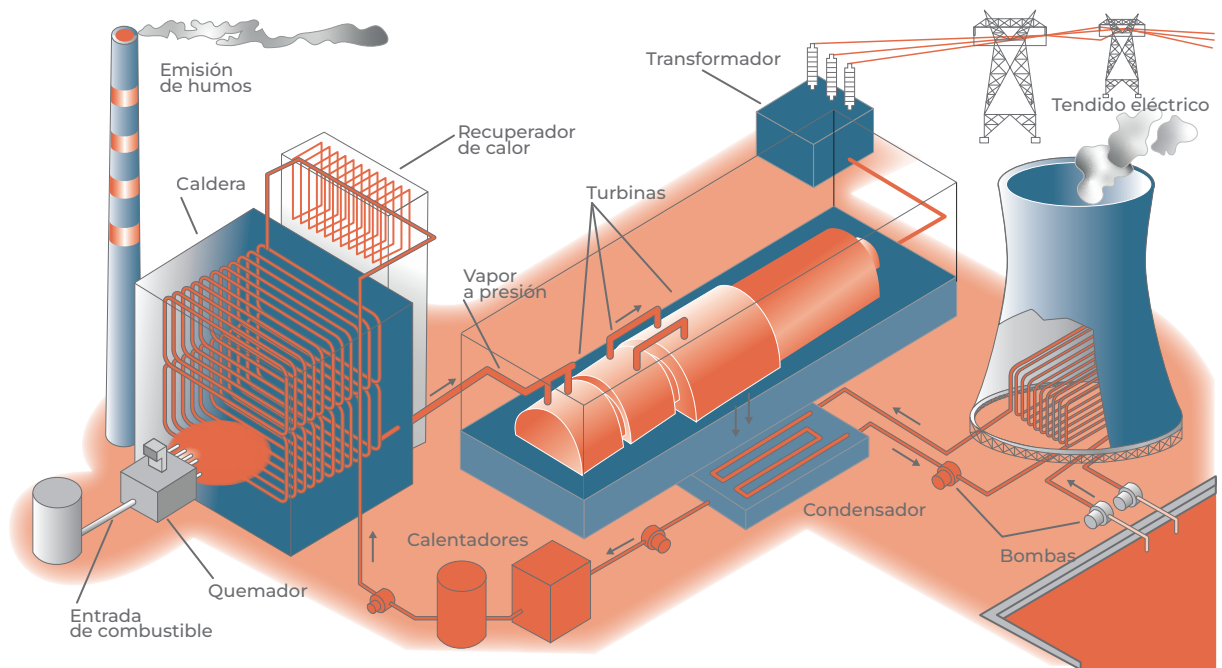
La PLT surge a partir del estudio de máquinas térmicas, a las que llamamos dispositivos, que transforman en trabajo el calor generado a partir de un recurso energético. Un ejemplo clásico es la máquina de vapor (figura 17). Otro ejemplo de máquina térmica es una central termoeléctrica (figura 18).

**FIGURA 17. MÁQUINA DE VAPOR**



Fuente: elaboración propia.

**FIGURA 18. ESQUEMA DE UNA CENTRAL TÉRMICA**



Fuente: elaboración propia.

La PLT conlleva una nueva función de estado conocida como la entalpía ( $H$ ), que se define como la cantidad de energía que se desprende en cualquier transformación de una forma a otra de energía.

## Segunda Ley de la Termodinámica

La segunda ley de la termodinámica (SLT) deriva de una restricción que impone la naturaleza a partir de la primera Ley y establece la irreversibilidad de los fenómenos físicos, especialmente durante el intercambio de calor.

Toda la energía interna que tiene un sistema en forma de trabajo se puede transformar en calor, pero no todo el calor puede transformarse en trabajo.

*Corolario 1:* No toda la energía es aprovechable.

*Corolario 2:* La energía no se pierde, pero no se puede utilizar para fines prácticos.

Surgen dos nuevas variables ligadas a la SLT: la entropía (S), que expresa el grado de desorden de un sistema, y la exergía (Ex), que es la parte de la energía que es aprovechable. En otras palabras, de la energía disponible definida en la PLT sólo hay una parte que es aprovechable (exergía) y otra que se disipa (entropía). Esto ocurre porque la energía se va desordenando cada vez que se opera en ella una transformación, se vuelve más difusa y pierde calidad respecto a su posibilidad de aprovechamiento.

De esto se desprende que, cuanto mayor sea el número de transformaciones involucradas en un proceso, mayor será la cantidad de energía que se “pierde” para fines prácticos ya que la energía se irá dispersando cada vez más e irá perdiendo su calidad, es decir, se irá degradando.

## Tipos de eficiencias

Para cada transformación que sufre la energía se define como eficiencia la cantidad de energía final con respecto a la energía inicial. Esto se suele estimar para los dispositivos que hemos desarrollado para los procesos de transformación. Los rendimientos de los dispositivos nos expresan la cantidad de calor que dicha máquina puede aprovechar para realizar un trabajo. De ahí que la eficiencia de un dispositivo, también conocida como rendimiento de primera ley, se exprese de la siguiente manera:

$$\eta_I = \frac{E_{\text{Útil}}}{E_{\text{Entrada}}}$$

Donde la  $E_{\text{Entrada}}$  es la energía que se debe de incorporar al sistema para que éste cubra todas sus necesidades, esto es, la energía necesaria para realizar una tarea o

proceso (representada como  $E_{\text{útil}}$ ) más la que se pierde en forma de calor y que no es posible aprovechar. De ahí que la  $E_{\text{entrada}} > E_{\text{útil}}$ .

Existe un rendimiento de segunda ley en el que únicamente se tiene en cuenta la energía que verdaderamente se aprovecha y se expresa de la siguiente manera:

$$\eta_{II} = \frac{E_{\text{proceso}}}{E_{\text{real}}}$$

Donde la  $E_{\text{Proceso}}$  es la energía que verdaderamente se puede aprovechar del proceso y la  $E_{\text{Real}}$  es la energía que entra en juego en el proceso. De ahí que la  $E_{\text{Real}} > E_{\text{Proceso}}$ .

## 2.3 ACTIVIDADES Y ESTRATEGIAS SUGERIDAS

### Actividad 1. Cálculos previos

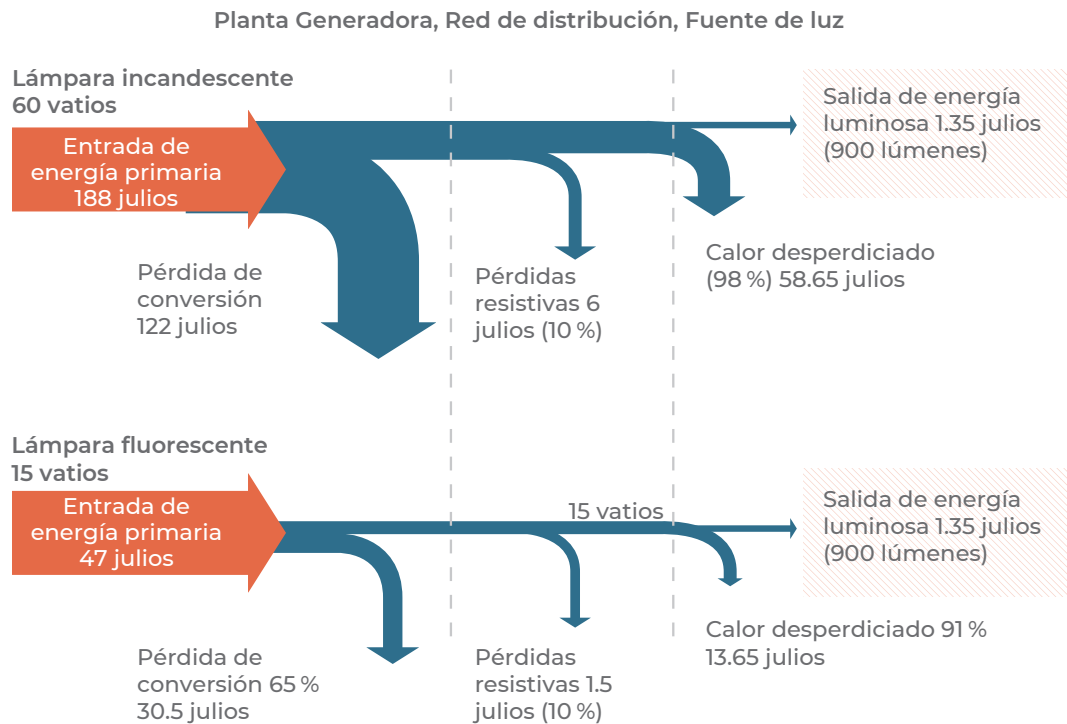
- ¿Cuánta energía emite una bombilla de 100 w en un minuto?
- Demuestra que 1 kWh = 3.6 MJ.
- El calor específico a presión constante del aire a 25°C es 1.005 kJ/kg·°C. Expresa este valor en kcal/kg·°C y Btu/lbm·°F.

## Actividad 2. Transformaciones de energía

Ejemplo de transformaciones de energía

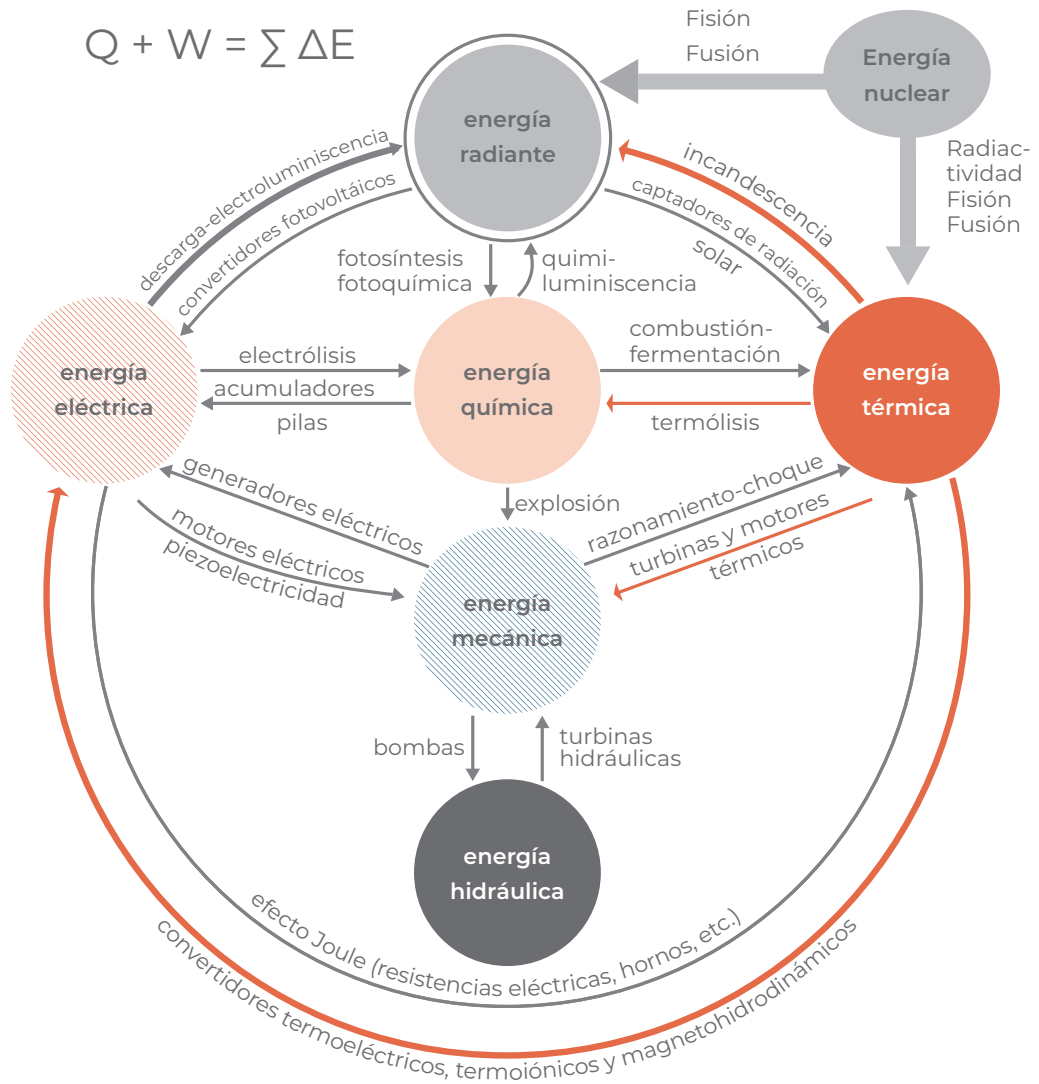
Por parejas, comenten las siguientes gráficas (figuras 19 y 20):

**FIGURA 19. EFICIENCIA ENERGÉTICA DE DISTINTOS TIPOS DE FOCOS**



Fuente: retomado de Electropaedia (s.f).

**FIGURA 20. ESQUEMA CON LAS CONVERSIONES ENTRE LAS DIFERENTES FORMAS DE ENERGÍA**



**Fuente:** retomado de la página *Energía y Química*.<sup>1</sup>

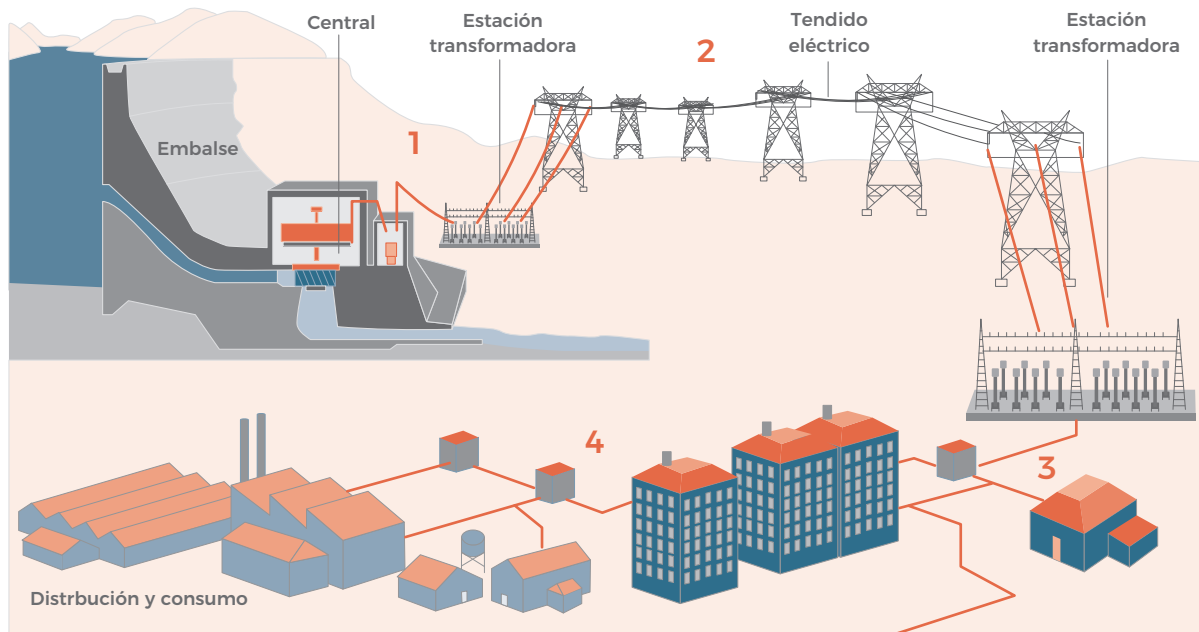
Pon algún ejemplo alternativo a los sugeridos que tengan cabida dentro de la imagen anterior.

<sup>1</sup> *Energía y Química*. <http://energiayquimica.blogspot.com/p/termofluidos.html>

## Rendimiento

A partir del esquema de la figura 21 deduce la ecuación del rendimiento equivalente del sistema completo teniendo en cuenta cada una de las transformaciones que en él intervienen.

**FIGURA 21. ESQUEMA DE LAS TRANSFORMACIONES DE ENERGÍA DESDE UNA CENTRAL HIDROELÉCTRICA HASTA EL USO FINAL DE LA ELECTRICIDAD**

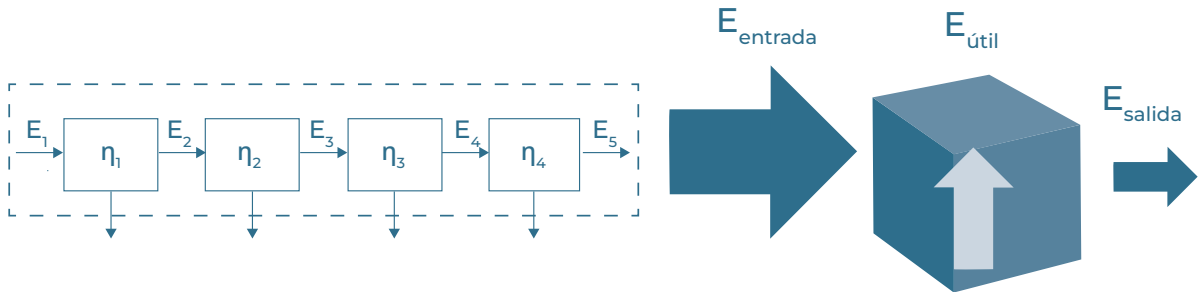


$$\eta_{\text{Equivalente}} = \prod_{i=1}^n \eta_i = \eta_4 \cdot \eta_3 \cdot \eta_2 \cdot \eta_1$$

**Nota:** ejemplo de resolución en la siguiente página.

### Modelo conceptual

En este caso se trata de un diagrama de cuatro cajas que hay que transformar en uno *equivalente* de una caja.



#### FÓRMULAS

Primera caja:

$$E_1 > E_2 \Rightarrow \eta_1 = \frac{E_2}{E_1}$$

Segunda caja:

$$E_2 > E_3 \Rightarrow \eta_2 = \frac{E_3}{E_2}$$

Tercera caja:

$$E_3 > E_4 \Rightarrow \eta_3 = \frac{E_4}{E_3}$$

Cuarta caja:

$$E_4 > E_5 \Rightarrow \eta_4 = \frac{E_5}{E_4}$$

Caja equivalente:

$$E_1 > E_5 \Rightarrow \eta_{\text{Equivalente}} = \frac{E_5}{E_1}$$

#### RESOLUCIÓN

En primer lugar, expresamos todo en función de las energías, despejándola de cada una de las ecuaciones anteriores:

$$E_2 = \eta_1 \cdot E_1$$

$$E_3 = \eta_2 \cdot E_2$$

$$E_4 = \eta_3 \cdot E_3$$

$$E_5 = \eta_4 \cdot E_4$$

A partir de la ecuación de la caja equivalente, sustituyamos cada una de las ecuaciones anteriores:

$$n_{\text{Equivalente}} = \frac{E_5}{E_1} = \frac{\eta_4 \cdot E_4}{E_1} \quad \eta_4 \cdot \frac{E_4}{E_1} = \eta_4 \cdot \frac{\eta_3 \cdot E_3}{E_1}$$

$$= \eta_4 \cdot \eta_3 \cdot \frac{E_3}{E_1} = \eta_4 \cdot \eta_3 \cdot \frac{\eta_2 \cdot E_2}{E_1}$$

$$= \eta_4 \cdot \eta_3 \cdot \eta_2 \cdot \frac{E_2}{E_1} = \eta_4 \cdot \eta_3 \cdot \eta_2 \cdot \frac{\eta_1 \cdot E_1}{E_1}$$

$$= \eta_4 \cdot \eta_3 \cdot \eta_2 \cdot \eta_1 \cdot \frac{E_1}{E_1} = \eta_4 \cdot \eta_3 \cdot \eta_2 \cdot \eta_1$$

De lo anterior se deduce que:

$$n_{\text{Equivalente}} = \prod_{i=1}^n \eta_i = \eta_4 \cdot \eta_3 \cdot \eta_2 \cdot \eta_1$$

Donde n es el número de cajas totales.

### Actividad 3. Cálculos de mayor complejidad

A partir del costo de la gasolina en tu localidad y de lo que te cuesta el kWh de electricidad en tu casa, comprueba cuál de las dos formas de energía resulta más cara.

Nota: observa si en la factura de la luz existe algún tipo de apoyo (subsidio) gubernamental.

Una planta termoeléctrica de 700 MW, que usa para el proceso de enfriamiento del agua de un río cercano, tiene una eficiencia del 45%. Determina la tasa de transferencia (potencia) de calor al agua del río.

Nota: aunque no es realista, suponemos que la planta trabaja de manera continua. Ejemplo de resolución en la siguiente página.

DATOS EL SISTEMA ES LA PLANTA COMPLETA	ACLARACIONES
<p>Potencia = <math>W_{\text{Máquina}} = 700 \text{ MW}</math></p> <p><math>\eta_{\text{Sistema}} = 0.45</math></p> <p>En este caso no existe factor de planta, esto es, podemos asumir que trabaja sin descanso (aunque sabemos que no es cierto).</p>	<p>El calor (<math>Q_1</math>) del foco caliente se transforma, por un lado, en trabajo que realiza la máquina (<math>W_{\text{Máquina}}</math>) y, por otro lado, en calor que se emite al foco frío (<math>Q_2</math>), esto es, el calor que se va al cuerpo de agua (río, lago, mar).</p> <p>En este caso nos dan los datos en MW, en lugar de en MJ. Lo que se hace en estos casos es, en lugar de trabajar con Q se trabaja con lo que se conoce como <math>\dot{Q}</math>, es decir, en lugar de representar una energía, representa una variación de una energía con relación al tiempo, también conocida en matemáticas como derivada y en física como velocidad. Por lo tanto:</p> <p>Si tenemos Q sus unidades serán MJ (energía)</p> <p>Si tenemos <math>\dot{Q}</math> sus unidades serán MW (potencia)</p>

FÓRMULAS	RESOLUCIÓN
1) $\dot{Q}_1 = \dot{W}_{out} + \dot{Q}_2$	$n_1 = \frac{\dot{W}_{out}}{\dot{Q}_1} \rightarrow \dot{Q}_1 = \frac{\dot{W}_{out}}{n_1} = \frac{700}{0.45} = 1\,750 \text{ MW}$ <p>Esto implica que se necesita esa potencia instalada para que se genere ese trabajo con esa eficiencia: potencia instalada &gt; Potencia de Generación</p> $\dot{Q}_1 = \dot{W}_{out} + \dot{Q}_2 \rightarrow \dot{Q}_2 = \dot{Q}_1 - \dot{W}_{out} = 1\,750 - 700 = 1\,050 \text{ MW}$ <p>Esta es la energía máxima que se transfiere al cuerpo de agua. En realidad, la cantidad de calor que llega al río puede ser menor debido a que alguna parte de ésta se pierde durante el flujo por tuberías y otros componentes.</p>
2) $n_1 = \frac{\dot{W}_{out}}{\dot{Q}_1}$ $\dot{Q}_1 > \dot{W}_{out}$	

## 2.4 DIARIO REFLEXIVO

A partir de lo revisado en esta unidad realiza tus propias reflexiones sobre las siguientes aseveraciones, tan utilizadas en el discurso oficial:

**“La tecnología nos va a salvar”.**

**Sugerencia:**

Revisar los límites teóricos y prácticos de la eficiencia energética; por ejemplo, el límite de Betz para los aerogeneradores, el límite Shockley–Queisser, para las celdas fotovoltaicas.

**“Un incremento en la eficiencia implica un menor consumo”**

**Sugerencia:**

Analizar la paradoja de Jevons o *efecto rebote*.





# 3. Variables relevantes para medir la eficiencia energética de las fuentes y sus límites

## 3.1 APRENDIZAJES ESPERADOS

El presente capítulo explica las variables más relevantes para entender el estado actual de las fuentes de energía. A partir del contenido propuesto las y los estudiantes o lectores interesados serán capaces de conocer y comprender las variables más relevantes para analizar las fuentes de energía.

Entre los aprendizajes esperados se encuentran:

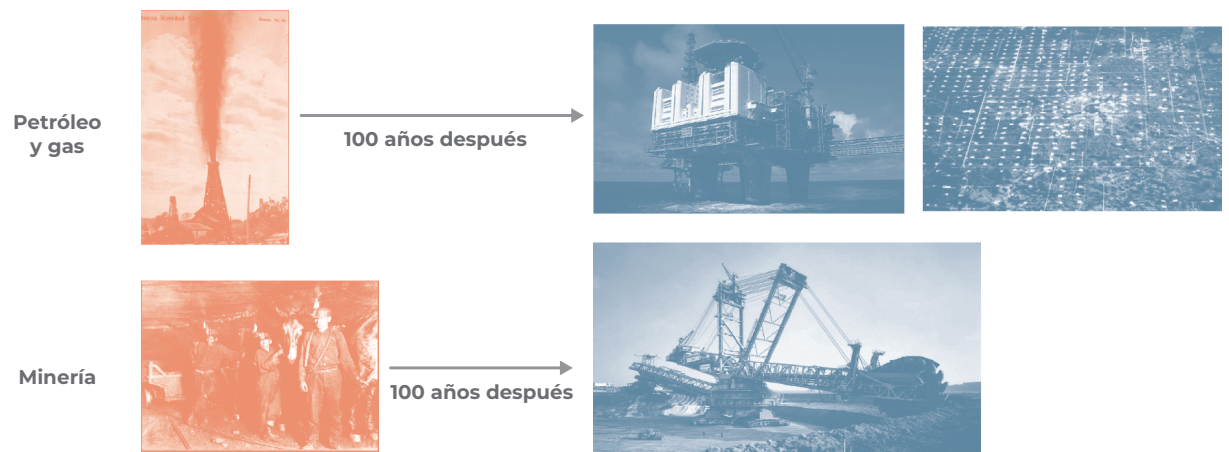
- Conocer y comprender los conceptos de densidad energética y tasa de retorno energético.
- Entender que no hay energía infinita, ya que vivimos en un planeta finito.
- Contextualizar los conocimientos construidos en esta unidad en casos particulares.

## 3.2 LÍMITES DEL CRECIMIENTO Y RETORNOS DECRECIENTES

### Preguntas e imágenes motivadoras

Observa las siguientes imágenes:

**FIGURA 22.** EVOLUCIÓN DE LAS TÉCNICAS DE EXTRACCIÓN DE LOS RECURSOS DEBIDO A LOS RETORNOS DECRECIENTES



**Fuente:** elaboración propia de los autores con imágenes de dominio público.

### Preguntas sugeridas:

- Describe lo que observas en las siguientes imágenes.
- ¿Qué inferencias puedes hacer del futuro?
- ¿Qué estudios conoces sobre los límites del crecimiento?

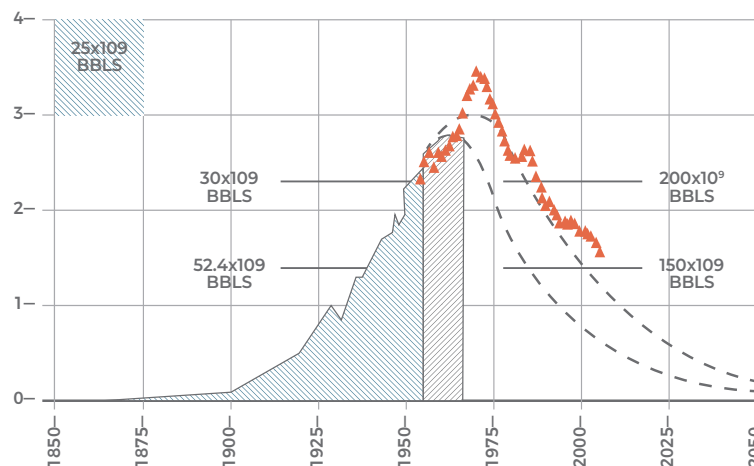
## Límites de crecimiento

Uno de los conceptos más relevantes para entender los límites del crecimiento es el de la tasa de producción de un recurso finito no renovable, como los hidrocarburos y el uranio. Empíricamente, se ha demostrado que esta tasa se puede representar mediante una curva en forma de campana o Gaussiana (figura 23), en la que se observa, en una primera fase, que la producción sube hasta llegar a un máximo (cénit) conocido como pico del recurso; le sucede una segunda fase de declive hasta alcanzar el agotamiento de lo explotable.

Considerando este comportamiento se pueden realizar inferencias sobre el momento en que se va a alcanzar el cénit del recurso y a partir del cual comenzará a declinar. Asimismo, es importante señalar que estas curvas son aplicables a todos los recursos no renovables, no sólo a las fuentes energéticas sino también a la extracción de los minerales.

En el caso del petróleo, el cénit de la producción se suele definir como el “pico del petróleo”, fenómeno que fue observado por primera vez en la industria petrolera en 1956 por M. K. Hubbert, geólogo de la Shell, quien observó que la producción de todo pozo, campo o región petrolera seguía una curva logística en la que la tasa de crecimiento disminuía a medida que el recurso se iba agotando. Con los datos de la producción hasta 1956 Hubbert realizó una extrapolación de la producción de petróleo de los Estados Unidos (excluyendo Alaska y el petróleo costa afuera) y estimó que el pico de producción del petróleo tendría lugar a finales de 1970 (figura 23).

**FIGURA 23. CURVA ELABORADA POR M. K. HUBBERT EN 1956**



**Nota:** en la curva se representan los datos de producción petrolera de los EE. UU. observados hasta ese momento (producción acumulada), más las reservas probadas y dos escenarios de extrapolación hasta 2050, los cuales se comparan con los datos reales observados posteriormente (puntos naranjas).

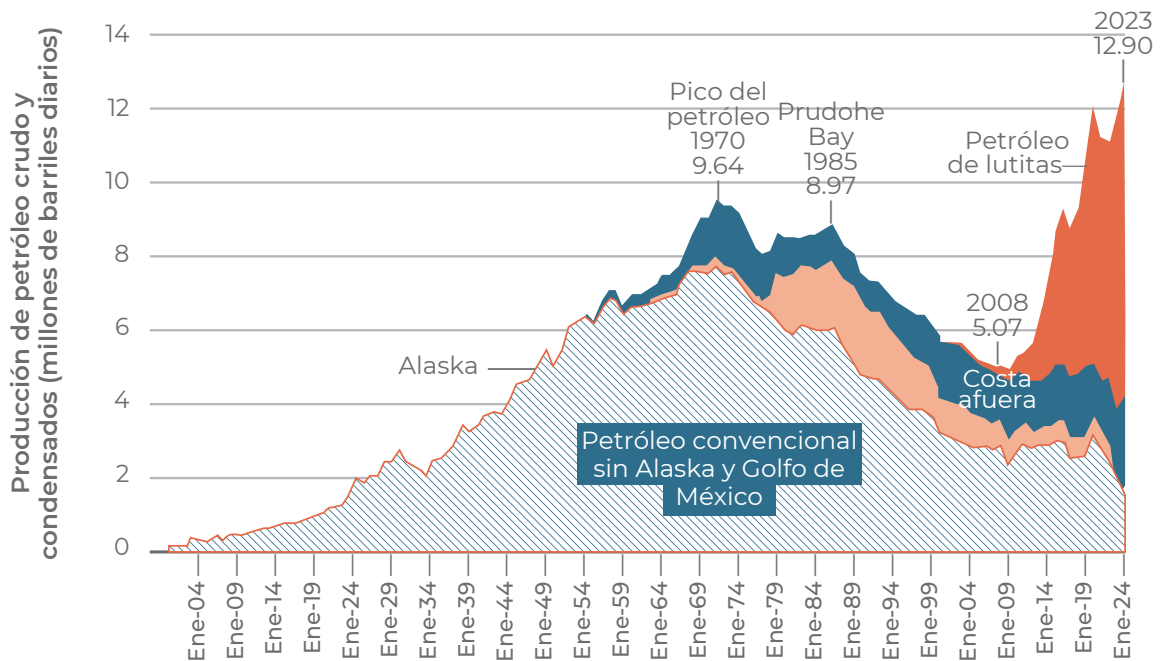
**Fuente:** Bardi (2011).

Cabe mencionar que Hubbert obtuvo una excelente aproximación si tenemos en cuenta la cantidad de recursos probados hasta ese momento, ya que a principios de 1971 los Estados Unidos llegaron al pico. Después del primer pico determinado de manera precisa por Hubbert, la producción volvió a subir a raíz de la explotación de nuevos recursos, como los campos marinos del Golfo de México y los grandes campos de petróleo en Prudhoe Bay, Alaska; sin embargo, se llegó a un segundo pico en 1987 (figura 24).

La producción volvió a crecer después de 2008 como consecuencia de la explotación del petróleo no convencional o petróleo de lutitas (*shale oil*) que se extrae mediante fracturación hidráulica (*fracking*) y del cual se hablará en la segunda parte del libro. Si bien el pico de petróleo de lutitas no ha llegado todavía, los análisis más recientes indican que se tocará a más tardar en 2025.

Hubbert no se preocupó por su descubrimiento, ya que vaticinó que, con el desarrollo de la energía nuclear en los años 50, el nuevo recurso proporcionaría toda la energía necesaria para la civilización una vez que los combustibles fósiles empezaran a menguar. Sin embargo, esto no ocurrió, pues esta suposición pasa por alto una serie de variables relevantes, entre ellas la limitada disponibilidad del combustible nuclear y la poca flexibilidad de la generación nucleoelectrónica.

**FIGURA 24. CURVA DE PRODUCCIÓN DE PETRÓLEO DE ESTADOS UNIDOS DONDE SE MUESTRAN LOS DIFERENTES PICOS DE PRODUCCIÓN HASTA 2019**

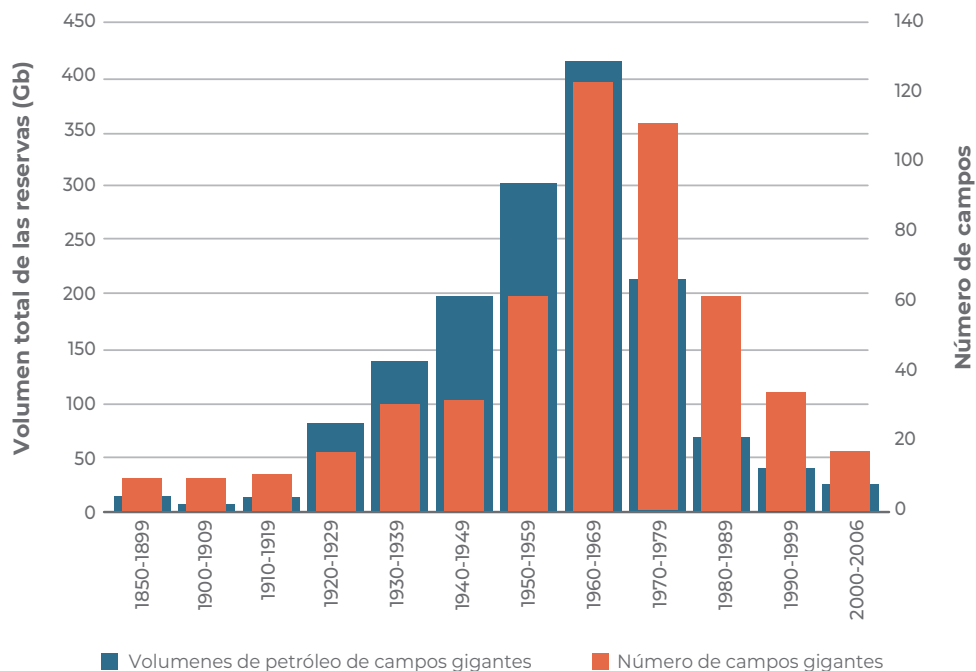


Fuente: Berman (2023).

Después de Hubbert, a partir de los años 70, comenzaron a realizarse estudios y modelos sobre las tendencias y los problemas que amenazarían a la sociedad global en el futuro, particularmente el problema del rendimiento decreciente de los recursos. Uno de los estudios más importantes fue realizado por dos veteranos de la exploración petrolera: Colin Campbell, geólogo retirado de la British Petroleum, y Jean Laherrère, ingeniero consultor de la industria petrolera. Estos autores mostraron que alcanzar el pico de la producción no significaba el agotamiento del recurso, sino la explotación de la parte de mayor calidad, más fácil de extraer y con costos menores (Campbell y Laherrère, 1998).

Si tomamos en cuenta que antes de poder explotar un recurso hay que descubrirlo, estos autores recopilaron el tamaño y fecha de los descubrimientos para los principales países petroleros y observaron que tanto los descubrimientos como la producción describen una curva gaussiana y se encuentran desfasados entre 27 y 40 años, según el país observado. A nivel global observamos que el pico de los descubrimientos de los campos gigantes se produjo entre los años 60 y 70 (figura 25), y desde entonces los descubrimientos han sido cada vez menores. Al tomar en cuenta esta observación, de acuerdo con la observación de Campbell y Laherrère, el pico de la producción se debería haber producido en la década del 2010.

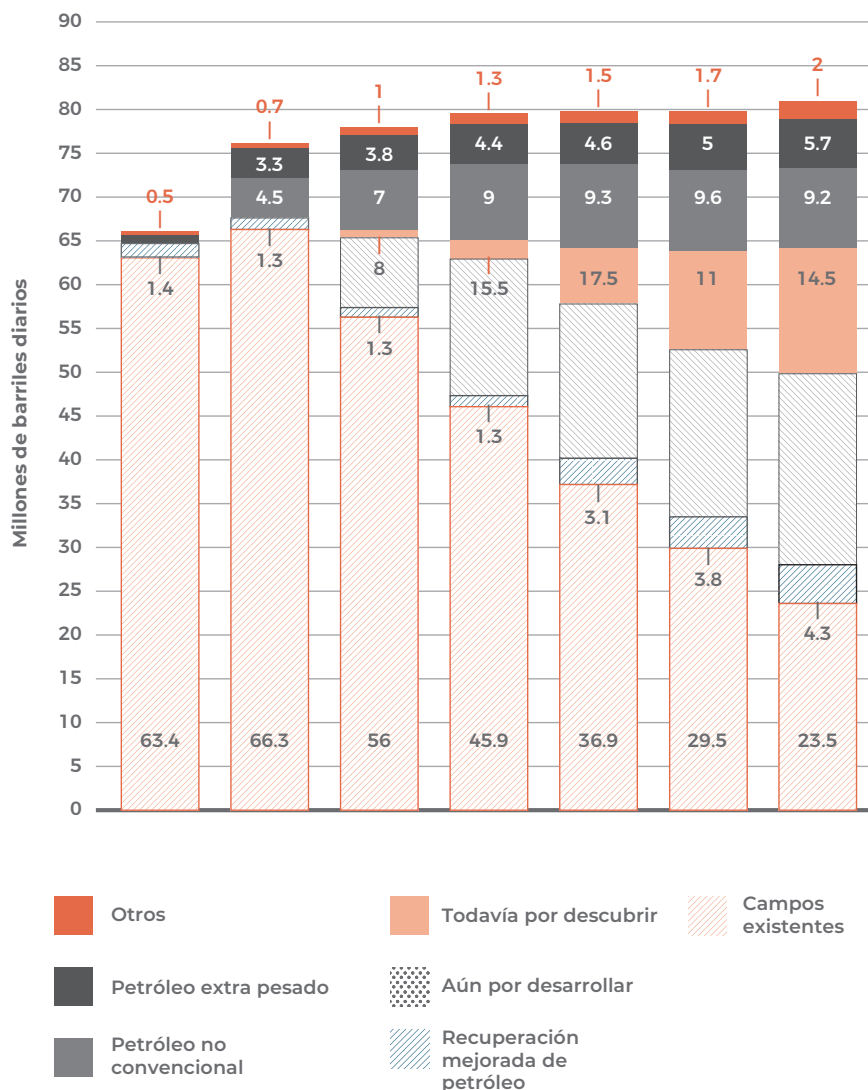
**FIGURA 25. VOLUMEN (ESCALA A LA IZQUIERDA) Y NÚMERO (ESCALA DE LA DERECHA) DE LOS CAMPOS PETROLEROS GIGANTES DESCUBIERTOS EN CADA DÉCADA DESDE 1850**



Fuente: elaborado con base en Hook et al. (2009).

En la figura 26 se muestran las predicciones que en 2017 hizo la Agencia Internacional de Energía (IEA por sus siglas en inglés). En ellas se observa que entre 2000 y 2016 la producción de petróleo convencional subió muy poco y que, a futuro, el declive de los campos en producción se estimaba entre el 5 y el 8 % anual. Sin embargo, la gráfica muestra que esta disminución iba compensándose con petróleo no convencional (*extra heavy* y *tight oil*) y petróleo “todavía por descubrir”.

**FIGURA 26. PREVISIONES DE LA PRODUCCIÓN DE PETRÓLEO REALIZADAS POR LA IEA EN 2017**

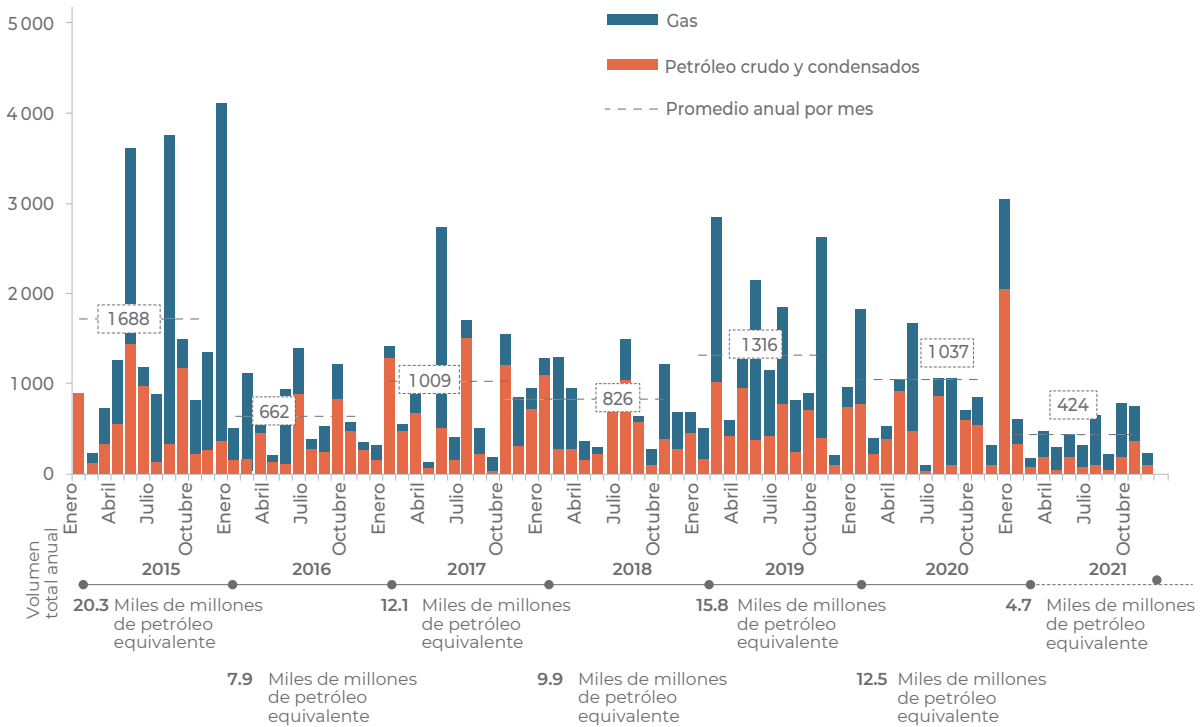


Fuente: adaptado del sitio web Crude Oil Peak.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Crude Oil Peak. <https://crudeoilpeak.info/does-the-iea-try-to-hide-the-conventional-crude-oil-peak-in-its-2017-world-energy-outlook>

Más recientemente, la consultora Rystad Energy observó que desde el 2015 no ha habido descubrimientos importantes de nuevos campos. Además, en los pocos sitios en los que se ha hallado, se ha descubierto más gas que petróleo (figura 27). Los nuevos campos descubiertos entre el 2016 y el 2021 representaron alrededor del 15 % del consumo anual mundial de energía y son cada vez más caros de explotar.

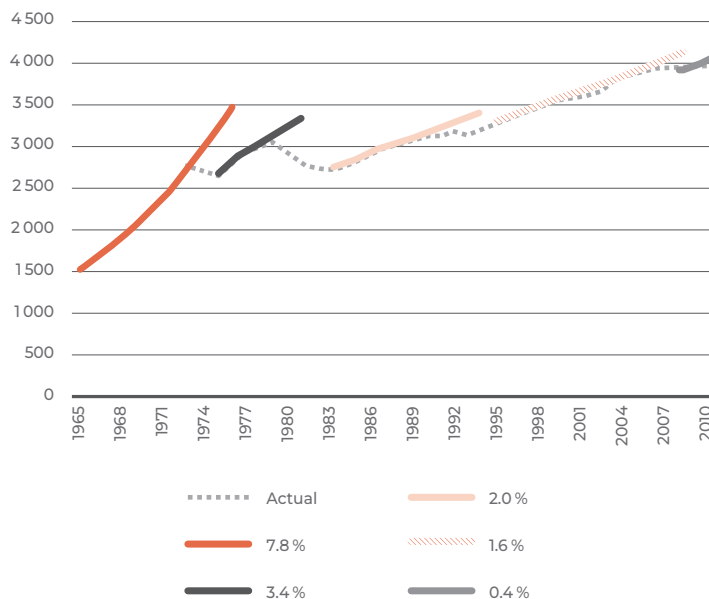
**FIGURA 27. VOLUMEN DE PETRÓLEO Y GAS DESCUBIERTO ENTRE 2015 Y 2021**



Fuente: Rystad Energy (2021).

Un indicador de que nos aproximamos al pico de la producción es que la tasa de crecimiento de la producción de petróleo entre 1965 y 2012 fue bajando progresivamente desde el 7.9%, hasta alcanzar el 0.1% en el periodo comprendido entre el 2005 y el 2012 (figura 28).

**FIGURA 28. TASA DE CRECIMIENTO DE LA PRODUCCIÓN MUNDIAL DE PETRÓLEO POR PERIODOS**



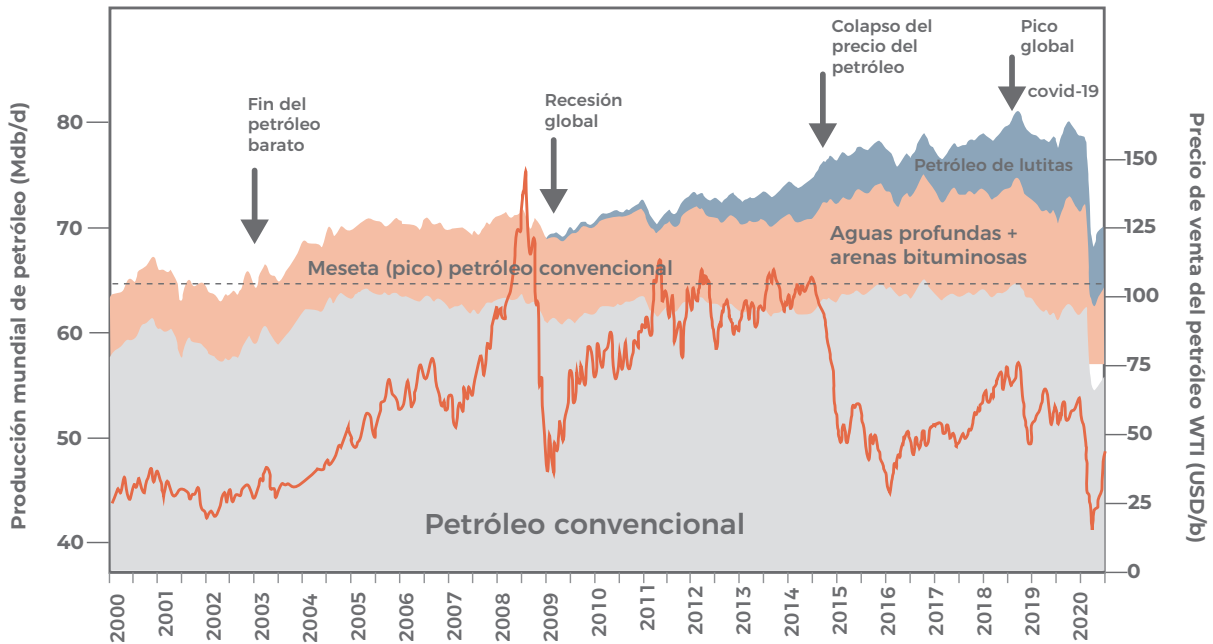
**Fuente:** tomado de Tveberg (2012).

La gráfica de la figura 29 muestra con más detalle la evolución de la producción de petróleo por tipo y el precio de venta internacional desde el año 2000. Se observa que, hasta 2003, el precio del petróleo era de cerca de 25 dólares (USD) por barril (b). A partir de esa fecha comenzó a aumentar su precio hasta alcanzar los 70 USD/b, como consecuencia de la dificultad de incrementar la oferta. Cuando se alcanzó, en 2005, el máximo de la producción de petróleo convencional el precio empezó a subir abruptamente, hasta alcanzar los 130 USD/b en el verano de 2008.

El alto precio de venta estimuló la producción del petróleo más caro, como el petróleo de lutitas, que se extrae con la técnica de la fracturación hidráulica (*fracking*) en los Estados Unidos, las arenas bituminosas y el petróleo de aguas profundas (ver parte 2). Esta producción de petróleo caro contribuyó a que se pospusieran los problemas por un tiempo. Posteriormente, con la llegada de la recesión global el precio

volvió a caer por falta de demanda. Pero muy pronto volvió a incrementarse para establecerse por encima de los 100 USD/b desde 2011.

**FIGURA 29. EVOLUCIÓN HISTÓRICA DE LOS PRECIOS (ESCALA A LA DERECHA) Y PRODUCCIÓN DEL PETRÓLEO POR TIPO ENTRE 2000 Y 2022**

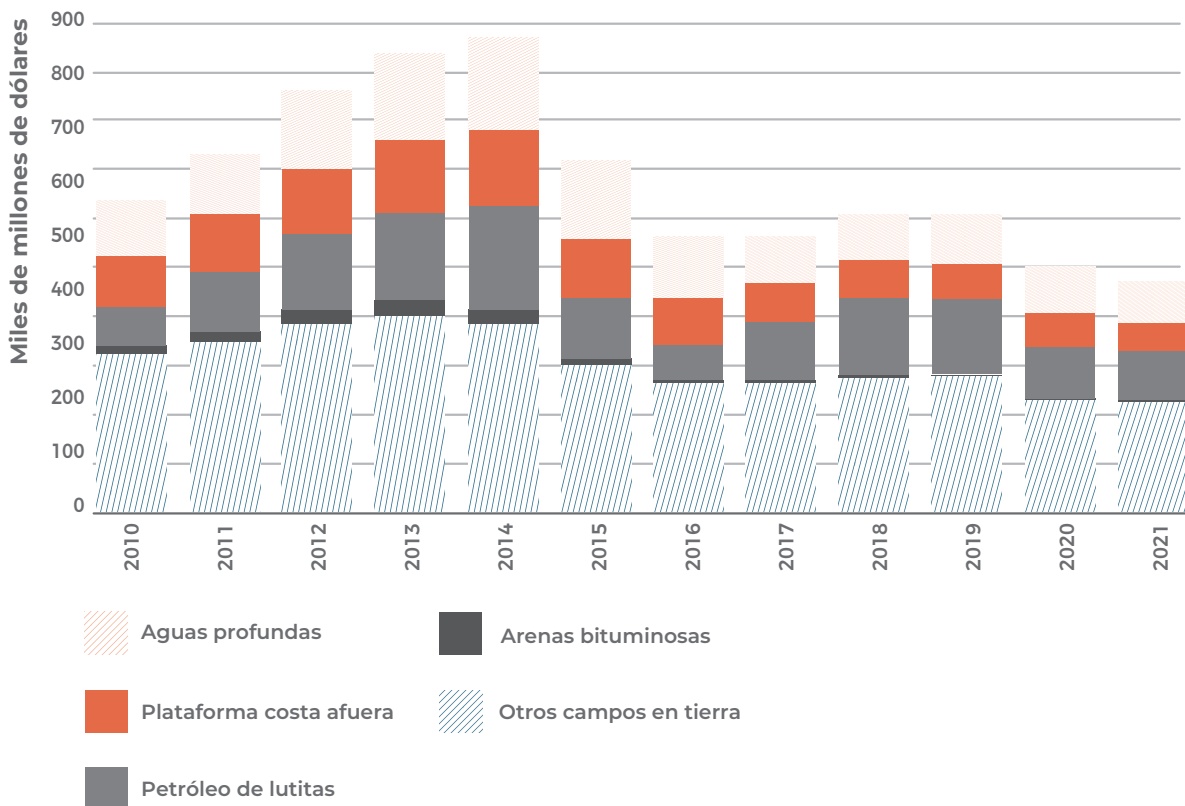


Fuente: Ferrari (2020).

El mercado del petróleo responde a la ley de la demanda y la oferta, y la evolución ilustrada en la figura 29 nos muestra cómo el precio sube cuando escasea la oferta (2005-2008), pero también baja cuando se vuelve demasiado alto para la economía y la sociedad con lo que hay una reducción de la demanda (2008-2009 y 2014-2015). Estas grandes variaciones del precio de venta del petróleo y el alto costo de producción de los campos remanentes tuvieron una repercusión en las decisiones de las empresas petroleras internacionales.

Como se muestra en la figura 30, la industria petrolera invirtió cantidades crecientes en exploración y producción entre 2010 y 2014, mientras los precios se mantuvieron altos, pero disminuyeron considerablemente en los dos años subsecuentes cuando los precios bajaron. En 2020 las inversiones volvieron a bajar por el efecto de la disminución del consumo asociado a la pandemia del covid-19.

**FIGURA 30. INVERSIONES EN EXPLORACIÓN Y PRODUCCIÓN DE LA INDUSTRIA PETROLERA ENTRE 2010 Y 2021**



**Fuente:** Rystad Energy (2020).

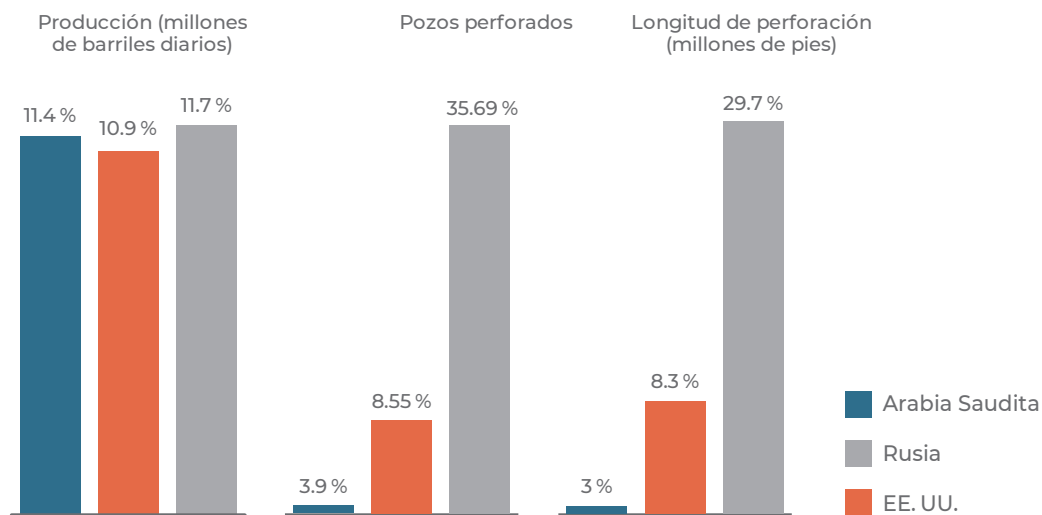
Al excluir los picos mínimos y máximos de corta duración, entre 2015 y mediados de 2023, el precio del crudo ha estado oscilando en un rango comprendido entre 50 y 80 USD/b. Estos precios son demasiado altos para una economía acostumbrada por décadas a precios de 20-30 USD/b, pero son demasiado bajos para que la industria invierta en el desarrollo de los campos que quedan. De acuerdo con los datos de 2021 (Rystad Energy, 2021b) los campos actualmente en producción tienen un costo de equilibrio (el costo mínimo para su producción) inferior a los 30 USD/b, pero el petróleo que queda por extraerse tiene costos de explotación mucho mayores, que llegan a más de 70 USD/b.

Es importante recordar que este costo incluye sólo exploración y producción, pero una compañía petrolera necesita precios de venta mucho mayores para poder mantenerse, pagar impuestos y generar ganancias para sus inversionistas si es privada, o para la hacienda pública, si es del Estado. Además, estos precios deben sostenerse en el mediano plazo, dado que los grandes proyectos necesitan un mínimo de entre tres y cinco años para empezar a producir.

Debido al alto costo de producción las compañías que se enfocaron en producir petróleo no convencional de los Estados Unidos tuvieron que endeudarse constantemente e incluso varias quebraron después de la baja de los precios de 2015 y de 2020. A pesar de lo anterior, la industria del *fracking* persiste como consecuencia de una narrativa que se centra, por un lado, en las grandes cantidades de hidrocarburos no-convencional estimadas y, por otro, en el avance tecnológico que supuestamente ha permitido bajar los costos. Pero en realidad la “mejora tecnológica” que se presume consiste principalmente en perforar pozos horizontales más largos, con mayores volúmenes de agua inyectada y con mayores cantidades de aditivos contaminantes.

Para mostrar las implicaciones de la extracción del petróleo no convencional se presenta la siguiente comparación entre los países que más petróleo producían en 2014; esto es, Arabia Saudita, Rusia y los Estados Unidos (figura 31). Aquí se contrasta la cantidad de pozos y la longitud de perforación que han de realizar para obtener una cifra similar de petróleo, los dos primeros son pozos de tipo convencional y el tercero, no convencional (*shale oil*).

**FIGURA 31. COMPARACIÓN ENTRE LOS PRINCIPALES PRODUCTORES DE PETRÓLEO EN 2014 EN CUANTO A NÚMERO DE POZOS EN OPERACIÓN Y LONGITUD DE PERFORACIÓN**



**Fuente:** adaptado de presentación a inversionistas de Schumberger (2015), disponible en el sitio The Motley Fool.<sup>2</sup>

<sup>2</sup> The Motley Fool. <https://www.fool.com/investing/general/2015/07/12/this-jaw-dropping-slide-shows-why-saudi-arabia-mak.aspx>

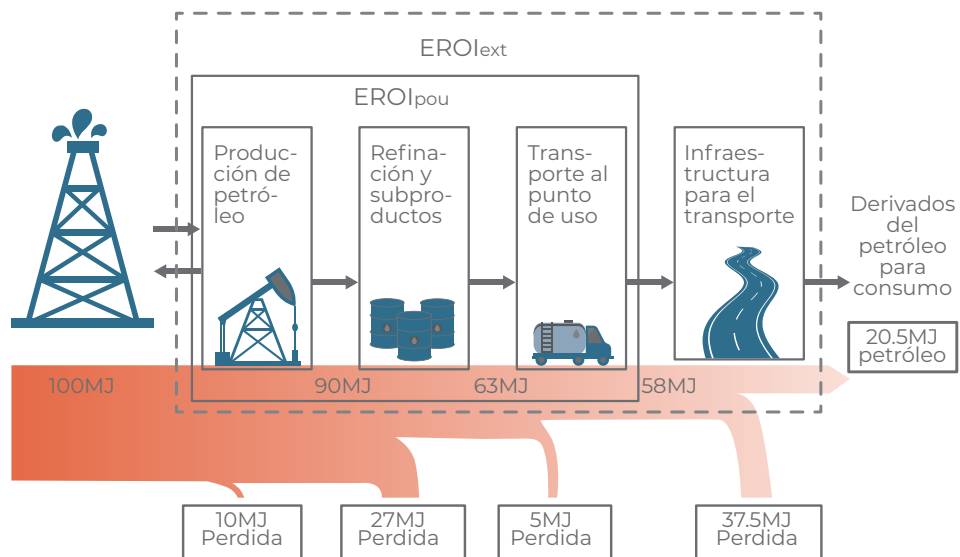
Lo que se observa en la gráfica es que los Estados Unidos necesitan perforar 100 veces más pozos con una longitud 100 veces mayor para producir la misma cantidad de petróleo que Arabia Saudita. Esto implica que a pesar de que los dos países extraen casi el mismo volumen de petróleo la cantidad de energía empleada y el costo de extracción es muy distinto.

### Tasa de retorno energético

Para tomar en cuenta el costo energético de la producción de energía se desarrolló en los años setenta el concepto de tasa de retorno energético o EROI por sus siglas en inglés (*Energy Return On Invested*), que se expresa como el cociente entre la energía que se obtiene de un recurso energético y la que se invierte para su obtención. Para estimar este valor se debe de tomar en cuenta la energía necesaria para la exploración, la construcción de la infraestructura de producción, la extracción, refinación y remediación al final del proyecto.

En la figura 32 se presenta una estimación de la EROI que permite ejemplificar su cálculo para el caso de los Estados Unidos. Como se observa en la imagen, si se parte de un valor inicial de 100 MJ de energía extraídos de un pozo, 10 MJ se han de invertir en la extracción; 27 MJ se pierden durante la refinación, 5 MJ en el transporte y 37.5 MJ se utilizan en la construcción de la infraestructura del transporte, por lo que resta un total de 20.5 MJ de los 100 MJ de los que partimos.

**FIGURA 32. ESTIMACIÓN DE LA EROI PARA EL CASO DE LA PRODUCCIÓN DE PETRÓLEO EN ESTADOS UNIDOS**



**Nota:** MJ = Megajulios

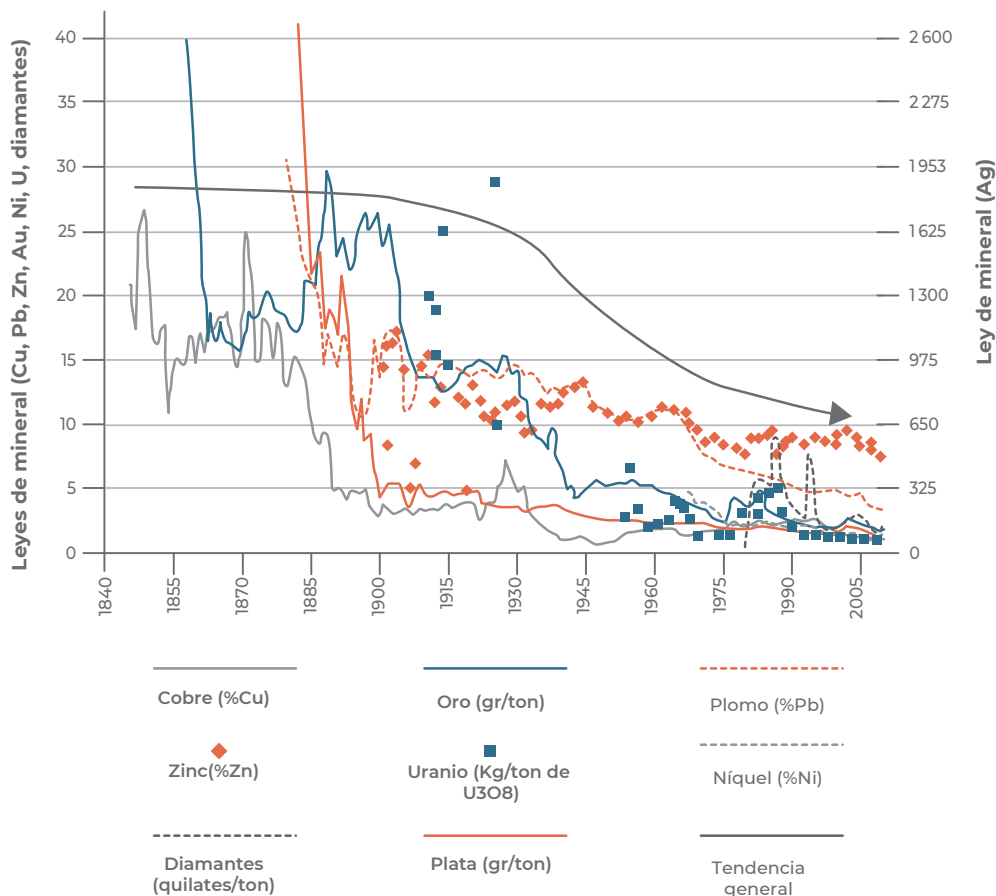
**Fuente:** Tomado de Hall et al (2014).

En la literatura científica se han propuesto una gran variedad de metodologías y criterios para estimar la EROEI, pero una observación común a todos los estudios sobre petróleo es que el recurso está declinando desde hace varias décadas (ver por ejemplo Court y Fizaine, 2017). Esto significa que cada vez se requiere una mayor cantidad de energía para poder extraer petróleo y gas, así como para procesarlos y llevarlos hasta el usuario final.

### Ley decreciente en la minería

La disminución de la EROEI del petróleo tiene un correlato en la extracción de los recursos minerales, que son fundamentales para todos los recursos energéticos, pero particularmente en la construcción de la infraestructura para el aprovechamiento de las energías renovables.

**FIGURA 33. DISMINUCIÓN DE LA LEY MINERAL (CONCENTRACIÓN DEL RECURSO) PARA COBRE, ORO, PLOMO, ZINC, URANIO, NÍQUEL, DIAMANTES Y PLATA EN AUSTRALIA DESDE 1840 A 2010**



Fuente: Mudd (2009).

Como en el caso del petróleo, la tendencia en la minería es hacia el agotamiento, puesto que los yacimientos más grandes y las vetas con concentraciones mayores se han explotado primero. Esto se observa en la figura 33 para el caso de Australia donde los datos para la concentración de cobre, oro, plomo, zinc, uranio, níquel, diamantes y plata (ley mineral) va disminuyendo en el tiempo, lo que implica que la cantidad de metal por tonelada de roca extraída va decreciendo.

Esto conlleva mayor desperdicio de roca y, por ende, un mayor uso de energía (Calvo et al., 2016). También se consume cada vez más agua para el proceso de extracción y, sobretodo, para el procesado y refinación del mineral (Mudd, 2010). En resumen, se observa la misma tendencia que con las fuentes fósiles, que tiene como consecuencia un mayor costo energético, económico y ambiental en el tiempo.

### 3.3 ACTIVIDADES Y ESTRATEGIAS SUGERIDAS

#### *Actividad 1. Análisis de la producción de petróleo de lutitas de los Estados Unidos*

**Explora las gráficas interactivas del sitio:**

<https://realinvestmentadvice.com/wp-content/uploads/2024/04/shale-oil-well-production.jpg>

**Procedimiento:**

- Analiza la situación de la producción de lutita de los Estados Unidos, por año de inicio de producción y por cuenca, a diciembre de 2021.
- ¿Cuántos pozos han perforado los Estados Unidos en los últimos diez años para extraer el petróleo de lutitas?
- ¿Cuáles son las cuencas que producen más y qué productividad tienen los pozos en promedio en cada una de ellas?

### 3.4 DIARIO REFLEXIVO

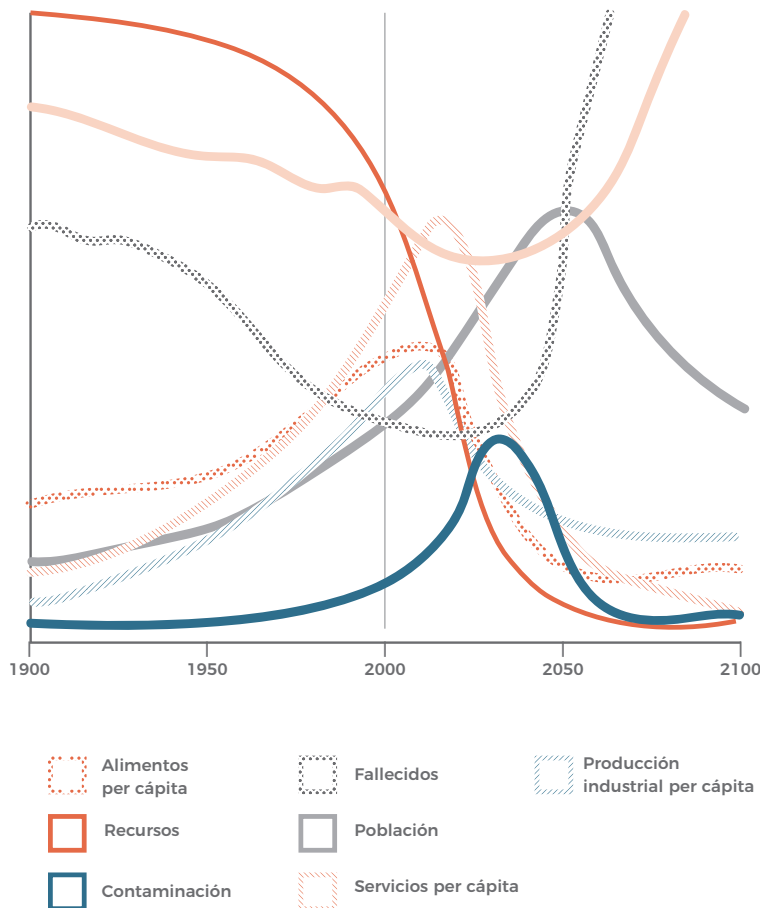
En el afán de seguir creciendo como civilización hemos llegado al punto en el que tenemos que recurrir a recursos cada vez más caros, de menor calidad, con baja tasa de retorno energético y con un creciente impacto ambiental. Esto sucede porque seguimos pensando que la naturaleza está a nuestra disposición, proveyendo recursos y procesando los desechos de la actividad humana en lugar de adaptar nuestros hábitos de consumo para vivir dentro de los límites del planeta.

A partir de lo revisado en esta unidad realiza tus reflexiones. Puedes tener en cuenta las propuestas planteadas o realizar tus propias sugerencias.

#### Gráfica del libro *Limits to Growth* (1972)

Revisa la gráfica y la reflexión elaborada en el libro de Meadows et al. (1972)

**FIGURA 34. ESCENARIO BASE DEL ESTUDIO THE LIMITS TO GROWTH**



Fuente: Meadows et al. (1972).

## Tiempo para reflexionar

- ¿Qué piensas de la siguiente reflexión de Meadows et al., en *The Limits to Growth* (1972)?

Si se mantienen las tendencias actuales de crecimiento de la población mundial, industrialización, contaminación ambiental, producción de alimentos y agotamiento de los recursos, este planeta alcanzará los límites de su crecimiento en el curso de los próximos cien años. El resultado más probable sería un súbito e incontrolable descenso tanto de la población como de la capacidad industrial.

- Realiza un *collage* con las portadas de estudios (libros, artículos etc.) sobre el agotamiento de los recursos de calidad y baratos.





## 4. Matriz energética y flujos de energía

### 4.1 APRENDIZAJES ESPERADOS

Este capítulo aborda datos globales sobre la energía a nivel mundial y en México. A partir del contenido propuesto las y los estudiantes o lectores interesados serán capaces de analizar e interpretar la matriz energética y los flujos energéticos a escala global y nacional.

Entre los aprendizajes esperados se encuentran:

- Entender el contenido de la matriz energética, tanto del lado de la producción, como en el de consumo.
- Conocer y analizar los flujos energéticos a nivel mundial.
- Propiciar que los estudiantes contextualicen los conocimientos construidos en esta unidad en casos particulares.
- Dotar a los estudiantes de una creciente autonomía intelectual para resolver problemas cuantitativos.

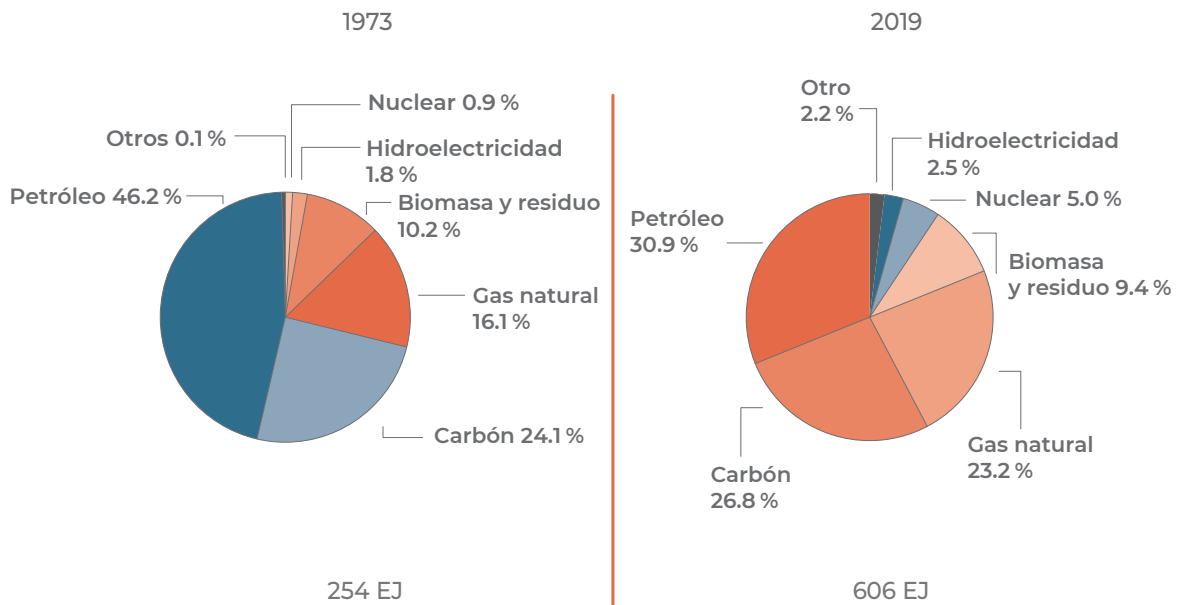
## 4.2 MATRIZ ENERGÉTICA Y FLUJOS DE ENERGÍA

### Preguntas e imágenes motivadoras

#### Imágenes motivadoras

Observa las siguientes gráficas de pastel:

**FIGURA 35. MATRIZ DE ENERGÍA GLOBAL PARA LOS AÑOS 1973 Y 2019**



**Nota:** EJ = Exajulios; Otro incluyen geotermia, solar, eólica, undimotriz, entre otras.

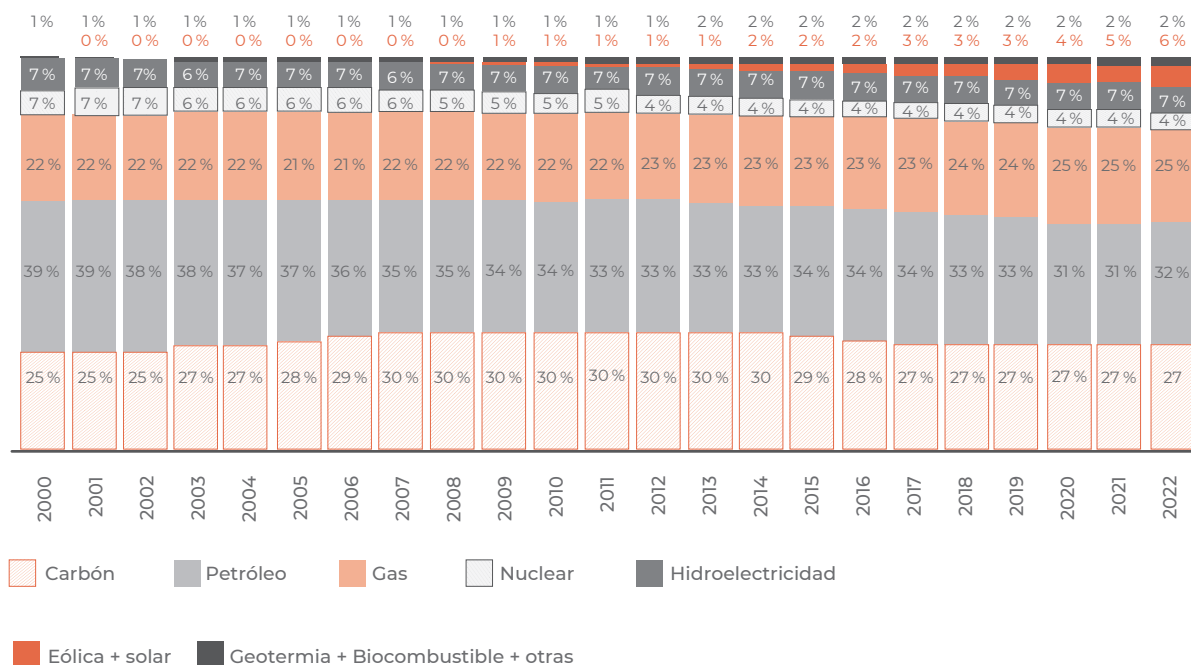
**Fuente:** IEA (2021).

#### Preguntas sugeridas:

- Compara las matrices energéticas primarias a nivel mundial, tanto la generación global como la generada a partir de los combustibles fósiles.
- ¿Qué información relevante obtienes al comparar ambas matrices?
- ¿Qué observas en cuanto a energía total?

## Imágenes motivadoras

**FIGURA 36. EVOLUCIÓN DE LA MATRIZ ENERGÉTICA DE 2000 A 2022**



Fuente: datos del Energy Institute.<sup>1</sup>

### Preguntas sugeridas:

- ¿Qué fuentes han cambiado su papel en este periodo?
- ¿Cuáles son los usos finales fundamentales de los hidrocarburos?

## Evolución de la matriz energética mundial

La matriz energética es una representación gráfica relevante a la hora de conocer los usos diversos de la energía tanto en su producción como en su consumo. Si se revisan los valores de producción que se mostraron en las gráficas de la figura 35, en la que se comparan dos años separados por un intervalo de 46 años, se descubre que,

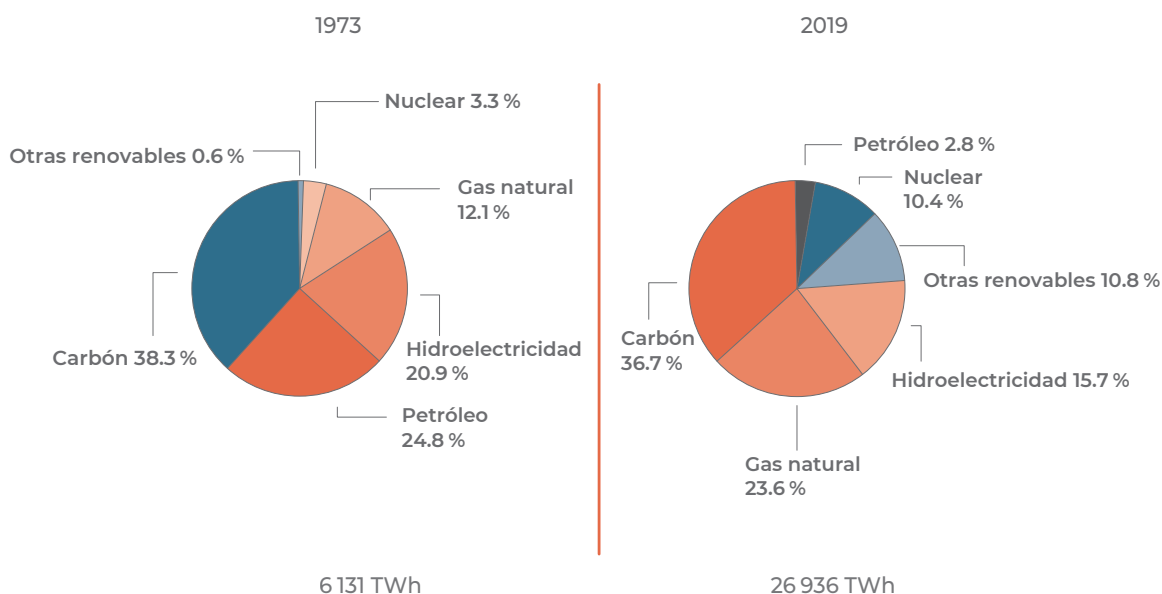
<sup>1</sup> Datos graficados por el Energy Institute. <https://www.worldenergydata.org/>

a pesar de una ligera disminución de los porcentajes de energía generada a partir de los combustibles fósiles, su cantidad absoluta en exajulios ha aumentado alrededor del 2.2 veces; además, la energía total consumida se ha multiplicado por 2.4.

Lo anterior se debe al masivo uso de los combustibles fósiles en sectores como el transporte, la generación eléctrica, la industria, la agricultura y la petroquímica. Incluso, se revisamos en las últimas dos décadas (figura 36) el papel de los combustibles fósiles ha disminuido sólo un 4% por efecto del incremento de fuentes renovables.

En cuanto a la generación de electricidad (figura 37) podemos observar que en 46 años se ha cuadruplicado su consumo y la dependencia de los combustibles fósiles, a pesar de que ha disminuido porcentualmente (del 75% en 1973 al 65% en el 2019), en valores absolutos ha llegado a duplicar su valor.

**FIGURA 37. GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD EN 1973 Y 2019**



**Nota:** TWh = Terawatios/hora; Otras renovables incluyen geotermia, solar, eólica y undimotriz, entre otras.

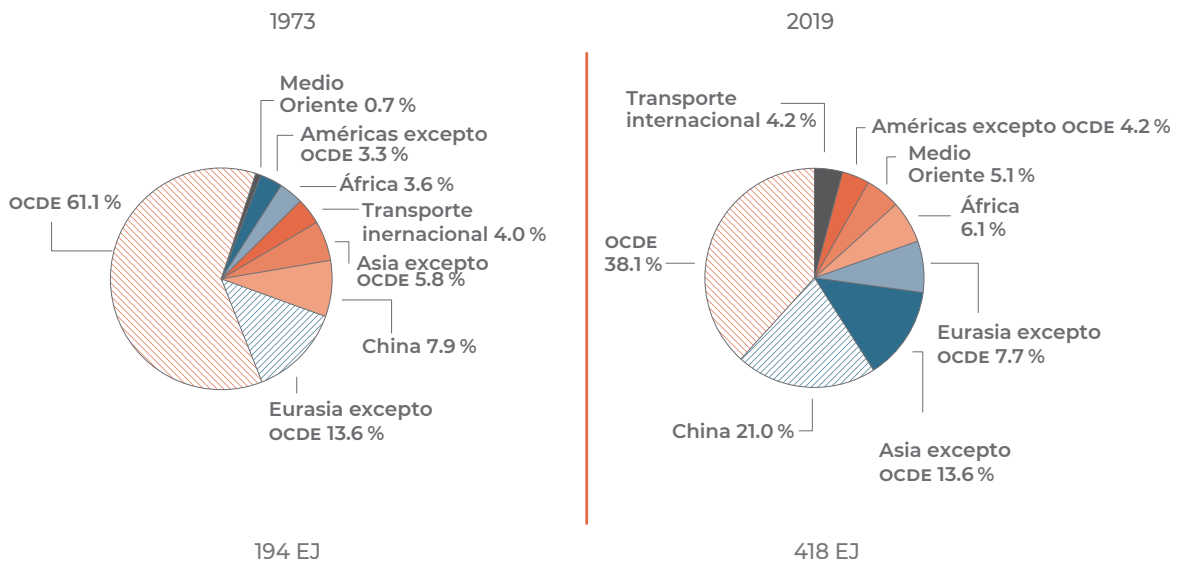
**Fuente:** IEA (2021).

No obstante, el consumo de energía no es el mismo entre las distintas regiones del mundo. Como se puede observar en la figura 38, en términos porcentuales el consumo de los países de la Organización para la Cooperación y Desarrollo Económico

(OCDE) –que reúne los Estados Unidos, Canadá, Australia, Nueva Zelanda, Japón, Corea del Sur, México, Chile y gran parte de Europa– cayó del 61 % en 1973 al 37.5 % en 2019, llegando casi a nivel de los países no pertenecientes a la OCDE, entre los que se encuentran China e India, donde la demanda de energía se multiplicó por siete, y en valores absolutos casi se triplicó durante este período.

Los países de la OCDE siguen siendo aquellos cuya región tiene el mayor consumo de energía, a pesar de haber disminuido mucho su demanda.

**FIGURA 38. CONSUMO DE ENERGÍA FINAL POR REGIÓN**

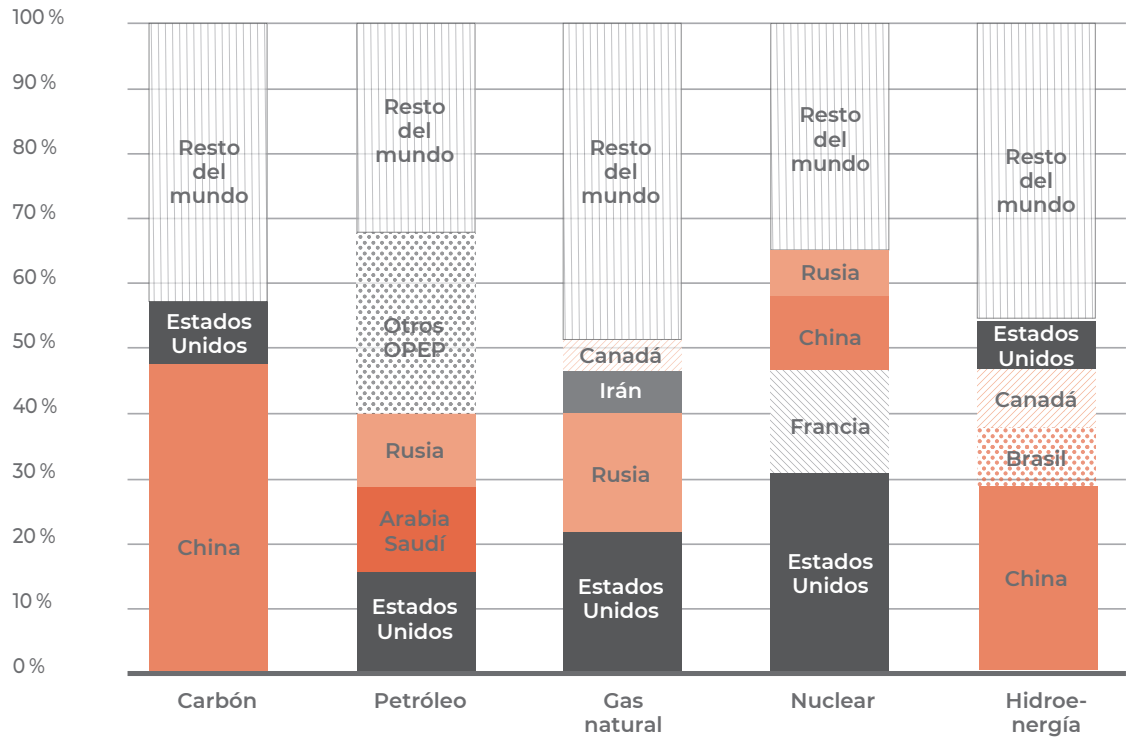


**Nota:** EJ = Exajulios. ocde = Organización para la Cooperación y Desarrollo Económico.  
**Fuente:** IEA (2021).

En la figura 39 se muestran los principales países productores de energía por tipo de fuentes, entre los que se encuentran:

- Carbón: China (principal productor con casi 50%).
- Petróleo: Estados Unidos, Rusia y Arabia Saudita.
- Gas natural: Estados Unidos y Rusia.
- Nuclear: Estados Unidos y Francia.
- Hidroeléctrica: China.

**FIGURA 39. CLASIFICACIÓN DE LOS MAYORES PRODUCTORES DE LAS CINCO PRINCIPALES FUENTES DE ENERGÍA EN 2018**

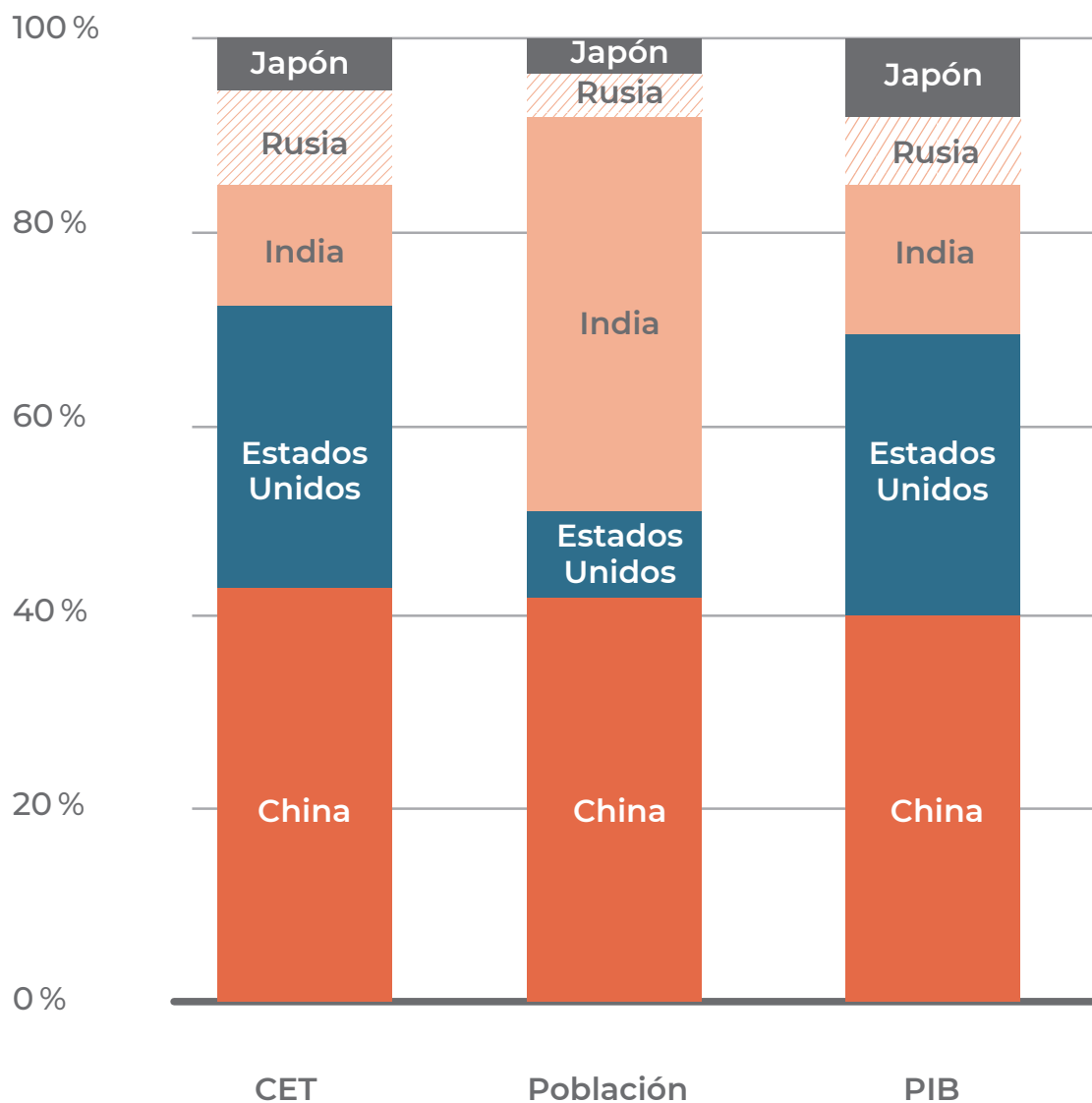


**Nota:** OPEP = Organización de los Países Exportadores de Petróleo.

**Fuente:** International Energy Agency (2020).

Los países que más energía consumen (figura 40) son los EE. UU. y China, pero, si consideramos la población de estos países, el consumo per cápita de los ciudadanos estadounidenses es cuatro veces mayor que el de China. También se observa que los países que más energía consumen son las economías más grandes, a excepción de Japón e India, que consumen menos, pero tienen mayor PIB.

**FIGURA 40. CONSUMO DE ENERGÍA TOTAL (CET), POBLACIÓN Y PRODUCTO INTERIOR BRUTO (PIB) DE LOS CINCO MAYORES CONSUMIDORES DE ENERGÍA EN 2018**



**Fuente:** International Energy Agency (2020).

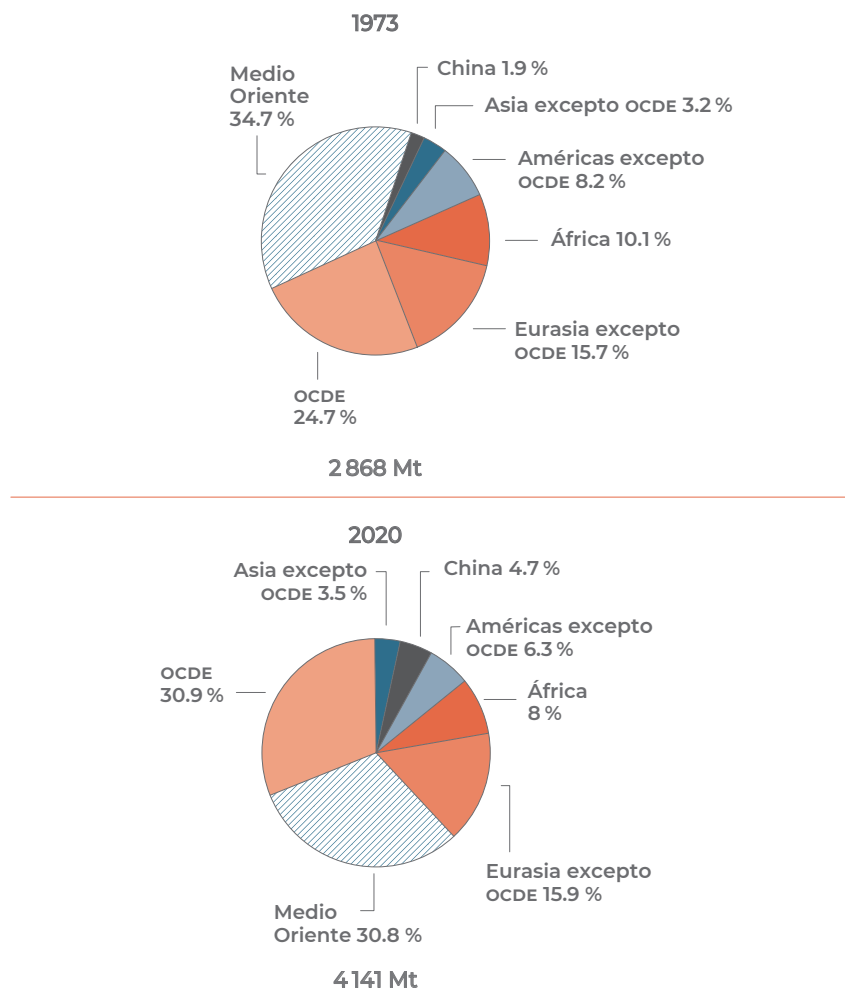
A continuación, vamos a analizar con mayor profundidad el estado de cada una de las fuentes primarias no renovables.

## Petróleo

- A pesar de que la producción de energía a partir del petróleo se ha reducido porcentualmente, la producción absoluta sigue creciendo.
- La mayor parte del petróleo sigue produciéndose en Oriente Medio seguido por los Estados Unidos, Rusia y Canadá.
- Los mayores exportadores netos de petróleo son Arabia Saudita, Rusia, Irak y Canadá.

Los mayores importadores netos son China, India, los Estados Unidos, Japón, Corea del Sur, Alemania y los países de Europa occidental.

**FIGURA 41. PRODUCCIÓN MUNDIAL 1973 Y 2020 DE PETRÓLEO**



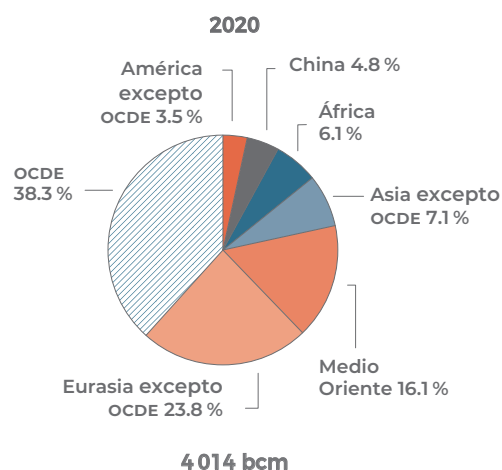
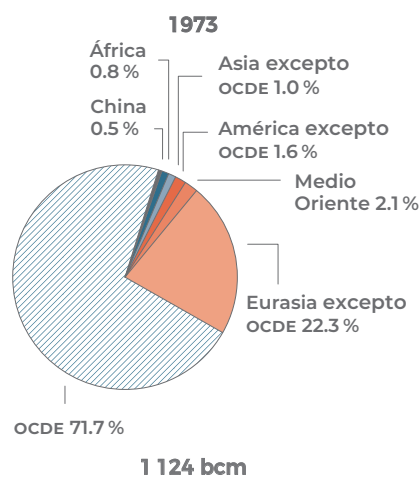
**Nota:** Mt= millones de toneladas.

**Fuente:** International Energy Agency (2021).

## Gas natural

- La producción de los países de la OCDE ha disminuido porcentualmente, mientras que ha aumentado la de Oriente Medio y en los países europeos que no pertenecen a la OCDE, principalmente Rusia.
- La mayor parte del gas natural se produce en los Estados Unidos, Rusia, Irán, China y Canadá.
- Los mayores exportadores netos de petróleo son Rusia, Catar, Noruega y Australia.
- Los mayores importadores netos son China, Japón, Alemania, Italia y México.

**FIGURA 42. PRODUCCIÓN MUNDIAL 1973 Y 2020 DE GAS NATURAL**



**Nota:** Bcm = Miles de millones de metros cúbicos.

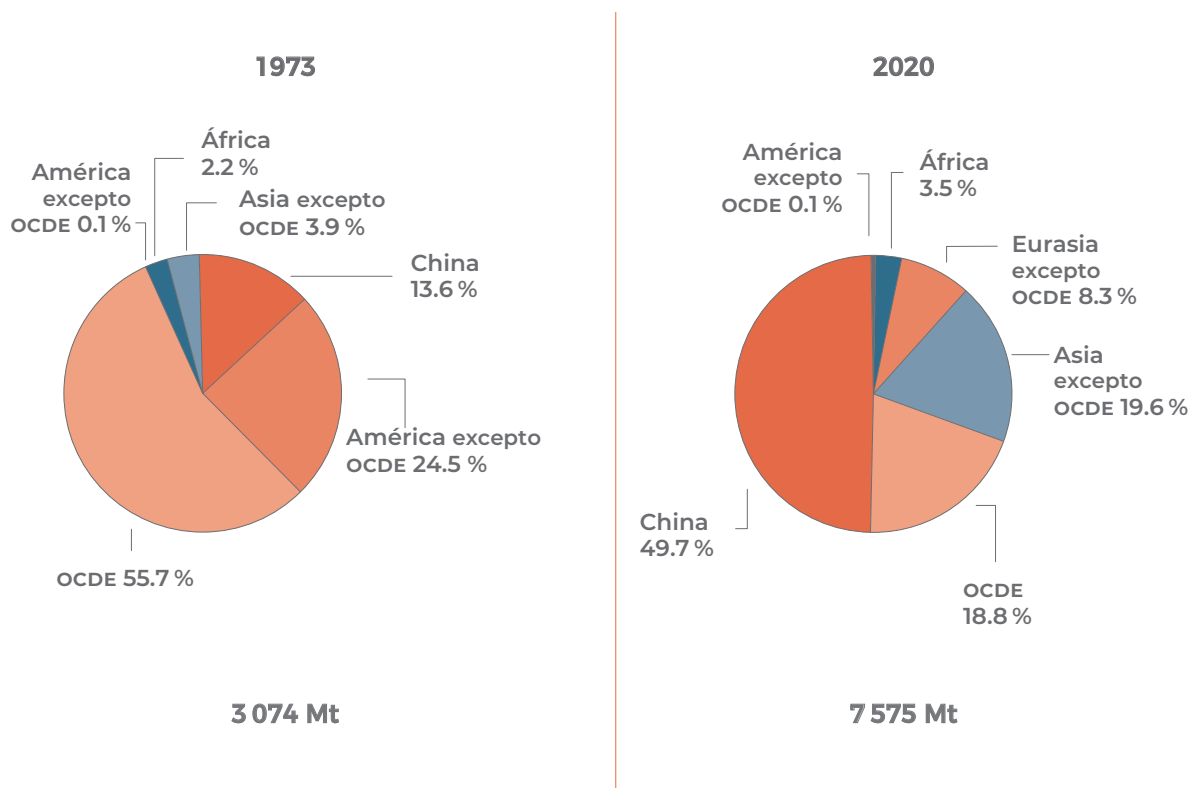
**Fuente:** International Energy Agency (2021).

## Carbón

- La producción del carbón aumentó considerablemente debido a que China se volcó a su utilización, ya que cuenta con las mayores reservas mundiales. En los países de la OCDE se ha reducido considerablemente.
- La mayor parte del carbón se produce en China, India, Indonesia, Australia y los Estados Unidos.
- Los mayores exportadores netos son Indonesia, Australia, Rusia, Sudáfrica, los Estados Unidos y Colombia.
- Los mayores importadores netos son China, India, Japón y Corea.

Nota: el carbón no se importa mucho porque su traslado es costoso a grandes distancias debido a que, a diferencia de los hidrocarburos, no se puede transportar en ductos.

**FIGURA 43. PRODUCCIÓN MUNDIAL 1973 Y 2020 DE CARBÓN**

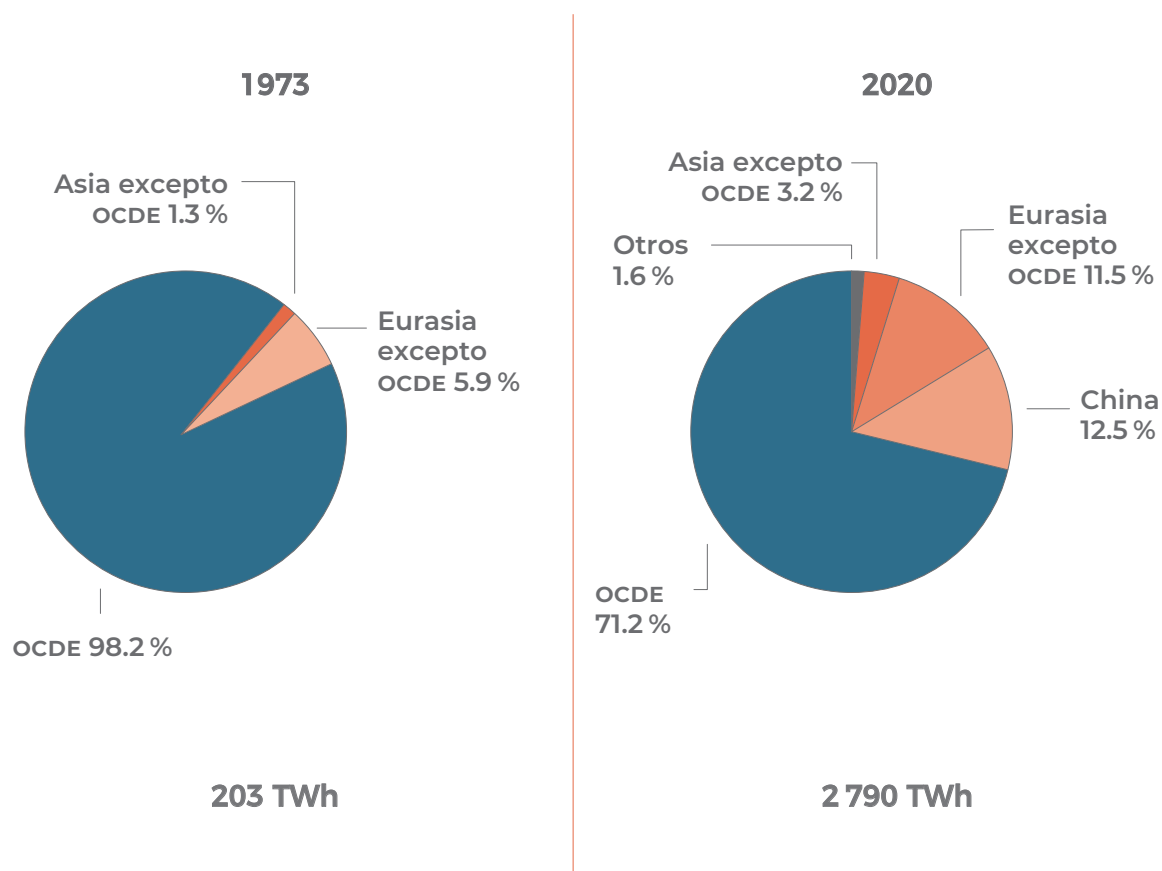


Fuente: International Energy Agency (2021).

## Nuclear

- La producción de energía eléctrica a partir de la fuente nuclear se ha multiplicado por 13 desde 1973, principalmente en los países desarrollados (OCDE). Sin embargo, en porcentaje ha disminuido en la OCDE y se ha incrementado en China y países de Europa que no perteneces a la OCDE.
- Los Estados Unidos son el país con la mayor producción de energía nuclear seguido por China, Francia y Rusia.
- Los países que más producen electricidad con energía nuclear son Francia, Ucrania, Eslovaquia y Hungría.

**FIGURA 44. GENERACIÓN MUNDIAL 1973 Y 2020 DE ENERGÍA NUCLEAR**



**Nota:** TWh = Terawatio/hora.

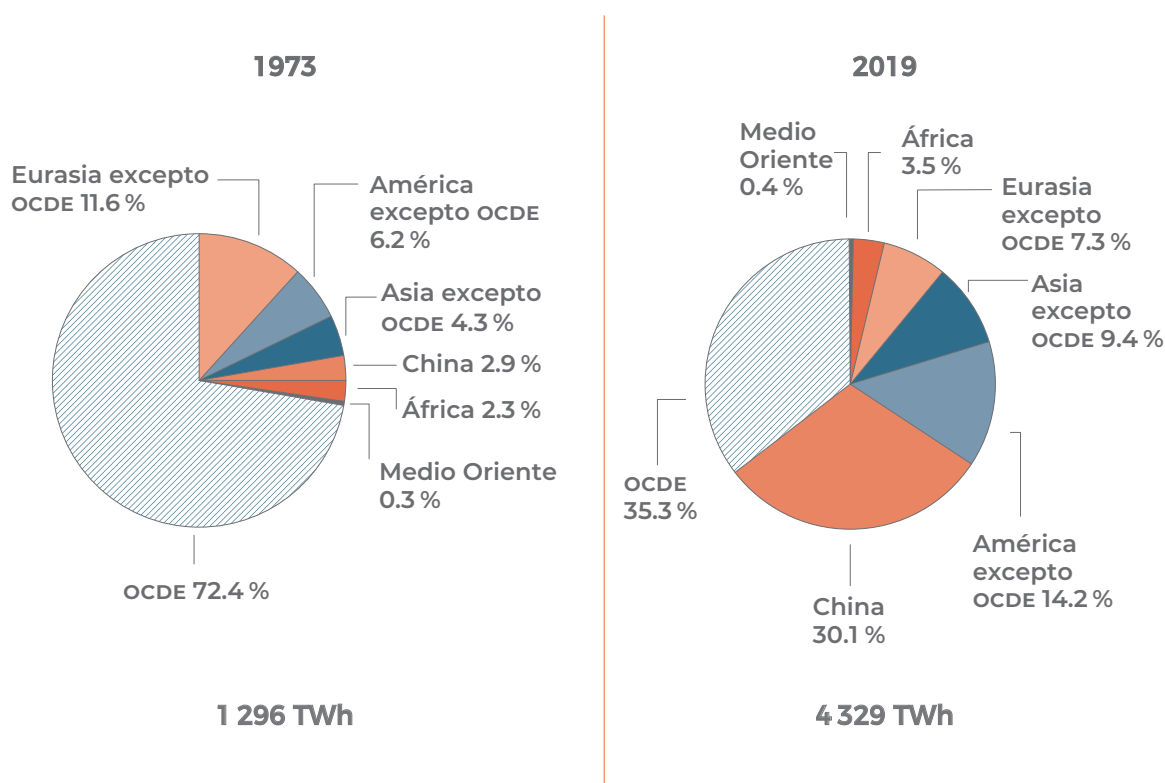
**Fuente:** International Energy Agency (2021).

El panorama con relación al estado de las energías primarias renovables a nivel mundial es el que se describe a continuación.

### Energía hidroeléctrica

- En las últimas décadas la producción de energía hidroeléctrica prácticamente no ha aumentado en los países de la OCDE, que ya habían desarrollado esta fuente en la gran mayoría de los sitios más rentables.
- El incremento mayor ha sido en China y América Latina (principalmente Brasil) que ha llevado a más que triplicar la generación global.
- Los países con mayor aporte de esta fuente en la matriz eléctrica son Noruega, Brasil, Canadá y China.

**FIGURA 45. GENERACIÓN MUNDIAL 1973 Y 2020 DE ENERGÍA HIDROELÉCTRICA**



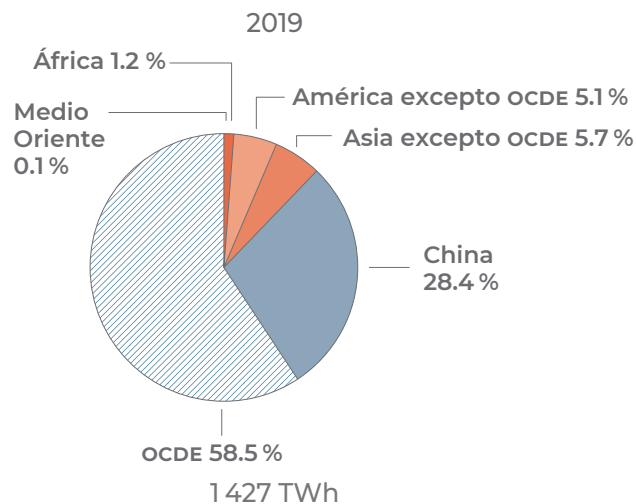
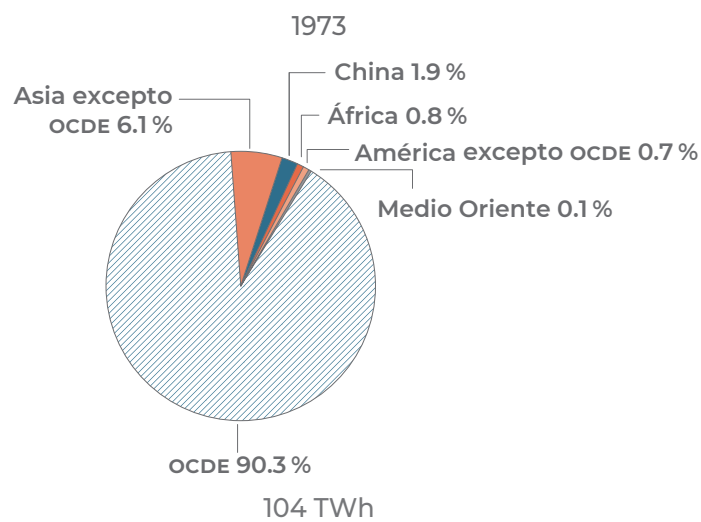
**Nota:** TWh = Terawatio/hora

**Fuente:** International Energy Agency (2021).

## Energía eólica

- La producción de energía eólica ha aumentado del orden de 14 veces desde 2005, y ha tenido mayor penetración en los países de la OCDE.
- Los países con mayor producción de energía eólica son China, los Estados Unidos y Alemania.
- Los países con mayores porcentajes de generación eólica en la producción eléctrica doméstica son España, Alemania e Inglaterra.

**FIGURA 46. GENERACIÓN ELÉCTRICA MUNDIAL 2005 Y 2019 PROCEDENTE DE ENERGÍA EÓLICA**



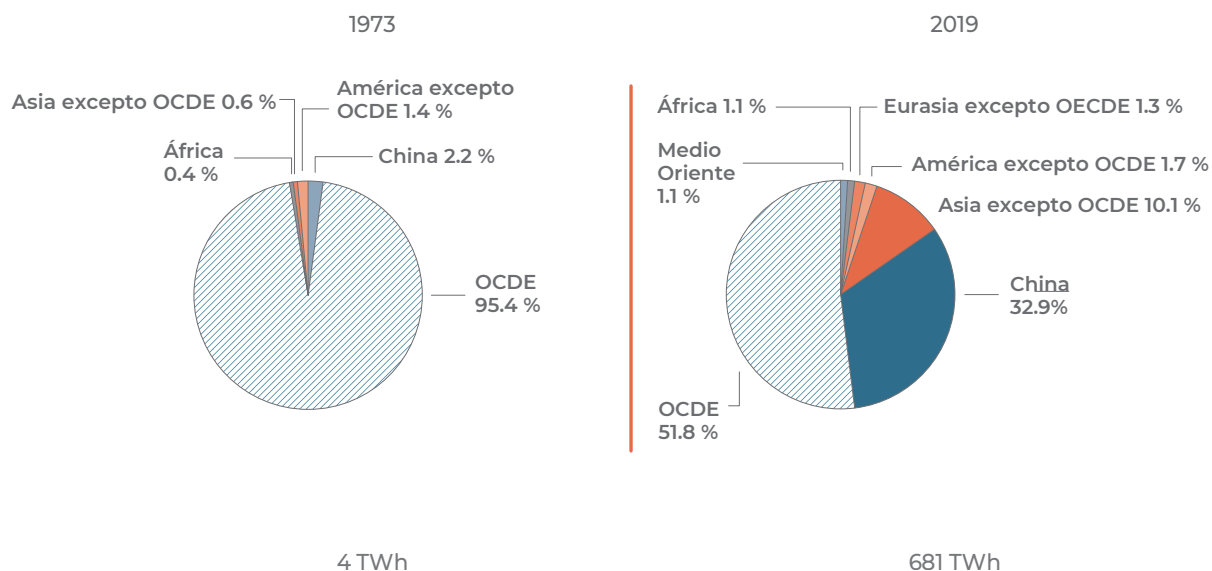
**Nota:** TWh = Terawatio/hora

**Fuente:** International Energy Agency (2021).

## Energía solar fotovoltaica

- La producción de energía solar fotovoltaica (Fv) se ha incrementado dos órdenes de magnitud desde 2005, con mayor penetración en los países de la OCDE y en China.
- Los países con mayor producción de energía solar Fv son China y los Estados Unidos.
- Los países con mayores porcentajes de generación solar Fv en la producción eléctrica doméstica son Italia, Alemania y Japón.

**FIGURA 47. GENERACIÓN ELÉCTRICA MUNDIAL 2005 Y 2019 DE ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA**

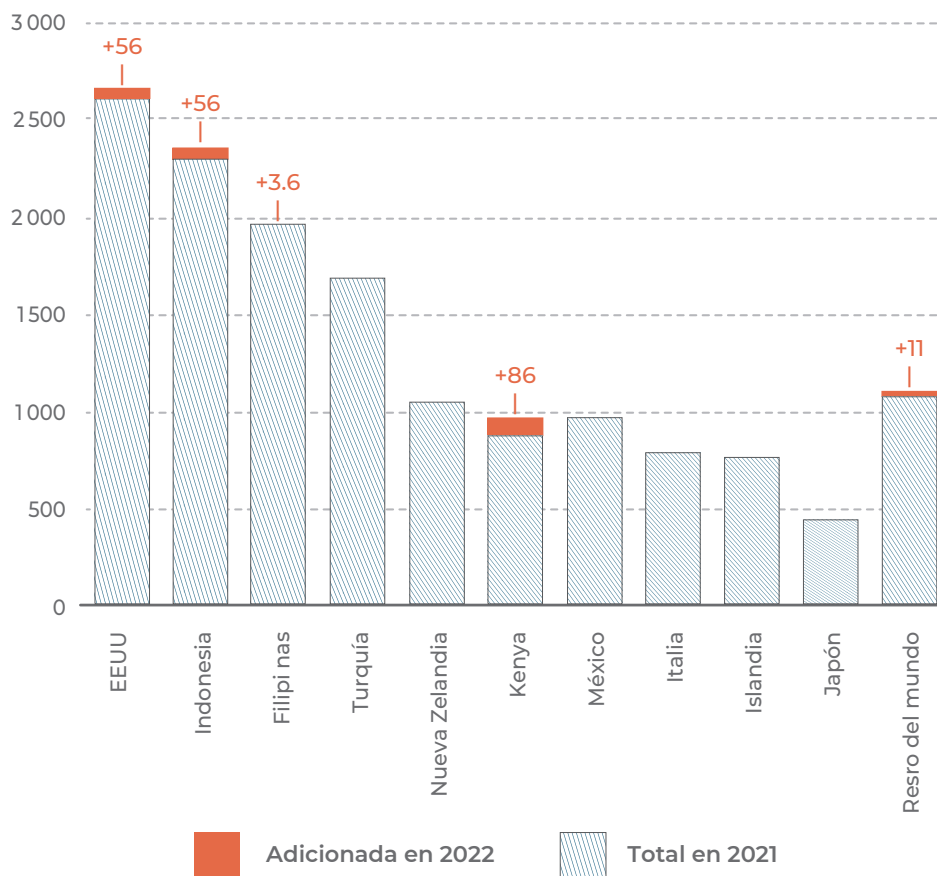


**Fuente:** International Energy Agency (2021).

## Geotermia

- La producción de energía eléctrica a partir de la geotermia se da en un número reducido de lugares alrededor del mundo.
- Los países con mayor generación geotérmica son los Estados Unidos, Filipinas, Indonesia, Turquía, Nueva Zelanda y México.
- Los países con mayores porcentajes de generación eléctrica a partir de geotermia son Kenia (51%), Filipinas (27%), Islandia (30%), El Salvador (25%), Nueva Zelanda (14.5%) y Costa Rica (14%) (Bertani, 2016).

**FIGURA 48. CAPACIDAD INSTALADA DE CENTRALES GEOTÉRMICAS EN 2021 Y CRECIMIENTO EN 2022**



Fuente: IRENA (2022).

Es importante hacer notar que todas estas fuentes renovables únicamente contribuyen en la generación de energía eléctrica.

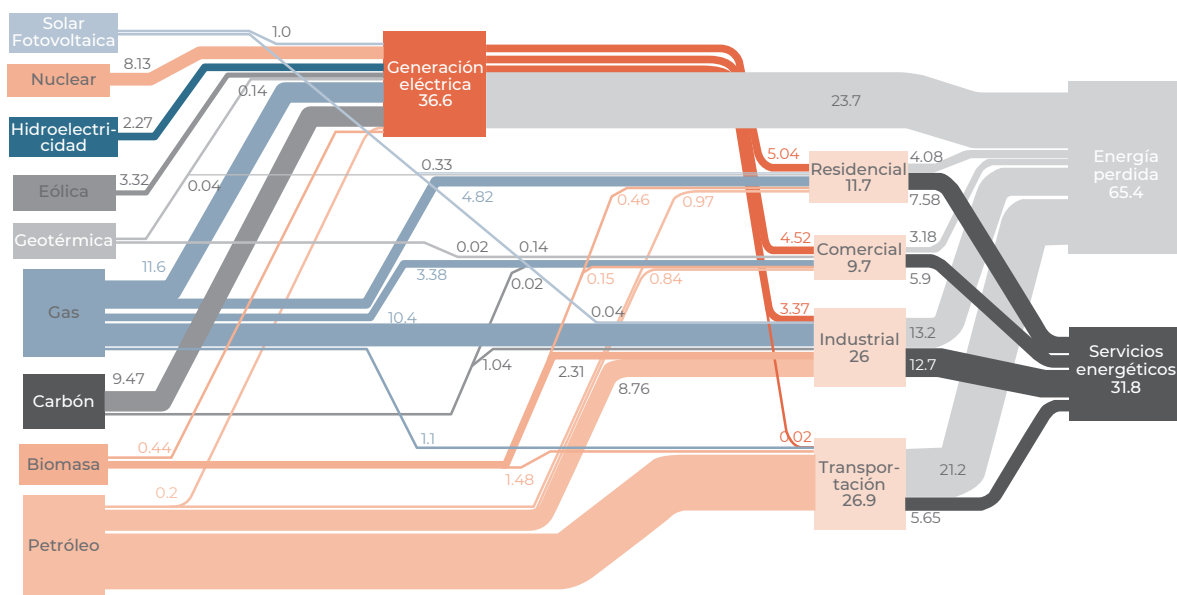
### Flujos energéticos

Otra forma de representar la energía es mediante los diagramas de Sankey a través de los cuales se puede observar de manera explícita:

- La contribución de cada fuente de energía primaria.
- Su transformación.
- El uso final por tipo.

Una de las cuestiones más impactantes que se descubre en estas gráficas es la representación de las pérdidas, tal y como lo afirman las Leyes de la Termodinámica. Si observamos el caso de del flujo de energía en los Estados Unidos para 2022, por ejemplo (figura 49), se observa que las pérdidas de energía en las transformaciones son del orden del 65.4%. Otro de los datos notable es que el sector de mayor consumo final es el del transporte.

**FIGURA 49. DIAGRAMA DE SANKEY DEL FLUJO DE ENERGÍA PARA ESTADOS UNIDOS EN 2022**



Fuente: Energy Flow Charts.<sup>2</sup>

### 4.3 ACTIVIDADES Y ESTRATEGIAS SUGERIDAS

#### Actividad 1. Base de datos de energía (Energy Institute)

##### Base de datos sobre energía (Energy Institute, EX BP)

Descarga la base de datos Statistical Review of World Energy (de Energy Institute) de su página Descarga de datos y recursos (*Resources and data downloads*):<sup>3</sup>

<sup>2</sup> Energy Flow Charts. <https://flowcharts.llnl.gov/>

<sup>3</sup> Energy Institute. <https://www.energyinst.org/statistical-review/resources-and-data-downloads>

**Procedimiento:**

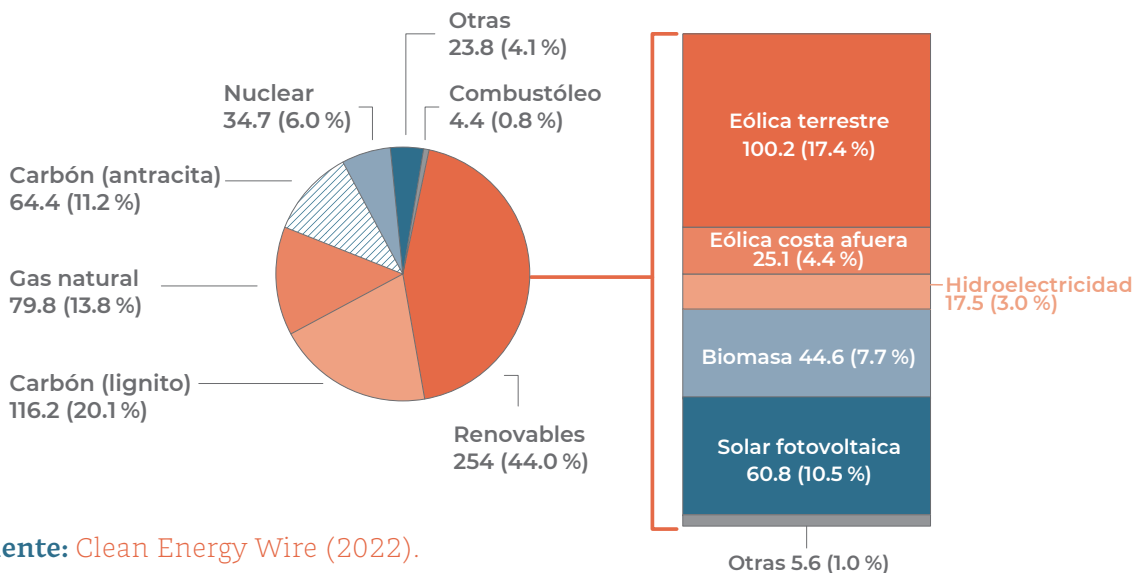
- Prepara una gráfica (histograma) mostrando las reservas probadas de petróleo, gas natural y carbón en orden decreciente para los primeros 20 países por cada tipo de fuente
- Prepara unas gráficas mostrando la matriz energética (porcentaje de tipo de fuente) en 2021 y 2022 para 1) mundo, 2) Centro y Sudamérica, 3) Estados Unidos, 4) Europa Occidental, 5) China, y 6) México.
- ¿Qué países dependen más de los combustibles fósiles?
- ¿Qué relación puedes observar entre los resultados de 1) y 2)?

**Actividad 2. Caso de Alemania**

**Evolución de la generación eléctrica**

Revisa la gráfica de la figura 50 y la información de la página sobre matriz energética y generación eléctrica de Alemania.<sup>4</sup>

**FIGURA 50. GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA DE ALEMANIA POR FUENTE EN 2022 (EN % Y EN VALOR ABSOLUTO EN TWh)**



**Fuente:** Clean Energy Wire (2022).

<sup>4</sup> Clean Energy Wire (Clew). <https://www.cleanenergywire.org/factsheets/germanys-energy-consumption-and-power-mix-charts>

- Averigua cuánto ha invertido Alemania en generación eléctrica procedente de fuentes renovables. Indaga de qué manera Alemania está compensando la reducción de energía nuclear.

**Procedimiento:**

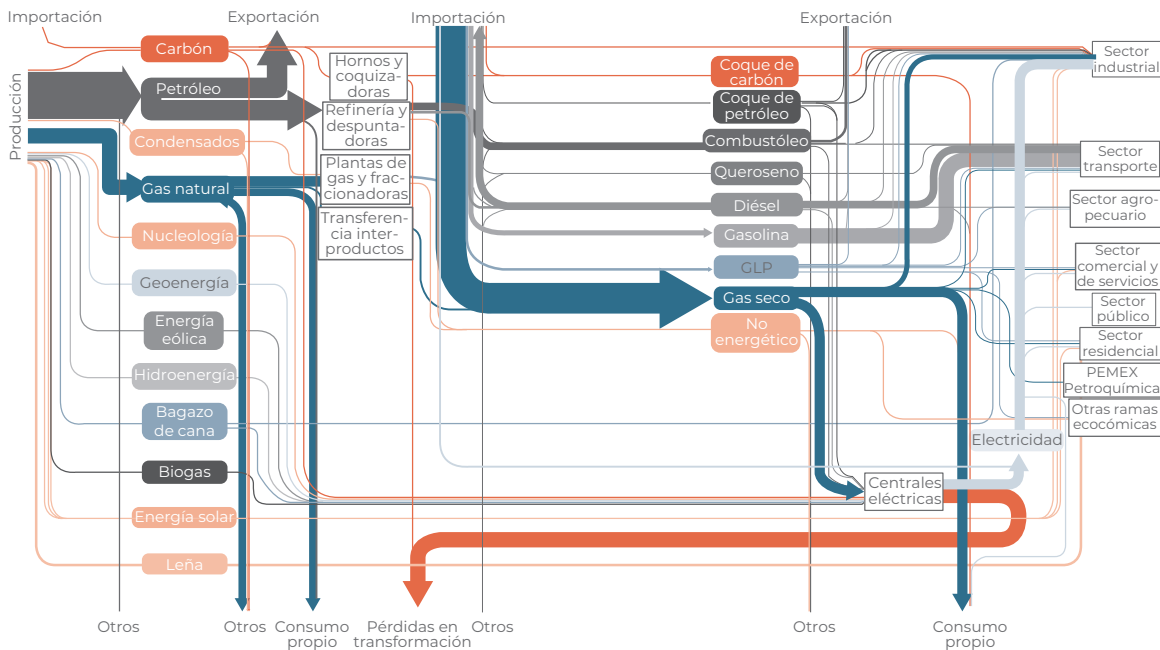
- Busca una gráfica de la evolución de la matriz de generación eléctrica de Alemania en las últimas dos décadas.
- Compara cómo ha cambiado la matriz energética.
- Busca una gráfica de la matriz energética total de Alemania y observa la contribución de las renovables.
- Haz una reflexión.

Actividad 3. Diagramas de flujo

Evolución de la capacidad de generación eléctrica de México

Revisa la figura 51 y la información del reporte de Palacios et al. (2022).<sup>5</sup>

**FIGURA 51. DIAGRAMA DE FLUJO DEL SISTEMA ENERGÉTICO MEXICANO PARA 2020**



Fuente: Palacio et al. (2022).

Procedimiento:

- Con base en la gráfica y los datos contenidos en el reporte de Palacio et al. (2022) estima si México es un importador o exportador neto de energía.

Por parejas, escojan un país distinto a México y exploren los diagramas de Sankey por país y por año el sitio de la Agencia Internacional de Energía<sup>6</sup> o el diagrama de la Unión Europea en el sitio Eurostat.<sup>7</sup>

<sup>5</sup> Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (Conahcyt). <https://conahcyt.mx/cuaderno-tematico-2/>

<sup>6</sup> The IEA. <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/energy-sankey>

<sup>7</sup> Eurosta. <https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-eurostat-news/-/WDN-20190329-1>

- Compara los diagramas de flujo del país escogido y el que se presenta en la imagen perteneciente a México.
- Realiza una reflexión.

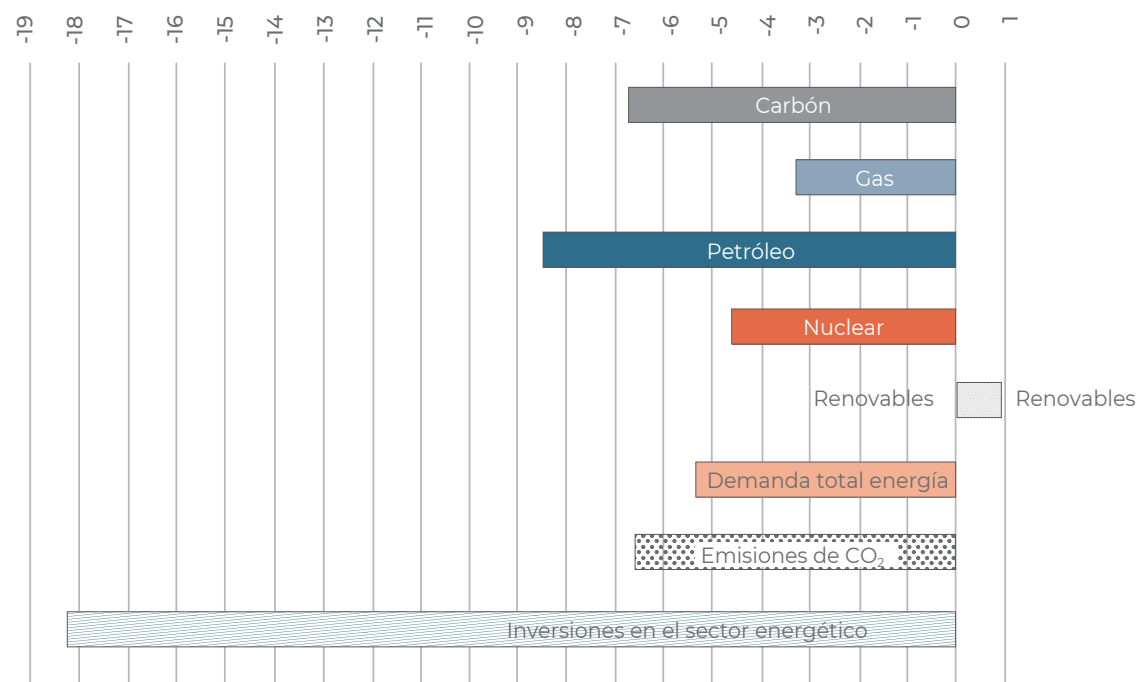
#### 4.4 DIARIO REFLEXIVO

A partir de lo revisado en esta unidad reflexiona de qué manera te reconoces en lo expuesto. Entre las posibles reflexiones que se pueden hacer se encuentra la siguiente.

#### Efecto del covid-19 sobre el sector energía

Reflexión sobre los efectos de la pandemia en el sector de la energía.

**FIGURA 52. EFECTOS DEL COVID-19 EN EL SECTOR DE LA ENERGÍA**



**Fuente:** International Energy Agency (2020).

#### Tiempo para reflexionar

- ¿Cuál fue el efecto de la pandemia sobre el sector de la energía teniendo en cuenta las variables que aparecen en la gráfica?
- ¿Cómo cambió tu consumo energético durante ese periodo?

## REFERENCIAS

- Austin, S. (2015). Los precios del petróleo y la guerra civil siria. *Weltsicht Meine*. <http://ruddygarroussmeineweltsicht.blogspot.com/2015/10/los-precios-del-petroleo-y-la-guerra.html>
- Appunn, K., Yannick, H. y Julian, W. (3 de agosto, 2022). Germany's Energy Consumption and Power Mix in Charts. *Clean Energy Wire*. <https://www.cleanenergywire.org/factsheets/germanys-energy-consumption-and-power-mix-charts>
- Bardi, U. (15 de mayo de 2011). Entropy, Peak Oil and Stoic Philosophy. *Resilience*. <https://www.resilience.org/stories/2011-05-15/entropy-peak-oil-and-stoic-philosophy/>
- Berman, A. (3 de septiembre de 2020). Stop Expecting Oil and the Economy to Recover. *Art Berman*. <https://www.artberman.com/blog/stop-expecting-oil-and-the-economy-to-recover/>
- Bertani, R. (2016). Geothermal Power Generation in the World 2010-2014 Update Report. *Geothermics*, 60, 31-43.
- Bradshaw, C. J. A. et al. (2021). Underestimating the Challenges of Avoiding a Ghastly Future. *Frontiers in Conservation Science*. 1, 1-10.
- British Petroleum (2022). Energy Outlook 2022 Edition. *British Petroleum*. <https://www.iims.org.uk/bp-energy-outlook-2022-published/>
- Calvo, G., Mudd, G., Valero, A. y Valero, A. (2016). Decreasing Ore Grades in Global Metallic Mining: A Theoretical Issue or a Global Reality? *Resources*, 5(4), 36.
- Campbell, C. J. y Laherrère, J. H. (1998). The End of Cheap Oil. *Scientific American*, 278(3), 78-83.
- Court, V. y Fizaine, F. (2017). Long-term Estimates of the Energy-return-on-investment (EROI) of Coal, Oil, and Gas Global Productions. *Ecological Economics*, 138, 145-159.

- DiLallo, M. (2015). This Jaw-Dropping Slide Shows Why Saudi Arabia Makes So Much Money on Oil. <https://www.fool.com/investing/general/2015/07/12/this-jaw-dropping-slide-shows-why-saudi-arabia-mak.aspx>
- Ferrari L. (2020). Pico del petróleo y fin del crecimiento. *Revista América Latina en Movimiento* 550, 15-18. <https://www.alainet.org/es/revistas/550>
- García-Ochoa, R. y Graizbord, B. (2016). Caracterización espacial de la pobreza energética en México. Un análisis a escala subnacional. *Economía, sociedad y territorio*, 16(51), 289-337.
- Global Carbon Project (2021). *Infographics*. <https://www.globalcarbonproject.org/carbonbudget/22/infographics.htm>
- Hall, C. A. y Day, J. W. (2009). Revisiting the Limits to Growth After Peak Oil: In the 1970s a Rising World Population and the Finite Resources Available to Support it Were Hot Topics. Interest Faded—but it's Time to Take Another Look. *American scientist*, 97(3), 230-237.
- Hall, C., Lambert, J. y Balogh, S. (2014). EROI of Different Fuels and the Implications for Society. *Energy Policy*, 64, 141-152.
- Heinberg, R. (2017). *Why Climate Change Isn't Our Biggest Environmental Problem, and Why Technology Won't Save Us*. Post Carbon Institute. <https://www.postcarbon.org/why-climate-change-isnt-our-biggest-environmental-problem-and-why-technology-wont-save-us/>
- Hickel, J. y Kallis, G. (2020). Is Green Growth Possible? *New Political Economy*, 25(4), 469-486. <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/13563467.2019.1598964>
- Höök, M., Hirsch, R. y Aleklett, K. (2009). Giant Oil Field Decline Rates and Their Influence on World Oil Production. *Energy Policy*, 37(6), 2262-2272.
- International Energy Agency (2020). *World Energy Balances Overview 2020*. [https://iea.blob.core.windows.net/assets/23f096ab-5872-4eb0-91c4-418625c2c9d7/World\\_Energy\\_Balances\\_Overview\\_2020\\_edition.pdf](https://iea.blob.core.windows.net/assets/23f096ab-5872-4eb0-91c4-418625c2c9d7/World_Energy_Balances_Overview_2020_edition.pdf)
- International Energy Agency (2021). *Key World Energy Statistics*. <https://www.iea.org/reports/key-world-energy-statistics-2021>

- International Energy Agency (2022). *Energy Investment by Sector*. <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/energy-investment-by-sector-2018-2020-2>
- International Renewable Energy Agency (IRENA) (2022). *Renewable 2022 Global Status Report*. REN 21. <https://www.ren21.net/gsr-2022/>
- International Renewable Energy Agency (IRENA) (2023). *Renewable 2023 Global Status Report*. REN 21. [https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR2023\\_GlobalOverview\\_Full\\_Report\\_with\\_endnotes\\_web.pdf](https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR2023_GlobalOverview_Full_Report_with_endnotes_web.pdf)
- Meadows, D. H., Meadows, D. L., Randers, J. y Behrens, W. W. (1972). *Los límites del crecimiento: informe al Club de Roma sobre el predicamento de la humanidad*. Fondo de Cultura Económica.
- Misswise (2023). *Power Station*. <http://misswise.weebly.com/power-stations.html>
- Mudd, G. M. (2010). The Environmental Sustainability of Mining in Australia: Key Mega-trends and Looming Constraints. *Resources Policy*, 35(2), 98-115.
- Murphy, T. (2021). *Energy and Human Ambitions on a Finite Planet*. eScholarship. <https://escholarship.org/uc/item/9js5291m>
- Palacios, R., Valles, X., Solís, A., Becerril, A. S., Rodríguez, F., Martínez, H., Rodríguez, J. I., De La Pascua, L. E., Pleitez, R. O., Hernández, F. y Zamudio, J. P. (2022). *Estudio del balance nacional de energía 2020*. Programa Nacional Estratégico sobre Energía y Cambio Climático (Pronace ECC), Plataforma Nacional Energía Ambiente y Sociedad (Planeas). Cuaderno temático, 2. <https://conahcyt.mx/cuaderno-tematico-2/>
- Peters, E. (2022). *US Update Through December 2021*. Novilabs. <https://novilabs.com/blog/us-update-through-december-2021/>
- Rystad Energy (2021a). *Oil and Gas Discoveries Projected to Sink to Lowest Level in 75 Years*. [rystadenergy.com](http://rystadenergy.com)
- Rystad Energy (2021b). *As Falling Costs Make New Oil Cheaper to Produce, Climate Policies May Fail Unless they Target Demand*. <https://www.rogtec magazine.com/rystad-energy-as-falling-costs-make-new-oil-cheaper-to-produce-climate-policies-may-fail-unless-they-target-demand/>

- Santillán, M. y de la Vega, A. (2018). Do the Rich Pollute More? Mexican Household Consumption by Income Level and CO<sub>2</sub> Emissions. *International Journal of Energy Sector Management*, 13(3), 694 - 712. <https://doi.org/10.1108/IJESM-07-2018-0016>
- Steffen, W., Broadgate, W., Deutsch, L., Gaffney, O. y Ludwig, C. (2015). The Trajectory of the Anthropocene: The Great Acceleration. *The Anthropocene Review*, 2(1), 81-98.
- Tverberg, G. (2012). Evidence that Oil Limits are Leading to Declining Economic Growth. *Our Finite World*. <https://ourfiniteworld.com/2012/07/13/plan-for-lower-growth-in-real-gdp-going-forward/>
- Tverberg, G. (2017). World GDP in Current US Dollars Seems to Have Peaked; This is a Problem. *Our Finite World*. <https://ourfiniteworld.com/2017/08/14/world-gdp-in-current-us-dollars-seems-to-have-peaked-this-is-a-problem/#more-42124>
- United Nations Conference on Trade and Development (UNCTAD) (2021). *Technology and Innovation Report 2021*. [https://unctad.org/system/files/official-document/tir2020\\_en.pdf](https://unctad.org/system/files/official-document/tir2020_en.pdf)
- Wrigley, E. A. (2010). *Energy and the English Industrial Revolution*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511779619>





# Segunda parte

## Fuentes primarias de energía

### 5. Combustibles fósiles

#### 5.1 APRENDIZAJES ESPERADOS

A partir del contenido aquí propuesto las y los estudiantes serán capaces de conocer y comprender las distintas fuentes de energía no renovables y su ciclo de vida, lo que les permitirá argumentar de manera congruente sobre el futuro energético mundial.

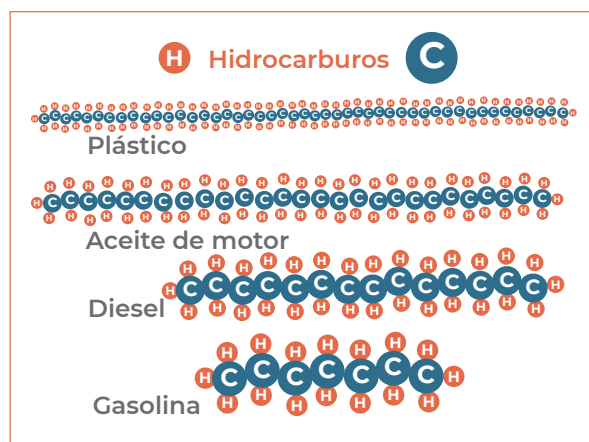
Entre los aprendizajes esperados se encuentran:

- Conocer y comprender la formación de los combustibles fósiles y las reservas remanentes, así como su transformación y uso final.
- Conocer cuáles son los países que más producen y más consumen los recursos energéticos no renovables.
- Conocer las fuentes renovables y la tecnología para su aprovechamiento.
- Propiciar la reflexión acerca de las ventajas y desventajas de cada fuente.

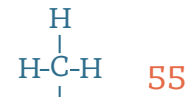
#### 5.2 PETRÓLEO Y GAS

##### Preguntas e imágenes motivadoras

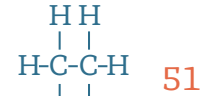
Observa las siguientes imágenes:



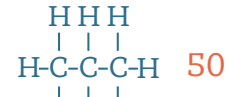
**kJ por gramo**



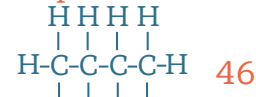
Metano



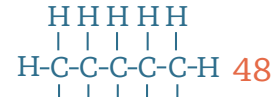
Etano



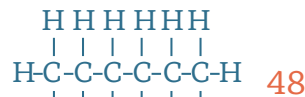
Propano



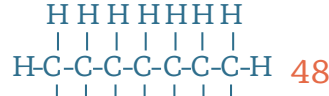
Butano



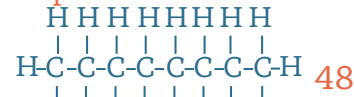
Pentano



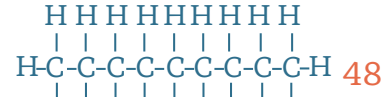
Hexano



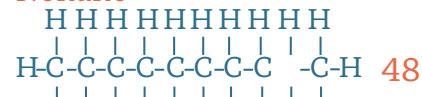
Heptano



Octano

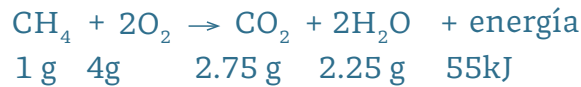


Nonano

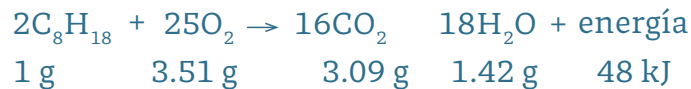


Decano

**Metano**



**Octano**



**Sugerencias:**

- El gas natural es una mezcla de los hidrocarburos más ligeros (metano a butano); la gasolina, la turbosina y el diésel son más pesados y tienen de cinco a 20 átomos de carbono. A cantidades mayores de átomos de carbono se encuentran los lubricantes y luego el asfalto. Las cadenas más largas de estos átomos se encuentran en los materiales plásticos de síntesis.

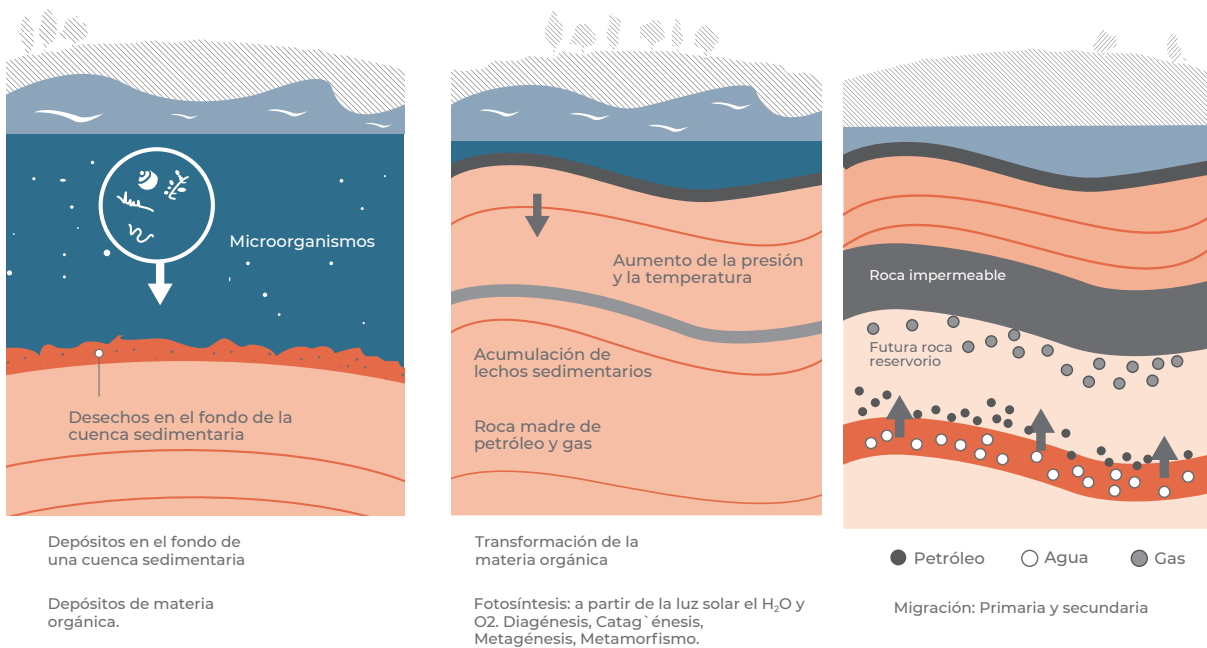
Preguntas sugeridas:

- ¿Qué son los hidrocarburos (HC)?
- ¿A qué variable nos referimos cuando hablamos de kJ/g de combustible?
- Explica las reacciones de combustión del metano y del octano propuestas en la imagen anterior.
- Busca otras reacciones de combustión. ¿Qué se observa?

### Formación de petróleo y gas convencionales

Los combustibles fósiles son energía solar del pasado geológico que ha sido fijada por plantas y microorganismos planctónicos de origen vegetal. Este material se va acumulando en cuencas marinas someras junto con los sedimentos producto de la erosión de las rocas. A medida que este material va quedando enterrado a mayor profundidad por la acumulación de nuevas capas sedimentarias se incrementa también la presión sobre él y aumenta su temperatura (figura 1).

**FIGURA 1. FASES DEL PROCESO DE FORMACIÓN DE LOS HIDROCARBUROS**

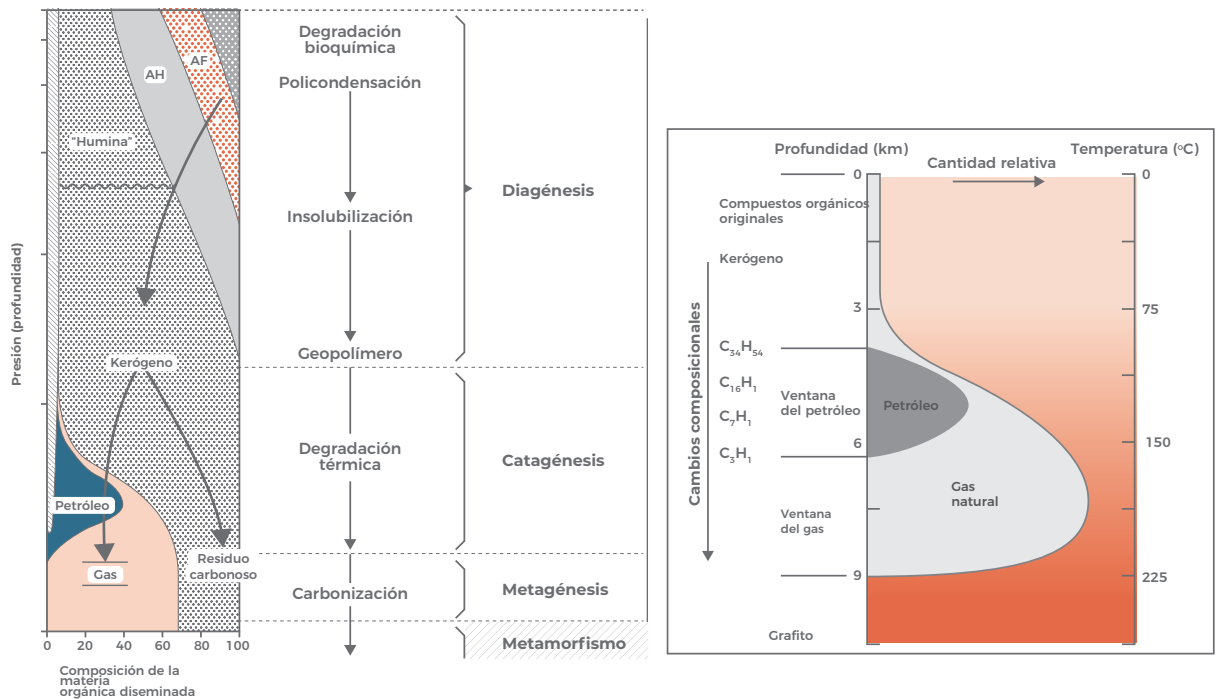


**Fuente:** elaboración propia a partir de López et al. (2015).

Con el tiempo dicho material va pasando por diversas fases entre las que se encuentran la diagénesis, la catagénesis, la metagénesis y el metamorfismo, procesos que implican su transformación química y mineralógica. El material orgánico se transforma primero en una sustancia conocida como querógeno y, posteriormente, en petróleo o gas.

A continuación, se muestran de manera esquemática las distintas fases por las que pasa el material orgánico en estos procesos de transformación (figura 2).

**FIGURA 2. A) TRANSFORMACIÓN DE LA MATERIA ORGÁNICA EN PETRÓLEO Y GAS EN FUNCIÓN DE LA PROFUNDIDAD; B) AMPLIACIÓN MOSTRANDO LAS VENTANAS DE PRESIÓN Y TEMPERATURA DE FORMACIÓN Y ESTABILIDAD DE PETRÓLEO Y GAS**



Fuente: elaboración propia.

**Fase I: Diagenesis (procesos biológicos)**

- A poca profundidad.
  - Presión litostática entre 0 y 300 bares.
  - Temperatura de 0 a 50 °C.
- › La compactación de la materia orgánica dentro de las arcillas genera biopolímeros, compuestos orgánicos como glucosa y proteínas que son sometidos a un ataque microbiano hasta convertirse en geopolímeros –ácido húmico (AH), ácido fúlvico (AF), humina, entre otros–, precursores del querógeno.
  - › El O<sub>2</sub> se pierde rápidamente durante la diagenesis, en forma de CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O.

- › Gran parte de la materia orgánica que se conserva se transforma en querógeno, que es la fracción insoluble.
- › Una proporción menor se convierte en betumen que corresponde a la parte soluble.
- › El hidrocarburo más importante que se forma en esta fase, es el metano.

### **Fase II: Catagénesis (procesos térmicos)**

Inicia la ventana de generación.

Etapas de transformación del querógeno donde se genera petróleo y gas húmedo.

- Presión litostática entre 300 y 1 500 bares.
- Temperatura de 50 a 150 °C.
- › Inicia cuando la roca generadora alcanza profundidades mayores a 1 km. A los 2.6 km se alcanza el máximo pico de generación de hidrocarburos líquidos.
- › En el proceso de catagénesis la T juega un papel muy importante:
- › T = 60 °C: empieza la generación principal de hidrocarburos líquidos, los cuales son pesados y ricos en N<sub>2</sub>, S y O<sub>2</sub>.
- › T = 100 °C: se produce la máxima generación (al aumentar la T los aceites se van haciendo más ligeros).
- › T > 100 °C: la generación de hidrocarburos disminuye y se forman hidrocarburos condensados y gases.

La catagénesis tardía se da entre los 3.0 y 3.5 km:

- Con la pérdida de H<sub>2</sub> la capacidad de generación de hidrocarburos disminuye hasta agotar su potencial petrolífero.
- Se genera más gas; por lo tanto, es la principal zona de formación de gas (seco y húmedo), originándose pequeñas fracciones de hidrocarburos condensados.

- › El color del querógeno va cambiando con el incremento de su madurez: amarillo-dorado-naranja-café claro-café oscuro-negro.

La ventana de generación se cierra a  $T = 175^{\circ}\text{C}$ . La generación directa desde el querógeno termina a  $T = 225^{\circ}\text{C}$ .

### **Fase III: Metagénesis (procesos térmicos)**

- › A grandes profundidades y altas  $T$ .
- › En esta etapa lo que más predomina es la generación de gas.
- › El querógeno residual se transforma en metano y el carbón en antracita.
- › La generación de metano acaba a  $T = 225^{\circ}\text{C}$  con profundidades cercanas a los 8 km y presión litostática  $> 1500$  bares.

### **Fase IV: Metamorfismo (procesos térmicos)**

- › Inicia cuando el sepultamiento es  $> 10$  km.
- › Tiene lugar la transformación del querógeno residual en grafito y del carbón en meta-antracita.
- › Bajo estas condiciones, ya no hay producción de hidrocarburos gaseosos.

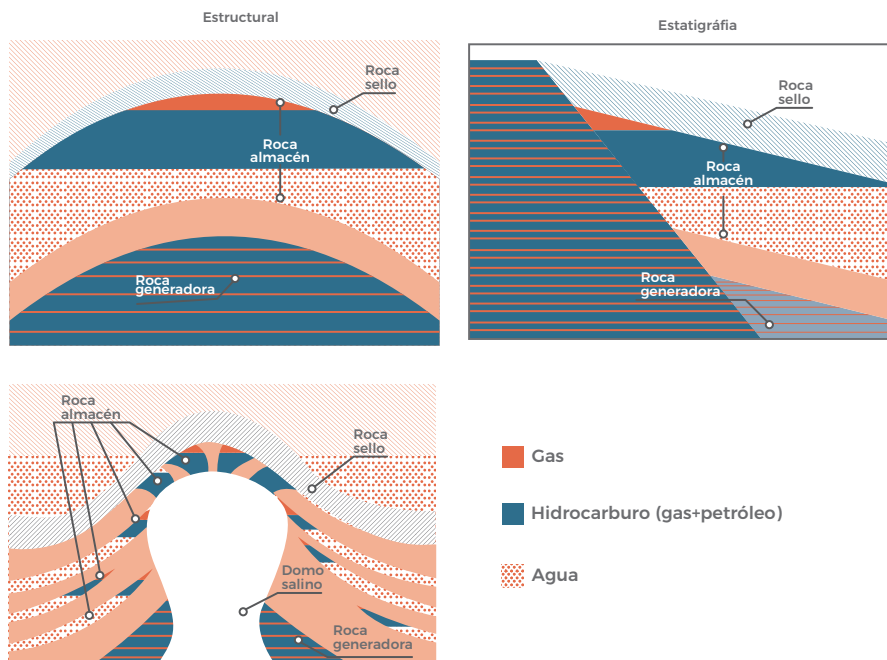
Como conclusión podemos decir que para que se forme petróleo y gas se necesitan las condiciones que se presentan a continuación, que limitan la ocurrencia de yacimientos de hidrocarburos en el planeta:

- *Ambiente marino somero.*
- *Materia orgánica:* acumulación de fito y zooplancton.
- *Roca madre o generadora:* debe estar enterrada a una profundidad suficiente ( $> 1$  km) para que la materia orgánica contenida pueda empezar a madurar hasta convertirse en aceite o gas. Deben ser rocas porosas o fracturadas con permeabilidad primaria o secundaria.
- *Cuenca sedimentaria:* en la que se den procesos de subsidencia (hundimiento por su propio peso) y enterramiento, con un aporte suficiente de sedimentos. Se trata de márgenes de placas pasivos donde no se ha dado vulcanismo.

- *Procesos geológicos y bioquímicos*: diagénesis, catagénesis, metagénesis.
- *Presión y temperatura*: las adecuadas para que se den ventanas apropiadas de formación como consecuencia de la subsidencia de las capas que se van acumulando por el exceso de masa.
- *Tiempo geológico* (millones de años).

Pero éstas no son las únicas condiciones. A medida que se forman, inicia un proceso de migración en el que una parte del petróleo y del gas natural dejan la roca madre y fluyen hacia la superficie, debido a su menor densidad. Para que los hidrocarburos puedan formar yacimientos es necesario que en este trayecto encuentren las llamadas “trampas geológicas”, que son formaciones porosas y permeables cubiertas por una roca impermeable que sella el reservorio y les impide el camino hacia la superficie (figura 3). Los reservorios donde se aloja el petróleo consisten en rocas porosas o fracturadas que pueden llegar a presentar permeabilidad primaria o secundaria, siendo los más importantes los depósitos siliciclásticos y los carbonatos.

**FIGURA 3. TIPOS DE TRAMPAS GEOLÓGICAS EN LAS QUE SE PUEDEN ACUMULAR LOS HIDROCARBUROS**



**Fuente:** elaboración propia a partir de la página Facebook de la Comisión Nacional de Hidrocarburos.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Comisión Nacional de Hidrocarburos (Facebook). <https://www.facebook.com/cnhmx/photos/las-trampas-geol%C3%B3gicas-son-estructuras-que-hacen-possible-la-acumulaci%C3%B3n-de-los-h/890373514743271/>

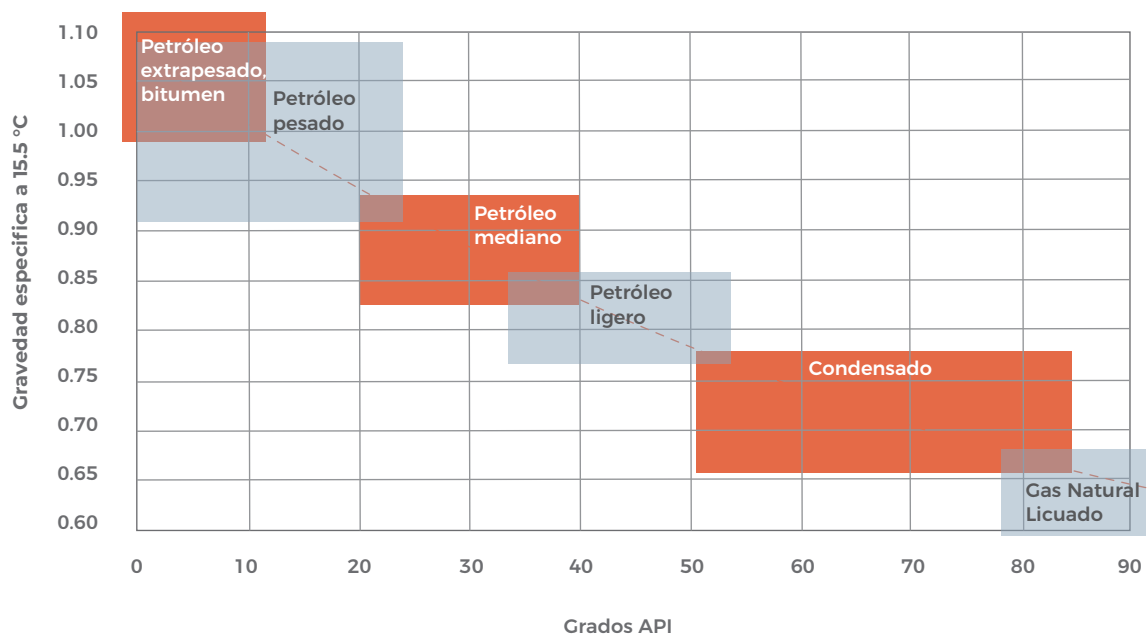
Cabe mencionar que en estos reservorios el petróleo no es el único fluido que rellena los intersticios, sino que, casi siempre, hay aguas congénitas, también llamadas salmueras o aguas de producción, que deben ser separadas del crudo para su tratamiento.

### Clasificación del petróleo y de las reservas

Como se mencionó en la introducción del presente capítulo, el petróleo no tiene una composición fija, sino que es una mezcla de diferentes moléculas de hidrocarburos. Dependiendo de la cantidad relativa de estas cadenas de hidrocarburos, el petróleo se vuelve más o menos pesado. Para enunciar esta característica se utiliza un primer parámetro conocido como gravedad específica, que se expresa en grados api (American Petroleum Institute) y donde el valor 10 corresponde a la densidad del agua (figura 4). Cuantos más grados API posea, más ligero será el crudo y, por ende, menos viscoso, esto es, fluirá con mayor facilidad.

Otro parámetro importante es el contenido en sulfuros: cuanto mayor contenido de sulfuro el petróleo se define como más amargo.

**FIGURA 4. CLASIFICACIÓN DEL PETRÓLEO EN GRADOS API**

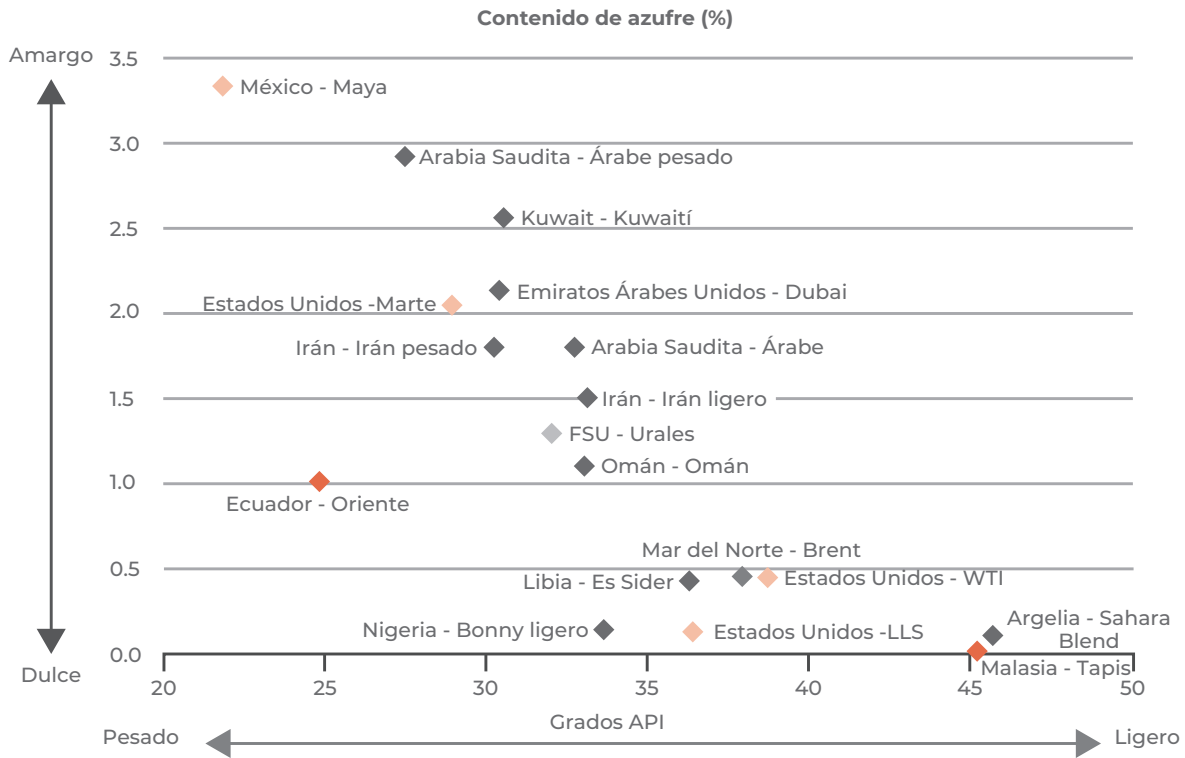


**Fuente:** Engineering ToolBox (2007).

Si se comparan ambas variables para distintos tipos de petróleo comercializados a nivel mundial (figura 5), observamos que el crudo maya, que representa la principal producción de México, es un crudo pesado con baja graduación API y una elevada

concentración de azufre. Por esta razón se vende a un precio inferior que otros crudos más ligeros y dulces, ya que los procesos de refinación para su uso final son más caros.

**FIGURA 5. CLASIFICACIÓN DE LOS DIFERENTES PETRÓLEOS A NIVEL MUNDIAL DEPENDIENDO DEL CONTENIDO EN SULFUROS Y DE LOS GRADOS API**



Fuente: EIA (2014).

Por ende, lo que marcará el precio del petróleo a nivel mundial, además del costo del transporte desde el lugar de extracción, será la mejor combinación de ambas variables. De ahí que el petróleo West Texas Intermediate (WTI), así como el Brent del mar del Norte sean los crudos de referencia más usados a nivel mundial. Los crudos pesados tienden a venderse a un precio inferior porque requieren procesos de refinación costosos. Sin embargo, también los crudos demasiado ligeros, como el petróleo no convencional de los Estados Unidos, se venden a un precio inferior porque necesitan ser mezclados con un crudo más pesado para poder procesarse en las refinerías.

Además de la clasificación del petróleo, es importante conocer la clasificación de las reservas, ya que, a veces, estos conceptos se manejan con poco rigor en las notas periodísticas. De hecho, pueden existir grandes volúmenes de hidrocarburos en el subsuelo, pero la probabilidad de que se puedan recuperar depende de la

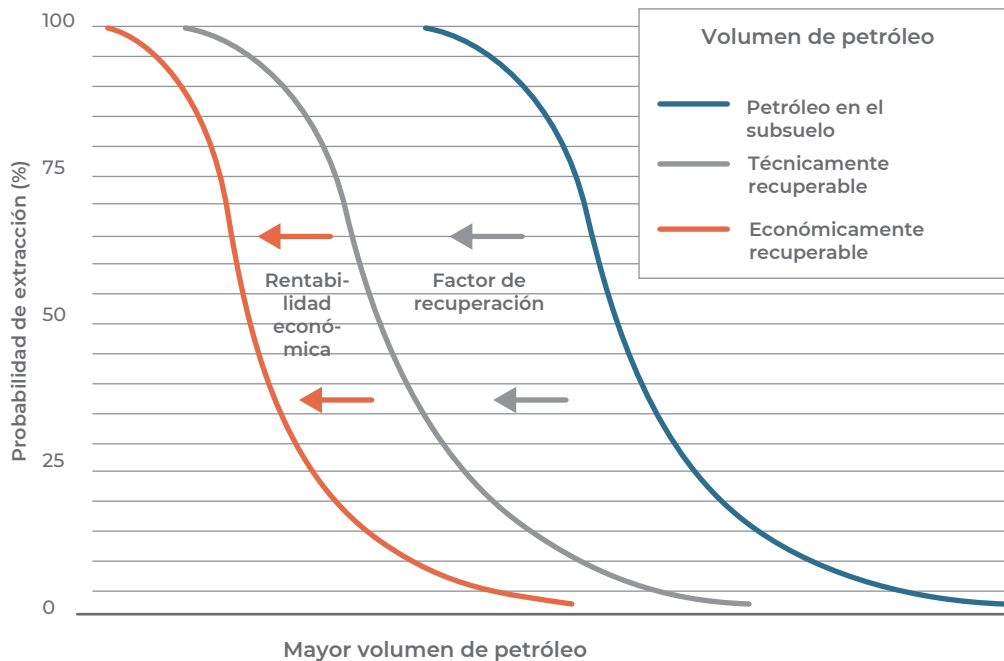
tecnología y del costo de extracción. Por lo tanto, a nivel internacional existe una definición y una metodología establecida por la Securities and Exchange Commission de los Estados Unidos para clasificar las reservas de hidrocarburos de acuerdo con la probabilidad de recuperación tomando en cuenta los límites tecnológicos y el coste económico.

- *Reservas probadas*: son aquellas que tienen una probabilidad del 9% de ser extraídas bajo condiciones económicas y de operación existentes en una fecha específica. Pueden estar en producción o no, dependiendo de si se ha construido o no la infraestructura necesaria para ello.
- *Reservas no probadas*: se dividen en *probables* (50% de probabilidad de ser extraídas) y en *posibles* (10% de probabilidad de ser extraídas).

A su vez se habla de reservas: *reservas 1P* para las reservas probadas, *reservas 2P*, que son la suma de las probadas más las probables, y *reservas 3P*, que son la suma de las probadas más las probables más las posibles.

En la figura 6 se muestran los volúmenes de extracción de petróleo versus la probabilidad de ser extraído por medio de curvas que implican tres categorías distintas: 1) el petróleo que existe en el subsuelo; 2) el petróleo técnicamente recuperable (límite técnico), 3) el petróleo económicamente recuperable (límite económico). Lo que se observa es que, teniendo en cuenta los dos límites, el técnico y el económico, los volúmenes recuperables son sólo una fracción del recurso existente en el subsuelo y que el volumen extraíble disminuye con el incremento de la probabilidad de extracción.

**FIGURA 6. VOLÚMENES VERSUS PROBABILIDAD DE EXTRACCIÓN DE PETRÓLEO**



**Fuente:** elaboración propia a partir de imagen de dominio público hospedada en Wikipedia.

Como se puede apreciar, sólo podemos extraer una parte del petróleo existente en el subsuelo. El factor de recuperación a nivel mundial (crudo producido/crudo total existente en el reservorio) puede variar entre 10% y 80%, si bien la mediana es del 35%. En el 90% de los casos, esta media se encuentra entre el 20% y el 50%, es decir, sólo en casos excepcionales se extrae algo más de la mitad del recurso existente.

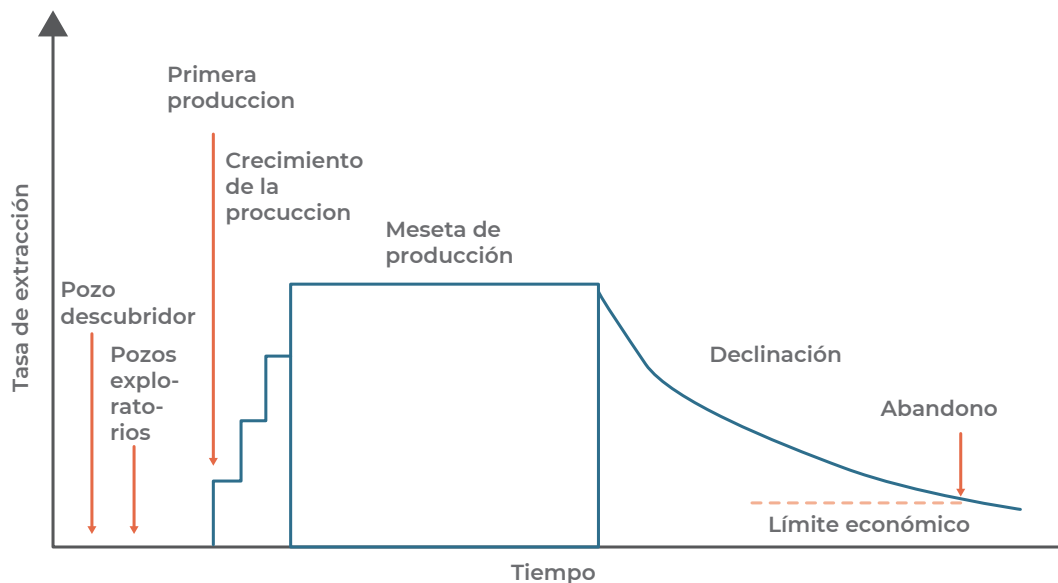
### Exploración, producción y recuperación mejorada de petróleo y gas

El proceso de búsqueda de nuevos yacimientos comienza con una exploración geofísica en las regiones que presentan las características geológicas necesarias, como las descritas en la sección 1.2. Esto se lleva a cabo, principalmente, mediante técnicas de sísmicas de reflexión, con el propósito de encontrar las “trampas geológicas”, donde, generalmente, el gas está encima del petróleo por su densidad (figura 3). Una vez identificadas estructuras potenciales, se perfora un pozo para comprobar si existe petróleo y analizar sus características.

El siguiente paso es delimitar el volumen del yacimiento con la perforación de otros pozos, para estimar las reservas y decidir si es conveniente o no su extracción.

desde el punto de vista económico. Finalmente, se inicia la explotación del recurso y se va produciendo hasta llegar a un máximo en el que la producción de petróleo tiene forma de meseta (*plateau*) a partir del cual se inicia el declive natural del recurso en el que el límite de extracción lo marca la parte económica, es decir hasta que la ganancia que se obtiene de él deje de ser mayor a la que se invierte en su explotación (figura 7).

**FIGURA 7. PROCESO DE EXPLORACIÓN Y EXPLOTACIÓN DEL PETRÓLEO**



**Fuente:** elaboración propia basado en Höök et al. (2014).

Durante la primera parte del proceso, el petróleo fluye de manera natural como consecuencia del gradiente de presión que se genera al perforar los pozos. A esta fase se la conoce como *recuperación primaria*. Con el tiempo, la presión del propio yacimiento disminuye y para poder seguir extrayendo el petróleo es necesario recurrir a técnicas de recuperación mejorada, que pueden ser secundarias y terciarias.

Las técnicas de *recuperación secundaria* para incrementar la producción consisten en:

1. La inyección de agua, que en ocasiones suele ser marina.
2. La inyección de gas seco del propio yacimiento ( $\text{CH}_4$ ).

La inyección de agua aprovecha la inmiscibilidad de ambas fases. La efectividad depende del tipo de petróleo: si tiene API  $> 10^\circ$  es más ligero que el agua y flota, pero uno con API  $< 10^\circ$  es más denso. En la práctica la inyección de agua es efectiva cuando el petróleo tiene API  $> 25^\circ$ . También es importante que la presión de inyección sea la adecuada para conseguir que el petróleo que se está recuperando tenga la menor cantidad de agua posible.

Para conocer de qué manera impactan estas técnicas de recuperación secundaria en la producción de petróleo, se muestra en la figura 8 la producción de petróleo y de agua, así como el “corte de agua”, es decir, la relación entre el petróleo y el agua producida expresada como el porcentaje de agua sobre el total de los líquidos extraídos. Lo que se observa es que mediante esta técnica la cola de la producción se mantiene en el tiempo, pero con una producción de petróleo cada vez menor, hasta dejar de ser rentable.

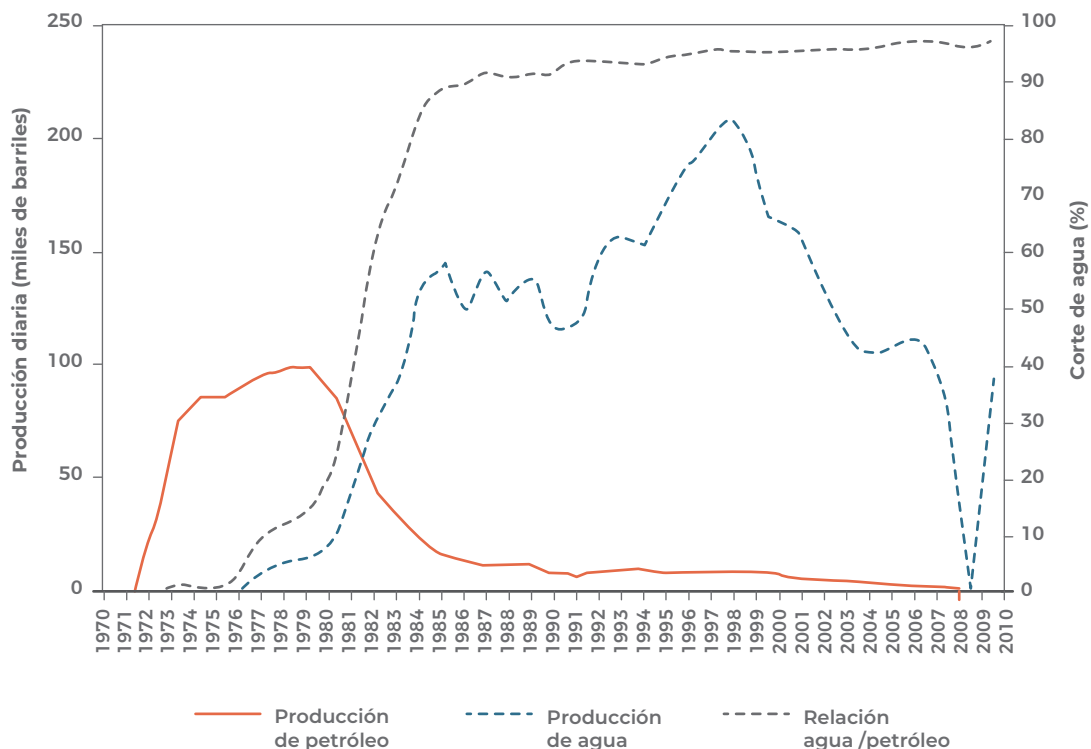
Finalmente, se puede emplear la *recuperación terciaria* o *Enhanced Oil Recovery* (EOR) en inglés, la cual consiste en la aplicación de técnicas más avanzadas que promueven la disminución de la viscosidad del crudo de tal manera que éste fluye más fácilmente.

Entre las terciarias se encuentran:

1. El calentamiento del petróleo que hay en el interior del yacimiento con vapor de agua a elevada temperatura.
2. La inyección de gases ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$  o gas seco) u otras sustancias químicas tales como polímeros e incluso bacterias anaeróbicas que cambian las propiedades del crudo.

Los altos costos hacen que sólo en un porcentaje menor de todos los campos se apliquen la recuperación secundaria y terciaria, y sólo cuando el precio de venta del petróleo es suficientemente alto. De hecho, desde 1959 a 2010, sólo 652 proyectos a nivel mundial han aplicado estas técnicas, que han permitido recuperar aproximadamente 1.8 Mb diarios en 2010, lo que significa aproximadamente el 1.5% de la producción global de petróleo (Aleklett et al., 2010).

**FIGURA 8. PERFIL DE PRODUCCIÓN DE PETRÓLEO Y AGUA CON RECUPERACIÓN SECUNDARIA EN EL CAMPO GIGANTE DE JAY, EN FLORIDA, EE. UU.**

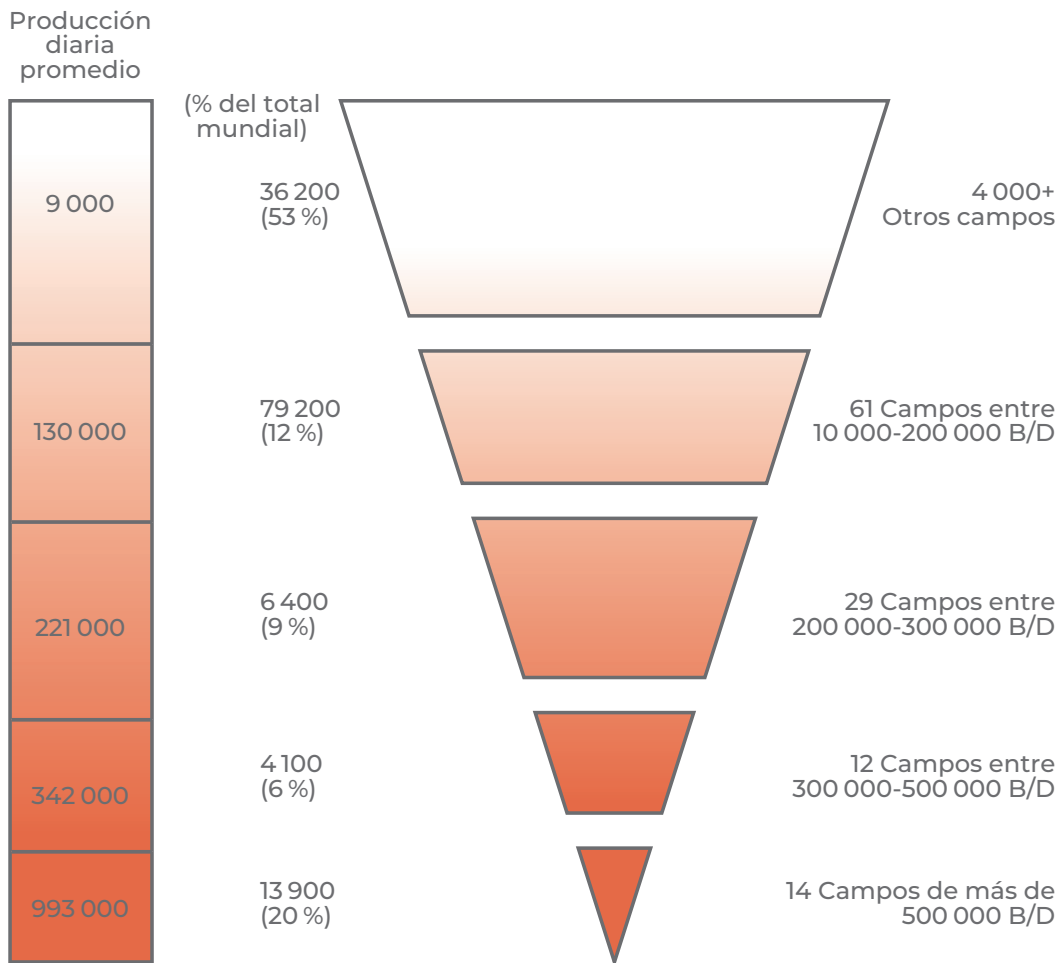


Fuente: Höök et al. (2014).

Otra variable importante en la producción es la tasa de extracción de petróleo, esto es, la cantidad de petróleo máxima que se puede extraer diariamente. A nivel mundial existe una correlación directa entre los recursos totales que se pueden extraer (reservas) y la máxima producción diaria (Höök et al., 2014). Asimismo, existe una tendencia a la disminución de la tasa de declive conforme los campos tienen mayor tamaño, es decir, yacimientos más grandes implican un flujo mayor de extracción y una declinación más lenta.

Esto se puede observar también en la figura 9, en la que se muestra cómo de tan sólo 116 yacimientos, gigantes y supergigantes, se extrae casi la misma cantidad de petróleo (47%) que de los más de 4000 campos restantes. Para 2005, aproximadamente 500 campos gigantes (alrededor del 1% del número total de campos petroleros mundiales) aportaron el 60% de la producción mundial de petróleo, y los 20 yacimientos más grandes fueron responsables por sí solos de casi el 25% (Höök et al., 2009).

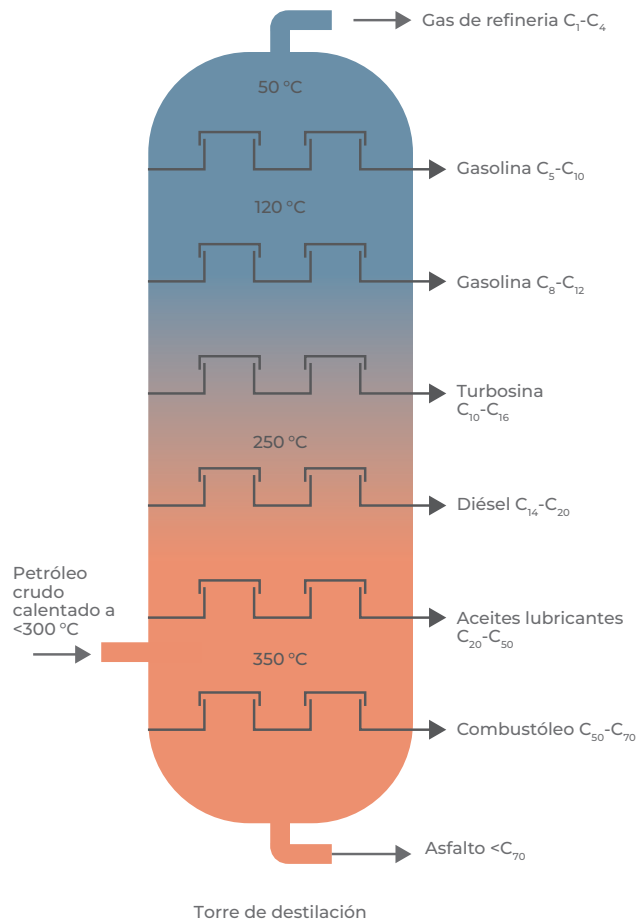
**FIGURA 9. PRODUCCIÓN DIARIA DE PETRÓLEO POR CLASE DE YACIMIENTOS (EN MILES DE BARRILES DIARIOS - B/D) Y PORCENTAJE RELATIVO**



**Fuente:** elaboración propia a partir de Simmons (2002).

### Refinación de petróleo y gas

Una vez que el petróleo ha sido extraído, se procede a su refinación. Este proceso consiste en calentar el crudo para separar las diferentes cadenas que lo conforman con base en su punto de ebullición. Dentro de una torre los diferentes productos se fraccionan; quedan abajo los más pesados y arriba los más ligeros (figura 10).

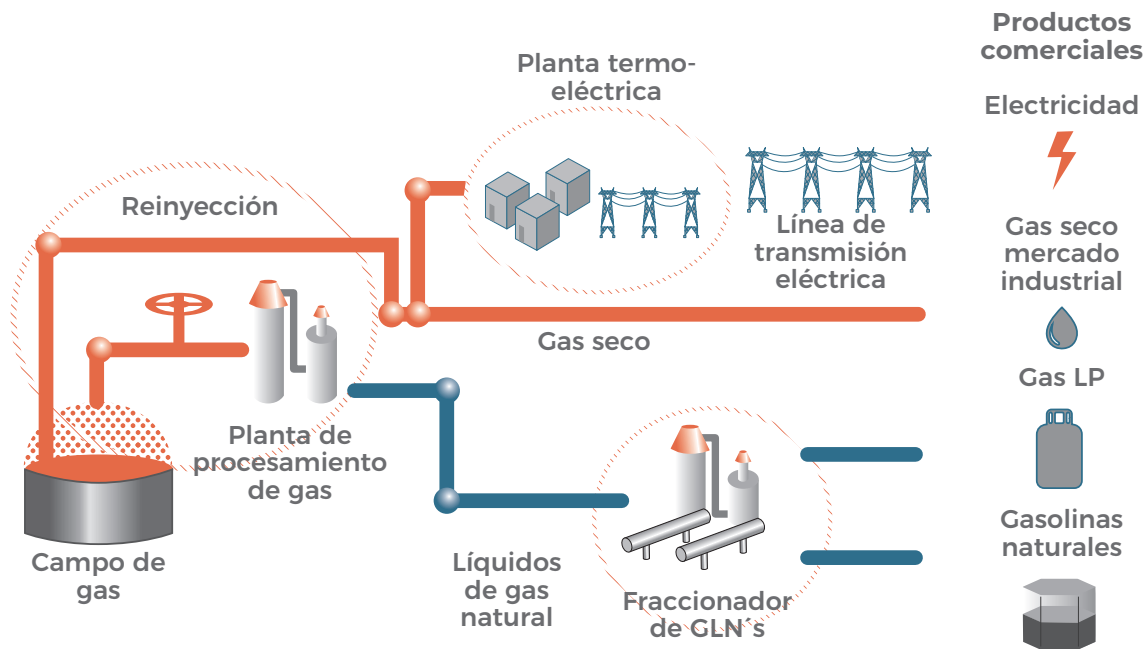
**FIGURA 10. ESQUEMA DE LA DESTILACIÓN FRACCIONADA (REFINACIÓN) DEL PETRÓLEO**

**Fuente:** elaboración propia.

De arriba hacia abajo de la torre se extraen el gas, las gasolinas, el queroseno (turbosina), el diésel, los aceites ligeros y los pesados –hasta las parafinas– y finalmente, en el fondo, el asfalto y el bitumen.

El gas natural también tiene un proceso de separación, aunque más sencillo. El gas puede encontrarse asociado al petróleo crudo en el yacimiento (gas húmedo) o encontrarse como gas no asociado (gas seco). Por ende, cuando se encuentran juntos, es necesario separar el gas antes de enviar el petróleo a una planta de separación (figura 11).

FIGURA 11. PROCESAMIENTO DEL GAS Y SUS PRODUCTOS



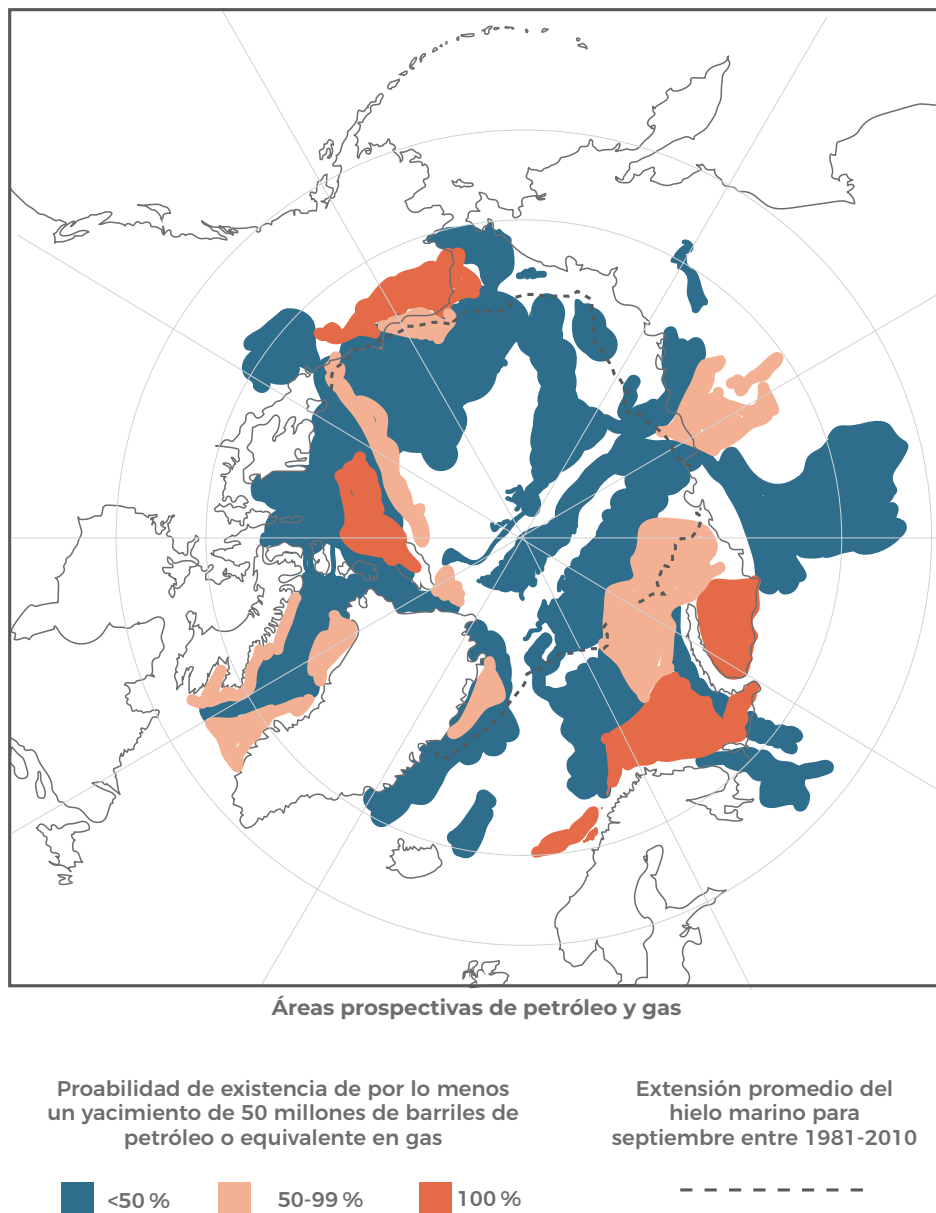
Fuente: elaboración propia.

De la planta de separación del gas salen los siguientes productos

1. *Gas Seco (metano)*: se utiliza como combustible tanto en las plantas termoeléctricas de ciclo combinado como en la industria.
2. *Líquidos de planta del gas*: etano, propano, butano y pentano. A su vez, éstos se separan en:
  - *GLP (gas licuado de petróleo)*: propano y butano. Su uso final es en el sector del transporte y residencial (cocción y calefacción de agua).
  - *Gasolina natural*: que es una mezcla de bajo octanaje y se usa principalmente como solvente.

La producción de los líquidos de planta del gas ha crecido significativamente en los últimos años por la explotación de campos no convencionales o muy profundos en los que abundan los condensados.



**FIGURA 13. ÁREAS PROSPECTIVAS DE PETRÓLEO Y GAS EN EL ÁRTICO**

**Fuente:** elaboración propia con datos de Nordregio (2019).

Aunque las estimaciones son muy variables, es posible que el Ártico tenga entre 50 y 90 000 millones de barriles de petróleo, lo que podría significar un 13% del petróleo todavía por descubrir en el mundo. Paradójicamente, la reducción del hielo del Ártico (figura 13), como consecuencia del cambio climático producto de la quema de combustibles fósiles, está volviendo más accesible la explotación de esta región para la extracción de hidrocarburos.

## Flujos de petróleo y gas a nivel global

Una vez que el petróleo ha sido extraído, se procede a su refinación.

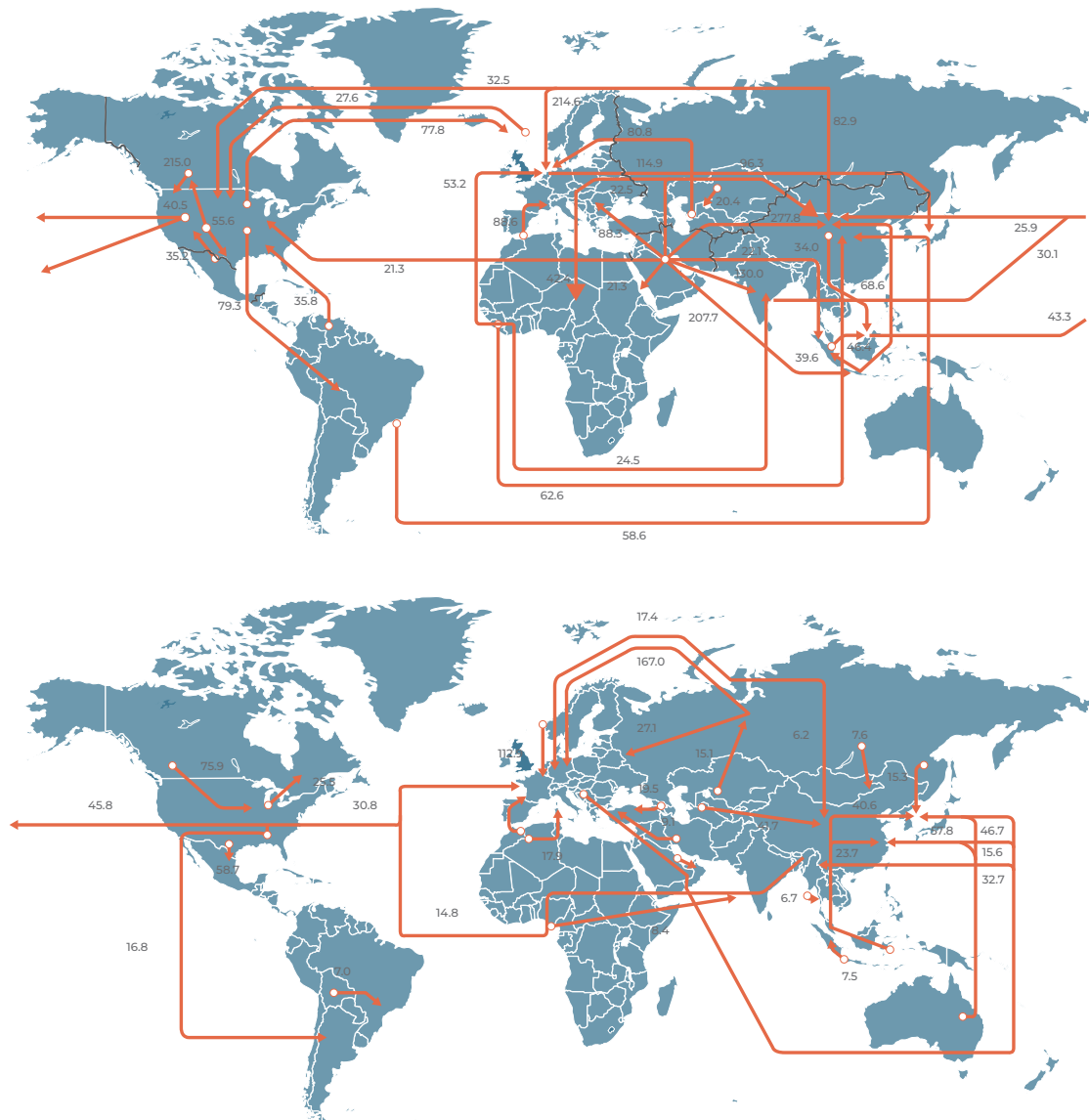
Un factor importante que puede encarecer el costo del petróleo y del gas es el transporte. Este se lleva a cabo por dos medios:

1. *Ductos* (por tierra).
2. *Barco* (por mar).

El petróleo puede transportarse en barco sin necesidad de ser transformado, mientras que el gas debe comprimirse y enfriarse a  $-161.5\text{ }^{\circ}\text{C}$  para ser trasladado como gas natural licuado (GNL). Posteriormente, vuelve a gasificarse para su transporte en ductos. Esto implica la construcción de terminales de licuefacción y regasificación, así como un gasto energético que se suma al costo del transporte vía marítima. Estos costos adicionales explican el mayor costo del GNL para países de la Unión Europea, o Japón y Corea del Sur en Asia, los cuales hacen un uso importante de este insumo.

Al revisar la figura 14, en la que se representa el flujo tanto de petróleo como de gas para el año 2021, se observa que la gran parte del petróleo que se exporta sale de Medio Oriente y de Rusia, y converge hacia China, Europa y los Estados Unidos. Algo similar sucede con el gas, pero la aportación de Rusia es la más marcada, tanto por ductos como en forma de GNL. Existen también flujos que proceden de los Estados Unidos y de África y que concurren, principalmente, en Europa.

**FIGURA 14. PRINCIPALES FLUJOS DE PETRÓLEO (A) EN MILLONES DE TONELADAS, Y DE GAS NATURAL (B) EN MILES DE MILLONES DE PIES CÚBICOS, PARA 2021**



Fuente: British Petroleum (2022).

En la última década, debido a la demanda creciente de gas natural para la generación eléctrica y diferentes usos industriales, se han construido varios nuevos gasoductos en Eurasia. Algunos de los principales son:

- *Gasoductos North-Stream 1 y 2* entre Rusia a Alemania. El Nord Stream 1 entró en función en el 2012, mientras que el Nord Stream 2 se com-

pletó a mediados del 2022. Sin embargo, en septiembre de ese mismo año estos gasoductos vitales para Europa central, y particularmente para la industria alemana, quedaron fuera de servicio por el sabotaje que se sospecha fue propiciado por los Estados Unidos, como se explica en la parte III del libro.

- *Gasoducto de Trans-Anatolio*, que sale de Azerbaiyán y de Rusia, pasa por Turquía, hasta llegar al sur de Italia para alimentar a Europa. Entró en funcionamiento en 2020.
- *Gasoducto Power of Siberia*, que surge de la región de Siberia Oriental en Rusia para transportar el gas a China. El primer gasoducto empezó a funcionar en el 2019. Se está construyendo un segundo.

En Norteamérica, como consecuencia de la sobreproducción de gas no convencional (*gas shale*) de los Estados Unidos, se han construido diferentes gasoductos que alimentan a México, e incluso desde allí se planea exportar gas licuado a otros países. En total, en 2022 México contaba con 18000 km de gasoductos y 24 puntos de internación. Algunos gasoductos están todavía en construcción. También cuenta con tres terminales de regasificación en Ensenada, Manzanillo y Altamira, y se prevé construir otros en Sonora y el Istmo de Tehuantepec. Un mapa interactivo de la infraestructura gasífera del país puede consultarse en el sitio del proyecto Planeas de Conahcyt en la sección “Flujo y uso del gas”.<sup>2</sup>

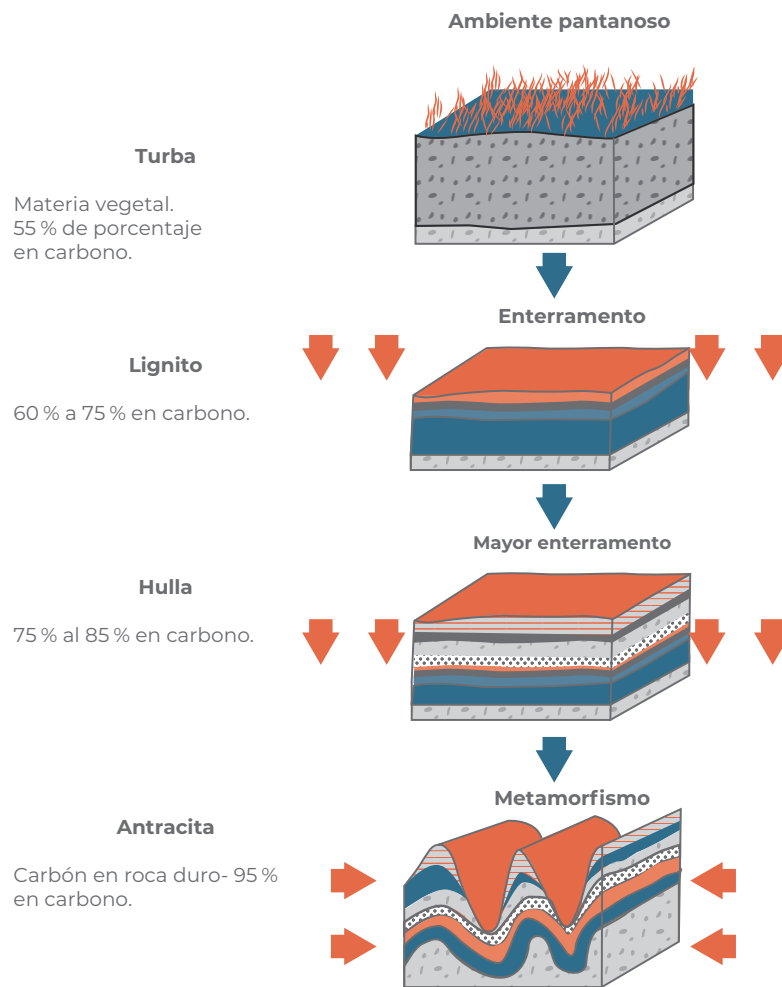
## 5.3 CARBÓN

### Preguntas e imágenes motivadoras

#### Imágenes motivadoras

Observando la siguiente imagen (figura 15) responde a las preguntas que se sugieren más abajo.

<sup>2</sup> Flujos y uso de gas. <https://energia.conahcyt.mx/planeas/hidrocarburos/flujo-gas>

**FIGURA 15. CLASIFICACIÓN DEL CARBÓN**

**Fuente:** Área ciencias (2023).

- ¿Cuántos tipos de carbón existen?
- ¿Cuáles son sus propiedades? ¿Cuál es el de menor calidad?
- ¿Cuáles son sus aplicaciones?
- Compara sus entalpías con las del metano y la de la gasolina.
- Compara los niveles de  $\text{CO}_2$  que emite con los de los hidrocarburos.

### Generación del carbón

La formación del carbón es similar a la de los hidrocarburos descrita en el capítulo anterior, pero la materia inicial es de tipo exclusivamente vegetal. La mayor parte del carbón (se estima un 90 %) se formó en cuencas continentales someras (lagunas y

humedales) en el periodo Carbonífero y, en menor medida, en el Pérmico, ambos de la era Paleozoica. En este periodo se dieron condiciones climáticas de calentamiento que favorecieron el crecimiento de gran cantidad de biomasa vegetal.

Sucesivamente, un enfriamiento global provocó el descenso del nivel del mar. Esto dio origen a la formación de amplios deltas fluviales producidos por una mayor erosión debido a la caída del nivel base. Los restos del material vegetal sepultado, con el transcurso del tiempo geológico, se convirtieron en grandes depósitos de carbón.

### Clasificación del carbón y sus usos

Dependiendo de la presión y temperatura a la que fue expuesta la materia vegetal durante el enterramiento se pueden tener cuatro tipos de carbón con calidades distintas en función de su contenido de C y porcentaje de humedad (figura 15). Ordenadas de menor a mayor calidad tendremos:

1. *Turba*. Con menor poder calorífico debido a que contiene un menor porcentaje de C (55%).
2. *Lignito*. Con mayor poder calorífico, con un porcentaje de C de entre el 60% y el 75%.
3. *Hulla*. Con alto poder calorífico y un porcentaje de C de entre el 75% y el 85%.
4. *Antracita*. Con el mayor poder calorífico debido a que contiene hasta un 95% de C.

Estos tipos de carbón tienen usos distintos:

1. *Turba*. No tiene uso como combustible, sino sólo como sustrato, tanto en jardinería como en agricultura.
2. *Lignito*. Se usa como combustible para la generación de electricidad. A medida que aumenta su poder calorífico se utiliza también como combustible para industria, particularmente en la cementeras.
3. *Hulla y antracita*. Se utilizan principalmente en la manufactura del acero.

### Explotación de carbón

El recurso se explota mediante excavaciones:

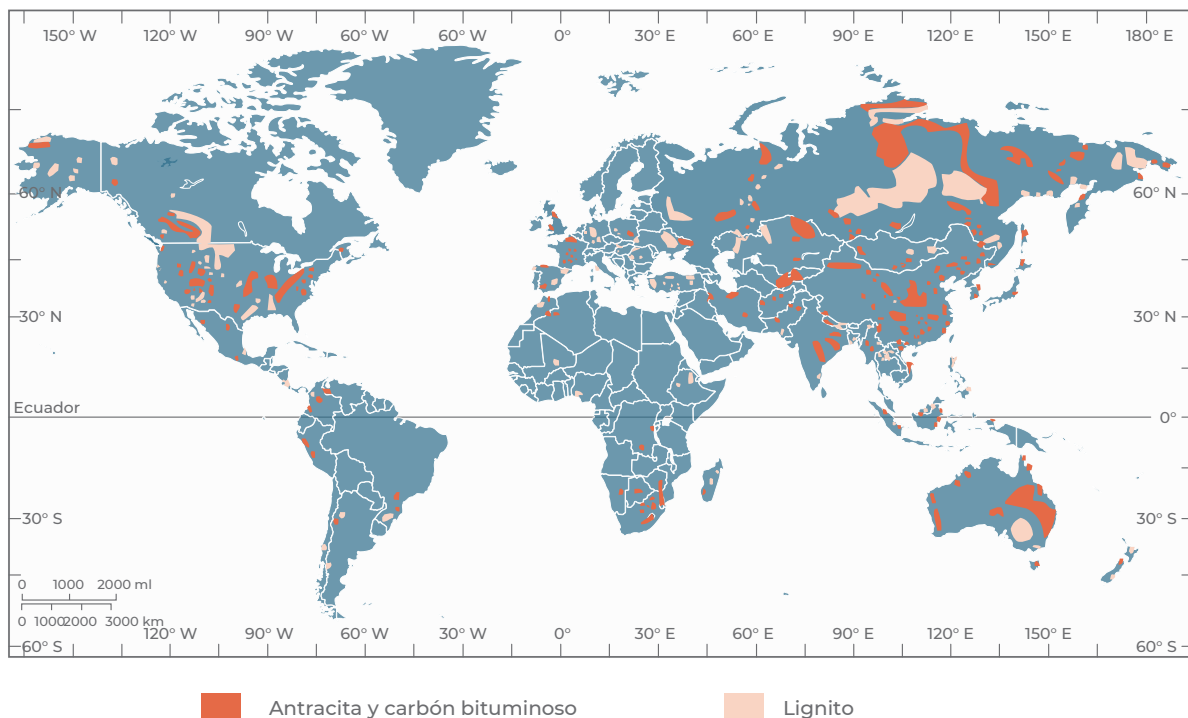
1. *A cielo abierto*. Supone el 60% de la producción del carbón en la actualidad; de este tipo de minas se puede recuperar hasta el 90% del recurso.

2. *Subterráneas.* Supone el 40% de la producción restante ya que, además de que se recupera mucho menos recurso, su costo de extracción es más alto. Asimismo, existe un riesgo mayor de accidentes por la posibilidad de que haya gases atrapados que pueden explotar ( $\text{CH}_4$ ) o ser tóxicos para los trabajadores ( $\text{SO}_2$ ).

### Reservas y flujos de carbón a nivel mundial

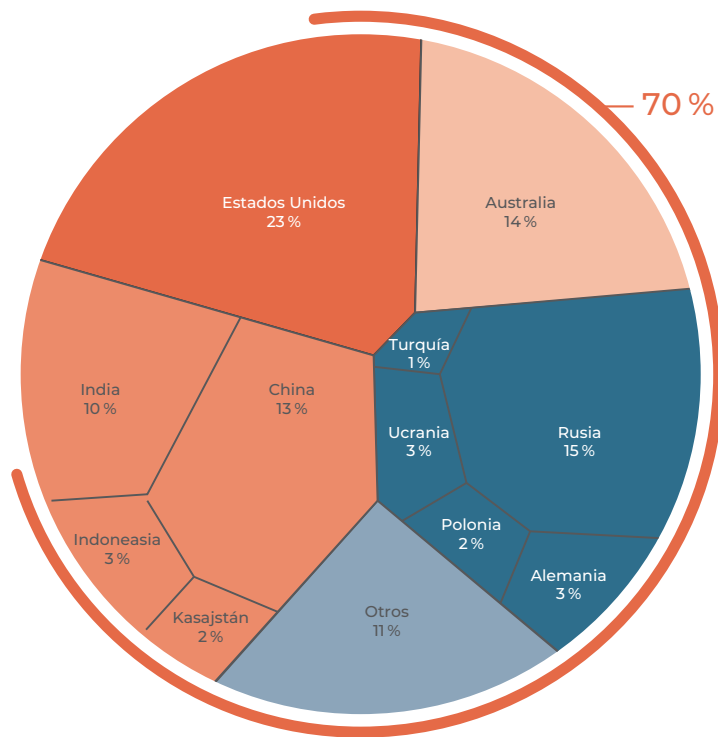
Los depósitos de carbón sólo se encuentran en unas cuantas regiones, aquellas donde se han dado las condiciones geológicas para su formación (figura 16). Sin embargo, a diferencia de los hidrocarburos, los depósitos sólo se encuentran en tierra.

**FIGURA 16. PRINCIPALES DEPÓSITOS Y TIPOS DE CARBÓN EN EL MUNDO**



**Fuente:** elaboración propia con base en Bosák et al. (2023)

La estimación de las reservas de carbón es menos precisa que la del petróleo, y en el pasado las de algunos países como China eran poco confiables. De hecho, las reservas han sido revisadas a la baja en varias ocasiones al tomar en cuenta también la calidad del carbón. De acuerdo con los datos publicados por BP (2021) el 70% de lo que queda es carbón de buena calidad calorífica (figura 17).

**FIGURA 17. RESERVAS DE CARBÓN A NIVEL MUNDIAL**

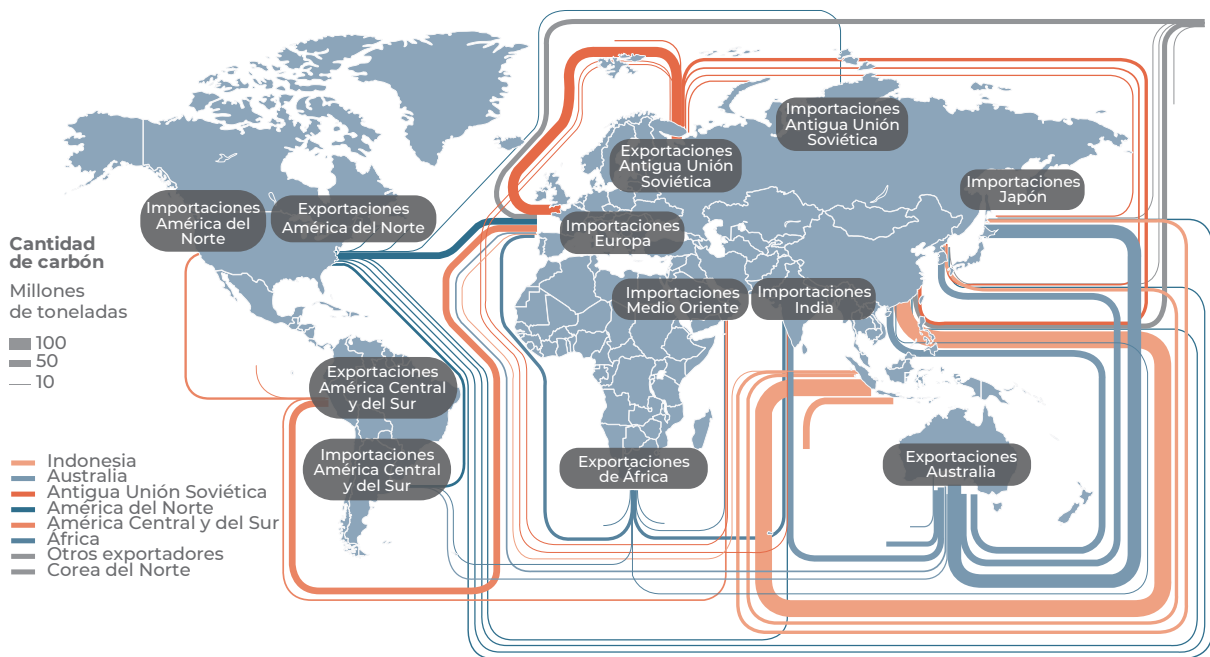
**Nota:** el semicírculo del 70% se refiere al carbón de mejor calidad (antracita y carbón bituminoso) utilizado para la generación eléctrica y la producción de acero

**Fuente:** elaboración propia con datos de British Petroleum (2021).

El total de las reservas estimadas en el 2020 era de 1000 millones de toneladas, de las cuales el 75% estaban distribuidas en tan sólo cinco países: EE. UU., Rusia, Australia, China e India (figura 17). Entre los países que más carbón producen destaca China, con un 50%, a pesar de que sólo cuenta con el 13% de las reservas. Los otros países con más producción son la India (12%), Indonesia (7%), Australia (6%), los Estados Unidos (6%) y Rusia (5%).

El comercio internacional de carbón es más reducido que el de petróleo, dado que es un sólido y tiene menor densidad energética. De hecho, el 90% de la producción se consume en el país de origen. Sin embargo, sí hay una parte que se exporta, principalmente desde Australia, Indonesia y Rusia hacia China, India, Japón y Corea (figura 18). En el caso de las Américas el flujo es principalmente de los Estados Unidos y Colombia hacia Europa. En resumen, en el caso del carbón, los Estados Unidos son el país que más tiene, China el que más consume y Australia el que más exporta.

**FIGURA 18. COMERCIO INTERNACIONAL DE CARBÓN EN MEGATONELADAS**



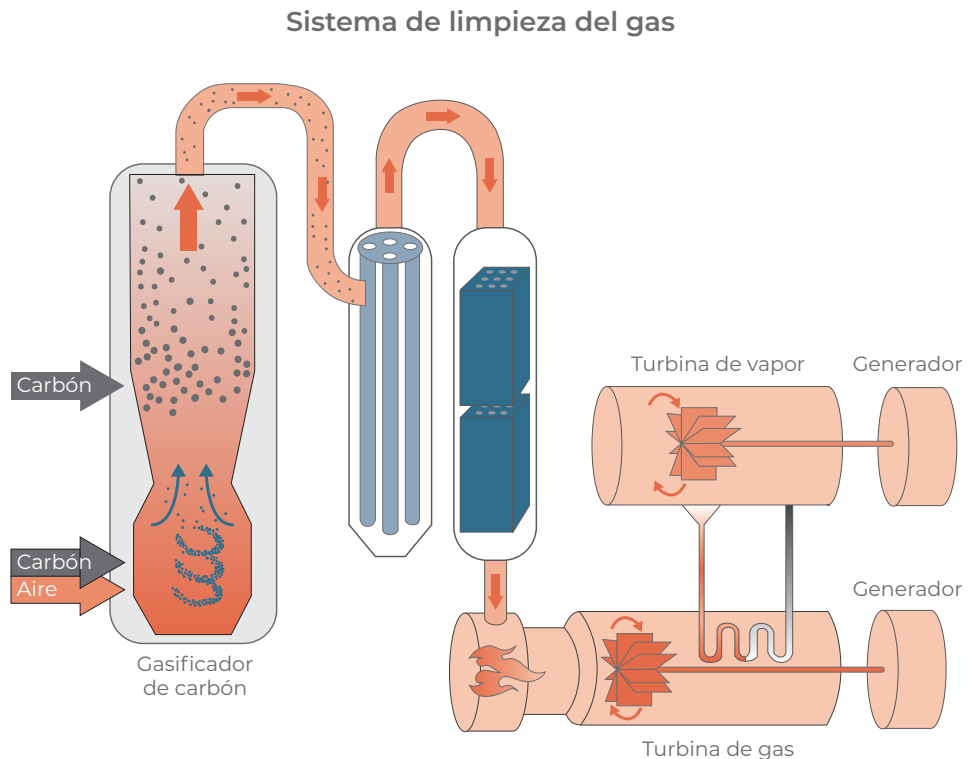
Fuente: Carbon Brief (2022).

### Usos del carbón

A pesar de que es el combustible más sucio, el consumo de carbón a nivel mundial no decrece. Esto se debe a que es un combustible fundamental, principalmente para tres usos:

- Generación de electricidad en centrales termoeléctricas o de ciclo combinado. Éste es, por mucho, el uso principal. Actualmente la electricidad producida por carbón representa aproximadamente el 35% del total mundial (IEA, 2022).
- Producción de acero a partir del mineral de hierro en los altos hornos, en los que se invierte el 15% del recurso (World Steel Association, 2022).
- Producción de cemento, cuyo porcentaje es del 5%.

Como se puede observar, el carbón se utiliza únicamente como combustible para generar calor con elevadas intensidades energéticas, mientras que el petróleo tiene una variedad mayor de aplicaciones.

**FIGURA 19. ESQUEMA DEL USO DE CARBÓN EN UNA CENTRAL DE CICLO COMBINADO**

**Fuente:** elaboración propia.

Además de las centrales termoeléctricas tradicionales, el carbón también puede utilizarse en centrales de ciclo combinado modernas, previa gasificación y eliminación de las impurezas. Para ello se inyecta carbón en un gasificador donde actúa con oxígeno y vapor de agua. A partir de aquí se obtiene un gas de síntesis compuesto por:  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2$  y  $\text{H}_2\text{S}$  que se enfría y se trata para eliminar el polvo, el azufre y otros contaminantes. Posteriormente, el gas se utiliza como combustible para las centrales de ciclo combinado en las que los gases de escape de la primera turbina alimentan una caldera conectada a una turbina de vapor, que también recupera el calor de refrigeración de la gasificación.

Para la producción de acero, se utiliza el carbón para fundir el mineral de hierro a temperaturas de 1000 a 1200 °C en un alto horno. Este se alimenta colocando capas alternadas de coque de carbón, mineral de menas de hierro y piedra caliza, que sirve de catalizador para la reacción de reducción, donde se desprende el oxígeno del óxido de hierro. Lo que se obtiene es el arrabio, que es el acero fundido y la escoria, que es el residuo.

Debido a esta reacción química no hay otra forma de producir el acero a partir del mineral de hierro. Si bien se puede alcanzar temperaturas de fusión del hierro con hornos de arco eléctricos, esto sólo puede servir para fundir la chatarra. A pesar de que este tipo de reciclaje va en aumento, a nivel mundial la producción de acero se hace todavía en un 62% en altos hornos por medio de carbón (World Steel Association, 2023).

En cuanto a la producción de cemento, el carbón se utiliza como fuente de energía para alcanzar las altas temperaturas necesarias para el proceso. Un horno de alta temperatura, a menudo alimentado con carbón, calienta carbonato cálcico (piedra caliza) junto con sílice, óxido de hierro y alúmina hasta fundirlos parcialmente a 1450 °C; esto transforma la mezcla en una sustancia conocida como *clinker*. Posteriormente, este material se mezcla a su vez con yeso y se muele hasta obtener el cemento. La producción de cemento requiere grandes cantidades de energía: se consumen alrededor de 450 g de carbón por cada 900 g de cemento producido.

## 5.4 HIDROCARBUROS NO CONVENCIONALES

### Preguntas e imágenes motivadoras

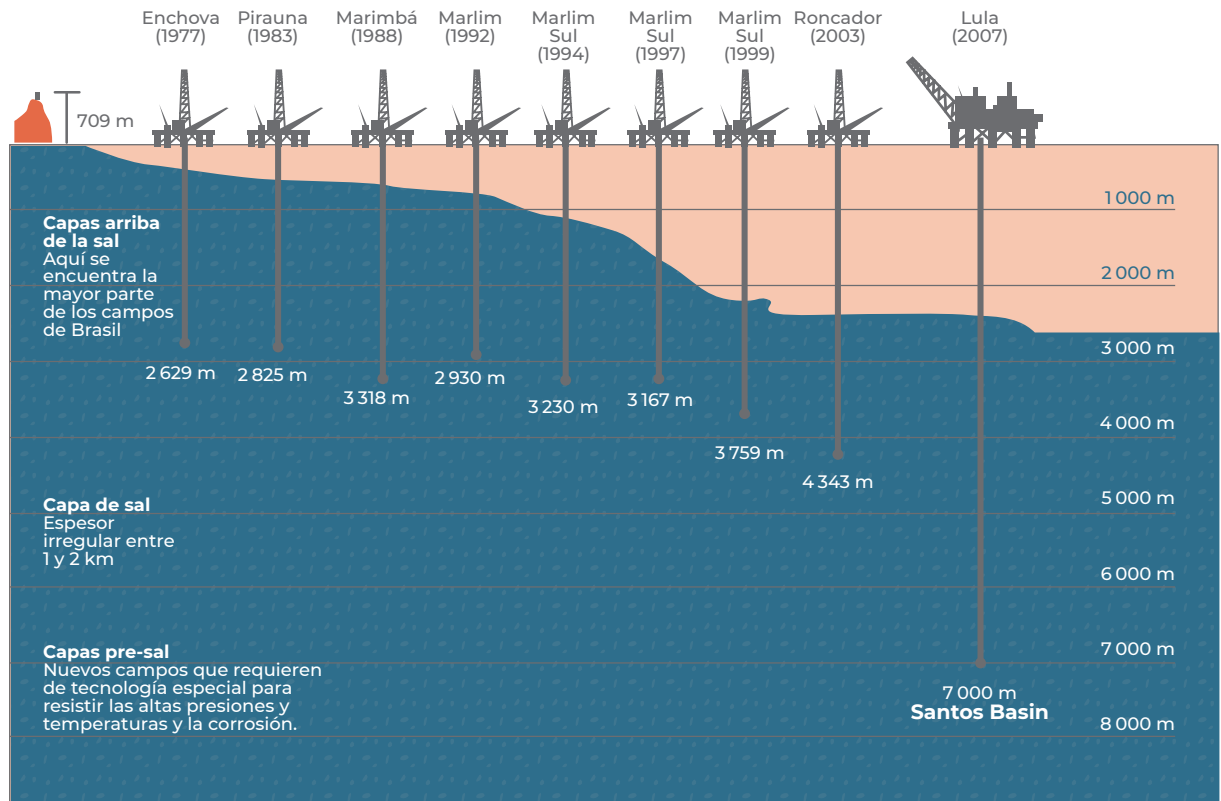
#### Imágenes motivadoras

Escanea el siguiente QR y observa la animación en la que se despliegan los pozos perforados con la técnica del *fracking* en la cuenca Bakken de los Estados Unidos:



Luego analiza la siguiente figura:

**FIGURA 20. EVOLUCIÓN DE LA EXTRACCIÓN DE PETRÓLEO COSTA AFUERA, EN BRASIL**



**Fuente:** adaptado de [https://blog.naver.com/santa\\_croce/220373141592](https://blog.naver.com/santa_croce/220373141592)

### Sugerencias:

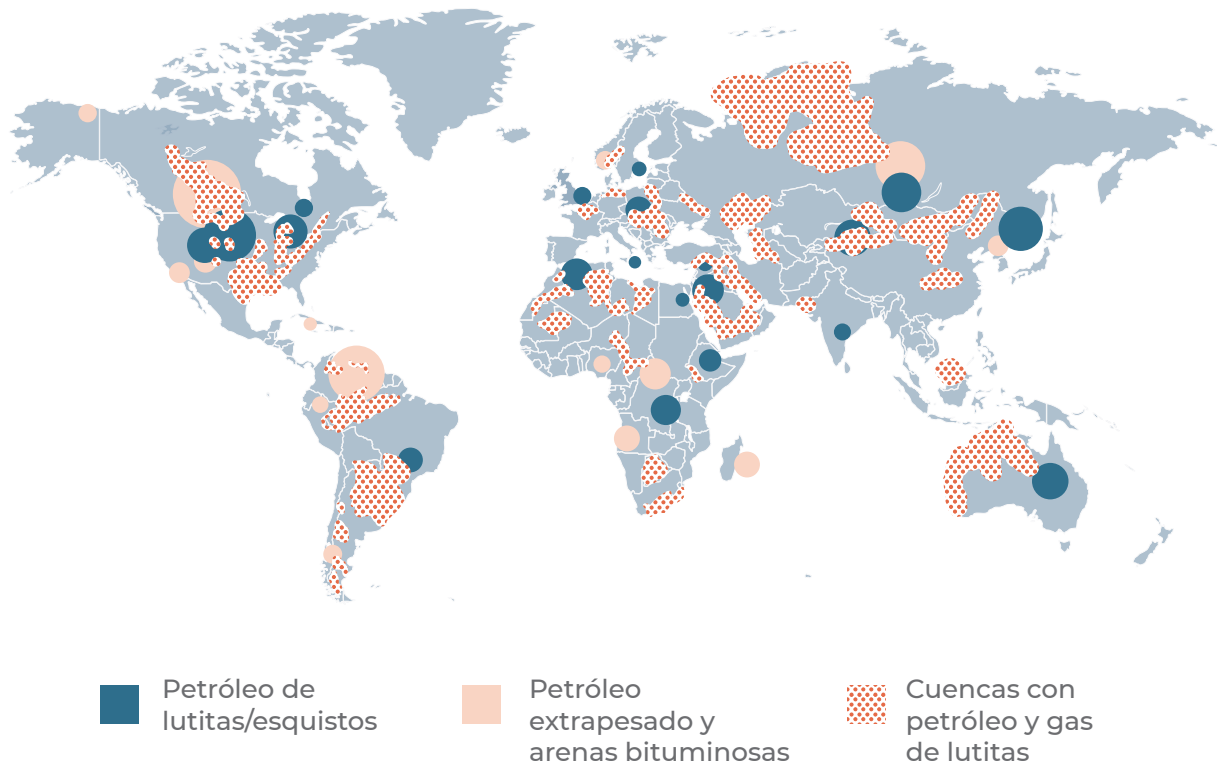
Revisa el comportamiento de los precios del petróleo en los periodos analizados

- ¿Qué tendencia ves en el tiempo?
- ¿Qué reflexiones puedes hacer al respecto?

### Clasificación, explotación y recursos prospectivos

Bajo la definición de petróleo y gas no convencional se agrupan los hidrocarburos que, por las características del reservorio o la calidad del recurso, no pueden ser recuperados con tecnología convencional (figura 21).

**FIGURA 21. DISTRIBUCIÓN MUNDIAL DE DIFERENTES TIPOS DE PETRÓLEO NO CONVENCIONAL**



**Fuente:** elaboración propia con base en Sun et al. (2021).

Dentro de esta categoría se encuentran los siguientes tipos:

- Crudo pesado, ultrapesado y arenas bituminosas (*tar sands*): el petróleo es tan viscoso que no puede fluir a pesar de las condiciones de permeabilidad del medio. En este sentido se necesitan técnicas de fluidificación del crudo.
- Petróleo y gas de lutitas (*tight oil* y *shale gas*): el reservorio presenta baja o nula permeabilidad, independientemente de las propiedades reológicas del crudo. En este caso, se necesitan técnicas de fracturación de la roca matriz.

En ocasiones se considera como no convencional también el petróleo de aguas profundas, ya que su recuperación requiere una infraestructura especial; sin embargo, desde el punto de vista del reservorio y del recurso se trata normalmente de yacimientos convencionales.

## Crudo pesado, ultrapesado y arenas bituminosas

Se trata de un petróleo de muy alta viscosidad, que necesita sistemas de producción especiales como pozos horizontales e inyección de vapor o solventes. Por definición el crudo pesado tiene  $< 20^{\circ}\text{API}$  y el extrapesado  $< 10^{\circ}\text{API}$ , lo cual implica costos adicionales tanto para su extracción como para su refinación. Esto lo convierte en un recurso caro y con una baja tasa de retorno energético.

Entre los ejemplos más destacados se encuentran el campo de Manifah, Arabia Saudita, la franja del Orinoco, en Venezuela y las arenas bituminosas de Alberta, Canadá. En el primer caso se trata de un campo *offshore*, a muy poca distancia de la costa, que se descubrió en 1957 pero no se explotó por tratarse de un crudo pesado con presencia de azufre y vanadio. No obstante, desde el 2011 se ha empezado a desarrollar utilizando técnicas para fluidificar y limpiar el crudo pesado.

La Faja del Orinoco (figura 22) es una zona extensa rica en petróleo ultrapesado ( $8$  a  $9.5^{\circ}\text{API}$ ) en la parte central de Venezuela. Esta región se exploró por primera vez en 1936, sin embargo, no fue hasta la presidencia de Hugo Chávez (1999-2013) que se inició el proceso de certificación de reservas de petróleo, que llevó a Venezuela a posicionarse como uno de los países con las mayores reservas del mundo. De acuerdo con el Servicio Geológico de los Estados Unidos, en esta faja existen entre 380 y 652 000 millones de barriles de crudo técnicamente recuperables (Schenk et al., 2009). El gigantesco campo está dividido en cuatro bloques de Boyacá, Junín, Ayacucho y Carabobo, donde el primero alberga la mayor cantidad de crudo.

**FIGURA 22. CUENCA DE PETRÓLEO ULTRAPESADO DE LA FAJA DEL ORINOCO, EN VENEZUELA**



**Fuente:** elaboración propia.

Sin embargo, la alta densidad (8 a 9.5°API) del crudo requiere la utilización de técnicas de perforación horizontal, así como la inyección de diluyente de 50°API para disminuir la viscosidad hasta conseguir la de un crudo de 16°API. En la última década la producción de este petróleo bajó drásticamente como resultado del abandono de las compañías petroleras extranjeras, las sanciones internacionales, la falta de reinversión en la industria petrolera y la caída de los precios del petróleo en 2015.

Otro caso de petróleo difícil de producir es el de las arenas bituminosas de la provincia de Alberta, en Canadá (figura 23). Se trata de arenas impregnadas de bitumen en estado casi sólido, con valores API entre los 8.5 ° y 15 °. La forma de explotar dicho recurso no convencional es mediante minería a cielo abierto (55 % de la producción proviene de excavaciones de este tipo) o por medio del método de drenaje gravitacional asistido por vapor, SAGD por sus siglas en inglés (*Steam Assisted Gravitational Drainage*).

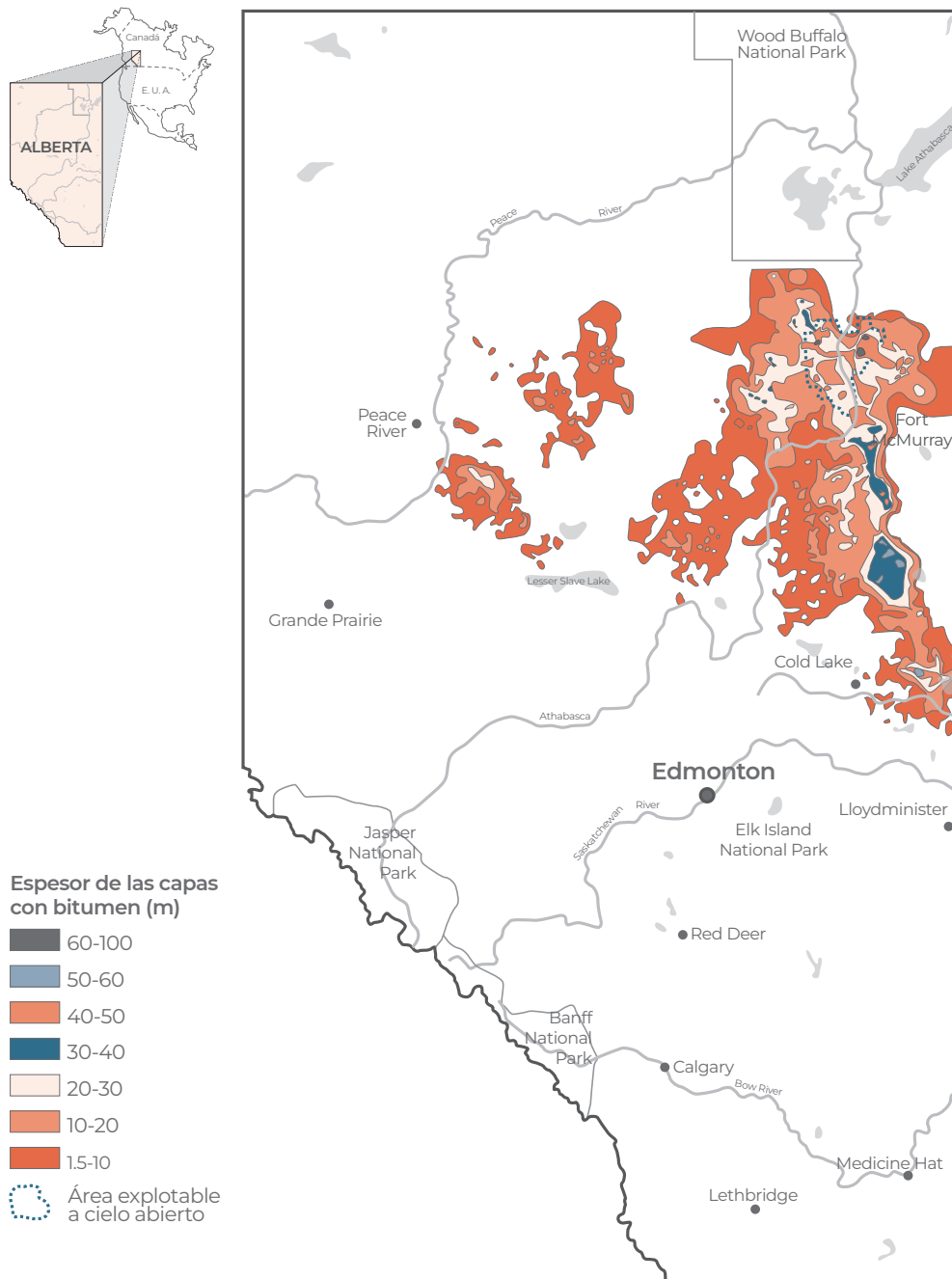
La técnica consiste en perforar dos pozos horizontales, uno por encima del otro a una distancia de entre 4 a 6 m. En el superior se inyecta vapor a elevada temperatura para que reduzca la viscosidad del bitumen, para que pueda ser extraído por el pozo inferior. Tanto la excavación a cielo abierto como la explotación en subsuelo tienen alto impacto ambiental y requieren grandes cantidades de agua y energía.

De acuerdo con *Alberta Energy Regulator*<sup>3</sup> sus reservas probadas de arenas bituminosas equivalen a aproximadamente a 158 000 millones de barriles de crudo y su producción ascendió a unos 3.3 millones de barriles por día en 2022. El costo de extracción promedio es de los más altos a nivel mundial.

---

<sup>3</sup> Alberta Energy Regulator. <https://www.aer.ca>

**FIGURA 23. DISTRIBUCIÓN DE LAS ARENAS BITUMINOSAS DE ALBERTA, CANADÁ**

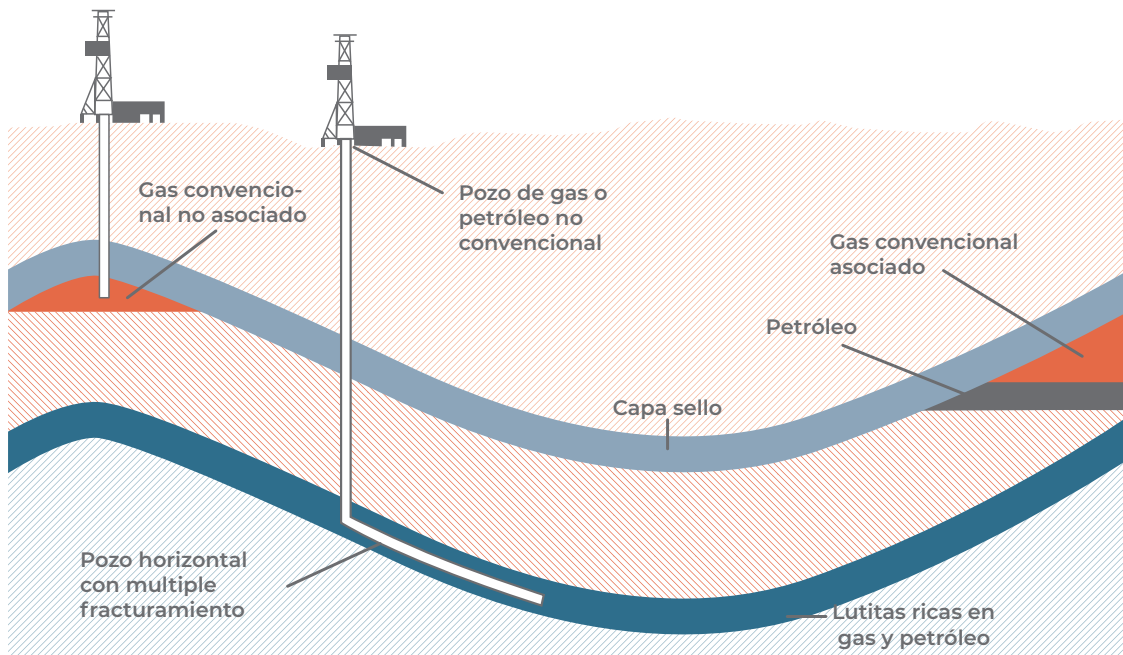


**Fuente:** elaboración propia a partir de Alberta Geological Survey (2012).

## Petróleo y gas de lutitas

Este recurso, definido como *tight oil* y *shale gas* en inglés, está asociado con la roca generadora de los hidrocarburos convencionales. Son los hidrocarburos que no migraron en su momento y que quedaron atrapados en la roca madre. La figura 24 muestra esquemáticamente la diferencia entre los dos tipos de recursos. Como se puede apreciar en la imagen, el yacimiento convencional, que posee porosidad y permeabilidad mucho mayores que la roca madre, se ubica normalmente arriba de esta. La roca madre es normalmente una roca arcillosa (lutitas), donde el petróleo queda atrapado y compactado con una permeabilidad baja o nula, lo que impide que fluya hacia arriba.

**FIGURA 24. PETRÓLEO Y GAS CONVENCIONAL Y NO CONVENCIONAL**

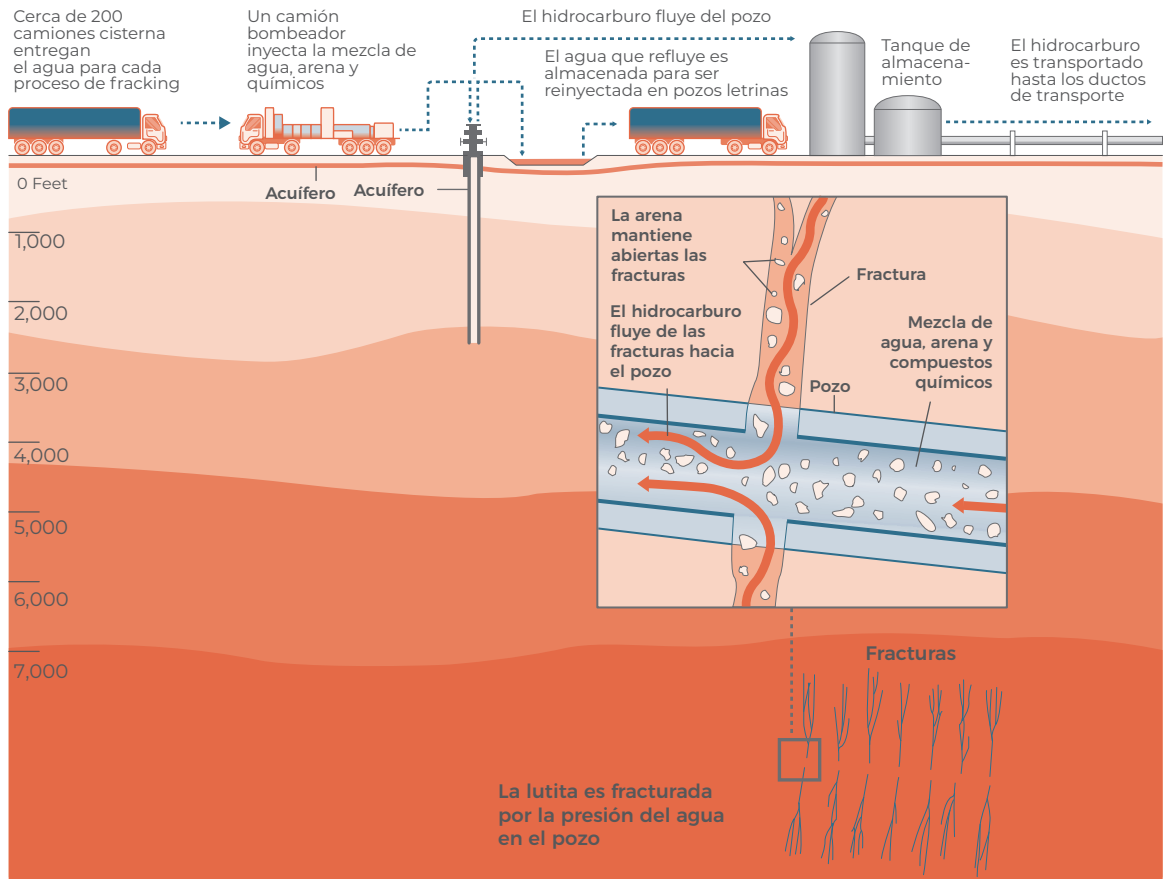


Fuente: adaptado de EIA (2011).

Para poder acceder a una fracción de este recurso se recurre a la técnica conocida como fracturación hidráulica (*fracking*), desarrollada por primera vez en 1947, que consiste en inyectar una mezcla de grandes cantidades de agua a alta presión (90% de la mezcla que se incorpora) para fracturar la roca, junto con un agente apuntalante, como la arena (9.5%), que mantiene abiertas las fracturas y diferentes tipos de compuestos químicos (0.5%) que permiten maximizar el flujo del hidrocarburo.

Dado que las capas de lutitas que contienen los hidrocarburos son normalmente subhorizontales, los pozos se perforan verticalmente hasta alcanzar la roca generadora a partir de la cual se continúa con una perforación horizontal lo más paralela posible a la formación (figura 25).

**FIGURA 25. EXPLOTACIÓN DE PETRÓLEO Y GAS DE LUTITAS POR FRACKING**



**Fuente:** adaptado de Plumer (2015).

Debido a las características de petróleo y gas no convencionales estos recursos no pueden considerarse equivalentes a los hidrocarburos convencionales explotados durante el último siglo y medio. En la tabla 1 siguiente se resumen las principales diferencias entre los dos tipos de recursos en el caso del petróleo.

**TABLA 1. DIFERENCIAS ENTRE EL PETRÓLEO Y GAS CONVENCIONAL Y NO CONVENCIONAL**

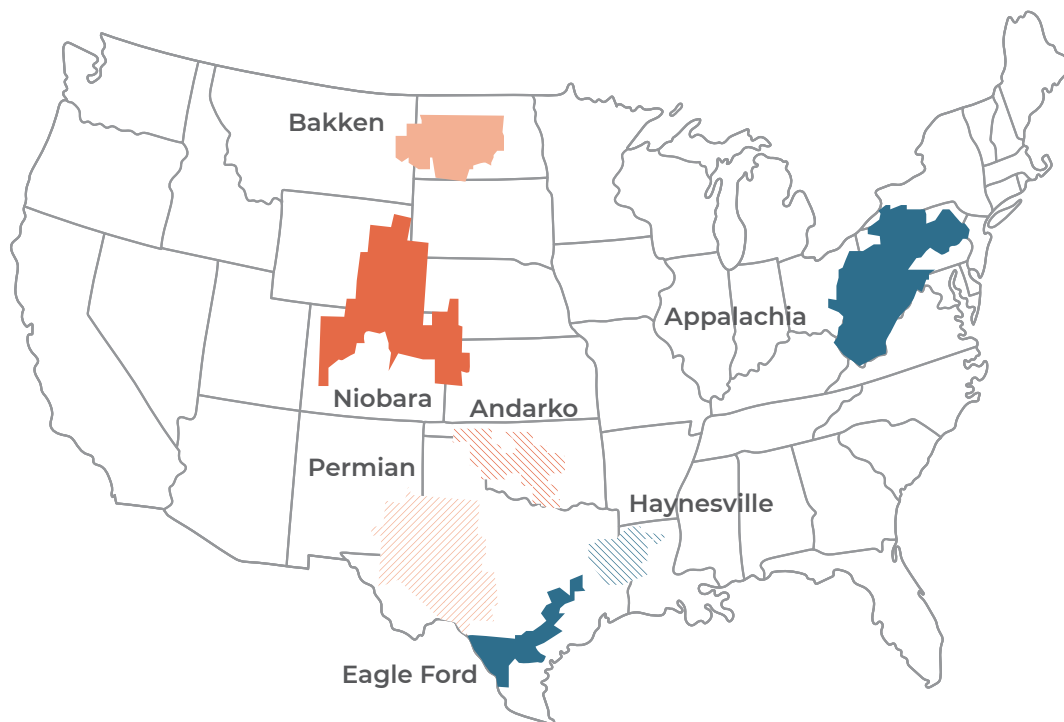
<b>Petróleo y gas convencional</b>	<b>Petróleo y gas no convencional</b>
Desde 1870 a la fecha	Desde 2008 a la fecha
Acumulaciones de hidrocarburos que han migrado desde la roca generadora al reservorio formado por rocas permeables.	Gotas de petróleo y gas atrapadas en la roca generadora del petróleo convencional que tiene baja o nula permeabilidad.
El hidrocarburo fluye por su propia presión y luego por inyección de agua o gas.	El hidrocarburo no fluye, se necesita fracturación hidráulica ( <i>fracking</i> ).
Alta productividad por pozo (miles de barriles diarios) y producción por varias décadas.	Menor productividad por pozo (de 10s a 100s de barriles diarios), se acaban más pronto (2-3 años).
Factor de recuperación del 35-40 %	Factor de recuperación 5-10 %
Tasa de retorno energético > 10:1	Tasa de retorno energético < 3:1
Petróleo apto para refinación	Petróleo muy ligero (no refinable sin mezclar con petróleo pesado)
Petróleo barato (10-25 USD/b)	Petróleo caro (50-60 USD/b)

**Fuente:** elaboración propia.

A nivel mundial la explotación del petróleo y gas no convencional se ha dado casi exclusivamente en los Estados Unidos y, en mucho menor medida, en Argentina. Si nos centramos en el caso de los EE. UU. la producción viene de siete cuencas, conocidas también como *plays*, que se encuentran al este de las Montañas Rocallosas y se muestran en la figura 26. Los *plays* de Anadarko, Bakken, Eagle Ford, Niobara y Permian producen tanto petróleo como gas, mientras que los de Appalachia y Haynesville producen, exclusivamente, gas. En términos absolutos los que más producen son el Permian, para petróleo, y el Appalachia, para el gas.

En diciembre del 2023, el primero producía seis millones de barriles diarios de petróleo y el segundo 36 000 millones de pies cúbicos de gas. La agencia de información de energía de los EE. UU. publica mensualmente los datos de producción en el sitio oficial de la *Energy Information Administration*.<sup>4</sup> Los datos indican que en el 2023 sólo estos dos *plays* siguieron incrementando marginalmente su producción, mientras que los demás ya habrían alcanzado su pico de rendimiento.

<sup>4</sup> Energy Information Administration. <https://www.eia.gov/petroleum/drilling/>

**FIGURA 26. YACIMIENTOS DE PETRÓLEO Y GAS DE LUTITAS EN LOS ESTADOS UNIDOS**

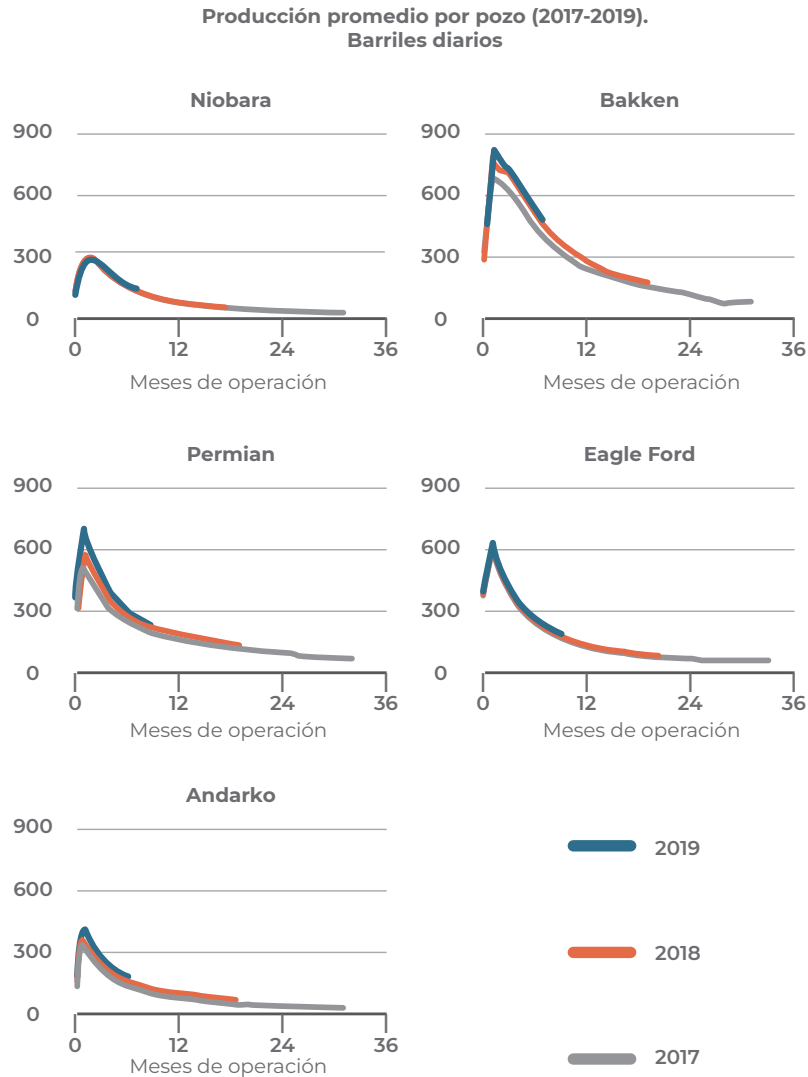
Fuente: EIA (2023).

Una forma de dimensionar lo que implica la explotación de los campos con petróleo de lutitas, y que repercute directamente en el costo de producción, es la baja productividad por pozo; esta puede ser de dos órdenes de magnitud inferior a la de los pozos convencionales. Por ello es necesaria la perforación de un número ingente de pozos (ver figura 31 de la parte 1).

Desde que los Estados Unidos empezaron la explotación masiva de los hidrocarburos no convencionales en el 2008, se han perforados más de 150 000 pozos horizontales para *fracking*. En total, para el 2022, los EE. UU. tenían 912 962 pozos de petróleo y gas con una producción promedio de 28 barriles diarios de petróleo y 192 591 pies cúbicos en el caso del gas (dato disponible en el sitio de la Energy Information Administration<sup>5</sup>). La razón por la cual se perforan tantos pozos es la alta tasa de declive de la producción, típicamente de un 60% tan sólo en el primer año. En muchos casos los pozos producen menos del 1% después del tercer año de operación EIA, 2020 (figura 27).

<sup>5</sup> Energy Information Administration. <https://www.eia.gov/petroleum/wells/>

**FIGURA 27. EVOLUCIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE PETRÓLEO NO CONVENCIONALES EN CINCO PLAYS DE LOS EE. UU. PARA POZOS PERFORADOS ENTRE EL 2017 Y EL 2019**



Fuente: adaptado de EIA (2020).

Como resultado, los costos de extracción son mucho mayores que en el caso del petróleo y gas convencional. El costo varía en cada *play* pero, para el petróleo, el precio de equilibrio en 2023 estaba entre 56 y 66 dólares por barril para nuevos pozos, sin considerar los gastos de exploración y adquisición inicial.<sup>6</sup> Para el gas en 2019 estaba

<sup>6</sup> Statista. <https://www.statista.com/statistics/748207/breakeven-prices-for-us-oil-producers-by-oilfield/>

entre 2.43 y 5.8 USD por millón de pies cúbicos (Mcf), sin contar los gastos financieros.<sup>7</sup> De hecho, un estudio reciente ha revelado que el 50% de la nueva producción de petróleo en los Estados Unidos no sería rentable si no fuera por los subsidios del gobierno, principalmente vía la exención de impuestos (Erickson et al., 2017).

Otra desventaja del petróleo de lutitas que disminuye su precio de venta es la composición, ya que se trata de un petróleo muy ligero (> 45°API) que no puede refinarse en su estado original, sino que necesita mezclarse con petróleo pesado para que pueda ser procesado en las refinerías. La solución que se ha empleado en los Estados Unidos es la de mezclarlo con el petróleo pesado que se obtiene de las arenas bituminosas de Canadá (*syncrude*) para compensar la mala calidad de estos dos extremos de los petróleos no convencionales.

Para el petróleo y gas no convencionales es difícil estimar las reservas sin la perforación de muchos pozos, ya que el factor de recuperación depende en buena medida, de la fracturabilidad de las rocas. Por lo tanto, las estimaciones que se han llevado a cabo inicialmente han sido revisadas en diferentes ocasiones. Las previsiones acerca de la producción futura del petróleo y gas de lutitas de la Agencia de Información de Energía de los Estados Unidos (EIA) han sido revisadas críticamente en varios estudios liderados por David Hughes, geólogo veterano retirado del Servicio Geológico de Canadá.

El análisis detallado de Hughes –basado en los datos de producción reales y la geología de los yacimientos– encontró que los pronósticos de la EIA eran demasiado optimistas. La lista de publicaciones se puede consultar en el micrositio de *Shale Bubble report series*.<sup>8</sup>

Por último, es importante considerar los impactos ambientales de la técnica del *fracking* entre los que se encuentran:

- Disminución de disponibilidad del agua para humanos y ecosistemas cercanos. En los Estados Unidos la cantidad de agua para cada operación de *fracking* ha ido aumentando con el tiempo. En la actualidad es común usar más de 20 millones de galones de agua (75 millones de litros) para cada operación de fracturación hidráulica en un pozo.<sup>9</sup>

<sup>7</sup> Constellation. <https://blogs.constellation.com/energy-management/gas-exports-impact-on-gas-prices-average-break-even-prices/>

<sup>8</sup> Shale Bubble report series, en el sitio oficial de Post Carbon Institute. <https://www.postcarbon.org/publications/shale-bubble-report-series/>

<sup>9</sup> S/a. Monster Fracks' Are Getting Far Bigger. And Far Thirstier. *The New York Times*. <https://www.nytimes.com/interactive/2023/09/25/climate/fracking-oil-gas-wells-water.html>

- Contaminación de fuentes de agua y suelos. Hay una extensa literatura científica que muestra los impactos sobre la salud en las regiones donde se lleva a cabo masivamente el *fracking* (CHPNY-PSR, 2023).
- Emisiones de gases de efecto invernadero como el metano ( $\text{CH}_4$ ). Los datos de satélite muestran que aproximadamente el 12% del metano puede escaparse a la atmósfera durante el ciclo de vida de un pozo de *gas shale* (Howarth, 2015).
- Terremotos someros en la cercanía de los *plays* no convencionales. Un análisis del catálogo de terremotos de los Estados Unidos entre 1998 y 2018 muestra un aumento en la frecuencia de los terremotos dentro de un radio de 150 km de los lugares de *fracking* y los sitios de reinyección (Villa y Singh, 2020).
- Incremento del tráfico pesado y daños sobre los caminos por el tránsito de los camiones. Contaminación sonora e impacto sobre el paisaje.

La explotación del petróleo de lutitas de los Estados Unidos ha revertido la caída de la producción llegando a rebasar el pico convencional de 1971 y constituyendo la mayor parte de la producción del país (ver figura 24, parte 1). Para el 2023, los recursos no convencionales representaron el 68% del total de la producción petrolera y el 74% de la producción de gas total de aquel país. Se puede afirmar que la explotación del petróleo y del gas de lutitas es una alternativa desesperada para seguir posponiendo el cambio de un sistema insostenible a costa de un recurso con altos costos energéticos, económicos y ambientales.

### Petróleo de aguas profundas

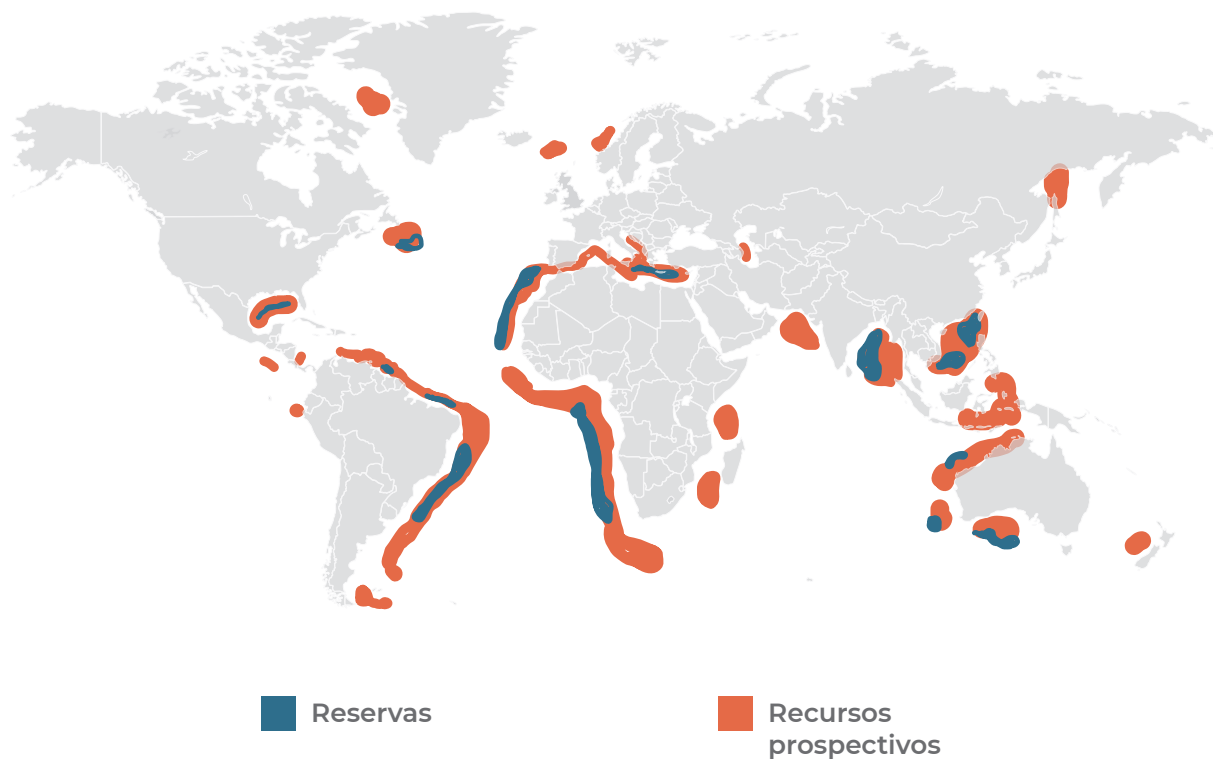
En las últimas tres décadas, el agotamiento de los campos terrestres y en agua someras ha impulsado la exploración y producción de campos costa afuera cada vez a mayor profundidad. Se distingue entre campos de aguas profundas (500 a 1 500 m de tirante de agua) y ultraprofundas (1500 a 3000 de tirante de agua). A su vez, los yacimientos se encuentran a varios km de profundidad bajo el piso marino. Para la exploración del recurso se utilizan métodos sísmicos como en tierra, aunque los sismógrafos tienen que ser manejados de manera remota. Aunado a esta complejidad, en la fase de exploración, se presentan otros problemas que se dan durante la explotación:

- Corrientes marinas que provocan movimiento de las estructuras y la vibración en las tuberías.

- Baja temperatura que dificultan el bombeo por el incremento de la viscosidad del crudo.
- Riesgo por huracanes y accidentes.

En la figura 28 se pueden observar las principales regiones con reservas en aguas profundas. El caso más complejo es el de los campos de Brasil (figura 20), tanto por las profundidades a las que se encuentran los capos (de 5 a 7 km por debajo del suelo marino), como por el hecho de que el petróleo está debajo de una espesa capa de sal. Debido a que este material es muy plástico y tiene menos resistencia que el resto de las rocas se debe tener especial cuidado con los lodos de perforación, que sirven para presurizar las paredes de los pozos y así evitar que una presión demasiado alta provoque una fracturación, o una demasiado baja cause el colapso del pozo.

**FIGURA 28. REGIONES CON POTENCIAL DE EXTRACCIÓN DE PETRÓLEO DE AGUAS PROFUNDAS Y ULTRAPROFUNDAS**



**Fuente:** elaboración propia.

Las aguas profundas han llegado a representar cerca del 10% de la producción mundial de crudo, pero, debido al alto costo y riesgo que conllevan los proyectos, no se prevé que se pueda rebasar este porcentaje en el futuro.

## 5.5 ACTIVIDADES Y ESTRATEGIAS SUGERIDAS

### Actividad 1. Confiabilidad de las reservas de petróleo

Descarga la base de datos Statistical Review of World Energy (de Energy Institute) y familiarízate con ella:

<https://www.energyinst.org/statistical-review/resources-and-data-downloads>

1. Prepara una gráfica mostrando la evolución de las reservas de petróleo para los países de la OPEP (esto es, Arabia Saudita, Irán, Iraq, Kuwait, Emiratos Árabes Unidos, Venezuela) desde 1980 a 2020.

#### Preguntas guía:

- ¿A qué se debe que los crecimientos repentinos en las reservas de algunos países árabes? ¿Por qué crees que se dan casi al mismo tiempo?
- ¿El crecimiento de las reservas de Venezuela en este siglo responde a la misma lógica?

### Actividad 2. Petróleo y gas en México

Entra al sitio del Sistema de Información Energética (SIE), en <https://sie.energia.gob.mx/>, ve a la carpeta hidrocarburos/petróleo crudo y revisa las opciones.

#### Actividades:

1. Elabora una gráfica mostrando la producción de petróleo de México desde 2011 a la fecha (puedes cambiar el intervalo de tiempo con el botón “opciones”).
2. Agrega el consumo de petróleo a la gráfica.

#### Preguntas guía:

- ¿Qué porcentaje de su producción petrolera exportó México en 2018, 2019, 2020 y en 2021?

Ahora ve a la carpeta hidrocarburos/gas natural.

1. Elabora una gráfica mostrando las importaciones de gas natural de México desde el 2011 a la fecha (puedes cambiar el intervalo de tiempo con el botón “opciones”).
2. Agrega la producción de gas natural nacional en la gráfica.

**Preguntas guía:**

- ¿Cuánto gas natural importó México para su consumo en 2018, 2019, 2020 y 2021 en términos porcentuales (%)?
- ¿Cómo afectó la pandemia la producción y el consumo de hidrocarburos (tanto en los Estados Unidos, como en México)?

### *Actividad 3. Carbón y emisiones de gases de efecto invernadero*

1. Usa la base de datos Statistical Review of World Energy (de Energy Institute) de la actividad 1 y prepara una gráfica (histograma) en la que muestres los 15 países que más CO<sub>2</sub> emiten.
2. Utiliza los datos de población del sitio del Banco Mundial (<https://data.worldbank.org/indicador/SP.POP.TOTL>) y prepara unas gráficas mostrando la cantidad de emisiones per cápita para todo el mundo y para los siguientes países: Estados Unidos, Canadá, Alemania, Francia, Reino Unido, China, India, Rusia, México y Cuba.
3. Grafica el consumo de carbón en términos absolutos y per cápita de los mismos países.

**Preguntas guía:**

- ¿Los resultados son lo que esperabas?
- ¿Qué piensas acerca del llamado de los países europeos y los Estados Unidos a China, India y México para que reduzcan el consumo de carbón?

**Actividad 4. Comparación de los combustibles fósiles**

1. Elabora una tabla de doble entrada en la que compares las ventajas y desventajas de cada fuente de energía mencionadas en este capítulo teniendo en cuenta las diversas variables presentadas a lo largo del mismo.
2. Acompaña la tabla con gráficas que demuestren lo aseverado en ella.







## 6. Energía nuclear

### 6.1 PREGUNTAS E IMÁGENES MOTIVADORAS



#### Escanea y observa la imagen

Algunos elementos que se encuentran en la naturaleza emiten radiación a través de isótopos radioactivos, como por ejemplo  $^{40}\text{K}$ ,  $^{87}\text{Rb}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  y  $^{222}\text{Rn}$ .

- Gran parte de la radiación que recibimos surge de los suelos y de las paredes de los edificios y es producto de materiales que proceden de elementos naturales que contienen radionúclidos.
- Los alimentos que ingerimos, el agua que bebemos y el aire que respiramos también tienen en su composición una pequeña porción de elementos radioactivos. Nuestro propio organismo contiene K, parte del cual es radioactivo también.

#### Preguntas guía:

- ¿De cuántas maneras nos encontramos expuestos a radiación nuclear?
- ¿Qué alimentos de los que ingieres en el día a día contienen radioisótopos?

- ¿Cuántas veces te has expuesto a radiación artificial en tu vida?
- ¿Conoces el número de muertes por exposición natural a radiación en el mundo?
- ¿Qué tipo de reflexión te motivan las preguntas anteriores y las respuestas obtenidas?

Por tratarse de algo complejo, al estar vinculada con la física nuclear y cuántica, la energía nuclear es poco conocida por la sociedad en general, que a menudo la relaciona con los accidentes históricos y las afectaciones provocadas. Por esta razón es importante ofrecer una explicación objetiva sobre ella puesto que, en sí misma, se trata de un fenómeno natural que no tiene que ver directamente con el uso que el ser humano le da.

## 6.2 ANTECEDENTES HISTÓRICOS

La atracción por el nivel atómico se remonta al filósofo griego Demócrito, quien en el cuarto siglo a.C. acuñó el término átomo cuya etimología griega significa *lo que no se puede partir*. A pesar de que los grandes pensadores de la época proveyeron a la humanidad con descubrimientos y conocimientos impresionantes, no fue hasta 1803 cuando Dalton propuso una teoría formal sobre los elementos y compuestos de la materia. Conforme iban avanzando las investigaciones, el *modelo atómico* fue evolucionando paralelamente a los descubrimientos vinculados al campo de la radiación nuclear.

### Evolución de los modelos atómicos

- 1904: Thomson plantea el *Modelo de pastel de pasas* a partir del descubrimiento del electrón en 1897.
- 1911: Rutherford explica que el núcleo se concentra en un espacio infinitamente pequeño, con una elevada densidad y cargado positivamente.
- 1913: Bohr establece el *Modelo de niveles de energía*, que describe los niveles discretos del átomo.
- 1926: Schrödinger desarrolla el *Modelo de nube de electrones*, que propone que, debido a su movimiento constante en forma de ondas estacionarias, los electrones no pueden ser localizados de manera determinística, sino sólo como área de probabilidad.
- 1932: Chadwick descubre el neutrón como partícula relevante dentro del núcleo atómico, complementando así los conocimientos aportados por Rutherford sobre el núcleo.

El modelo atómico que se considera más preciso en la actualidad consta de un núcleo formado por nucleones, esto es, los protones, con carga positiva, y los neutrones, que no tienen carga. Estos nucleones se encuentran formados por dos *quarks up* y uno *down* unidos mediante fuerzas nucleares fuertes de corto alcance y les envuelve una nube probabilística de electrones, cargados negativamente.

### Evolución del conocimiento sobre radiación nuclear

- 1895: Röntgen descubre los rayos X.
- 1896: Becquerel descubre que el uranio es radiactivo.
- 1898: Marie Curie descubre el radio y el polonio.
- 1903: Marie y Pierre Curie descubren la radiación artificial.
- 1916: Einstein enuncia la Teoría general de la relatividad.
- 1934: Fermi produce los primeros isótopos radiactivos artificiales.
- 1942: Fermi consigue una reacción nuclear en cadena.
- 1951: Primera generación de electricidad de origen nuclear.
- 1956: Entra en funcionamiento *Calder Hall*, primera central nuclear comercial.

## 6.3 CONCEPTOS PREVIOS

La radiación nuclear está asociada con la energía de enlace, que es la energía que mantiene unidos a los nucleones en el núcleo atómico. A su vez ésta se relaciona con la equivalencia entre masa y energía establecida por Einstein:  $E = mc^2$ . Lo que explica esta ecuación es que, en la formación original del átomo, parte de la masa de los nucleones que se unieron se transformó en energía de unión, provocando un defecto de masa en el núcleo atómico final.

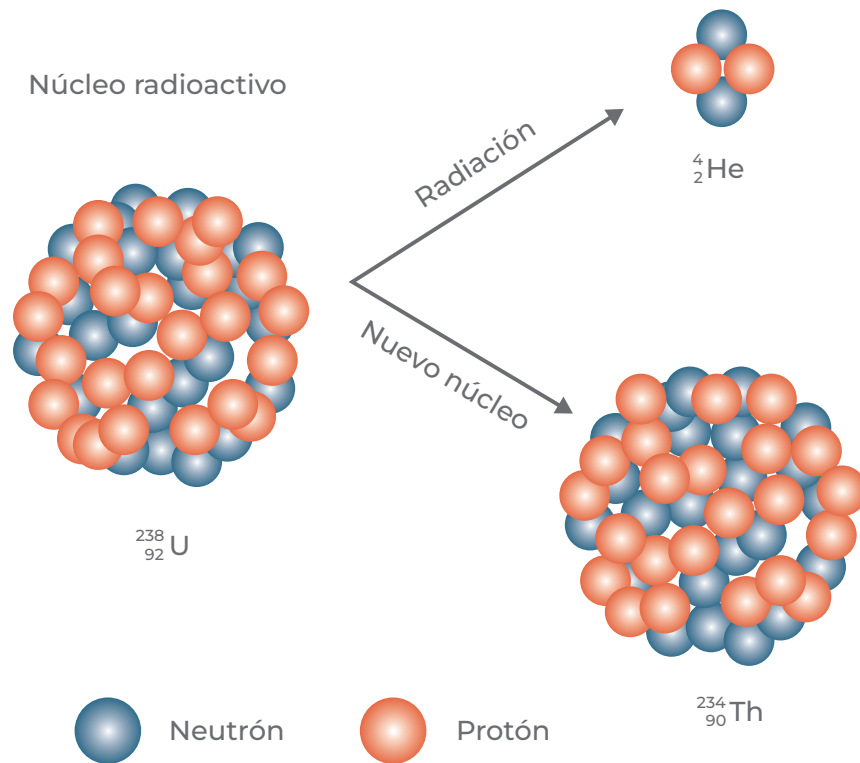
Si se quisiera romper este enlace nuclear fuerte se debería de aplicar la misma energía que se incorporó durante su formación inicial. La ruptura del enlace se define como fisión nuclear y en este proceso se libera parte de la energía en forma de radiación como se explica en las cápsulas explicativas que vienen a continuación y que se relacionan con las distintas formas de desintegración nuclear.

## Desintegración alfa

Los núcleos atómicos inestables emiten radiación en forma de partículas de manera espontánea. Una de las partículas emitidas es un núcleo de helio 4 ( ${}^4\text{He}^{2+}$ ) llamado partícula alfa. La otra partícula depende del radionúclido del que se aparta. La separación nuclear incluye también la emisión de energía. (figura 29).

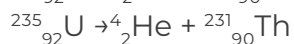
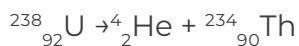
Para que este proceso sea posible, la partícula ha de superar una barrera de potencial que la mantiene atrapada dentro del núcleo, proceso que es explicado por el llamado efecto túnel que fue introducido por George Gamow en 1928. Gamow explicó cómo la partícula atraviesa ese pozo de potencial por medio de un “salto cuántico”.

**FIGURA 29. DESINTEGRACIÓN ALFA**



**Fuente:** elaboración propia.

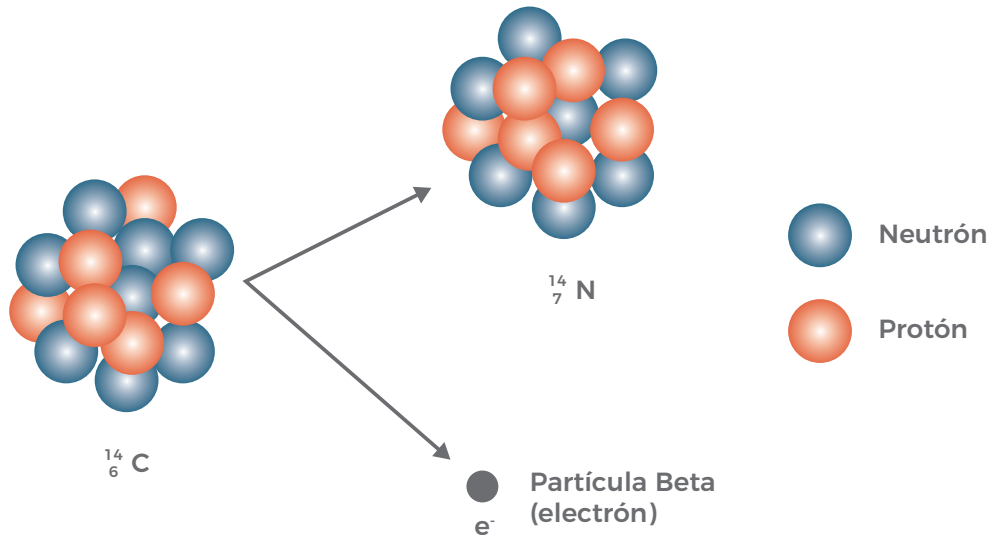
Ejemplos de reacciones que pudieran tener lugar en un reactor nuclear serían:



## Desintegración beta

Ocurre en núcleos que son inestables por tener una relación desigual entre neutrones y protones (más neutrones que protones). En este caso, algunos neutrones se transforman en un protón y un electrón, siendo este último el que se emite desde el núcleo con elevada energía cinética (figura 30).

**FIGURA 30. DESINTEGRACIÓN BETA**



**Fuente:** elaboración propia.

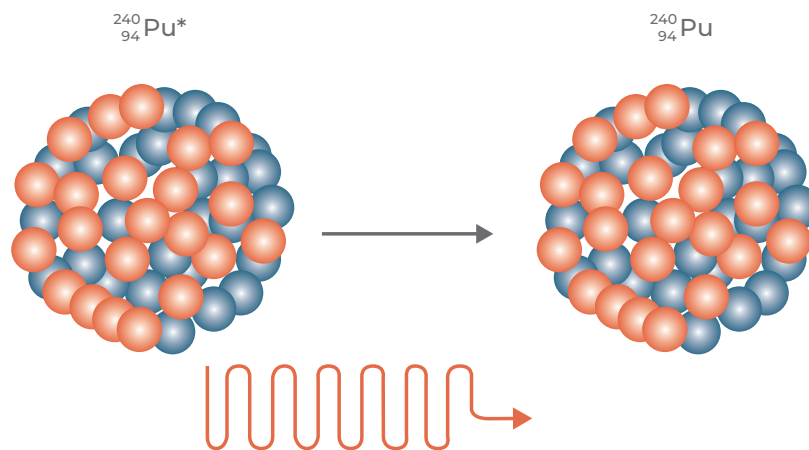
La reacción quedaría de la siguiente manera:



Cuando el número de protones es mayor al número de neutrones, la desintegración beta se define como positrónica porque un protón se transforma en un neutrón y un positrón, que es la antipartícula del electrón ya que tiene carga positiva.

## Desintegración gamma

A diferencia de los otros dos tipos de decaimiento, la desintegración gamma no implica un cambio en el elemento. Es una decadencia de un estado excitado a uno inferior mediante la emisión de ondas electromagnéticas altamente energéticas desde el núcleo. Esta excitación es similar a la que experimentan los electrones excitados, pero con energías mucho mayores.

**FIGURA 31. DESINTEGRACIÓN GAMMA**

Radiación Gamma: ondas electromagnéticas de alta energía

**Fuente:** elaboración propia.

Nota: la radiación X y la  $\gamma$  tienen las mismas propiedades, pero lo que las diferencia es su procedencia, las primeras se originan en las capas externas del átomo y las segundas proceden del núcleo. Estas últimas son más energéticas.

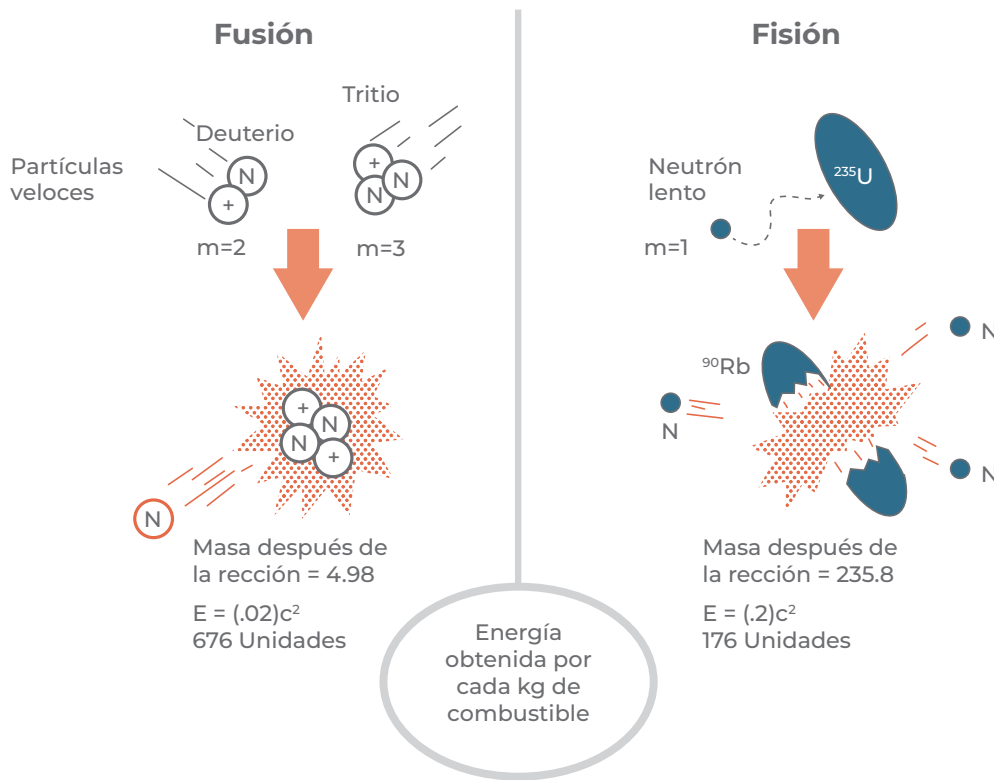
Otro concepto relevante para entender el riesgo de las centrales nucleares es el poder de penetrabilidad de las distintas partículas ionizantes producto de las desintegraciones alfa, beta y gamma, que son capaces de arrancar un electrón de un átomo:

- *Las partículas alfa* son las radiaciones ionizantes que cuentan con una masa mayor, por ende, su poder de penetración se reduce. Dichas radiaciones no pueden atravesar una hoja de papel o la piel.
- *Las partículas beta* poseen menor masa y, por lo tanto, pueden atravesar una hoja de papel, pero no una lámina metálica de 1 mm de espesor o la propia ropa.
- *Las partículas gamma* son radiaciones electromagnéticas, por ende, no tienen masa, por lo que tienen mayor poder de penetración. Este tipo de radiación requiere de una gruesa capa de Pb o de hormigón (concreto) para ser retenida.

### Tipos de reacciones nucleares

Existen dos tipos de reacciones nucleares dependiendo si se forman elementos más pesados o si se divide el núcleo para dar lugar a elementos más ligeros: fusión y fisión, respectivamente (figura 32). Éstas se explican a continuación y en la tabla 2.

FIGURA 32. TIPOS DE REACCIONES NUCLEARES



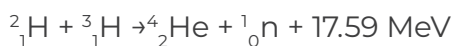
Fuente: elaboración propia.

## Reacciones nucleares

Existen dos tipos de reacciones nucleares dependiendo de si se crea o se destruye el núcleo atómico:

- *Fusión nuclear*: unión de núcleos atómicos muy livianos que requiere gran cantidad de energía inicial. Tiene lugar en las estrellas de manera natural.
- *Fisión nuclear*: división de núcleos atómicos pesados. Se produce de forma artificial controlada en los reactores nucleares, o descontrolada en las bombas atómicas. También se da de manera espontánea en los isótopos radioactivos de  $^{40}\text{K}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{235}\text{U}$  y  $^{238}\text{U}$  que existen en la Tierra desde su formación.

Un ejemplo de reacción nuclear de fusión es:



Un ejemplo de reacción nuclear de fisión es:



Nota: las unidades serán explicadas en la sección de las actividades.

**TABLA 2. DIFERENCIAS ENTRE FISIÓN NUCLEAR Y FUSIÓN NUCLEAR**

CONCEPTO	FISIÓN NUCLEAR	FUSIÓN NUCLEAR
Definición	Es la división de un átomo pesado en 2 o más átomos más ligeros.	Es la unión de 2 o más átomos livianos en uno grande.
Ocurrencia natural	En la Tierra ocurre de forma natural sólo para isotopos de K, Th, U. Se puede inducir artificialmente de manera controlada en reactores, o descontrolada, como en el caso de las bombas atómicas.	Ocurre en las estrellas, como el Sol.
Condiciones	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Masa crítica de la sustancia.</li> <li>• Neutrones a una determinada velocidad.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ambiente de alta densidad.</li> <li>• Temperatura alta.</li> </ul>
Energía necesaria	No se requiere tanta energía, en contraste con la fusión nuclear.	Consiste en acercar dos protones lo suficiente como para sobreponerse a las fuerzas nucleares de repulsión electrostática, lo que requiere de enormes cantidades de energía.
Energía liberada	Es $10^9$ de veces más grande que la que se libera en las reacciones químicas, pero menor que en la fusión.	La energía liberada en la fusión es 3-4 veces mayor que en la fisión (defecto de masa convertido en energía).

**Fuente:** elaboración propia.

A partir de aquí nos centraremos en la fisión nuclear únicamente, que, como hemos visto, es la reacción en la que el núcleo de un átomo pesado, al capturar un neutrón externo, se vuelve inestable y procede a dividirse en dos o más núcleos de átomos más livianos, emitiendo, además, neutrones, rayos gamma y energía. Cabe mencionar que estos neutrones que son emitidos como producto de la fisión, si se encuentran a su vez con otros átomos fisionables, provocarán lo que se conoce como reacción en cadena.

A pesar de que existen isótopos inestables que se fisionan de manera inestable, siempre necesitarán, entre otras condiciones, la incidencia de un neutrón. Este podrá ser:

- *Lento o térmico*: para el caso de  $^{234}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Pu}$ .
- *Rápidos*: que involucran un umbral de energía. Es el caso de  $^{238}\text{U}$  (0,8 MeV) y  $^{232}\text{Th}$  (1,2 MeV).

La probabilidad de que un núcleo se fisione en un determinado intervalo de tiempo será proporcional a lo que se conoce como constante de desintegración,  $\lambda$ , que indica la actividad del radioisótopo y está directamente relacionada con la vida media del elemento radiactivo (tiempo que ha de pasar para que la mitad de la muestra se fisione espontáneamente). Cada núcleo fisible tiene distintos tiempos de semi-desintegración, como se observa en la tabla 3:

**TABLA 3. TIEMPOS DE DESINTEGRACIÓN DE LOS NÚCLEO FISIBLES**

ELEMENTO	VIDA MEDIA
$^{15}\text{O}$ (Oxígeno 15)	122 segundos
$^{222}\text{Rn}$ (Radón 222)	3,8 días
$^{131}\text{I}$ (Yodo 131)	8 días
$^{90}\text{Sr}$ (Estroncio 90)	21.1 años
$^{137}\text{Cs}$ (Cesio 137)	30 años
$^{14}\text{C}$ (Carbono 14)	5730 años
$^{41}\text{Ca}$ (Calcio 41)	103000 años
$^{40}\text{K}$ (Potasio 40)	1,25 millones de años
$^{235}\text{U}$ (Uranio 235)	703.8 millones de años
$^{232}\text{Th}$ (Torio 232)	1405 millones de años
$^{238}\text{U}$ (Uranio 238)	4510 millones de años

Fuente: Wikipedia.

En un reactor nuclear lo que proporciona la energía es el isótopo  $^{235}\text{U}$ , puesto que es el que puede fisionarse al ser bombardeado por neutrones lentos y producir una reacción en cadena (se define como un isótopo fisible). En cambio, el isótopo  $^{238}\text{U}$  requiere una energía crítica mayor y libera menos energía de la que absorbe (es un isótopo fisionable, pero no fisible). No obstante, el tiempo de semidesintegración del  $^{235}\text{U}$  es de 703.8 millones de años y dado que la edad de la Tierra es de 4500 millones de años, la cantidad de este radioisótopo en la actualidad es de tan solo 0.71%, mientras que el  $^{238}\text{U}$ , cuya vida media es similar a la de la Tierra, constituye el 99.28%. Además, de todo lo anterior, el combustible nuclear necesita contener entre 3 y 5% de  $^{235}\text{U}$ , lo que se consigue mediante procesos de enriquecimiento.

## 6.4 URANIO: MINERÍA Y PROCESAMIENTO

En esta sección revisaremos el ciclo completo por el que pasa el combustible nuclear desde su fabricación hasta su emplazamiento final como residuo. La primera fase del ciclo de vida es la de extracción del mineral de los yacimientos terrestres. El principal mineral primario es la uraninita ( $UO_2$ ) o pechblenda ( $U_2O_8$ ), aunque en depósitos particulares es posible encontrar una variedad de minerales de uranio más diversa.

El mineral se obtiene por medio de minería a cielo abierto, o subterránea si se encuentra a más de 100 m de profundidad. Esta última requiere de técnicas de ventilación y de la reducción de los tiempos de exposición de los trabajadores ante la existencia del gas Rn que aparece como resultado del decaimiento natural del U. Otra de las formas de extracción del mineral es mediante procesos de lixiviación in situ, que consisten en inyectar una solución química en el yacimiento y el fluido obtenido es posteriormente bombeado a la superficie donde los metales son recuperados. Esta es la etapa que implica un mayor costo, junto con la de enriquecimiento.

En la actualidad, como se puede observar en la tabla 4, sólo unos cuantos países cuentan con minería de uranio. Su explotación está encabezada por Kazajistán, que produjo el 43% del suministro mundial, seguido de Canadá (15%) y Namibia (11%) (World Nuclear Association, 2023).

**TABLA 4. PRODUCCIÓN DE URANIO A NIVEL MUNDIAL**

PAÍS	2018	2019	2020	2021	2022
Kazajistán	21 705	22 808	19 477	21 819	21 227
Canadá	7 001	6 938	3 885	4 693	7 351
Namibia	5 525	5 476	5 413	5 753	5 613
Australia	6 517	6 613	6 203	4 192	4 553
Uzbekistán (est.)	3 450	3 500	3 500	3 520	3 300
Rusia	2 904	2 911	2 846	2 635	2 508
Nigeria	2 911	2 983	2 991	2 248	2 020
China	1 885	1 885	1 885	1 600	1 700
India	423	308	400	600	600
Sudáfrica (est.)	346	346	250	192	200
Ucrania	790	800	744	455	100

PAÍS	2018	2019	2020	2021	2022
EE.UU.	582	58	6	8	75
Pakistán (est.)	45	45	45	45	45
Brasil	0	0	15	29	43
Irán	71	71	71	21	20

**Fuente:** World Nuclear Association (2023).

Una vez recuperado el mineral, comienza la fase de conversión en las plantas de procesamiento, en las que el material extraído pasa por un proceso de trituración y molienda hasta obtenerse de él un polvo seco con un 90% de  $U_3O_8$  (octóxido de triuranio) llamado *yellow cake* (“pastel amarillo”) que es el insumo que se puede comercializar en el mercado.

La siguiente es la fase de refinado. En ella tiene lugar el enriquecimiento en uranio fisible  $^{235}U$ , que pasa del 0.71% de concentración –su concentración natural– a la requerida en las centrales nucleares, que es de 3-5 %. Esto se hace bombardeando el  $U_3O_8$  con flúor gaseoso que, al reaccionar, genera  $UF_{6(g)}$  (hexafluoruro de uranio) en estado gaseoso. Las técnicas que se utilizan para ello son la difusión y la centrifugación gaseosa. Dicho gas enriquecido se convierte más tarde en polvo de  $UO_2$  (dióxido de uranio). Éste se hornea a elevadas temperaturas, lo que permite convertirlo en unas pastillas cerámicas llamadas pellets, que tienen 0.78 cm de diámetro.

Posteriormente se apilan en tubos de aleación resistentes a la corrosión, habitualmente de zircaloy (aleación de zirconio), formando las barras de combustible de los reactores nucleares. Dichas varillas tienen una longitud típica de 4 m cada una y almacenan en su interior alrededor de 350 pellets. El enriquecimiento del uranio es un proceso complejo y caro. Por este motivo, el 98% se realiza sólo en cinco países: Rusia (48%), Alemania-Holanda (23%), Francia (12%), China (10%) y los Estados Unidos (8%) (World Nuclear Association, 2022).

## 6.5 LA FUENTE NUCLEAR PARA LA GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD

El diagrama general de producción de electricidad en una central nuclear es semejante al de una central termoeléctrica, ya que ambas se basan en la producción de energía calorífica. El calor transforma agua en vapor que mueve una turbina, a su vez acoplada a un generador de electricidad.

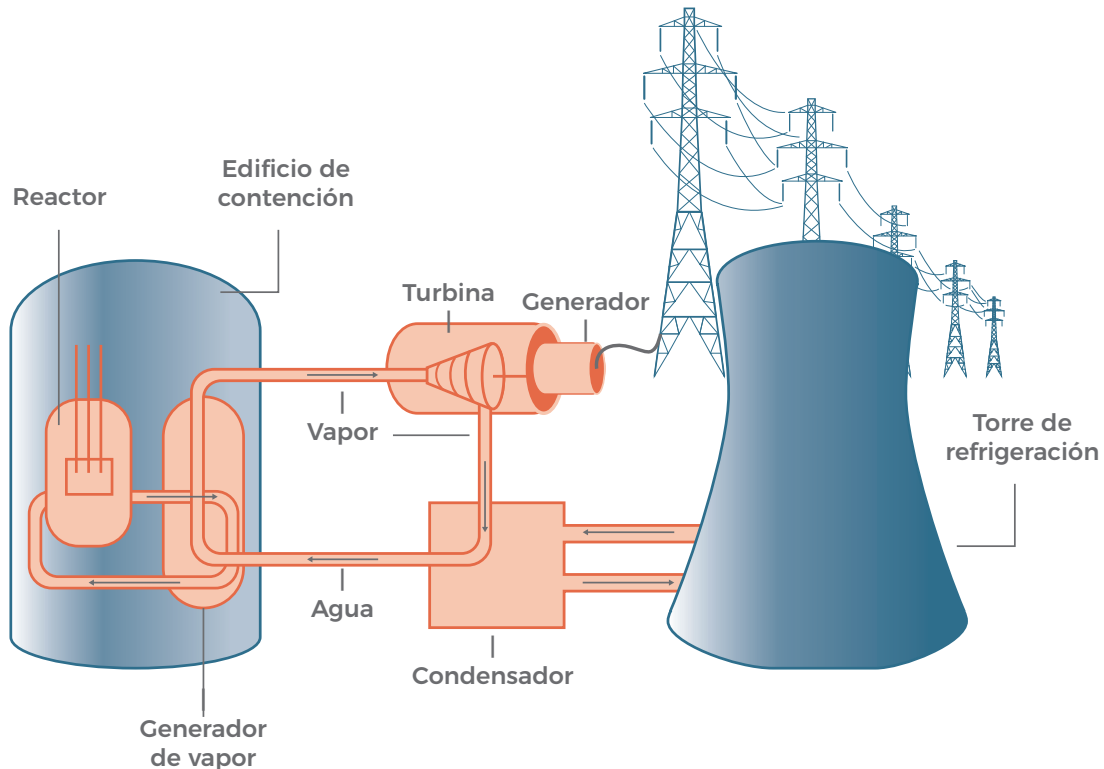
Las centrales nucleares se dividen en varias partes (figura 33):

- El edificio de contención en el que se localiza el reactor nuclear donde tiene lugar la fisión. Dentro de éste se encuentran el núcleo, las barras de combustible, el líquido refrigerante, las barras de control o moderador nuclear y el generador de vapor, que a su vez contiene el separador de humedad y el secador de vapor.
- La turbina que produce la electricidad.
- El condensador en el que se enfría el vapor, convirtiéndolo en agua líquida que recircula nuevamente por el circuito interno. El condensador es conectado con la torre de refrigeración o con un cuerpo de agua externo.
- Las torres de enfriamiento, que son partes que sólo existen en aquellos reactores que no estén cerca de un gran cuerpo de agua.

### Reactores nucleares

El reactor nuclear cuenta con varios elementos:

- *El refrigerante.* Ayuda a controlar la presión interna del reactor nuclear y su temperatura. El refrigerante puede ser agua destilada o salina procedente de algún cuerpo de agua externo (no está en contacto directo con el material radiactivo).
- *El moderador.* Cuya función es reducir la velocidad de los neutrones térmicos (lentos) que se originan durante la fisión para propiciar una reacción nuclear controlada. Entre los distintos tipos de moderador que pueden utilizarse se encuentran el agua corriente, el agua pesada (óxido de deuterio) y el grafito.
- *Las barras de control.* Tienen la función de disminuir el número de neutrones que son generados durante la fisión nuclear mediante su absorción, un proceso conocido como “captura neutrónica”. De esta manera se controla el número de reacciones que tienen lugar, con lo que se evita una reacción en cadena que provocaría la explosión del reactor. El material de estas barras de control es carburo de boro ( $B_4C$ ); el boro absorbe los neutrones.
- En el núcleo del reactor se encuentran las barras de uranio y el blindaje. Entre los materiales más utilizados para éste destacan el hormigón y el plomo, que reducen el riesgo de escape hacia el exterior de las radiaciones gamma y neutrónicas de gran poder de penetración.

**FIGURA 33. ESQUEMA GENERAL DE UNA CENTRAL NUCLEAR**

**Fuente:** elaboración propia.

Dependiendo de la combinación de los elementos anteriores y los procesos involucrados, se tendrá un tipo de reactor u otro. De acuerdo con la clasificación de la ONU existen cuatro tipos de reactores nucleares:

- *Reactor de grafito (g)*. El moderador es grafito. Forman parte de la Generación I de reactores y son usados principalmente en Rusia.
- *HWR (Heavy Water Reactor)*. Reactor de agua pesada presurizada. Conocido como CANDU. Existen en Canadá y la India. Forman parte de la Generación II.
- *LWR (Light Water Reactor)*. Reactor de agua ligera. A su vez pueden ser de dos tipos: reactores de agua en ebullición (BWR), donde la ebullición se lleva a cabo dentro del propio reactor; y reactores de agua a presión, (PWR) en los que el reactor y el generador de vapor se encuentran por separado. El primero es utilizado en los Estados Unidos, Japón y Suecia,

- y el segundo en casi todos los países. Forman parte de la Generación II y III de reactores y representan el 84% de los reactores en operación.
- FBR (*Fast Breeder Reactor*). Reactor reproductor rápido. Es un reactor que utiliza neutrones rápidos para generar más combustible nuclear del que consume mientras genera energía. Son prototipos de la Generación IV de reactores que pueden utilizar también  $^{232}\text{Th}$  y  $^{238}\text{U}$ .
  - La tabla 5 resume las diferentes características de cada tipo.

**TABLA 5. CARACTERÍSTICAS DE LOS DIFERENTES TIPOS DE REACTORES NUCLEARES**

Tipo de reactor	lwr (Reactor de Agua Ligera)	hwr (Reactor de Agua Pesada)	Reactor de grafito-gas	fbr (Reactor reproductor rápido)
Moderador	Agua corriente	Agua pesada	Grafito	No necesita
Refrigerante	Agua corriente	Agua pesada	CO <sub>2</sub> o Helio	Sodio líquido
Combustible	Uranio enriquecido	Uranio natural	Uranio enriquecido	Plutonio
Características	Dos tipos: BWR: reactor de agua en ebullición. PWR: reactor de agua a presión	También conocido como CANDU	Dos tipos: AGR → CO <sub>2</sub> HTGR → Helio	Utilizan neutrones rápidos en lugar de térmicos

**Fuente:** elaboración propia con información de la World Nuclear Association (2022).

Dependiendo del tipo de reactor nuclear las barras de combustible se van intercambiando cada uno o dos años. Para ello se lleva a cabo un proceso que puede durar alrededor de 30 días, ya que implica una gran cantidad de trabajos de mantenimiento, prevención e inspecciones. Lo que se hace es detener la central y esperar el tiempo pertinente para el enfriamiento del reactor. Posteriormente, se abre la vasija del reactor y se procede a la extracción de las barras más antiguas que se ubican en el centro, se reubican las otras desplazándolas hacia el centro y se incorporan nuevas varillas de combustible.

## 6.6 VENTAJAS DE LA ENERGÍA NUCLEAR

Uno de los argumentos de los defensores de la energía nuclear es que, desde un punto de vista exclusivamente técnico, la energía nuclear está muy por encima de las fuentes renovables en cuanto a densidad energética y factor de planta. La densidad es también superior a la de los combustibles fósiles, ya que un pellet de combustible

nuclear (5g) equivale a 565 litros de petróleo, una tonelada de carbón o 480 m<sup>3</sup> de gas natural. Se estima que la densidad energética del combustible nuclear es hasta seis órdenes de magnitud mayor que la de los combustibles fósiles y cerca de ocho veces la de las fuentes renovables.

Por otro lado, el factor de planta (el tiempo en el que reactor puede funcionar a su capacidad máxima) es cercano al 92 % (EIA, 2022), dado que una central nuclear tiene poca flexibilidad por lo que funciona casi constantemente a su capacidad nominal. Si bien esto permite que la fuente nuclear se use como carga base en el sistema eléctrico, también limita su uso para soportar las variaciones de la demanda. Por otro lado, al considerar que las plantas nucleares no tienen emisiones de gases de efecto invernadero durante su operación, se ha promovido como una fuente “limpia” que puede contribuir a la mitigación del cambio climático.

## 6.7 PROBLEMAS DE LA ENERGÍA NUCLEAR

A pesar de su alta densidad energética y de la ausencia de emisiones de GEI durante la generación eléctrica, la fuente nuclear presenta también varios problemas y limitaciones que vamos a analizar en este apartado.

### Disponibilidad del combustible

La energía nuclear es una fuente no renovable, ya que el combustible se produce a partir de minerales de uranio, cuyas reservas son finitas. Los yacimientos con características adecuadas se encuentran en pocos lugares del planeta y el pico de la producción de uranio se alcanzó en 1980 con casi 70 000 toneladas/año. Después de la disminución que siguió a la caída de la URSS –entonces el mayor productor– hubo un repunte, seguido por un segundo pico en el 2016 de alrededor de 62 000 toneladas/año. Desde entonces la producción ha bajado y fue de cerca de 48 000 toneladas/año en el 2021 (World Nuclear Association, 2023).

Desde 1991, la extracción de uranio es inferior a los requerimientos mundiales para los reactores nucleares, con la excepción del 2016, año en el que se llegó a un equilibrio. El déficit se ha estado cubriendo con los inventarios disponibles a partir de reprocesamiento del plutonio procedente del desmantelamiento de las armas nucleares (particularmente de la ex Unión Soviética) y, en menor medida, con el reciclaje del combustible agotado. Sin embargo, se estima que para cumplir con los requerimientos mundiales hasta el 2040 se consumiría alrededor del 87 % de la base total de recursos identificados en 2019 (Grancea et al., 2020).

## Gestión de residuos

Uno de los principales problemas de la energía nuclear es la gestión de los residuos, dado que se trata de material que puede emitir radiaciones por miles de años. Inicialmente el combustible que ha sido retirado del reactor es almacenado en lo que se conoce como piscinas de enfriamiento, que se construyen con concreto armado y se llenan de agua ligera que absorbe la radiación alpha, beta, gamma y neutrónica. Permanecen en este lugar un mínimo de cinco y un máximo de diez años, y una vez cumplido este periodo conducen a un doble problema, de tiempo y espacio, para almacenar los residuos radiactivos gastados dependiendo de su nivel de actividad radiactiva.

- *Residuo de alta actividad (RAA)*. Son aquellos que contienen concentraciones apreciables de radionucleidos emisores alfa de vida larga o emisores beta-gamma con periodos de semidesintegración superiores a 30 años. Se estima que representan el 3 % del total de los residuos, pero concentran el 95 % de la radioactividad asociada a los residuos. Se almacenan, en primera instancia, en las piscinas y en sitios de Almacenamiento Temporal Intermedio (ATI) de las centrales nucleares mientras siguen su decaimiento radiactivo por un periodo de 50 años. Posteriormente se destinan a un Almacenamiento Geológico Profundo (AGP), que son áreas subterráneas en las que la roca presenta baja o nula permeabilidad.
- *Residuo de media y baja actividad (RMBA)*. Son aquellos cuya actividad se debe principalmente a la presencia de isótopos radiactivos de periodo de semidesintegración corto o medio (inferior a 30 años). Constituyen el 7 % del total de los residuos y el 4 % de la radioactividad. Se disponen en sitios de Almacenamiento Temporal Centralizado (ATC).
- *Residuo de baja y muy baja actividad (RBBA)*: proceden de las actividades mineras y de fabricación de concentrados de uranio. Representan el 90 % del total de los residuos, pero sólo el 1 % de la radioactividad. Por su naturaleza se estabilizan *in situ* en los emplazamientos mineros.

En la actualidad los residuos de alta actividad, en su gran mayoría, siguen estando confinados en las piscinas de las centrales o en contenedores temporales adaptados en las propias centrales a la espera de ser llevados a su emplazamiento final en los AGP. Desde hace ya treinta años una serie de países están uniendo esfuerzos a través de proyectos interdisciplinarios para ubicar y desarrollar los sitios de AGP, que han de garantizar un confinamiento con múltiples barreras de protección para miles de años. Sin embargo, a excepción del sitio de Onkalo, en Finlandia no hay

ningún AGP operando en el mundo. Mientras tanto, lo que se está haciendo es seguir ampliando los ATIS (Almacenamientos Temporales Individualizados).

Una parte de estos residuos es reprocesada, lo que permite recuperar una cantidad significativa de plutonio del combustible usado, que luego se mezcla con óxido de uranio empobrecido para producir combustible nuevo. La Agencia Internacional de Energía Atómica estima que aproximadamente el 32% de los residuos de alta actividad generados desde la llegada de la producción de energía nuclear civil han sido reprocesado (IAEA, 2022).

En lo que respecta a los residuos de media, baja y muy baja radiactividad, se almacenan en centros de almacenamiento. Hay que hacer hincapié en que no todos los países que operan centrales nucleares disponen de estos almacenamientos finales, lo que implica un gran riesgo para la población en general.

### Requerimiento de materiales

Como sucede con las fuentes renovables, la infraestructura para el aprovechamiento de la energía nuclear depende fuertemente de los combustibles fósiles, necesarios para la producción del combustible y para la construcción de la planta. Como hemos visto, el combustible nuclear debe fabricarse a partir de la extracción y concentración del uranio. Esto requiere un largo proceso que involucra minería y procesado, cuyo insumo energético implica grandes cantidades de energía de origen fósil.

Asimismo, la construcción de las centrales nucleares, su posterior desmantelamiento y la disposición a largo plazo de los residuos requiere también de ingentes cantidades de energía fósil, así como de cemento, acero y otros materiales de intenso consumo de hidrocarburos. Tan solo el edificio que protege el reactor nuclear es una bóveda de contención con un muro doble de hormigón armado con espesor de 1.3 m cada uno. El blindaje del muro exterior está diseñado a prueba de colisiones aéreas, tanto de aviones militares como de grandes aviones comerciales. La altura del edificio de contención es del orden de 63 m y el ancho del edificio de contención es del orden de 49 m. Otras partes de las centrales que utilizan grandes cantidades de concreto son las torres de enfriamiento.

### Costos de la fuente nuclear

La construcción de una planta nuclear requiere grandes capitales y largos periodos. Las inversiones iniciales, asociados a la preparación del sitio, su ingeniería, fabricación, construcción y puesta en marcha son mucho mayores que los costos operativos relacionados con la adquisición del combustible, el mantenimiento y la disposición de los residuos radiactivos. Esto se debe a que las centrales nucleares son

técnicamente muy complejas y deben cumplir estrictos requisitos de seguridad en términos de licencia y de diseño.

Por otro lado, el tiempo que lleva la puesta en marcha de una central desde su diseño hasta su operación es del orden de diez años, lo que agrava los costos de financiación, que pueden llegar a ser significativos. La construcción de centrales nucleares es típica de grandes proyectos de infraestructura donde los costos y tiempos de entrega tienden a subestimarse.

## 6.8 PANORAMA MUNDIAL DE LA ENERGÍA NUCLEAR

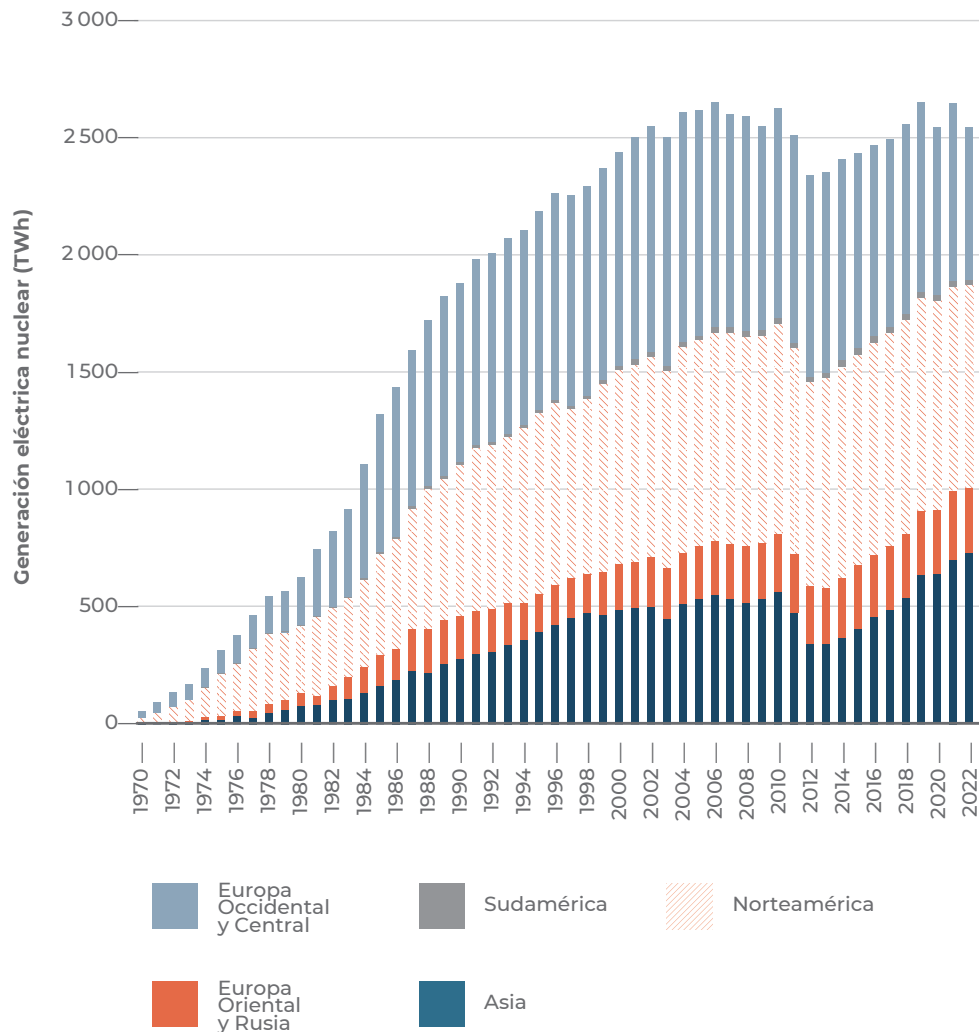
A nivel mundial, el primer reactor nuclear a gran escala fue el Chicago Pile-1, que alcanzó el punto crítico de generación el 2 de diciembre de 1942. Lamentablemente el reactor se construyó para fines militares en el conocido Proyecto Manhattan, con el fin de reutilizar el plutonio generado como subproducto de la fisión del  $^{235}\text{U}$  para construir las primeras armas nucleares, empleadas por los Estados Unidos para destruir las ciudades de Hiroshima y Nagasaki el 6 y 9 de agosto de 1945, respectivamente.

Después de la guerra, y a partir de la propuesta de la campaña “Átomos para la Paz” del presidente de los Estados Unidos, Dwight D. Eisenhower, se impulsó la utilización del uranio como fuente de energía eléctrica. Sin embargo, fue la Unión Soviética, con el reactor Obninsk, en 1954, la que puso en marcha la primera central nuclear del mundo conectada a la red eléctrica. Desde entonces, la construcción de reactores nucleares y la consecuente generación eléctrica empezó lentamente.

A partir de las crisis petroleras de principio de los años 70 creció a un ritmo mayor, hasta alcanzar una meseta en la primera década del siglo xx (figura 34). Como consecuencia del desastre de Fukushima, ocurrido en el 2011, se dio una disminución, principalmente en Japón, y no fue sino hasta el final de la década pasada que se recuperaron los valores anteriores.

En la actualidad, existen en el mundo 440 reactores nucleares. Los principales países que cuentan con reactores nucleares son los Estados Unidos, con 96; Francia, con 58; China, con 47; Rusia, con 38; Japón, con 33; Corea del Sur, con 24; la India, con 22, y Canadá, con 19. México cuenta con dos reactores en la central nucleoelectrónica de Laguna Verde, Veracruz, que opera desde 1990. A pesar de que hay países que están pensando en el cierre definitivo de sus centrales nucleares –como Italia, Alemania y España–, otros países están construyendo nuevas plantas nucleares. En total, hay 54 plantas en construcción y 119 que se están planeando.

**FIGURA 34. GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD MUNDIAL POR MEDIO DE ENERGÍA NUCLEAR**



**Fuente:** World Nuclear Association (2023).

Cabe mencionar que, en la actualidad, la fuente nuclear proporciona el 10 % de la electricidad mundial. En 2022, 13 países produjeron al menos una cuarta parte de su electricidad a partir de energía nuclear. Destaca entre ellos Francia, que obtiene alrededor del 7% de su energía de esta fuente, mientras que Eslovaquia, Bélgica y Hungría obtienen de ella aproximadamente la mitad.

## 6.9 ACTIVIDADES Y ESTRATEGIAS SUGERIDAS

**Actividad 1. Decaimiento radiactivo**

El periodo de semidesintegración del  $^{226}\text{Ra}$  es de 1620 años.

- Aplicar la ley de decaimiento radiactivo y calcular el tiempo necesario para que la actividad de una muestra de 1g de  $^{226}\text{Ra}$  quede reducida a un dieciseisavo de su valor original.

DATOS	CONSIDERACIONES PREVIAS
Periodo de semi-desintegración:	El periodo de semidesintegración es el tiempo que tarda en decaer la mitad de la cantidad original:
$\tau_{1/2} (^{226}\text{Ra}) = 1620$ años.	$t = t_{1/2} = \tau_{1/2}$
Valor de decaimiento:	Esto se cumple cuando el decaimiento es a la mitad:
$N = N_0/16$	$N = N_0/2$
	En primer lugar, se calcula el tiempo de semidesintegración:
	$\frac{N_0}{2} = N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot \tau_{1/2}}$
	$\frac{1}{2} = e^{-\lambda \cdot \tau_{1/2}}$
	$2 = e^{-\lambda \cdot \tau_{1/2}}$
	Al aplicar logaritmos se obtiene:
	$\ln 2 = \ln e^{\lambda \cdot \tau_{1/2}}$
	$\ln 2 = \lambda \cdot \tau_{1/2}$
	$\tau_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}$

## FÓRMULA

La expresión para el decaimiento radiactivo es la siguiente:

$$N = N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t}$$

donde:  $N_0$  es la cantidad inicial del radioisótopo,  $\lambda$  es la constante de decaimiento y  $t$  es el tiempo de desintegración.

$$\tau_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}$$

donde:  $\tau_{1/2}$  es el periodo de semidesintegración.

## RESOLUCIÓN

Para calcular la constante de decaimiento, se ha de calcular su periodo de semidesintegración en s:

$$1620 \text{ años} \cdot \frac{365 \text{ días}}{1 \text{ año}} \cdot \frac{24 \text{ h}}{1 \text{ día}} \cdot \frac{3600 \text{ s}}{1 \text{ h}} = 5.1 \cdot 10^{10} \text{ s}$$

A continuación, se calcula la constante de decaimiento:

$$\lambda = \frac{\ln 2}{\tau_{1/2}} = \frac{\ln 2}{5.1 \cdot 10^{10} \text{ s}} = 1.36 \cdot 10^{-11} \text{ s}^{-1}$$

Finalmente, se calcula el tiempo que tarda en decaer 1/16 de 1 g de  $^{226}\text{Ra}$ :

$$N = N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t}$$

$$\frac{N}{N_0} = e^{-\lambda \cdot t}$$

$$\frac{N_0}{N} = e^{\lambda \cdot t}$$

Aplicando logaritmos se obtiene:

$$\ln \frac{N_0}{N} = \ln e^{\lambda \cdot t} = \lambda \cdot t$$

$$t = \frac{1}{\lambda} = \ln \frac{N_0}{N}$$

Si se sustituye:  $N = 1/16$  de  $N_0$  entonces se obtiene:

$$t = \frac{1}{\lambda} = \ln \frac{N_0}{N_0/16}$$

$$t = \frac{1}{\lambda} = \ln 16$$

$$t = \frac{1}{1.36 \cdot 10^{-11}} \cdot \ln 16 = 12.04 \cdot 10^{11} \text{ s}$$

### Actividad 2. Reacción de fisión

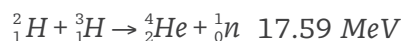
- Calcular la energía liberada en la reacción de fisión siguiente:



DATOS	CONSIDERACIONES PREVIAS
<p>Masas atómicas:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>M({}_0^1\text{n}) = 1.0087 \text{ UMA}</math></li> <li>• <math>M({}_{92}^{235}\text{U}) = 235.0439 \text{ UMA}</math></li> <li>• <math>M({}_{56}^{141}\text{Ba}) = 141.0000 \text{ UMA}</math></li> <li>• <math>M({}_{36}^{92}\text{Kr}) = 92.0000 \text{ UMA}</math></li> </ul> <p>Conversiones:</p> <p>1 e- = <math>-1.6605 \times 10^{-19} \text{ C}</math>                      1 uma = <math>1.6605 \times 10^{-27} \text{ kg}</math>                      1 eV = <math>1,6 \times 10^{-19} \text{ J}</math>                      1 uma = 931.5 MeV</p>	${}_0^1\text{n} + {}_{92}^{235}\text{U} \rightarrow {}_{56}^{141}\text{Ba} + {}_{36}^{92}\text{Kr} + 3 {}_0^1\text{n}$ <p>En este caso hay que tener en cuenta los 3 neutrones que se liberan como resultado de la reacción de fisión.</p>
FÓRMULA	RESOLUCIÓN
$\Delta m = [m({}_{56}^{141}\text{Ba}) + m({}_{36}^{92}\text{Kr}) + 3 \cdot m({}_0^1\text{n})] - [m({}_0^1\text{n}) + m({}_{92}^{235}\text{U})]$	<p>Para calcular la energía que se libera en la reacción de fisión que se plantea se debe de obtener el defecto de masa que se produce en ese rompimiento del núcleo; esto es:</p> $m = [141 + 92 - 3 \cdot (1.0087)] - [1.0087 + 235.0439] = -0.0265 \text{ UMA}$ <p>Sabiendo que 1 uma = 931.5 MeV, entonces:</p> $-0.0265 \text{ UMA} \cdot \frac{931.5 \text{ MeV}}{1 \text{ UMA}} = -24.68 \text{ MeV}$ <p>Sería la energía que es liberada por dicho átomo durante su fisión.</p>

### Actividad 3. Comparación entre la energía liberada por reacciones nucleares y químicas

- Compara la energía liberada por 1 g de deuterio en una reacción nuclear de fisión:



Con la de 1 g de uranio en la reacción nuclear de fisión anterior:



- Compárala también con la que se obtendría al quemar 1 g de carbón de acuerdo con la reacción siguiente:



DATOS	CONSIDERACIONES PREVIAS
<p>Calor combustión:  <math>Q_{\text{Reacción}} = 394 \text{ KJ/mol}</math> para la combustión del C.</p> <p>Conversiones:</p> <p>1 e- = <math>-1.6605 \times 10^{-19} \text{ C}</math>            1 uma = <math>1.6605 \times 10^{-27} \text{ kg}</math>            1 eV = <math>1,6 \times 10^{-19} \text{ J}</math>            1 uma = 931.5 MeV</p>	<p>Se tienen las reacciones nucleares de fisión y fusión siguientes:</p> ${}_1^2\text{H} + {}_1^3\text{H} \rightarrow {}_2^4\text{He} + {}_0^1\text{n}$ ${}_0^1\text{n} + {}_{92}^{235}\text{U} \rightarrow {}_{56}^{141}\text{Ba} + {}_{36}^{92}\text{Kr} + 3 {}_0^1\text{n}$ <p>Y la reacción química de combustión:</p> $\text{C}_{(s)} + \text{O}_{2(g)} \rightarrow \text{CO}_{2(g)}$

DATOS	CONSIDERACIONES PREVIAS
<p><math>E_{{}_1^2\text{H}} = 17.51 \text{ MeV}</math></p> <p><math>E_{{}_92^{235}\text{U}} = 24.68 \text{ MeV}</math></p>	<p>En primer lugar, se calcula la cantidad de átomos que hay en 1 g de cada uno de los elementos mencionados:</p> $1 \text{ g } {}_1^2\text{H} \cdot \frac{1 \text{ mol } {}_1^2\text{H}}{2.0141 \text{ UMA}} \cdot \frac{6.023 \cdot 10^{23} \text{ átomos}}{1 \text{ mol } {}_1^2\text{H}} = 2.98 \cdot 10^{23}$ $1 \text{ g } {}_{92}^{235}\text{U} \cdot \frac{1 \text{ mol } {}_{92}^{235}\text{U}}{235.0439 \text{ UMA}} \cdot \frac{6.023 \cdot 10^{23} \text{ átomos}}{1 \text{ mol } {}_{92}^{235}\text{U}} = 0.025 \cdot 10^{23}$ <p>En segundo lugar, se calcula la energía liberada en las reacciones nucleares propuestas sabiendo la energía que se libera para 1 átomo (calculadas en los ejercicios anteriores):</p> $E_{{}_1^2\text{H}} = 17.51 \cdot 2.98 \cdot 10^{23} = 52.33 \cdot 10^{23} \text{ MeV}$ $E_{{}_92^{235}\text{U}} = 24.68 \cdot 0.025 \cdot 10^{23} = 0.632 \cdot 10^{23} \text{ MeV}$

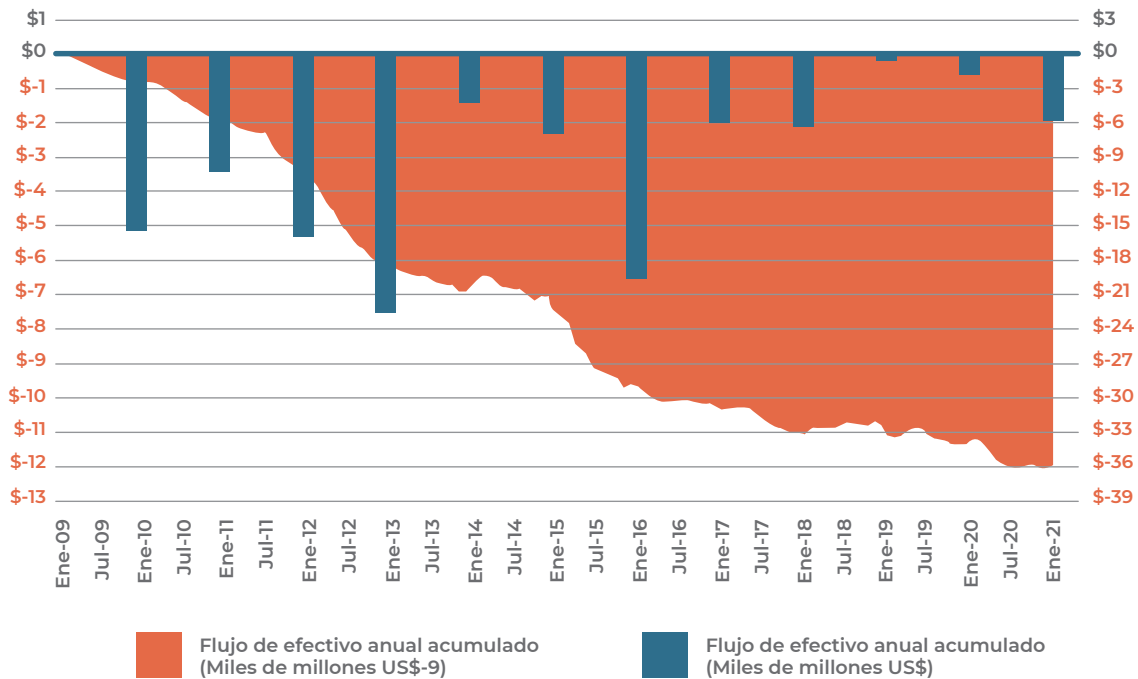
DATOS	CONSIDERACIONES PREVIAS
	<p>En tercer lugar, se calcula la energía liberada por 1 g de C en la reacción de combustión:</p> $1 \text{ g C} \cdot \frac{1 \text{ mol C}}{12 \text{ UMA}} \cdot \frac{394 \cdot 10^3 \text{ J}}{1 \text{ mol C}} \cdot \frac{1 \text{ eV}}{1.6 \cdot 10^{-19} \text{ J}} \cdot \frac{1 \text{ MeV}}{10^6 \text{ eV}} = 20.52$ <p>Finalmente, se compara las energías liberadas entre sí:</p> $\frac{E_{\text{Fusión}}}{E_{\text{Fisión}}} = \frac{52.33 \cdot 10^{23}}{0.632 \cdot 10^{23}} = 89.13 \text{ MeV}$ $\frac{E_{\text{Fusión}}}{E_{\text{Combustión}}} = \frac{52.33 \cdot 10^{23}}{20.52 \cdot 10^{16}} = 2.55 \cdot 10^7 \text{ MeV}$ <p>Por ende, una reacción nuclear es <math>10^7</math> veces más grande que una de combustión (reacción química).</p>

## 6.10 REFLEXIONES FINALES

### Petróleo no convencional

Revisa la imagen de la figura 35:

**FIGURA 35.** FLUJO DE EFECTIVO NETO POR AÑO (ESCALA DE LA IZQUIERDA) Y ACUMULADO (ESCALA DE LA DERECHA) PARA COMPAÑÍAS DE PETRÓLEO DE LUTITAS OPERANDO EN EL PLAY BAKKEN DESDE ENERO 2009 A DICIEMBRE 2020



**Fuente:** con información de Fractional Flow.<sup>1</sup>

#### Pregunta guía:

- ¿Por qué se ha invertido tanto en este recurso si las empresas de gas y petróleo de lutitas de los EE. UU. se han endeudado crecientemente en los últimos 10 años?

Sugerencia: Compara el precio de venta del petróleo con el costo de extracción de petróleo de lutitas y observa si hay relación con lo que muestra la figura.

<sup>1</sup> Fractional Flow. <https://runelikvern.com/>

## Posible explicación

Como se puede observar para el caso del Bakken, el flujo de efectivo de las empresas de gas y petróleo de lutitas que allí operan siempre ha sido negativo, eso implica que sus deudas han crecido constantemente. Esto ocurre porque el petróleo de lutitas tiene altos costos de extracción y se vende con descuento. Si bien las empresas han estado pagando dividendos a los accionistas y los intereses a los bancos no han estado repagando la deuda del capital.

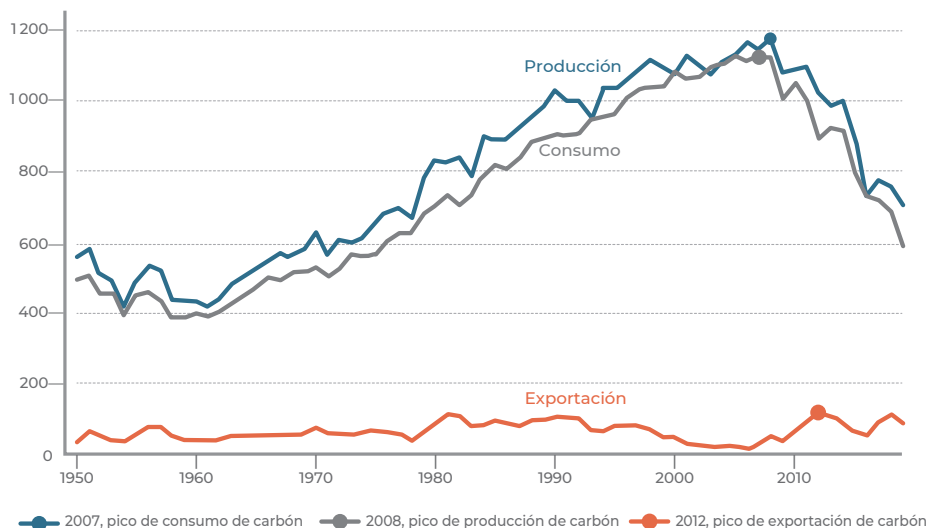
Entonces, ¿por qué ha habido toda esta inversión?

La respuesta tiene que ver con el retorno de esta inversión. A raíz de la crisis financiera del 2008 la Reserva Federal de los Estados Unidos (el equivalente el Banco Central), bajó la tasa de interés al 0.2%. Sin embargo, las empresas de *fracking*, que estaban cotizando en la bolsa, ofrecían entre el 6% y 8% de interés, de ahí que los especuladores, pero también inversionistas institucionales, prefiriesen invertir mejor en estas empresas, ya que en el corto plazo no parecían presentar problemas dada la narrativa oficial de que los Estados Unidos tenía petróleo no convencional por muchas décadas. Sin embargo, con la caída de los precios del crudo en 2015 y, posteriormente, con la pandemia, varias empresas quebraron.

## Consumo de carbón en los Estados Unidos

Observa la producción histórica de carbón de los EE. UU. (figura 36)

**FIGURA 36. PRODUCCIÓN Y CONSUMO DE CARBÓN EN LOS ESTADOS UNIDOS ENTRE 1950 Y 2019**



Fuente: EIA (2019).

## Preguntas guía:

- Se afirma que el carbón se está abandonando por ser un combustible sucio. ¿Crees que ésta es la razón principal o hay otras causas?

## Sugerencia:

Toma en cuenta los siguientes factores:

- Observa cuándo ocurrió el pico de la producción y consumo.
- Revisa cómo ha crecido la producción de gas natural de los Estados Unidos en el mismo periodo.
- Revisa en la página de Wikipedia el contenido calórico de cada tipo de carbón y observa cómo ha cambiado la producción por tipo.<sup>2</sup>

## Accidentes nucleares

La mala fama de la energía nuclear proviene de los accidentes ocurridos a nivel mundial y de su vinculación con la industria armamentística. En la figura 37 se explica la escala utilizada para clasificar los accidentes nucleares con base en las consecuencias asociadas, lo que te ayudará en la reflexión que se plantea más adelante.

**FIGURA 37. ESCALA INES (INTERNATIONAL NUCLEAR EVENT SCALE) DE LA ORGANIZACIÓN INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA**



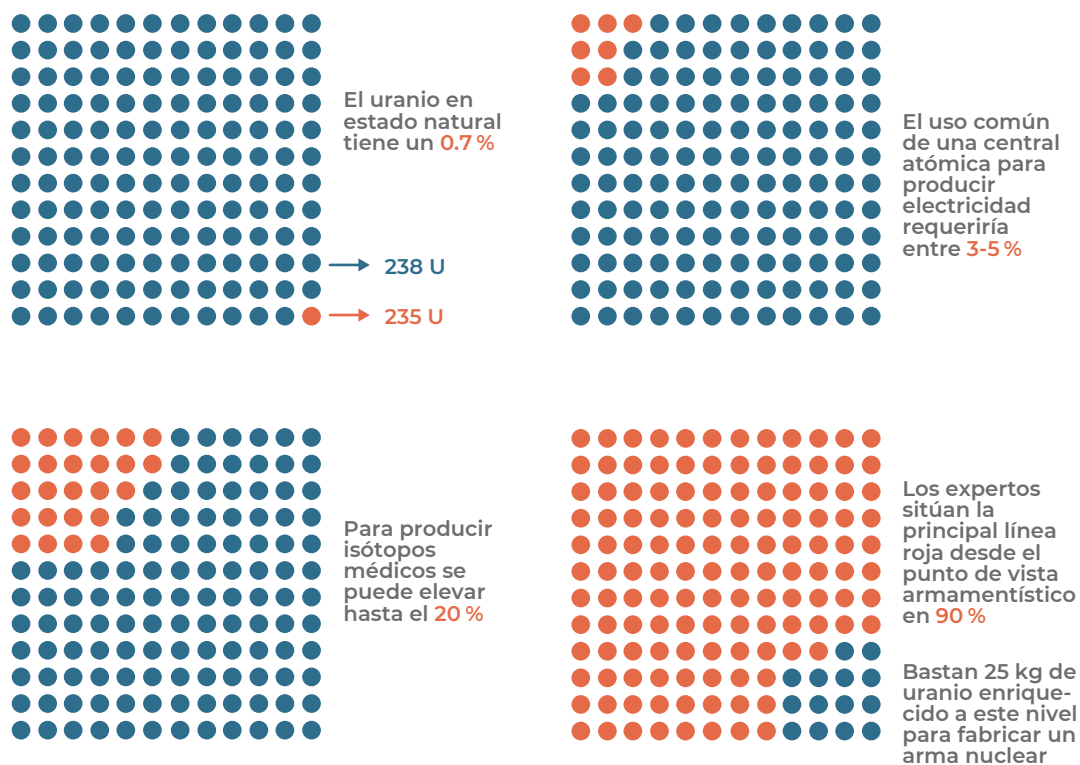
Fuente: IAEA (1990).

<sup>2</sup> Coal mining in the United States. [https://en.wikipedia.org/wiki/Coal\\_mining\\_in\\_the\\_United\\_States](https://en.wikipedia.org/wiki/Coal_mining_in_the_United_States)

## Enriquecimiento del $^{235}\text{U}$ - usos civiles y militares

Observa las gráficas de la figura 38 y realiza un análisis crítico-reflexivo:

**FIGURA 38. ENRIQUECIMIENTO DE URANIO PARA DIFERENTES USOS**



**Fuente:** Europa Press Internacional (2023).

- Para enriquecer el uranio que se extrae de los yacimientos en la actualidad se ha de pasar del 0.7% de  $^{235}\text{U}$  (gráfica 1) al 3 o 5% de concentración (gráfica 2), dependiendo del tipo de central nuclear.
- Para otros usos civiles, principalmente en el sector salud, se puede llegar al 20% (gráfica 3)
- En cambio, para la industria de las armas nucleares es del orden del 90% o más (gráfica 4).

**Preguntas guía:**

- ¿Qué opinas sobre la energía nuclear?
- ¿Qué sabes de la industria armamentística?

- ¿Tu opinión está más basada en los accidentes acontecidos en las centrales nucleares, en la industria armamentística o en el conocimiento de la energía nuclear?
- Indica aquellos accidentes nucleares que recuerdes sin buscar en la red. ¿Qué es lo que sabes de cada uno de ellos?
- ¿Se trata de una información basada en datos técnicos o es un discurso escuchado y recordado de los medios de comunicación o “del boca en boca”?
- Elabora una tabla en la que sintetices los accidentes acontecidos, las causas, el nivel de la escala INES, las muertes asociadas directa o indirectamente.
- Con base en lo anterior, ahora ya con información completa, reflexiona sobre la energía nuclear y la interacción del ser humano con ella.







# 7. Fuentes renovables

## 7.1 APRENDIZAJES ESPERADOS

El presente capítulo explica las fuentes de energía renovable a lo largo de su ciclo de vida. A partir del contenido aquí propuesto las y los estudiantes serán capaces de conocer y comprender las distintas fuentes de energía renovables, lo que le permitirá disponer de mayores y mejores argumentos para analizar el futuro energético mundial.

Entre los aprendizajes esperados se encuentran:

- Conocer las principales características de cada fuente y sus tecnologías de aprovechamiento en la historia, hasta la era moderna.
- Propiciar la reflexión acerca de las ventajas y desventajas de cada fuente renovable.
- Conocer la situación actual en cuanto al uso de las fuentes renovables en el mundo, así como los límites a su despliegue.

## 7.2 LAS FUENTES RENOVABLES ANTES DE LA ELECTRICIDAD

Antes del descubrimiento de los combustibles fósiles la humanidad utilizó fuentes renovables de energía. En contraste con el uso que se hacía antes de ellas, en la actualidad sirven principalmente para producir electricidad; en épocas anteriores su uso era directo, se utilizaban como fuente de calor y para generar energía mecánica. En este primer apartado examinaremos el uso histórico de estas fuentes, ya que, como veremos más adelante, el abandono de los combustibles fósiles por su agotamiento y su impacto ambiental hace necesario reconsiderar tecnologías antiguas.

## Energía hidráulica tradicional

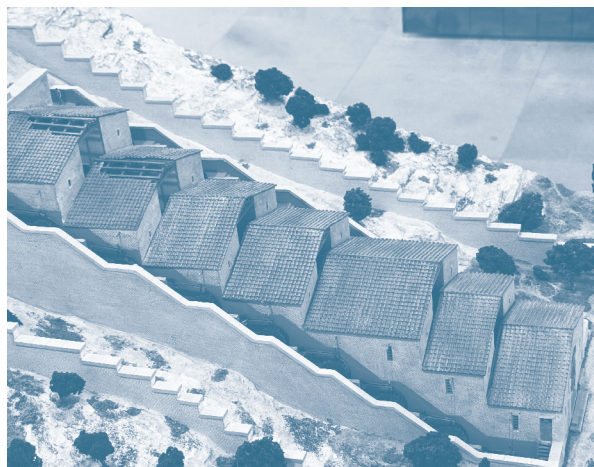
El uso del agua como energía mecánica para mover los molinos en los que se tritura el trigo se remonta a la época de los griegos, algo que quedó plasmado en *La Odisea*, de Homero, obra del siglo VIII a.C. (Angelakis et al., 2022).

Posteriormente, se extendió su uso al imperio romano tal y como quedó registrado en los libros de arquitectura del gran arquitecto Vitrubio. Uno de los molinos de agua más complejos que existieron durante la época romana es el que se encuentra en Barbegal, al sur de Francia, formado por 16 molinos de agua organizados en serie (figura 39A).

Se tiene evidencia de la existencia de molinos de agua en el pasado en múltiples civilizaciones. La gran civilización china, reconocida por sus grandes inventos, contaba no sólo con molinos de agua, sino con bombas de cadena para regar los grandes campos de arroz. Otros ejemplos de civilizaciones en las que los molinos de agua fueron utilizados para moler el grano son la persa (actual Irán), que habitó Harappan (actual Pakistán), la India del periodo Védico (entre el 3000 a.C. y el 2000 a.C.), así como algunas antiguas civilizaciones islámicas.

En la actualidad todavía se pueden encontrar en operación molinos de agua contruidos siguiendo principios tecnológicos antiguos (figura 39B) que aún sirven para la molienda, lo que nos demuestra que, para la pequeña escala, estas estructuras antiguas son una opción multifuncional y muy útil para la realización de trabajo aprovechando las fuerzas naturales.

**FIGURA 39. MOLINOS DE AGUA TRADICIONALES**



A) Barbegal, Francia.



B) Tannehill, Alabama.

Fuente: Pixabay.

## Energía geotérmica tradicional

La energía geotérmica forma parte de la historia de nuestra civilización (Kepinska, 2004), principalmente en aquellos puntos de la Tierra cercanos a manifestaciones geotermales en los que las personas pueden aprovechar estos recursos para su cuidado higiénico y para la cocción de manera natural, de la misma manera en que se utiliza el agua, el aire y el sol. Los primeros usos se remontan al periodo del Paleolítico (14000 a.C.) en la región de Turquía, donde se originaron los baños turcos que más tarde utilizarían también los romanos (figura 40).

Asimismo, del Neolítico (entre el 7000 y el 3000 a.C.) se encontraron evidencias arqueológicas del uso de aguas termales. Existen vestigios también de su uso terapéutico en los balnearios de lo que actualmente es Grecia, mismos que aparecieron en los relatos mitológicos de Homero e Hipócrates. A los antiguos griegos se debe el origen de la balneología como ciencia (Kepinska, 2004).

En la edad de Bronce (entre el 3000 y el 700 A.C.), los etruscos basaron el desarrollo de su civilización en la “industria geotérmica”. Este pueblo también comenzó a desarrollar la minería; explotó alumbre, caolín, hierro, óxidos, sulfuros, sílice, travertinos y lodos termominerales. Estos minerales se usaban para fabricar esmalte, cerámica, pinturas, vidrio, telas, ungüentos y medicinas. La cerámica la cubrían con esmalte que se elaboraba con bórax recuperado de los manantiales boracíferos, todavía activos en Larderello, Italia. Con la llegada de los romanos se comenzaron a construir baños y centros de *spa*, esto es, *salus per aquam*, cuyas finalidades eran el lavado, el descanso, el deporte y la relajación. Pronto, estos lugares se convirtieron en sitios idóneos para tratar temas políticos y de negocios.

Una de las regiones geotérmicas más espectaculares del planeta es la del Gran Rift del este de África, donde se encuentran volcanes activos, lagos volcánicos y manantiales termales que fueron utilizados como lugares sagrados de importancia espiritual. Entre las leyendas que antiguamente se originaron en estos lugares, se encuentra una de las versiones del ave fénix, basada en los flamencos, aves que incuban sus huevos en pequeñas acumulaciones de lodo caliente. Cuando las crías de los flamencos nacen, emergen volando, lo que a la vista parece el resurgir del ave mítica.

**FIGURA 40.** TERRAZAS DE TRAVERTINO FORMADAS POR LA PRECIPITACIÓN DE CALCITA EN PAMUKKALE, TURQUÍA



**Fuente:** Pixabay.<sup>1</sup>

En el caso de algunos pueblos chinos, además de utilizar la energía geotérmica para fines militares y con propósitos recreativos, la usaban en la elaboración de vinos, licores y té, cuyo fin era purificar el cuerpo, además de para otros fines medicinales, como sanar enfermedades de la piel cuando se sumerge a los pacientes en aguas sulfuradas.

Como se puede apreciar, el uso de la energía geotérmica no es algo reciente, sino que se remonta a más de 16000 años atrás. Su uso ha ido ampliándose, siendo la generación eléctrica una de sus últimas aplicaciones.

---

<sup>1</sup> Pixabay. [pixabay.com](https://pixabay.com)

## Energía eólica tradicional

El uso de la energía del viento también es muy antiguo. Según los datos de algunos historiadores hay evidencias del uso de la energía mecánica del viento que se remontan 3000 años en el tiempo. En Egipto, en un lugar cerca de Alejandría, por ejemplo, se utilizó para la molienda de granos.

Después de los egipcios se utilizó la energía eólica en Persia (Irán), donde hay vestigios de molinos cerca de la frontera afgana que datan del año 640 d.C. (figura 41A). En China también se utilizó la energía del viento en ruedas con paletas y un eje vertical para irrigar o drenar los campos de arroz, incluso hasta hace poco más de un siglo (figura 41B). A inicios del siglo xv, en Europa, se desarrollaron molinos de viento provistos de ruedas motrices para el bombeo de agua. Sin embargo, el molino fijo no era apropiado para este propósito.

En Holanda, esta situación inspiró el desarrollo de molinos con una cubierta giratoria que permitía orientar al viento sólo la parte superior del molino (figura 41C). Estos molinos se utilizaron principalmente para el drenaje y más tarde también para la molienda de granos y el aserrado de madera. Hasta finales del siglo xix, los molinos de viento se utilizaban típicamente para la molienda y bombeo de agua en casi toda Europa, desde el Mediterráneo (figura 41D) hasta Escandinavia.

**FIGURA 41. MOLINOS DE VIENTO ANTIGUOS**



**A)** Molinos verticales de la civilización persa (actual Irán).



**B)** Molinos de viento tradicionales de China, a principio del siglo xx.



**C)** Molino giratorio de Kinderdijk, Holanda.



**D)** Molino de viento mediterráneo en Murcia, España.

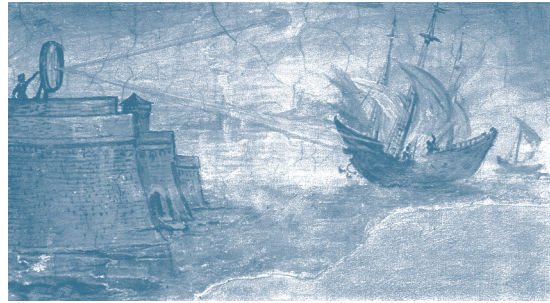
**Fuentes:** A) 1001 Inventions, B) Historical Photographs of China, C) Wikipedia Commons, y D) Rojas y Amezcuca (2005).

### Energía solar tradicional

El conocimiento que permite la manipulación y el uso de la capacidad de los rayos solares para calentar los cuerpos existe desde el inicio de la humanidad. Podemos hallar una de sus aplicaciones más explícitas y antiguas en la arquitectura de la antigua Grecia, allí se aprovechó la capacidad energética solar de forma directa o pasiva, orientando los edificios para aprovechar los rayos solares en invierno.

Asimismo, se comenzaron a utilizar las ventanas de manera estratégica para permitir una mejor entrada de luz solar. A su vez, los romanos implementaron el uso de cristales en viviendas y estructuras agrícolas para atrapar el calor emitido por el Sol durante los días fríos. También reconocieron el efecto invernadero y establecieron los primeros invernaderos para el cultivo de hortalizas.

No fue sino hasta el siglo III a.C. cuando se comenzó a usar la radiación solar de maneras alternativas, entre las que destaca el rayo de calor o *espejo ustorio* de Arquímedes, a quien se le atribuye haber logrado incendiar los barcos romanos en Siracusa usando los rayos solares (figura 42). Para ello construyó un espejo de forma cóncava creado con bronce que se colocaba en lugares estratégicos para captar los rayos solares y direccionarlos a un determinado punto; con ello se alcanzaban temperaturas tan altas que el invento era capaz de incendiar la madera a una distancia de 50 m.

**FIGURA 42. EL ESPEJO USTORIO DE ARQUÍMEDES**

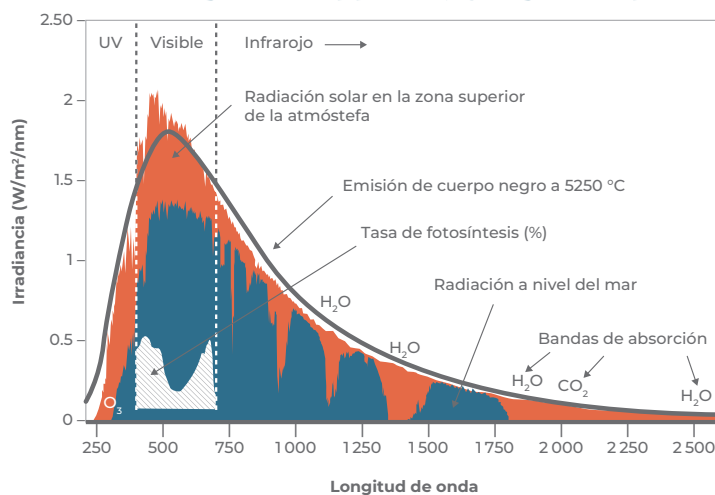
**Nota:** pintura de Giulio Parigi expuesta en la Galería de los Uffizi, Florencia, donde se representa el incendio de una nave romana utilizando un espejo ustorio, durante el sitio de Siracusa.

**Fuente:** Wikipedia Commons.

## 7.3 ENERGÍA SOLAR

### Preguntas e imágenes motivadoras

En la figura 43 se muestra el espectro de la radiación solar que llega a la Tierra.

**FIGURA 43. ESPECTRO DE LA RADIACIÓN SOLAR FUERA DE LA ATMÓSFERA DE LA TIERRA Y A NIVEL DEL MAR**

**Nota:** bajo condiciones de cielo despejado de manera que puede ser aprovechada por la fotosíntesis.

**Fuente:** Naturalmente, ciencias.<sup>2</sup>

<sup>2</sup> Naturalmente, ciencias. <https://naturalmenteciencias.files.wordpress.com/2011/11/espectro-solar-y-fotosíntesis.jpg>

## Sugerencias:

- Averiguar las temperaturas medias del sol y de la Tierra.
- Indagar acerca de la ley de Stefan-Boltzmann.

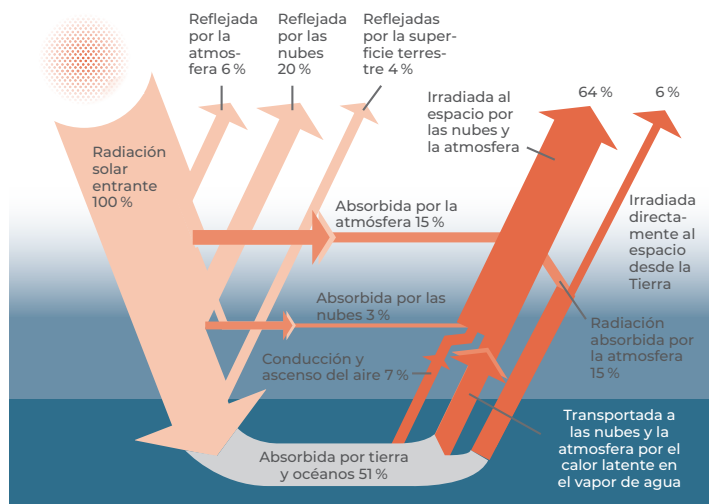
## Preguntas guía:

- ¿A través de qué moléculas absorbe la energía la atmósfera?
- ¿Cuál es la diferencia entre la radiación solar directa, difusa y reflejada?
- ¿Cuál es la expresión del flujo radiante solar y cuál es su valor?
- ¿Cómo se le conoce al flujo radiante solar por unidad de área?
- ¿Qué es el albedo?

## Origen de la radiación solar

Con excepción de la energía nuclear y la geotermia, el resto de las fuentes en la Tierra (eólica, hidráulica, biomasa y combustibles fósiles) tienen su origen en la energía solar, de ahí la importancia de que se analice el balance de la radiación solar que alcanza al planeta (figura 44).

**FIGURA 44. BALANCE ENERGÉTICO DE LA TIERRA**



Fuente: Wikipedia Commons.<sup>3</sup>

<sup>3</sup> Equilibrio térmico de la Tierra. [https://es.wikipedia.org/wiki/Equilibrio\\_t%C3%A9rmico\\_de\\_la\\_Tierra#/media/Archivo:57911main\\_Earth\\_Energy\\_Budget.jpg](https://es.wikipedia.org/wiki/Equilibrio_t%C3%A9rmico_de_la_Tierra#/media/Archivo:57911main_Earth_Energy_Budget.jpg)

Como podemos observar, de la radiación solar que llega al planeta ( $1.74 \cdot 10^{17}$  W) el 30% de la radiación es reflejada (albedo) de la siguiente forma: el 6% por la atmósfera, el 20% por las nubes y el 4% por la superficie terrestre. El 70% de la radiación es absorbida de esta manera: el 16% por la atmósfera, el 3% por las nubes y el 51% por la superficie terrestre y los océanos.

De este 70% de radiación absorbida el 47% sirve para aumentar la energía interna del aire, el agua y la tierra; el 23% provoca la evaporación y precipitación (clima); el 0.21% genera vientos, oleaje y convección. Sólo el 0.023% queda almacenada como energía química en plantas a través del proceso de fotosíntesis, la mitad de la cual se encuentra en los océanos en forma de fitoplancton.

Además del balance energético es importante conocer el valor de la constante energética solar, que se define como la cantidad de energía solar ( $W/m^2$ ) que incide perpendicularmente en la cima de la atmósfera (extraterrestre) a la distancia media Tierra-Sol. Para ello se realizará el cálculo que se muestra en la tabla 6.

El valor que se obtiene de la constante solar es de aproximadamente  $1390 W/m^2$ . Sin embargo, esta no es la energía disponible. Para calcular la energía disponible se debe de tener en cuenta que de esa irradiancia:

- Aproximadamente la mitad llega a la superficie (tabla 6 –cálculo de la constante solar–).
- Aproximadamente la mitad del día hay sol.
- El sol no incide perpendicularmente, por lo que el área efectiva de una superficie horizontal es de alrededor de la mitad del área.

**TABLA 6. CÁLCULO DE LA CONSTANCIA SOLAR**

La Ley de Stefan-Boltzmann expresa la pontencial total irradiada en todas las longitudes de onda por unidad de superficie	$I(T) = \sigma \cdot T^4$
	Donde: $\sigma$ es la constante de Stefan-Boltzmann cuyo valor es: $5.67 \cdot 10^{-8} W/m^2 \cdot K^4$
Para una $T_{sol} = 5800 K$	$I(T) = 5.67 \cdot T^{-8} \cdot (5800)^4 = 6.41 \cdot 10^7 W/m^2$
Si se realiza un balance entre la irradiancia que sale del Sol y la que llega a la Tierra se deduce lo siguiente:	$I_{Tierra} \cdot 4 \cdot \pi \cdot R_{Sol-Tierra}^2 = I_{Sol} \cdot 4 \cdot \pi \cdot R_{Sol}^2$
	Donde: $R_{sol-Tierra}$ que es la distancia entre el Sol y la Tierra $1.5 \cdot 10^{11} m$
	Donde: $R_{sol}$ que es la el radio del Sol: $7 \cdot 10^8 m$
Despejando:	$I_{Tierra} = I_{Sol} \cdot \frac{R_{Sol}^2}{R_{Sol-Tierra}^2} = 6.41 \cdot 10^7 \cdot \frac{(7 \cdot 10^8)^2}{(1.5 \cdot 10^{11})^2} = 1390 W/m^2$

Fuente: elaboración propia.

Por lo tanto, sólo será aprovechable  $1/8$  de esa energía, esto es, aproximadamente  $173,7 \text{ W/m}^2$ .

Cabe aclarar que este valor es un promedio. El valor real dependerá también de la latitud del lugar y la variación de la cobertura de nubes. Por ejemplo, en el Sahara (sin nubes, cerca del ecuador) este valor es de  $270 \text{ W/m}^2$  en promedio, mientras que en Alaska (muchas nubes, alta latitud) será de  $75 \text{ W/m}^2$  en promedio. Para una visión global de la irradiación solar y su potencial visitar el sitio interactivo Global Solar Atlas.<sup>4</sup>

### Aprovechamiento de la energía solar para generación eléctrica

Existen dos tipos de tecnologías asociadas a la generación de electricidad a partir de la energía solar: la fotovoltaica y la térmica.

Las centrales fotovoltaicas se basan en el efecto fotoeléctrico descubierto por Alexandre Edmond Becquerel en 1838. El físico francés se encontraba experimentando con una pila electrolítica y electrodos de platino cuando se percató de que, al exponer sus instrumentos directamente a los rayos solares, la corriente eléctrica se incrementaba. Se trata de un clásico caso de descubrimiento accidental. Las primeras celdas fotovoltaicas de silicio monocristalino se desarrollaron en 1950, un siglo más tarde de su descubrimiento.

Los nuevos descubrimientos inauguraron un nuevo debate en la historia de la física. Se abría una puerta a la ya consolidada teoría electromagnética de Maxwell en la que la radiación era considerada una onda y no una partícula. A partir de 1900 pudo explicarse mejor este tipo de fenómenos tras enunciarse la hipótesis sobre los fotones de Max Planck y tras estudiarse la emisión de radiación de los cuerpos negros, así como la posterior aportación de Einstein sobre la teoría de los fotones. Un *quantum* de luz –fotón– al incidir sobre una lámina semiconductor se comporta como una partícula que choca con los electrones libres y los moviliza fuera del átomo.

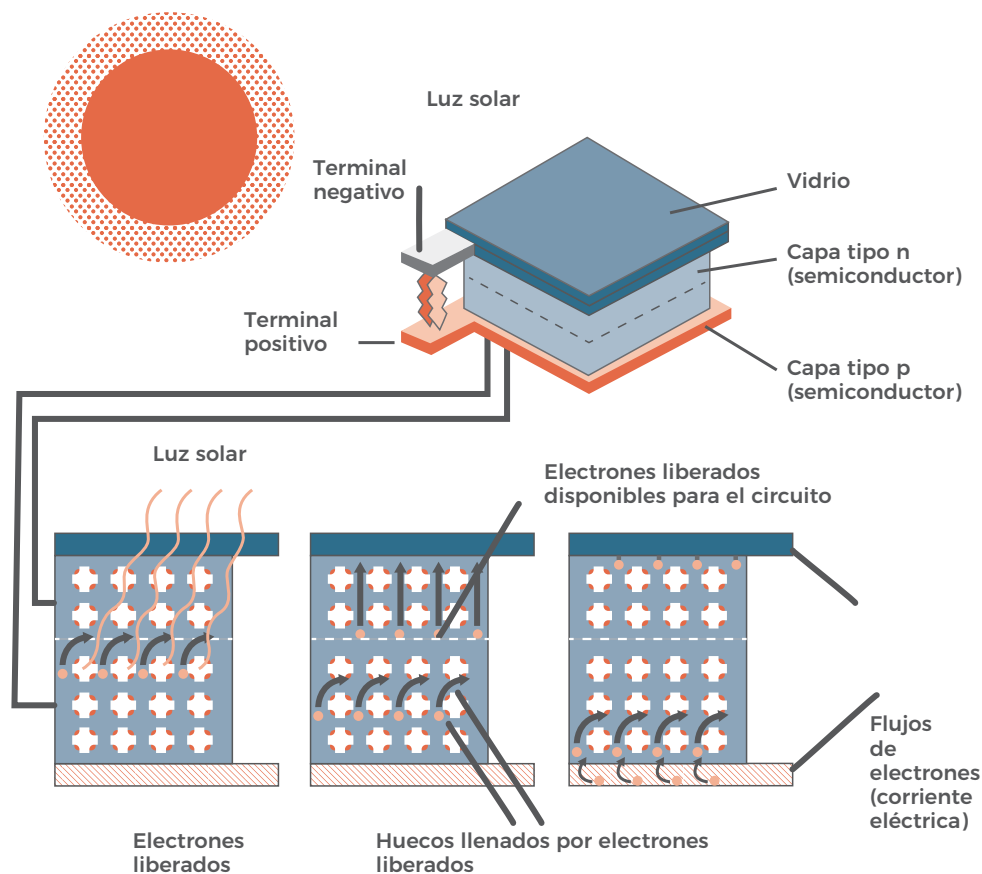
Desde este momento se comenzaron a asentarse las bases teóricas que sirvieron de apoyo en el desarrollo de tecnología fotovoltaica para la generación de electricidad a partir de la radiación solar y por medio del efecto fotoeléctrico; esto es, emisión de electrones ( $e^-$ ) que generan una corriente eléctrica al ser desprendidos de sus átomos respectivos por medio de un fotón incidente.

En la figura 45 se explica el funcionamiento de una celda fotovoltaica.

---

<sup>4</sup> Global Solar Atlas. <https://globalsolaratlas.info/map>

FIGURA 45. PRINCIPIO DE UNA CELDA FOTOVOLTAICA



**Fuente:** adaptada del sitio de la Energy Information Administration.<sup>5</sup>

La energía solar fotovoltaica se basa en el funcionamiento de una celda o panel solar en la que, gracias al efecto fotoeléctrico, se transforma la energía procedente del sol en energía eléctrica. Es un proceso que no involucra reacciones químicas ni nucleares, ni ciclos termodinámicos, por lo que esta fuente de energía se considera limpia, por lo menos durante la generación.

Los materiales semiconductores que se utilizan en las celdas fotovoltaicas han de contar con una estructura cristalina de elevada pureza, formada por la unión de dos tipos de capas:

- *Capa tipo "p"* (cargado positivamente). Consiste en una fina lámina, del orden de las micras, de un semiconductor, generalmente Si, dopada

<sup>5</sup> Energy Information Administration. <https://www.eia.gov/energyexplained/solar/photovoltaics-and-electricity.php>

con un elemento químico, como puede ser el Boro, que produzca huecos atómicos.

- *Capa tipo “n”* (cargado negativamente). Consiste en otra fina lámina de este semiconductor, dopada con otro elemento químico, principalmente el P, que produce electrones móviles.

De acuerdo con la teoría de los fotones, los cuantos que llegan del espacio chocan con los electrones libres de la capa tipo “n”, y generan un “hueco” en el átomo recientemente excitado, mismo que se desplaza hasta llenar otro hueco, lo que hace que los electrones, en este proceso de desplazamiento, aporten carga de un lugar con exceso a otro con defecto. El principio de una celda fotovoltaica es obligar a los electrones y a los *huecos* a avanzar hacia el lado opuesto del material en lugar de simplemente recombinarse en él, con lo que generan una corriente eléctrica debido a una diferencia de potencial, en un proceso similar al de una batería (figura 45).

Como en todos los procesos de transformación de energía, la eficiencia, asociada tanto al dispositivo como al proceso, juega un papel relevante. En este caso, la teoría expresa que la máxima eficiencia de conversión de la luz solar en electricidad es del 93 %, pero como vimos en la primera parte del libro, en el apartado de *Termodinámica*, no es lo mismo la energía disponible que la que finalmente se aprovecha, puesto que como se ha podido observar en las imágenes espectrales (figura 43), sólo se pueden convertir en electricidad ciertos rangos de frecuencia del espectro electromagnético. Éste se conoce como el límite de Shockley-Queisser que corresponde al 33 % de la eficiencia de conversión. En la actualidad, las celdas más eficientes se encuentran en el rango del 20-25%.

Eficiencias mayores se pueden obtener con las conocidas como celdas *tándem*, donde se superponen dos o más celdas individuales para aprovechar distintos rangos de longitud de onda del espectro. Con este tipo de celdas se están alcanzando, en laboratorio, picos del 45 % de rendimiento. Sin embargo, el costo de fabricación es mucho mayor, lo que hace inviable su desarrollo a gran escala.

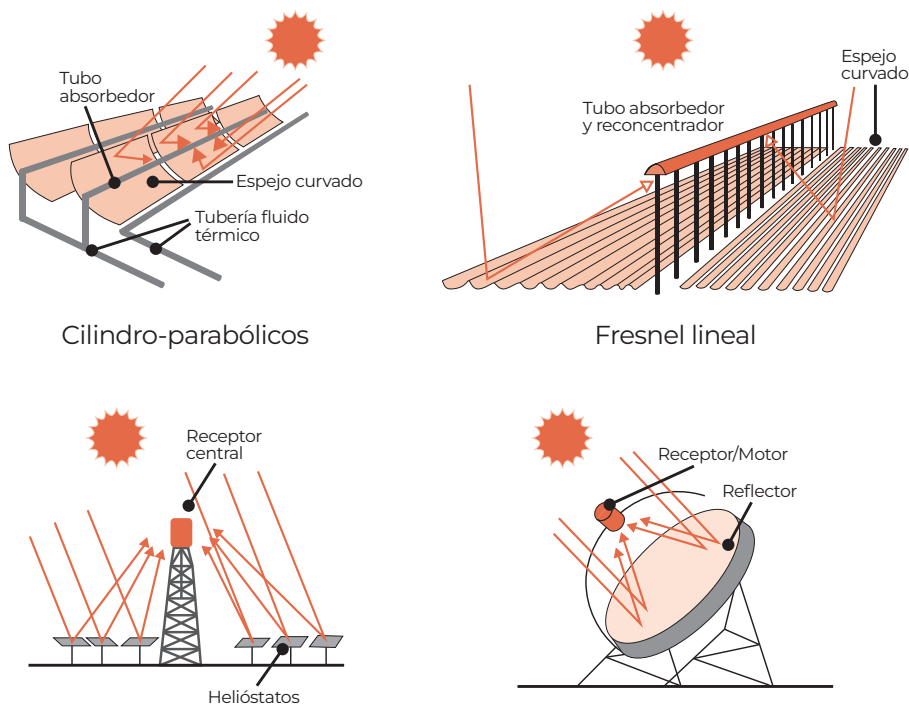
El segundo tipo de tecnología solar para aprovechamiento eléctrico es la llamada *termosolar*. En ésta se transforma la radiación procedente del Sol en calor y luego en electricidad (Concentrated Solar Power-CSP). Se basa en una idea desarrollada por Arquímedes hace más de 2000 años; consiste en concentrar la luz solar usando superficies reflejantes con distintos diseños para alcanzar altas temperaturas, en este caso de entre los 150 °C y los 700 °C, que servirán para calentar un fluido de trabajo que generará vapor y, finalmente –como en el resto de las centrales eléctricas–, producirá electricidad por medio del Principio de Faraday.

- Concentrador cilíndrico parabólico: de media temperatura.
- Concentrador de reflectores lineal Fresnel: de media temperatura.
- Concentrador tipo disco parabólico: de alta temperatura.
- Receptor central (torre central): de alta temperatura.

En el caso del concentrador cilíndrico parabólico se concentra la radiación por medio de espejos parabólicos ubicados de manera lineal y automáticamente orientados hacia un receptor, que consiste en un tubo por el que circula el fluido de trabajo, esto es, aceite térmico o sal fundida, y que eleva su temperatura entre los 150 °C y los 350 °C (figura 46).

Los reflectores lineales tipo Fresnel están fabricados con muchas tiras de espejos delgados y planos que concentran la luz del sol sobre tubos dentro de los cuales se bombea el fluido de trabajo. Los espejos planos permiten mayor superficie reflectante en la misma cantidad de espacio que la de un reflector parabólico, así se captura una mayor cantidad de luz solar disponible, y son más baratos que los reflectores parabólicos. En los dos casos anteriores el reflector sigue al sol en un solo eje. En las otras dos tecnologías el reflector sigue al sol en dos ejes, y proporciona mayores eficiencias.

**FIGURA 46. TIPOS DE TECNOLOGÍAS TERMOSOLARES**



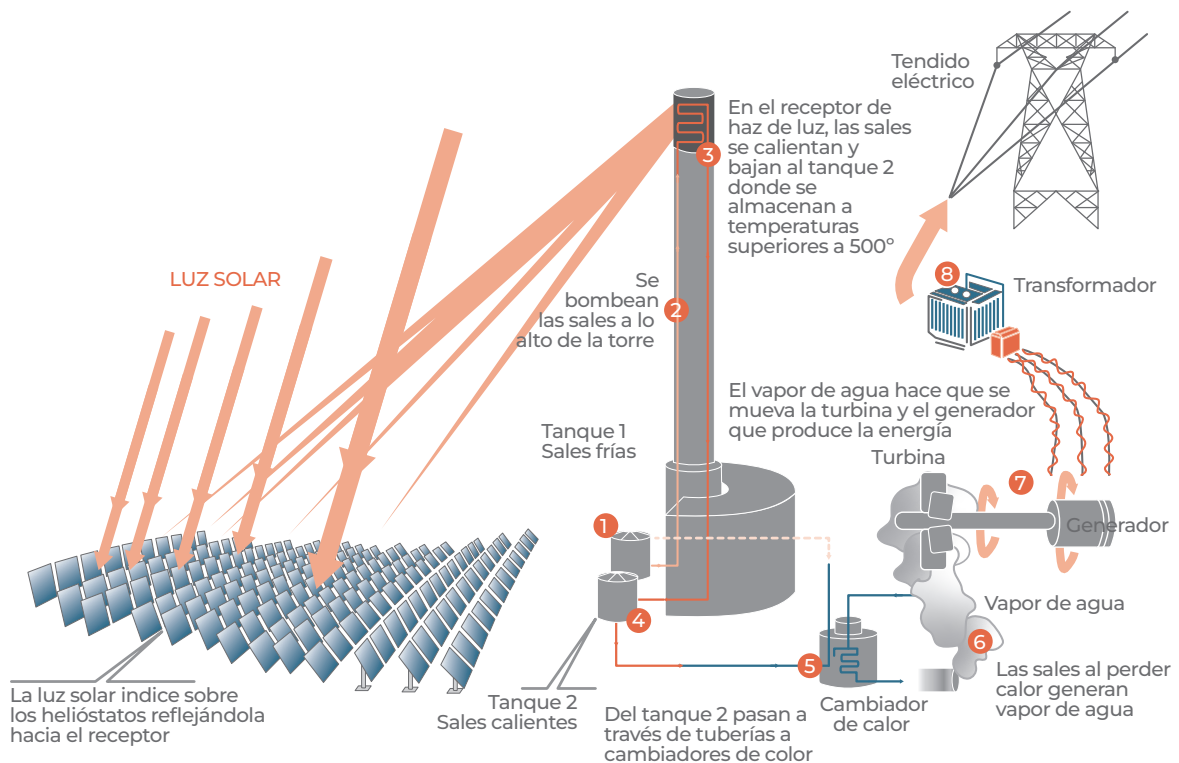
**Fuente:** elaboración propia con base en información pública.

El concentrador solar tipo disco parabólico consiste en un reflector parabólico único que concentra la luz en un receptor posicionado en el punto focal del reflector. El fluido de trabajo en el receptor es calentado entre 250 °C y 700 °C y hace funcionar un motor Stirling que produce energía mecánica y a su vez electricidad. Son los que proporcionan la más alta eficiencia dentro de las tecnologías de CSP, entre el 31% y el 32%, y su naturaleza modular les proporciona escalabilidad.

En el caso de los sistemas con torre central, la radiación solar es reflejada a través de cientos de espejos planos (helióstatos) y se dirige hacia un receptor o caldera que se ubica en una torre elevada de donde el fluido de trabajo es llevado a la turbina de vapor acoplada a un generador eléctrico (figura 47). Algo a resaltar es que la mezcla de sales calientes usada para intercambiar calor, al tener una capacidad calorífica elevada, puede continuar produciendo energía durante varias horas una vez que se ha puesto el sol, lo que disminuye la intermitencia de la generación.

Sin embargo, ésta sigue siendo fluctuante, especialmente en los meses invernales. Tales centrales han sido implementadas sobre todo en España y en el sur de los Estados Unidos, pero no han tenido mucha difusión por ser más caras que las basadas en paneles fotovoltaicos.

**FIGURA 47. ESQUEMA DE UNA CENTRAL TERMOSOLAR DE CONCENTRACIÓN CON TORRE CENTRAL**



**Fuente:** retomado de Vega et al. (2024).

Existen dos formas de generación de energía eléctrica por medio de fotoceldas, dependiendo del tipo de usuario que la esté produciendo. Por un lado, los megaproyectos solares con capacidad de generación de cientos a miles de megavatios son desarrollados por el estado o por empresas privadas, y manejados de manera centralizada para alimentar la red eléctrica.

Por otro lado, en muchos países se ha desarrollado la llamada generación distribuida, donde usuarios particulares, a veces en comunidad, instalan paneles suficientes para producir su propia electricidad o hasta un máximo establecido en cada país (en México actualmente el límite es de 700 Kw). Estas instalaciones requieren también de permisos gubernamentales, ya que, en la mayoría de los casos, la energía generada es vertida a la red, y ésta tiene una capacidad límite para incorporar la generación fotovoltaica.

La generación distribuida tiene varias ventajas, entre ellas que la energía es utilizada casi *in situ*, en otras palabras, no requiere de la construcción de grandes líneas de transmisión de alta tensión que la transporten del sitio en que se produce a aquel en que se consume. El problema principal para el desarrollo de la generación distribuida es que, si no se cuenta con subsidios, la inversión inicial es muy elevada para un único usuario y la recuperación del capital se produce hasta después de varios años.

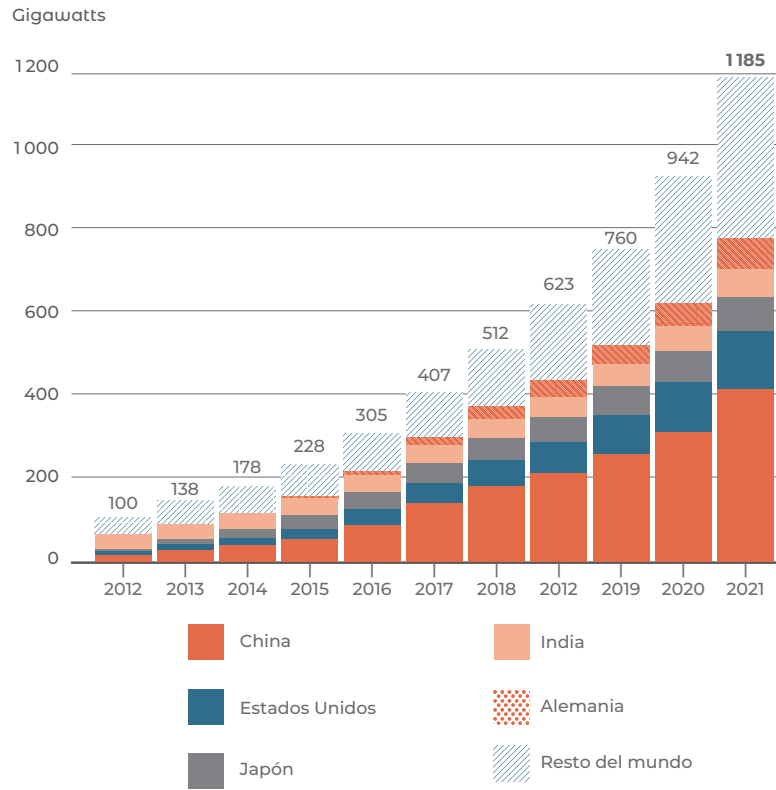
### Situación de la energía solar en el mundo

El 99% de la energía eléctrica producida por la fuente solar a nivel mundial es de tipo fotovoltaico. Los primeros que comenzaron a instalar paneles solares fueron Europa y los EE.UU., pero a partir del 2012 empezó una etapa de crecimiento exponencial a nivel mundial en la que se incorporaron países como China y Japón y, a partir del 2016, Emiratos Árabes Unidos, Marruecos e India, entre otros (figura 48).

La Agencia Internacional de Energías Renovables publica anualmente varios documentos que dan cuenta del crecimiento de las fuentes renovables. En su reporte del 2023, anunció que en el 2022 se alcanzó a nivel mundial 1185 GW de capacidad fotovoltaica (figura 48). El país con el crecimiento más rápido ha sido China, que cuenta actualmente con el 45% de la capacidad instalada, seguida por los Estados Unidos, Japón, Alemania, India, Italia, Australia y España. Cabe mencionar que casi el 10% corresponden a la generación distribuida con paneles en las azoteas.

En cuanto a la producción de paneles fotovoltaicos es importante mencionar el casi monopolio de China, que en el 2021 fabricaba el 85% de las celdas y el 75% de los módulos. En cambio, a pesar de estar entre los países que más instalan este tipo de infraestructura, los Estados Unidos y la Unión Europea sólo producían el 5.3% de los paneles a nivel mundial.

**FIGURA 48. CRECIMIENTO DE LA CAPACIDAD SOLAR FOTOVOLTAICA INSTALADA POR PAÍSES DESDE 2012**



Fuente: IRENA (2023).

## 7.4 ENERGÍA HIDROELÉCTRICA

### Preguntas e imágenes motivadoras

Observa la siguiente infografía sobre el funcionamiento de una central hidroeléctrica:



### Tareas y preguntas sugeridas:

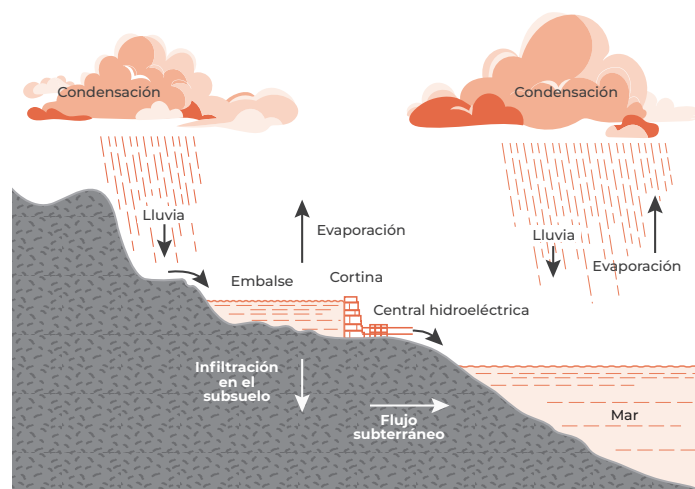
- Analiza el funcionamiento de una central hidroeléctrica. Menciona las distintas transformaciones de energía que ocurren.
- ¿Cuál crees que es el rendimiento global de todo el proceso? Identifica en qué fases del proceso existen pérdidas.

### El ciclo hidrológico y su aprovechamiento para la generación eléctrica

La energía hidroeléctrica, así como la eólica, la de oleaje, y la de biomasa, son subproductos de la radiación solar que llega a la tierra. Como vimos en el apartado anterior, cerca del 23% de la energía solar incidente está asociada al ciclo hidrológico (figura 44). Esta energía transforma el agua en vapor e incrementa su energía potencial al levantarlo en la atmósfera. La energía para evaporar el agua (calor latente de evaporación) es de 2250 J/g; en cambio, la energía necesaria para levantar 1 g de agua a la cima de la troposfera (10 km) es de 100 J ( $E_p = m \times g \times h = 0,001 \text{ kg} \times 10 \text{ m/s}^2 \times 10 \text{ 000 m}$ ). Por lo tanto, el 96% de la energía para formar las nubes es calor latente de evaporación y sólo el 4% es energía potencial para contrarrestar la gravedad.

Cuando el vapor se condensa y se transforma en agua regresa el calor latente, pero este es reirradiado a la atmósfera. No hay consecuencias para el ciclo hidrológico. Cuando llueve la energía gravitacional potencial se transforma principalmente en energía cinética. Sin embargo, una parte de la energía potencial puede aprovecharse si la lluvia cae en tierra y a una altura mayor que aquella donde se evaporó (figura 49).

**FIGURA 49. CICLO HIDROLÓGICO Y GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD**



Fuente: elaboración propia.

Las centrales hidroeléctricas usan esta pequeña energía sobrante que genera el flujo de los ríos. La construcción de una presa o embalse concentra la energía potencial en un área limitada para explotarla de manera óptima. En la central ocurre una transformación de energía potencial a energía mecánica y de ésta a electricidad por medio de turbinas conectadas a generadores eléctricos.

### Clasificación de las centrales hidroeléctricas

Existen distintas tipologías de centrales hidroeléctricas. Con base en su tamaño y en la capacidad de producción media de energía eléctrica se pueden dividir en:

- *Gran hidráulica.* Con una generación de más de 10 MW.
- *Mini hidráulica.* Con una generación comprendida entre 1 y 10 MW.
- *Micro hidráulica.* Con una generación menor a 1 MW.

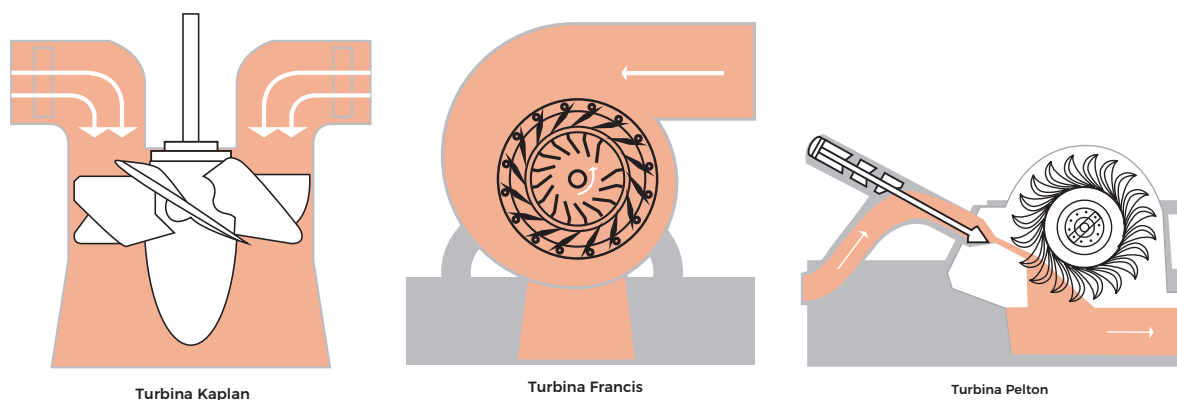
En cuanto al tipo de cortina y el material utilizado tenemos:

- *De gravedad.* Construidas con mampostería o concreto y un perfil triangular.
- *De contrafuerte.* Formada por una pared impermeable y contrafuertes para su estabilidad agua abajo.
- *De arco-bóved.* Normalmente es de concreto armado con un perfil que aprovecha el efecto transmisor del arco para transferir el empuje hacia las paredes laterales de roca.
- *De tierra o escollera.* Tienen un núcleo de material arcilloso que a veces es tratado con inyecciones de cemento.

Dependiendo del salto de agua y del caudal del que se disponga, se necesitarán turbinas diferentes (figura 50):

- *Doble regulación (Kaplan).* Aprovechan la velocidad en lugar de la presión; se usan en saltos de pequeña altura con caudal variable. Se pueden instalar tanto en posición vertical, como horizontal o inclinada.
- *Centrípeta (Francis).* Se pueden usar para saltos de diferentes alturas; tienen rendimiento óptimo cuando trabajan con un caudal entre el 60% y el 100% del caudal máximo.
- *Transversales (Pelton).* Para saltos de más de 100 m y caudal bajo en plantas con embalse.

FIGURA 50. TIPOLOGÍA DE TURBINAS



Fuente: elaboración propia.

### Los embalses como almacenes de energía

Las centrales hidroeléctricas son la forma más eficiente y a gran escala que se tiene hoy en día de almacenar energía para la generación eléctrica. Entre todos los tipos de centrales eléctricas, las hidroeléctricas son las que permiten incrementar más rápidamente la generación, ya que basta incrementar el flujo de agua abriendo las compuertas para producir más electricidad. Por esta razón, en muchos países, incluido México, se usan para cubrir los picos de la demanda eléctrica.

La energía hidroeléctrica se puede usar también como medio para almacenar la energía producida en exceso por parques eólicos o solares. La hidroeléctrica de almacenamiento por bombeo (*Pumped Storage Hydropower - PSH*) consta de dos embalses de agua a diferentes alturas, donde la energía eléctrica excedente se usa para bombear el agua del depósito inferior al superior (recarga), mientras que cuando se necesita generar electricidad el agua desciende de nuevo y pasa por una turbina y un generador.

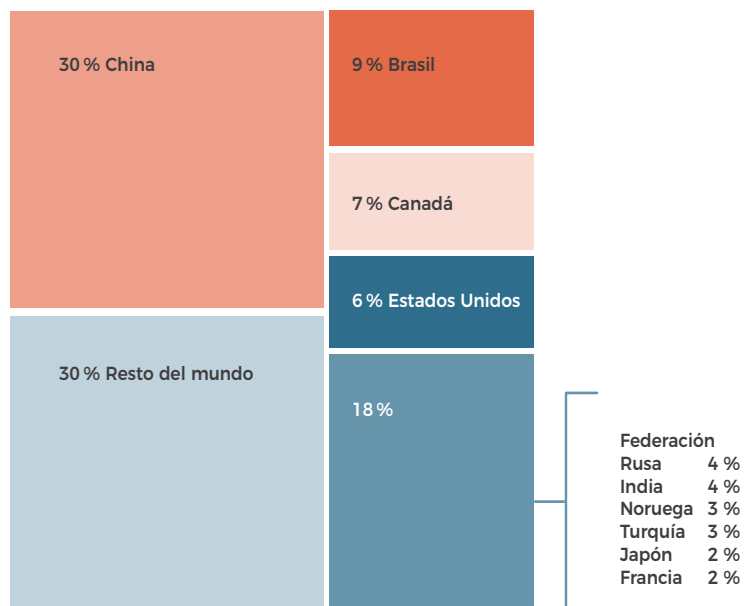
Los sistemas PSH actúan de manera similar a una batería gigante, porque puede almacenar energía y luego liberarla cuando sea necesario. Sin embargo, los costos de los sistemas de baterías son un orden de magnitud mayores que la PSH (Krüger et al, 2018), lo que explica por qué el 90% de la capacidad mundial de almacenamiento está basado en PSH (REN 21, 2021).

### La hidroeléctrica en el mundo

Los países del mundo con la mayor capacidad hidroeléctrica instalada son China, Brasil, los EE.UU. y Canadá (figura 51). China concentra el 30% de la capacidad hi-

droeléctrica total del mundo, con un total de 414 GW en el 2022. En China se encuentra la central hidroeléctrica más grande del mundo, que se conoce como la presa de las Tres Gargantas, con una capacidad instalada de 22.5 GW.

**FIGURA 51. PRINCIPALES PAÍSES CON CAPACIDAD HIDROELÉCTRICA INSTALADA EN EL MUNDO**



**Fuente:** IRENA (2023).

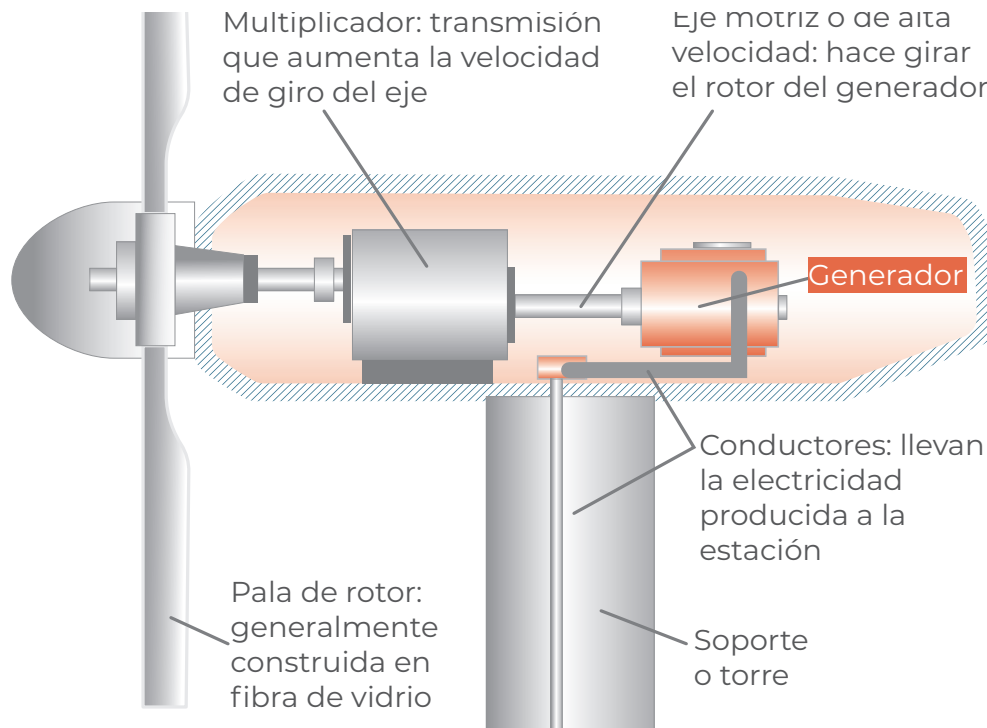
La hidroeléctrica es la forma más antigua de generación eléctrica, ya que se empezó a desarrollar a finales del siglo XIX. Es una fuente madura cuyo auge ya pasó. De hecho, el “pico” de la instalación de presas y de la capacidad de los embalses se tocó en la década de los setenta (Perera et al., 2021). Al igual que con los combustibles fósiles los lugares con mayor potencial se explotan primero. En el caso de la hidroeléctrica los ríos más grandes y con caudal regular ya han sido explotados. Sólo 21 de los 91 ríos del mundo de más de 1000 km no tienen una presa hidroeléctrica (Grill et al., 2019). Los ríos de flujo libre que quedan en el planeta están restringidos en gran medida a regiones remotas del Ártico, la cuenca del Amazonas y la cuenca del Congo.

## 7.5 ENERGÍA EÓLICA

### Preguntas e imágenes motivadoras

A continuación, se muestra el interior de un aerogenerador:

**FIGURA 52. FUNCIONAMIENTO DE UN AEROGENERADOR**



**Fuente:** elaboración propia.

### Tareas y preguntas sugeridas:

- Por parejas, pongan en común el funcionamiento de un aerogenerador.
- Socializar con el resto del grupo.
- ¿Cuáles son las limitantes asociadas a un aerogenerador?

### Evolución de la energía eolo-eléctrica

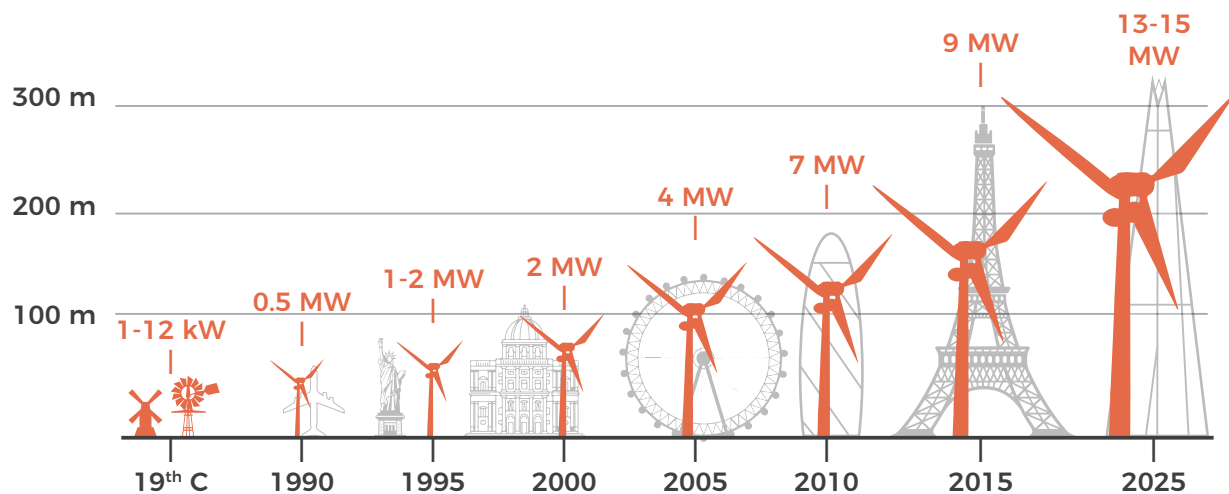
La utilización de la energía eólica para la generación de electricidad nace en 1887 cuando Charles F. Brush construye la primera turbina eólica para generación de electricidad con una capacidad de generación de 12 KW, un rotor de 17 m de diáme-

tro y 144 palas fabricadas con madera de cedro. Posteriormente, en 1942, la compañía F.L. Smidth construyó en Dinamarca diversos aerogeneradores, bi y tripala, con torres construidas en cemento y con elementos estructurales metálicos con las que se generaban corriente alterna. Sin embargo, fue hasta los años ochenta que esta fuente empieza a tener una aplicación comercial con las primeras turbinas eólicas o aerogeneradores, que se instalaron en Palm Spring, California.

Al comparar los primeros aerogeneradores con los actuales, la capacidad, la eficiencia e impacto visual han mejorado enormemente (figura 53). El avance más dramático ha sido el aumento en la capacidad de generación eléctrica y el incremento en la eficiencia de la conversión de la energía eólica. Los primeros aerogeneradores presentaban capacidades de apenas 25 KW, mientras que actualmente la gama comercial se encuentra entre los 750 KW y los 2500 KW (2.5 MW).

Así, cada turbina de 2 MW de capacidad produce más energía eléctrica que 200 de las máquinas que se comercializaban a finales de la década de 1980. El auge en la fabricación de los aerogeneradores se debe a la generación de conocimientos en aerodinámica, mecánica y eléctrica, así como a los beneficios económicos de su producción en masa.

**FIGURA 53. EVOLUCIÓN DEL TAMAÑO Y CAPACIDAD DE LOS AEROGENERADORES, DESDE EL SIGLO XIX HASTA LA ACTUALIDAD**



**Fuente:** adaptado de Bloomberg NEF (2017).

La capacidad de generación de los aerogeneradores modernos es 100 veces mayor que aquella que tenía al final de 1980, pero a costa de aumentar la torre del aerogenerador, así como los diámetros del rotor, que son hasta 20 veces más grandes.

Asimismo, para incrementar la generación se han estado desarrollando parques eólicos mar adentro (10 km o más desde tierra firme y hasta 200 m de tirante de agua). Los aerogeneradores de mar adentro tienen un mayor rendimiento, ya que la velocidad media del viento es considerablemente más alta, y operan durante más horas en el año (mayor factor de planta) porque en las costas el viento es más constante por efecto de la diferencia de temperatura entre mar y tierra.

Sin embargo, los parques costa afuera son más costosos que los terrestres, ya que 1) las cimentaciones son más difíciles de construir; 2) la transmisión de la energía generada mar adentro se realiza a través de cable submarino, más costoso de instalar; 3) el ambiente del mar incrementa la corrosión y la fatiga de los equipos y maquinaria.

### Limitantes de la energía eólica

Como la solar, la energía eólica es una fuente de energía variable y no despachable (no gestionable). Sin embargo, a diferencia de la primera, su generación eléctrica depende de muchos más factores, como la velocidad del viento, la densidad del aire, las características de la turbina, entre otros; todos, factores que cambian según la ubicación. La velocidad del viento debe estar en un rango determinado, dependiendo de la turbina. En general la velocidad tiene que ser superior a 3.5 m/s para generar electricidad, e inferior a 25 m/s para evitar daños mecánicos en la turbina.

El viento, además, tiene un comportamiento menos previsible que la radiación solar. Se ha propuesto que la suma de múltiples parques eólicos ubicados en diferentes áreas geográficas disminuiría la variabilidad e incrementaría la confiabilidad, pero por lo menos en Europa se ha mostrado empíricamente que no siempre es el caso, ya que hay días en que no sopla viento desde España a Dinamarca. Por esta razón, la eólica es la fuente que más necesita de almacenamiento.

Además, un problema que ha estado enfrentando recientemente la industria eólica europea es el desgaste prematuro de la infraestructura y el incremento significativo en los costos de los proyectos, que en el 2023 causó pérdidas importantes para las empresas europeas como Siemens y Vesta. Las fallas mecánicas se pueden asociar con cálculos demasiado justos de los materiales con que se construyen las gigantescas torres eólicas, en un mercado cada vez más competido donde se trata de ahorrar hasta el último centavo.

### Situación de la energía eólica mundial

El potencial eólico a nivel mundial es extremadamente variable (figura 54). Como se puede observar, el mayor flujo de viento es costa afuera y a altas latitudes: Alaska, Canadá, Groenlandia, norte de Europa y Kamchatka, en el hemisferio norte; Patago-

nia, sur de África, sur de Australia y Nueva Zelanda, en el hemisferio sur. Un estudio detallado del potencial eólico (Bandoc et al., 2018) muestra que hay ocho países con excelentes áreas, a saber, China, seguida por Canadá, los Estados Unidos, Argentina, Rusia, Chile, Noruega y Afganistán. Sin embargo, una parte de las zonas con elevado potencial eólico está fuera del alcance o demasiado lejos de las áreas de mayor demanda eléctrica.

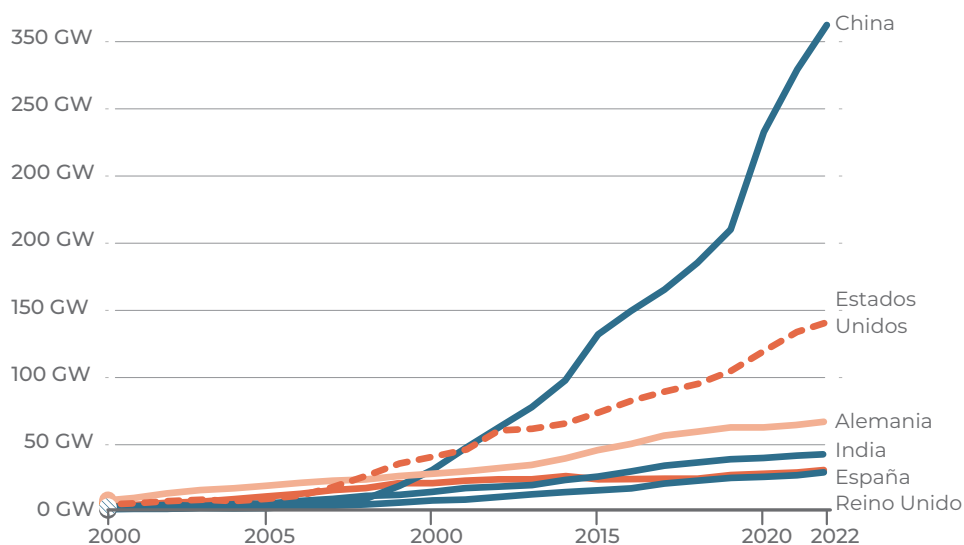
**FIGURA 54. VELOCIDAD PROMEDIO DEL VIENTO A NIVEL MUNDIAL**



**Nota:** ve el original en <https://globalwindatlas.info/en>

**Fuente:** Global Wind Atlas.

La capacidad eólica instalada ha crecido constantemente a partir del 2008, año en que el petróleo llegó a más de 100 USD/b, y para el 2022 la eólica había alcanzado los 906 GW (REN 21, 2023). Los países con la mayor cantidad de capacidad instalada son: China, con casi el 40 % del total y cuyo crecimiento notable tuvo lugar en la última década, seguida por los Estados Unidos, Alemania, India, España y Reino Unido (figura 55).

**FIGURA 55. EVOLUCIÓN DE LA CAPACIDAD EÓLICA EN LOS PRIMEROS SEIS PAÍSES PARA 2022**

**Fuente:** elaboración propia con dato del sitio Our World in Data.<sup>6</sup>

Los países que produjeron más de una cuarta parte de la energía eléctrica a partir de la fuente eólica para el 2022 fueron Dinamarca (55 %), Lituania (37.9%), Irlanda (33%), Uruguay (30.5%), Portugal (28.3%) y Luxemburgo (25.2%). Como podemos ver, son países relativamente pequeños con una demanda eléctrica modesta. De los países con mayor población y demanda, el Reino Unido es el que más se acerca, con el 24.6 %.

## 7.6 ENERGÍA GEOTÉRMICA

### Preguntas e imágenes motivadoras

Observa la siguiente imagen donde se muestra el flujo de calor en la superficie de la Tierra (Limberger et al., 2018)



<sup>6</sup> Our World in Data. <https://ourworldindata.org/grapher/cumulative-installed-wind-energy-capacity-gigawatts?country=DEU~IND~ESP~CHN~USA~GBR>

**Tareas y preguntas sugeridas:**

- ¿Qué observas en cuanto a la distribución y variación del flujo de calor?
- ¿Sabes cómo se genera esa energía calorífica al interior de la Tierra?
- A partir de las formas de propagación de la energía calorífica que se vio en la primera parte del libro, explica de qué manera crees que se propaga esa energía en el seno de la Tierra.

**Fuente de la energía geotérmica**

El aprovechamiento del calor interno de la Tierra para la generación de electricidad tiene más de un siglo. La principal razón para implementarla fue que, a la par de la hidroeléctrica, la tecnología asociada a la transformación de energía mecánica en eléctrica era relativamente sencilla, pero, sobre todo, porque ambas fuentes permiten una generación continua o controlable. La primera central geotérmica se construyó en 1904 en Larderello, Italia, donde existe una amplia región con una importante anomalía de temperatura.

El problema de este gran recurso es que se encuentra sólo en lugares específicos del planeta y su origen no está asociado a la acción del sol, sino a la energía calorífica generada por la propia Tierra. Esta energía calorífica interna del planeta se debe a una combinación de factores (figura 56):

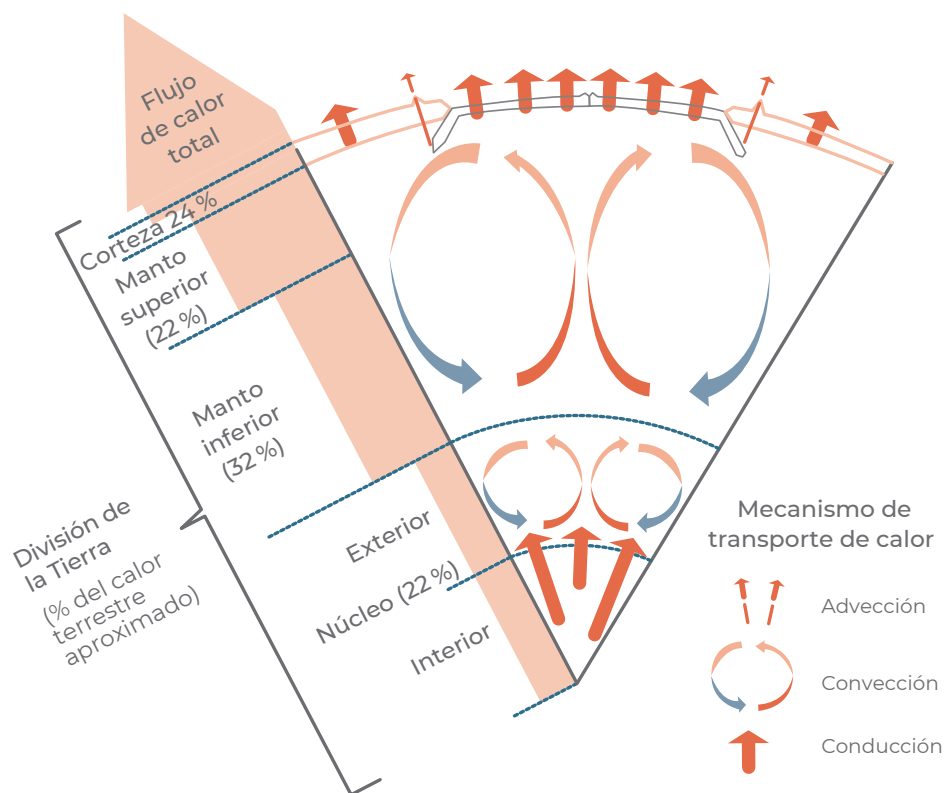
- Calor residual de la acreción planetaria (aproximadamente el 20 % del total) que se libera desde el núcleo de la Tierra.
- Calor producido por la reacción exotérmica del decaimiento radioactivo (80 % del total), principalmente a partir de los isótopos  $^{40}\text{K}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$  y  $^{232}\text{Th}$ , que se encuentran principalmente en la corteza continental y en el manto superior, es decir en los primeros 660 km de profundidad.

Como vimos en la sección sobre energía nuclear, estos isótopos radioactivos tienen un tiempo de vida media de miles de millones de años.

El isótopo que produce más calor al decaer es el  $^{235}\text{U}$ , y es el que tiene el semiperiodo de decaimiento menor, lo que implica que decae más rápidamente que el resto. El isótopo radiactivo con mayor concentración es el  $^{40}\text{K}$ . En la corteza terrestre, la roca que contiene más isotopos radioactivos es el granito.

Se considera que aproximadamente el 70% del calor interno del globo terráqueo (residual + radiogénico) fluye hacia la superficie por convección desde el manto, a través del movimiento de las placas y los procesos de fusión parcial que dan origen al magmatismo. El resto del calor se difunde por conducción (figura 56).

**FIGURA 56. GENERACIÓN Y TRANSPORTE DEL CALOR AL INTERIOR DE LA TIERRA**



**Fuente:** elaboración propia basada en imagen de Wikipedia Commons.

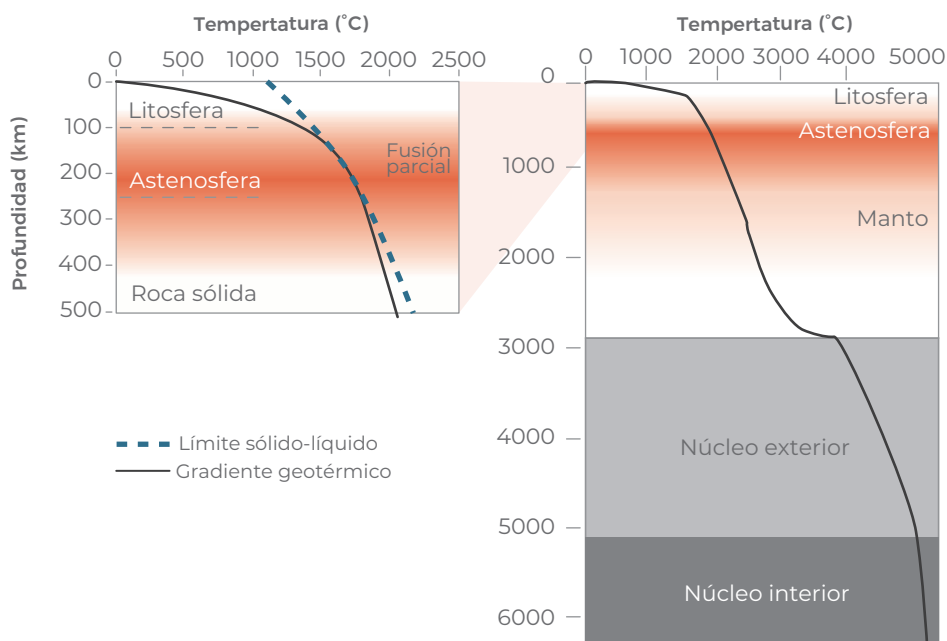
La geotermia explota el calor que llega cerca de la superficie en lugares donde hay anomalías de temperatura. El flujo de energía calorífica en superficie se mide en  $\text{mW}/\text{m}^2$  y se obtiene de la ecuación de Fourier:  $q = -ku$ , donde  $q$  es el flujo de calor,  $k$  es la conductividad térmica, y  $u$  es el gradiente de  $T$ . Este se obtiene a partir de la medición de la temperatura a diferentes profundidades en pozos perforados para este fin. Cabe mencionar lo siguiente:

- En los continentes, las mediciones se realizan normalmente a profundidades superiores a los 100 m, para evitar efectos inducidos por las variaciones estacionales.
- En los océanos, la temperatura del agua a nivel del suelo oceánico es normalmente estable y la temperatura se mide en la capa más superficial de sedimentos sin problema alguno.
- La conductividad térmica se mide en los laboratorios.

El flujo de calor total para el planeta es de  $47 \pm 2$  TW, que es equivalente a  $0.09 \text{ W/m}^2$  ( $90 \text{ mW/m}^2$ ). A partir de las mediciones del flujo de calor superficiales y de estimaciones basadas en datos geofísicos y geoquímicos se ha podido determinar el gradiente geotérmico, es decir, cómo varía la temperatura en el interior de la Tierra (figura 57). En promedio el gradiente es de  $1^\circ\text{C/km}$ , pero, como se puede observar, en la corteza es mucho mayor:  $33^\circ\text{C/km}$ , es decir, aumenta aproximadamente  $1^\circ\text{C}$  cada 33 m.

Los valores normales se encuentran en el rango de 10 a  $66^\circ\text{C/km}$ , no obstante, se han llegado a medir gradientes de hasta  $200^\circ\text{C/km}$  en zonas con reservorios geotérmicos activos. Es importante también observar que en torno a los 200 km de profundidad bajo la superficie de la tierra existe una capa llamada astenosfera, donde la roca puede fundirse parcialmente, lo que permite el movimiento de las placas tectónicas.

**FIGURA 57. GRADIENTE GEOTÉRMICO**

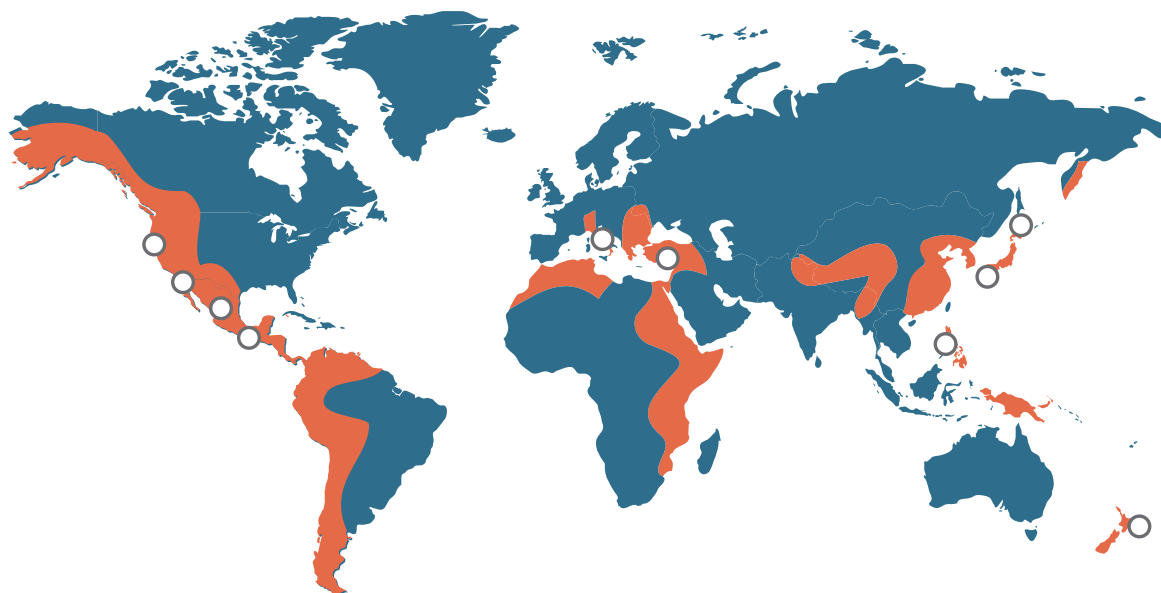


**Fuente:** adaptado de imagen de dominio público de Wikipedia (Creative Commons).

Las zonas más calientes se encuentran en los océanos, más concretamente en las dorsales oceánicas, donde las placas se apartan y donde se genera nueva corteza oceánica a través de cadenas volcánicas submarinas, así como en tierra en las zonas volcánicas asociada a la separación de placas (*rift*) o a la convergencia entre una placa oceánica y una continental (zonas de subducción). Uno de los países que cuenta con una situación única en el mundo es Islandia, ya que está ubicada sobre la dorsal del Atlántico del Norte, donde el volcanismo fue tan abundante que formó una isla.

Dada la imposibilidad de aprovechar el flujo de calor en otras zonas oceánicas, las regiones con potencial geotérmico en el mundo se restringen a las principales zonas volcánicas alrededor del Pacífico, en el Mediterráneo y en el *rift* de África oriental (figura 58).

**FIGURA 58. PRINCIPALES ZONAS GEOTÉRMICAS DEL PLANETA TIERRA (NARANJA) Y PRINCIPALES CAMPOS PRODUCTORES DE ELECTRICIDAD EN OPERACIÓN (CÍRCULOS)**



Fuente: elaboración propia.

### Yacimientos geotérmicos

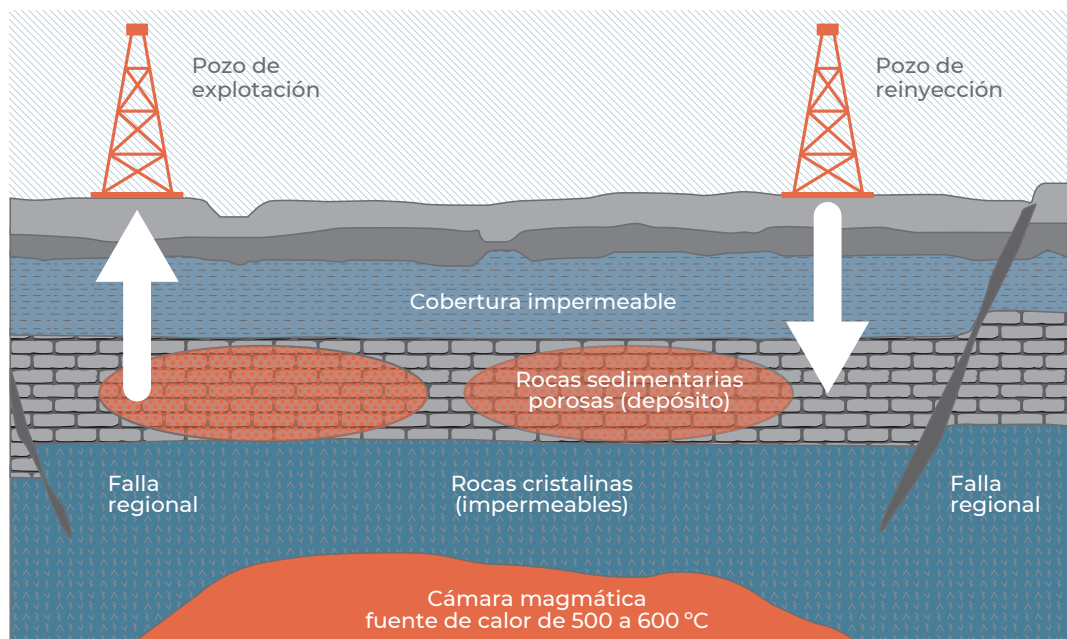
Los yacimientos geotérmicos son zonas con una anomalía de temperatura y condiciones geológicas que, permiten la presencia de agua confinada en el subsuelo cerca de la fuente de calor. Los yacimientos convencionales necesitan las siguientes condiciones (figura 59):

1. Una *fuentes de calor* en la corteza superior (<10 km). Normalmente esta fuente se asocia a una cámara magmática donde existen volúmenes importantes de magma de composición silícica o intermedia. La cámara puede alimentar grandes volcanes poligenéticos y calderas o constituir grandes cuerpos intrusivos. Una cámara magmática es rellenada de manera periódica por nuevo magma desde mayores profundidades, y el sistema magmático que alimenta un volcán o una caldera puede durar desde decenas hasta cientos de miles de años. Por lo tanto, la

fuentes de calor puede considerarse inagotable comparada con la escala de la civilización humana.

2. Debe existir un *reservorio de roca permeable* con agua sellado por una capa de rocas impermeables, es decir, un acuífero confinado por el cual circule el recurso hídrico y una *zona de recarga* que alimente al acuífero de manera regular. Para que pueda generarse electricidad en el reservorio es necesario que haya vapor o una mezcla de agua y vapor con temperaturas mayores a 120-150 °C. La detección de dichas cámaras se asocia a la presencia de volcanismo silíceo reciente (<200 ka) o a manifestaciones termales en superficie. Una vez ubicadas estas regiones, se procede a la exploración más exhaustiva del medio.

**FIGURA 59. ESQUEMA DE UN RESERVORIO GEOTÉRMICO**



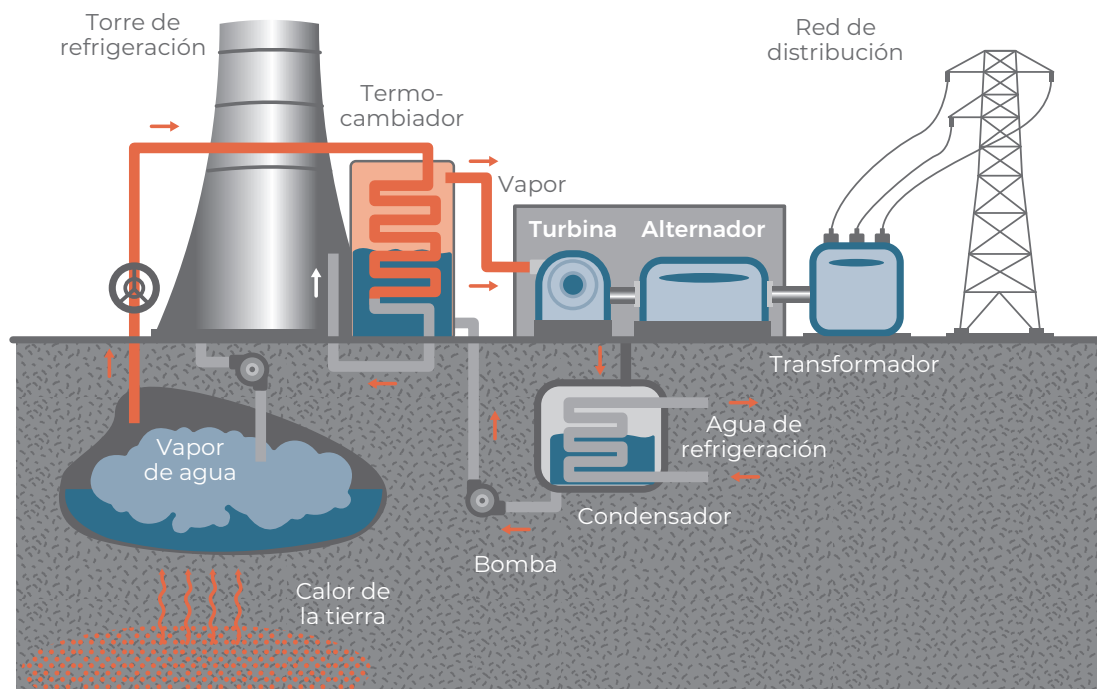
**Fuente:** retomado de Ferrari (2024).

La explotación del calor geotérmico (figura 59) se da por medio de pozos que extraen los fluidos, los cuales se transforman por completo en vapor a presión atmosférica. La presión del vapor permite activar turbinas acopladas a generadores con los que puede obtenerse una producción continua de electricidad (figura 60). Una vez que el calor ha sido intercambiado, el vapor se transforma en agua y es reinyectada en el reservorio por medio de otros pozos para ser nuevamente calentada.

El agua/vapor sirve entonces como medio para transportar el calor y transformarlo en energía mecánica. Para que el sistema siga funcionando es crucial que

haya suficiente fluido y se mantenga la permeabilidad del reservorio. Una sobre-explotación del yacimiento puede llevar a una disminución de la presión y de la generación eléctrica.

**FIGURA 60. ESQUEMA DE UNA CENTRAL GEOTÉRMICA**



**Fuente:** retomado de Ferrari (2024).

También en el caso de la geotermia existen recursos no convencionales, donde a pesar de existir altas temperaturas la permeabilidad es baja o nula y hay escasez de agua subterránea. Estos yacimientos se conocen como *roca seca caliente* y, pueden explotarse al incrementar la permeabilidad de la roca e induciendo fracturas por medio de una inyección forzada de agua para crear un reservorio geotérmico; eventualmente, también se adicionan pequeñas cantidades de ácido (sistemas geotérmicos mejorados). Sin embargo, a nivel mundial no hay todavía ejemplos de generación comercial con potencia significativa para este tipo de recursos (Lu, 2018).

En algunos casos no existe una cámara magmática, sino que el recurso geotérmico se debe a una anomalía térmica provocada por el decaimiento radiactivo de rocas graníticas –o en general rocas silíceas–, debido a su alto contenido en U, Th, K, las cuales están cubiertas por capas sedimentarias con baja conductividad térmica. Estos casos se han observado en ciertos lugares de Australia (Middleton, 2016), Francia

(graben del Río Rin), así como en la parte suroriental de la Sierra Madre Occidental de México (Castillo Reynoso et al., 2022).

### Clasificación de los campos geotérmicos

La clasificación de los campos geotérmicos toma en cuenta:

- La presencia o no de agua y el estado de ésta: líquido, vapor.
- Las condiciones en que ésta se encuentra en el yacimiento: alta o baja presión.
- La estructura geológica del yacimiento.

Con base en estas características, los campos se pueden clasificar en:

1. Sistemas hidrotérmicos.
2. Sistema geopresurizados.
3. Sistemas de roca caliente seca.

### Sistemas hidrotérmicos

Son los únicos sistemas que han superado las etapas de investigación y desarrollo experimental y que se encuentran actualmente en la etapa de explotación comercial.

Disponen de agua en su interior, normalmente procedente de deshielos o de lluvia.

- Suelen encontrarse a profundidades de entre 1 km y 10 km.
- En función de la fase en que se encuentre el agua se clasifican en:
  - Sistemas con predominio de vapor de agua.
  - Sistemas con predominio de agua líquida, de alta o baja entalpía.

Sistemas con predominio de vapor de agua:

- Entalpía del orden de 600 Kcal/kg.
- Temperaturas en el rango: 150 – 400 °C.
- $Pr < 5$  MPa.

En este caso el vapor se encuentra sobrecalentado y seco, características idóneas para la generación de energía eléctrica con un rendimiento aceptable.

Sistemas con predominio de agua en estado líquido *de alta entalpía*:

- Entalpía del orden 200 – 400 Kcal/kg.
- Temperaturas en el rango 180 – 300 °C.
- $P_r < 1\text{MPa}$ .

Generalmente, cuando el fluido alcanza la superficie se transforma en vapor debido al proceso de despresurización. Este tipo de sistemas son también ideales para generar energía eléctrica. Un ejemplo didáctico para entender el funcionamiento de ellos sería el surgimiento de burbujas al momento de abrir una botella de cerveza.

Sistemas con predominio de agua en estado líquido *de baja entalpía*:

- $T < 100\text{ °C}$ .

El agua que se extrae tendrá una temperatura inferior a su punto de ebullición, por lo que su aplicación más idónea es el calentamiento de algún fluido (calefacción industrial, urbana y agrícola).

### Sistemas geopresurizados

- El fluido, generalmente agua en estado líquido, se encuentra bajo una presión elevada que pueden alcanzar hasta 100 MPa.
- Las temperaturas no suelen ser excesivamente altas: 150 – 250 °C.
- El agua suele coexistir con gases naturales ( $\text{CH}_4$ ), lo que dificulta su explotación en la actualidad.
- Ubicados a mayor profundidad.

Nota: cuando se desarrolle una tecnología apropiada para su explotación comercial rentable, será posible utilizar tres fuentes de energía: hidráulica, térmica y gas.

### Sistemas roca seca caliente (no convencional)

Están constituidos por:

- Rocas impermeables.
- Con temperaturas dentro del rango: 150 – 300 °C
- No están vinculados a acuífero alguno.

Nota: constituyen un porcentaje muy elevado de los recursos geotérmicos mundiales, pero aún se encuentran en la etapa de investigación.

## Límites de la geotermia

Entre los factores limitantes asociados a la geotermia se encuentran:

- Las condiciones geológicas ideales para la existencia de yacimientos sólo se dan en un número limitado de sitios.
- Las condiciones termodinámicas de entalpía suficientes para que pueda generarse una producción sostenida de vapor (temperaturas superiores a los 150 °C) tampoco son comunes.
- La cantidad de energía que puede producir un campo geotérmico es muy inferior a la de un campo de petróleo. Por ejemplo, los mejores pozos geotérmicos producen menos energía que los pozos menos productivos de petróleo no convencional, que, como hemos visto, tienen una productividad mucho menor que los de yacimientos de petróleo convencional.
- No es un recurso totalmente renovable, ya que un campo geotérmico necesita: *a)* una recarga que sea mayor a la tasa de extracción, en caso contrario el balance de masas se volverá negativo y el campo acabará por agotarse; *b)* que la explotación del recurso no provoque variaciones en la permeabilidad intrínseca del reservorio a partir de las variaciones de la presión y temperatura, ello causa la cristalización de minerales que pueden llegar a sellar las fracturas e impedir el paso del vapor.

## Capacidad instalada y generación eléctrica mundial

A pesar de ser una fuente de alta calidad, por las razones expuestas anteriormente sólo una docena de países tiene por lo menos 200 MW de capacidad geotérmica instalada. Los principales países son: los Estados Unidos, Indonesia, Filipinas, Turquía, Nueva Zelanda, México, Italia e Islandia. En total la capacidad instalada mundial es de, únicamente, 14.6 GW, lo que representa el 1.4 % de la capacidad solar fotovoltaica. Desde el punto de vista de la generación de electricidad, la geotermia representa únicamente el 0.3% del total (REN 21, 2023).

Sin embargo, para algunos países es una fuente importante de la matriz energética, ya que producen más del 10% de su electricidad con geotermia: Kenia (51%), Filipinas (27%), Islandia (30%), El Salvador (25%), Nueva Zelanda (14.5%) y Costa Rica (14%). Se trata de países con un consumo de energía modesto, puesto que su población es reducida o su desarrollo industrial es limitado. Países como los Estados Unidos, Indonesia o Italia sólo llegan al 0.3%, 3.7% y 1.5%, respectivamente (Bertani, 2016).

En cuanto a la geotermia no convencional, a pesar de que se han estado estudiando sus posibilidades ya por algunas décadas, su desarrollo está todavía en una etapa incipiente.

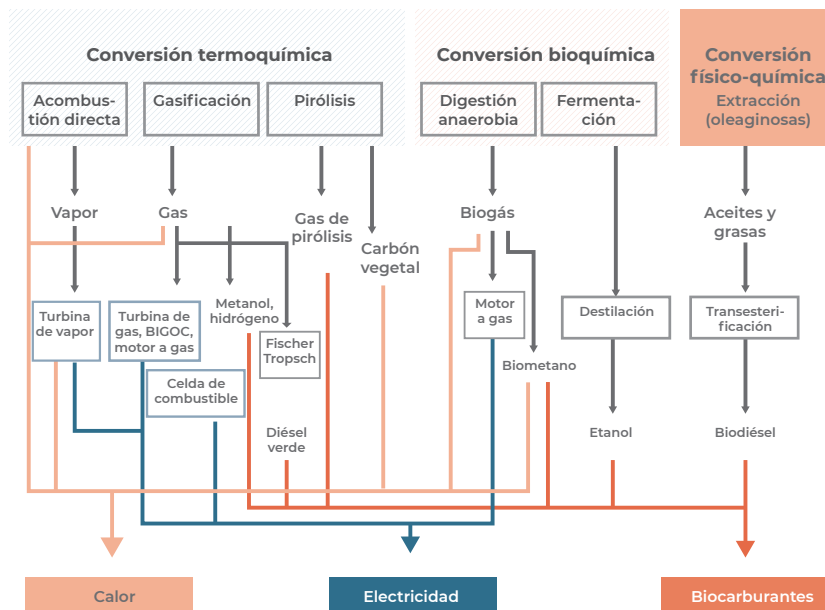
A nivel mundial, existen 18 proyectos de sistemas geotérmicos mejorados (EGS - *Enhanced Geothermal System*); sin embargo, por el momento, sólo hay pequeñas plantas o minicentrales con capacidad de entre 1.5 y 4.5 MW (Lu, 2018). La experiencia internacional indica que, si bien existen numerosos sitios que en conjunto pueden tener un potencial de generación mayor que la geotermia convencional, su desarrollo presenta retos técnicos importantes y un costo significativamente mayor, algo similar a lo que sucede con los hidrocarburos no convencionales (petróleo y gas de lutitas).

En cuanto al potencial futuro, las previsiones de crecimiento más optimistas estiman que la geotermia podría llegar a generar entre 800 y 1300 TWh/año en el 2050 (van der Zwaan y Dalla Longa, 2019), es decir, entre el 3.2 y 5% del consumo actual. Independientemente, la geotermia representa una fuente renovable de alta calidad que, allí donde existan las condiciones, debería desarrollarse con alta prioridad dada sus ventajas sobre otras fuentes intermitentes y diluidas, ya que puede producir electricidad de forma casi continua, además de ocupar mucho menos espacio que otras fuentes y con la misma capacidad.

## 7.7 BIOMASA

### Preguntas e imágenes motivadoras

**FIGURA 61. USOS FINALES DE LA BIOMASA Y SUS PROCESOS INVOLUCRADOS**



Fuente: Red Mexicana de Bioenergía (Rembio).

**Tareas y preguntas sugeridas:**

- Por parejas, estudien el esquema de la figura 61 y los procesos que observas.
- ¿Cuáles son sus densidades energéticas?
- Socialicen con el resto del grupo.

**Clasificación de la biomasa**

La biomasa es una fuente de energía renovable con un portafolios extenso de tecnologías maduras para la mayoría de sus distintas aplicaciones. Cualquier organismo vivo está constituido de biomasa: plantas, animales, microbios, entre otros. En esta definición se incluye:

- Todo tipo de materias vegetales; por ejemplo, caña de azúcar, sorgo, maíz, trigo, remolacha azucarera, además de grasas y otros despojos de procedencia animal.
- Materia orgánica contenida en aguas residuales.
- Todo deshecho de origen biológico.

**Datos interesantes**

- Sólo 40 TW de los 174 000 TW de energía solar que inciden sobre la Tierra son captados por la fotosíntesis, esto es, el 0.023%. La mitad ocurre en los océanos.
- El consumo global de la energía asociada a la actividad humana es de 12 TW y la actividad biológica humana 0.6 TW.

Nota 1: los combustibles fósiles son energía de biomasa concentrada.

Nota 2: la tierra produce cada año más de 230 000 millones de toneladas de materia viva.

La biomasa se crea a partir del proceso de fotosíntesis, que transforma parte de la energía solar en energía química, principalmente en carbohidratos. Un típico carbohidrato (azúcar) tiene una estructura molecular:  $[\text{CH}_2\text{O}]_x$ , donde  $x$  es un entero. Por ejemplo, la glucosa es  $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$  ( $x=6$ ).

La reacción fotosintética es:



$$1.47 \text{ g } 0.6 \text{ g } 16 \text{ kJ } 1 \text{ g } 1.07 \text{ g}$$

El consumo de carbohidratos es esencialmente el opuesto de la fotosíntesis: 16 kJ/g es aproximadamente 4 kcal/g.

Por lo anterior, la biomasa es básicamente una “batería” para almacenar energía solar (donde la energía de la luz solar es retransformada en energía térmica al momento de su combustión).

### ¿Por qué la eficiencia máxima de la fotosíntesis es de un 5%?

Sólo el 25% del espectro solar es aprovechado por la fotosíntesis, ya que:

- Se aprovecha el rango del rojo y del azul del espectro visible, mientras que el verde es reflejado.
- No se aprovecha la radiación ultravioleta ni la infrarroja.
- El 70% de esta luz es absorbida por las hojas.
- El 35% de la energía luminosa (la longitud de onda aprovechable) es almacenado como energía química, y el resto es energía calorífica.

Hay que resaltar que este uso incompleto de la energía también se da en los paneles fotovoltaicos.

### Explotación del recurso biomásico

Una de las grandes ventajas de la biomasa es su versatilidad, puesto que puede aprovecharse para diferentes usos finales:

- Energía calorífica.
- Biocombustibles.
- Electricidad.

Desde la prehistoria y hasta nuestros tiempos se hace uso de la biomasa como energía calorífica. Consiste en la combustión de la leña, el carbón vegetal y residuos agrícolas para calefacción y cocción de alimentos. Aunque a menudo es considerada como una fuente del pasado, más de 2000 millones de personas, en zonas

rurales y urbanas, dependen de la madera como combustible para satisfacer sus necesidades de energía primaria.

El uso de la biomasa para la obtención de los biocombustibles es más reciente. Los biocombustibles se dividen en líquidos, sólidos y gaseosos.

### Biocombustibles líquidos

Los biocombustibles líquidos son los aceites, alcoholes y otros compuestos químicos producidos a partir de materia orgánica; esto es, plantas herbáceas, oleaginosas y leñosas, residuos de la agricultura y la actividad forestal, desechos biológicos industriales como los desperdicios, y los subproductos de la industria alimenticia. La principal forma de utilización es como sustitutos de los combustibles fósiles en los diferentes tipos de refinados del petróleo:

- El *bioetanol* puede reemplazar, hasta cierto punto, a la gasolina.
- El *biodiésel* puede reemplazar al diésel.
- La *bioturbosina* podría reemplazar al combustible de aviación tradicional.

### Obtención de los biocombustibles líquidos

- El bioetanol puede obtenerse de la fermentación de derivados de azúcar, almidón, celulosa y polisacáridos; este último es etanol de origen biológico o bioetanol. Se utiliza el etanol hidratado en automóviles flexfuel, y el etanol anhidro, en mezclas con gasolina del 5% al 85% en volumen, en motores convencionales. En mezclas E5 y E10 sustituye a oxigenantes y antidetonantes como el MTBE y el TAME.
- El biodiésel es una mezcla de ésteres metílicos de ácidos grasos que puede sustituir al diésel y se obtiene de la reacción de aceites vegetales o grasas con metanol, de lo que se obtiene como subproducto la glicerina. El biodiésel es usado principalmente en Europa en mezclas con diésel al 5% o al 20% (B5, B20) o como biodiésel puro (B100). En Brasil y Argentina se utiliza el B5 como mezcla obligatoria.
- La bioturbosina actualmente se produce a partir de aceites derivados de especies como la *Jatropha*, la Higuera, las algas y algunas halófitas.
- También se está trabajando con biotecnología para producir biocombustibles a partir de la modificación de la estructura genética de las bacterias.

Existe controversia porque las tecnologías existentes para la fabricación de biocombustibles, también llamadas “de primera generación”, implican, por un lado, el uso de insumos que sirven también de alimentos, tierras y otros materiales como agua y fertilizantes, que eventualmente podrían servir para cultivos con fines alimenticios. Por otro lado, la tasa de retorno energético es muy baja, de 1.2 (ver el siguiente apartado).

### Datos sobre el impacto de los biocombustibles

- *Uso del suelo.* Si se quisiera sustituir el 10 % de la gasolina y el diésel con etanol, en el 2020 se requeriría el 20% de todo el maíz cultivado en el mundo, y para el 2050 se necesitaría el 29% (World Resources Institute, 2010). Esto implica restarle área al 11% de la superficie terrestre que actualmente se destina a cultivo.
- *Tasa de retorno energético* (TRE o EROI por sus siglas en inglés). Los estudios que tienen en cuenta no sólo la energía invertida en cultivar la planta, sino los insumos utilizados durante todo el proceso proporcionan un EROI muy bajo para el bioetanol: 1.797 a partir de la caña de azúcar, 1.040 para maíz y 0.739 para madera (Chiriboga et al., 2020). En el caso del biodiésel se obtienen valores de 3.052 para palma africana, 2.743 para piñón, 2.187 para grasa bovina y 2.891 para grasa porcina. Recordamos que un EROI de 1 significa que no hay ganancia energética y que valores inferiores indican un sumidero de energía.

Para obviar estos problemas, en la última década se han estado desarrollando los llamados *biocombustibles avanzados*, término actualmente preferido al de “biocombustibles de segunda generación”, los cuales utilizan materias primas que no compitan con los alimentos y que pueden tener menores impactos ambientales. Los costos de la generación de energía mediante cultivos dedicados son también mucho mayores que si utilizamos residuos naturales, agrícolas o industriales (Sánchez et al., 2015).

### Biocombustibles sólidos

Entre los biocombustibles sólidos se encuentran la leña, el carbón vegetal, los residuos agrícolas y los forestales, los pellets y las briquetas. Estos biocombustibles generan energía calorífica y electricidad mediante la combustión directa o previa gasificación o pirólisis.

El consumo global de leña ha aumentado levemente en las últimas dos décadas, como resultado de un balance entre el aumento de la población consumidora en los países más pobres y la penetración de otros combustibles domésticos como el gas LP y el queroseno en los sectores urbanos de países como India y China. La leña tiene como usos finales la cocción, la calefacción y el calentamiento de agua en el sector residencial. Proviene normalmente de árboles y arbustos localizados tanto en bosques naturales como en áreas agrícolas aledañas a los poblados. La sustentabilidad del uso de la leña puede verse afectada cuando la extracción de madera es mayor que la regeneración natural, lo que puede contribuir a la deforestación.

Otra manera de aprovechar la leña es la creación carbón vegetal, proceso que consiste en carbonizar la madera, sin que llegue a arder, lo que hace incrementa su densidad energética dado que se eliminan los gases y el agua presente en la leña original. Alrededor del 20% del peso original de la madera se convierte en carbón vegetal, mientras que el resto de la masa es liberada en forma de vapor y gases; así el carbón vegetal tiene alrededor del doble del contenido energético y sólo una cuarta parte del peso de la madera original, lo que hace más fácil su transporte y almacenamiento.

Este carbón vegetal se produce con madera proveniente de varias fuentes, incluida la leña de cambios de uso del suelo, del manejo de la regeneración de árboles en bosques naturales y de plantaciones forestales.

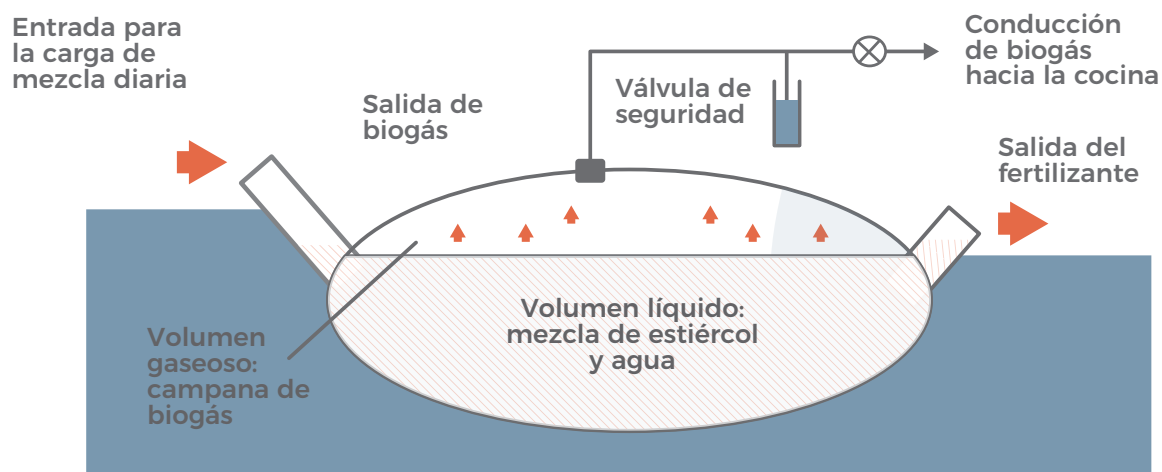
Otra forma de aprovechamiento de biocombustibles fósiles es en forma de pellets o briquetas, que son biocombustibles densificados, elaborados principalmente a partir del aserrín de los aserraderos, aunque en la actualidad se está expandiendo el uso de residuos agroindustriales como materia prima. La elaboración incluye los procesos de secado, reducción de tamaño y densificación. Con esto se aumenta su poder calorífico, densidad energética y eficiencia de combustión, lo que facilita su almacenamiento y manejo, además de hacer viable su transporte a muy largas distancias.

### Biocombustibles gaseosos

Los biocombustibles gaseosos, es decir, el biogás, consisten en una mezcla conformada, primordialmente, por  $\text{CH}_4$  (50%-70%) y  $\text{CO}_2$  (25%-40%), que se obtiene del proceso biológico de biodigestión anaerobia, el cual consta de una serie de reacciones bioquímicas en las que los residuos orgánicos son degradados o consumidos por un conjunto de microorganismos. La acción de los microorganismos produce energía calorífica, misma que se usa para mantener el proceso en su temperatura ideal (35°C). En el proceso también se generan efluentes líquidos y sólidos que pueden ser utilizados como fertilizantes orgánicos.

Este proceso se lleva a cabo en los biodigestores, donde la biodigestión de la biomasa ocurre en ausencia de oxígeno (anaeróbico) para que se produzca el  $\text{CH}_4$  (figura 62). Las materias primas que se utilizan son excrementos procedentes del sector agropecuario, entre los que se encuentran el purín y el estiércol de cerdo y de res, y los residuos de las cosechas y los lodos de estaciones depuradoras de agua. Los digestores varían su tamaño en un rango desde 1 a  $10 \text{ m}^3$  para pequeñas granjas, hasta más de  $1000 \text{ m}^3$  para grandes instalaciones.

**FIGURA 62. ESQUEMA DE UN BIODIGESTOR ESTÁNDAR**



**Fuente:** adaptado de Martí Herrero (2015).

También existen biodigestores lagunares, que se utilizan ampliamente en granjas. En un digestor bien manejado se pueden producir de 200 a  $400 \text{ m}^3$  de biogás por tonelada de materia fresca (TMF), aunque este valor varía mucho de acuerdo con la naturaleza de la materia prima digerida.

También se están utilizando los rellenos sanitarios como biodigestores, donde la extracción del biogás se lleva a cabo mediante la perforación de pozos verticales. El biogás es conducido mediante una red superficial de tuberías. La digestión es más lenta que en los biodigestores agropecuarios y pueden requerirse semanas o hasta años para su degradación completa. Los rendimientos (en toda la vida del relleno) varían de acuerdo con la composición de los desechos, pero teóricamente está en el rango de  $150\text{-}300 \text{ m}^3$  de biogás por tonelada de desecho.

Otra forma de producir biocombustible que está desarrollándose utiliza la fotosíntesis de algas. Este método presenta algunas ventajas: la absorción del  $\text{CO}_2$  (que pudiera llegar de una central térmica) y la posibilidad de generar biopetróleo a partir de la grasa de las algas, y con un poder calorífico similar al del carbón.

## Bioelectricidad

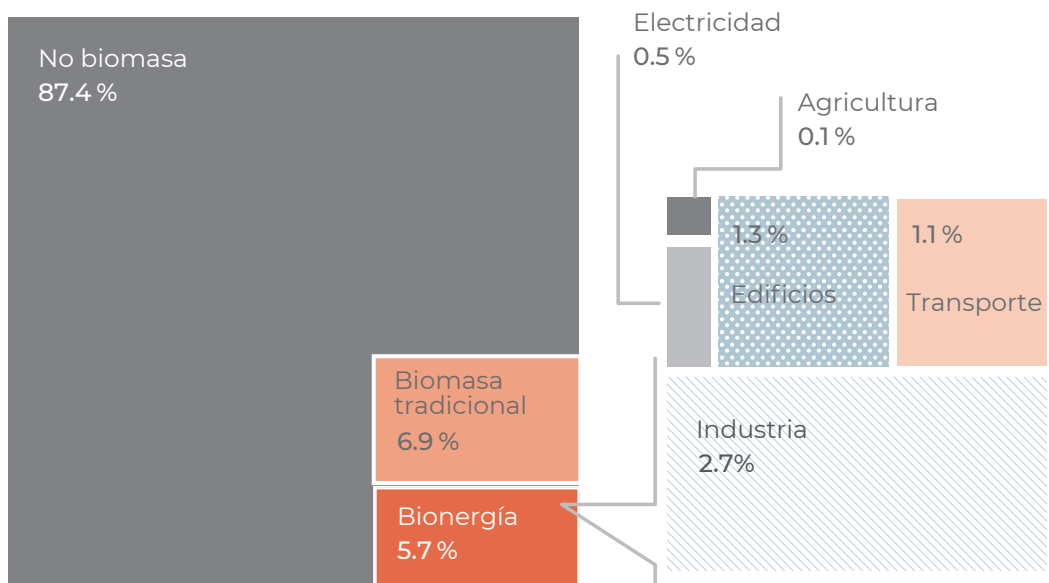
Otra manera de aprovechar la biomasa es la generación eléctrica. Esto ocurre de la misma forma que en cualquier central térmica: el biocombustible sólido, líquido o gaseoso es utilizado para la producción de calor mediante combustión, lo que genera vapor que a su vez mueve una turbina acoplada a un generador eléctrico.

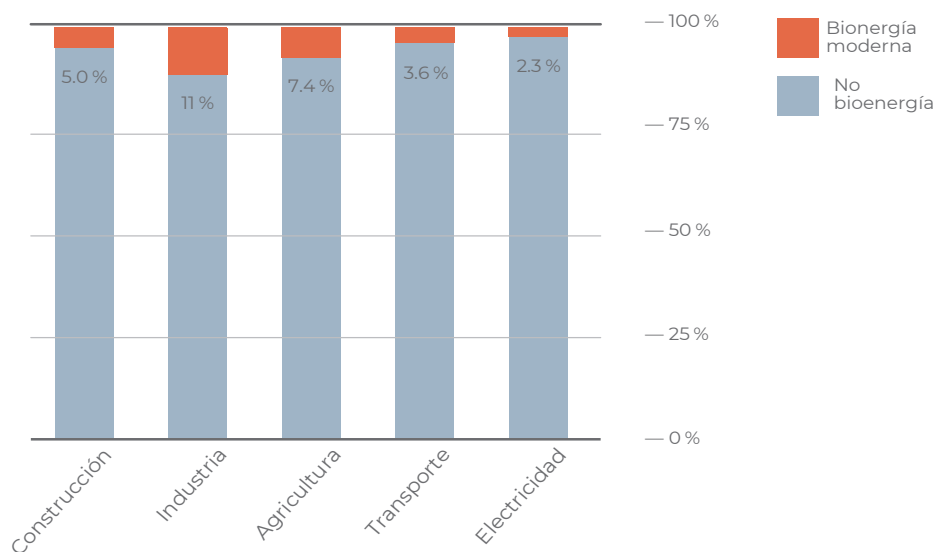
Finalmente, una de las formas más eficientes de aprovechar la biomasa sólida es la trigeneración. En este proceso se transforma termoquímicamente el recurso, ya sea mediante su combustión, su gasificación o su pirólisis, lo que permite obtener como productos unos gases inertes a alta temperatura, un gas o un líquido combustible, respectivamente. En cada caso se trata de combustibles con densidad energética inferior a la de los fósiles.

### Contribución de la biomasa en la matriz energética

A nivel internacional, la bioenergía, o energía obtenida de la biomasa (incluida la biomasa tradicional), representa el 12.3% del consumo total de energía, lo que representa más de la mitad de la obtenida por todas las fuentes renovables (figura 63).

**FIGURA 63. CONTRIBUCIÓN DE LA BIOMASA EN EL CONSUMO DE ENERGÍA FINAL A NIVEL MUNDIAL**

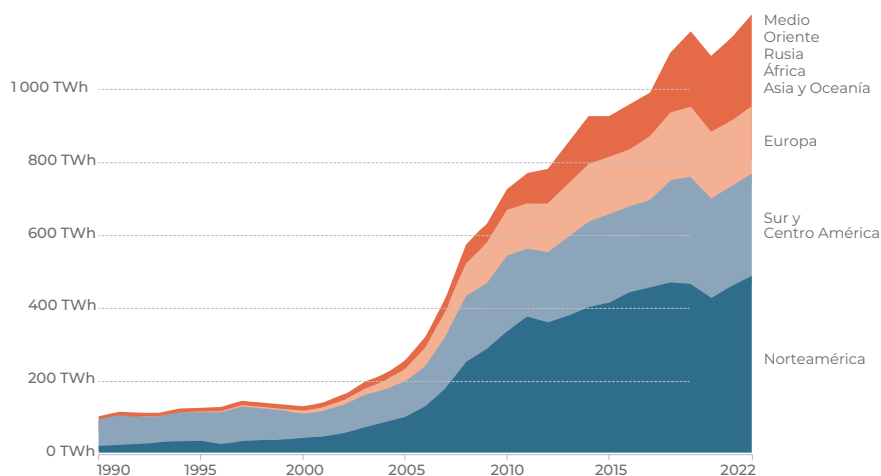




Fuente: IRENA (2023).

El crecimiento del mercado mundial de biocombustibles fue notable a partir del 2005, cuando el precio del petróleo empezó a crecer de manera acelerada. Como se aprecia en la figura 64 el mayor crecimiento se dio en Norteamérica y, particularmente, en los Estados Unidos, donde el uso del automóvil es mayor que en cualquier otro país.

**FIGURA 64. EVOLUCIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE BIOCOMBUSTIBLES POR REGIONES**



Fuente: elaboración propia con información del sitio Our World in Data.<sup>7</sup>

<sup>7</sup> Our World in Data. <https://ourworldindata.org/grapher/biofuels-production-by-region>

Se estima que para el año 2035 la biomasa podría contribuir con cerca del 25% de la energía requerida en el mundo, y constituir así uno de los pilares de la transición a fuentes renovables de energía (Red Mexicana de Bioenergía, 2013).

### Ventajas y desventajas de la bioenergía

La bioenergía presenta varias ventajas con respecto a otras fuentes de energía:

- *Es almacenable.* La energía de la biomasa está almacenada en la materia orgánica, por lo que, a diferencia de otras renovables como la solar y la eólica, sí es despachable, lo que le da ventajas para la generación de energía calorífica o electricidad.
- *Permite satisfacer la mayor parte de los usos finales.* Es la única energía renovable que puede sustituir a los combustibles fósiles en todas las aplicaciones y finalidades, porque permite producir energía calorífica, electricidad y biocarburantes líquidos.
- *Es ubicua.* La biomasa se puede encontrar o cultivar en casi todas partes, y está disponible en forma concentrada como subproducto de procesos agroindustriales, residuos de actividades humanas y estiércol de animales.
- *Es escalable.* Hay sistemas de aprovechamiento de biomasa y producción de bioenergía desde muy bajas potencias (< 1 kW) hasta grandes potencias (> 300 000 kW); esto permite una amplia versatilidad para el desarrollo de sistemas de suministro energético a escalas locales y globales.
- *Es comercialmente madura.* Muchas de las tecnologías para el uso energético de biomasa son rentables y están ampliamente desarrolladas a nivel comercial.

Entre los factores limitantes asociados a la biomasa se encuentran:

- *Requerimiento de áreas cultivables para la generación de biocombustibles.* Por este motivo se está recurriendo más a la biomasa procedente de los desechos que a la de los cultivos dedicados.
- *Uso del agua.* Varias regiones del mundo ya están experimentando estrés hídrico resultado del cambio climático. El requerimiento de agua para la generación de biocombustibles exacerbaría la crisis, ya que se necesita de 10 a 1 000 veces más agua que la usada para la producción de combustibles fósiles (Spang et al., 2014).

- *Densidad energética.* Al ser recursos con una densidad energética inferior a la de los combustibles fósiles, los costos de generación son mayores a paridad de volumen.

## 7.8 LIMITACIONES DE LAS FUENTES RENOVABLES

### Introducción

Nuestra civilización industrial-tecnológica se ha construido sobre la base de los combustibles fósiles, fuentes no renovables y contaminantes pero concentradas, controlables y, hasta el siglo pasado, abundantes y baratas. Las fuentes renovables se presentan como la solución para dejar atrás los dos grandes problemas de los combustibles fósiles: su impacto sobre el clima y su disponibilidad limitada. De hecho, las renovables se exhiben como fuentes limpias y con una disponibilidad ilimitada. Sin embargo, no existe ninguna fuente de energía completamente limpia e ilimitada.

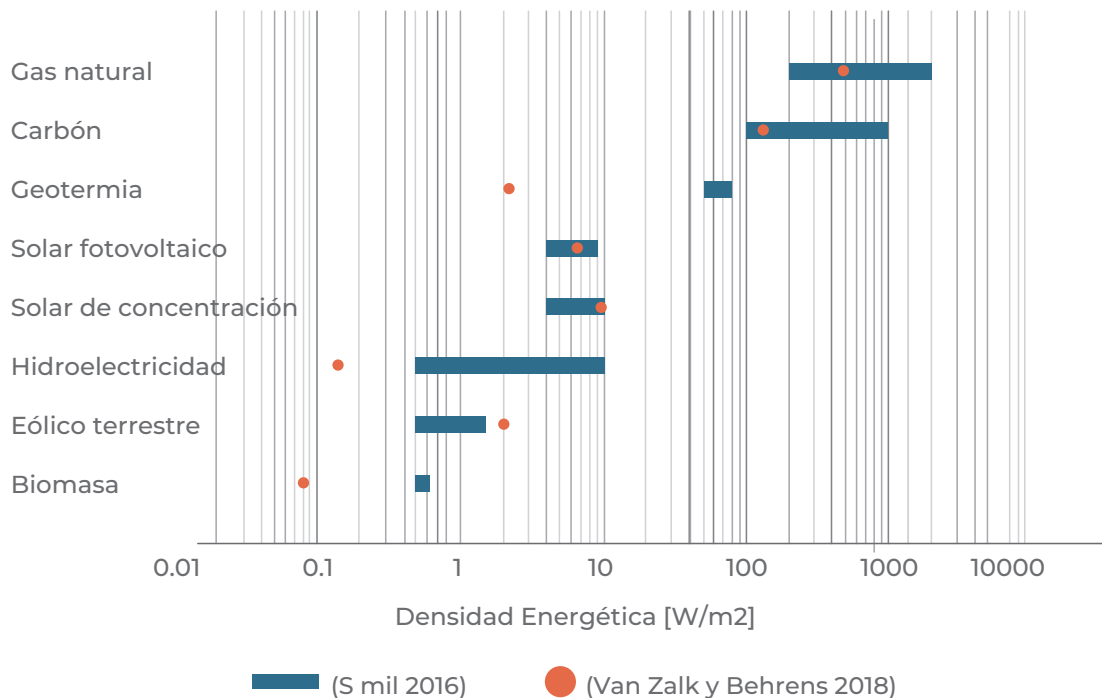
Si bien las renovables tienen menor impacto ambiental que los combustibles fósiles, son también menos concentradas y, en algunos casos, no controlables, lo que significa que no siempre pueden generar energía cuando se necesita. Tomando en cuenta estos aspectos, hay todo un espectro de opciones que va desde las fuentes más sucias y finitas, pero concentradas y controlables (los combustibles fósiles), pasando por otras menos sucias y controlables, aunque con disponibilidad limitada (geotermia, hidroeléctrica y biomasa), hasta energías menos sucias y abundantes, pero muy diluidas y no controlables (eólica y solar).

Además, aunque los flujos de energía son hasta cierto punto permanentes, la infraestructura para su aprovechamiento tiene que reconstruirse periódicamente con energía y materiales que en gran medida no son renovables. En esta sección analizaremos los principales límites de las fuentes renovables como posible sustituto de los combustibles fósiles.

### Densidad energética y factor de planta

Uno de los factores que más limitan las fuentes renovables es su menor densidad energética y, en el caso de la eólica y la solar, también la variabilidad de su generación, que depende de factores que no pueden ser controlados. La densidad energética se suele estimar dividiendo la generación de energía eléctrica anual entre el espacio que ocupa la planta, presa hidroeléctrica o parque eólico o solar. En la figura 65 se reportan tanto el rango a nivel mundial (Smil, 2016) como las estimaciones promedio para los Estados Unidos (Van Zalk y Behrens, 2018) de la densidad energética de diferentes fuentes.

**FIGURA 65. DENSIDAD ENERGÉTICA DE DIFERENTES FUENTES DE GENERACIÓN ELÉCTRICA MEDIDAS EN WATTS POR M<sup>2</sup>**



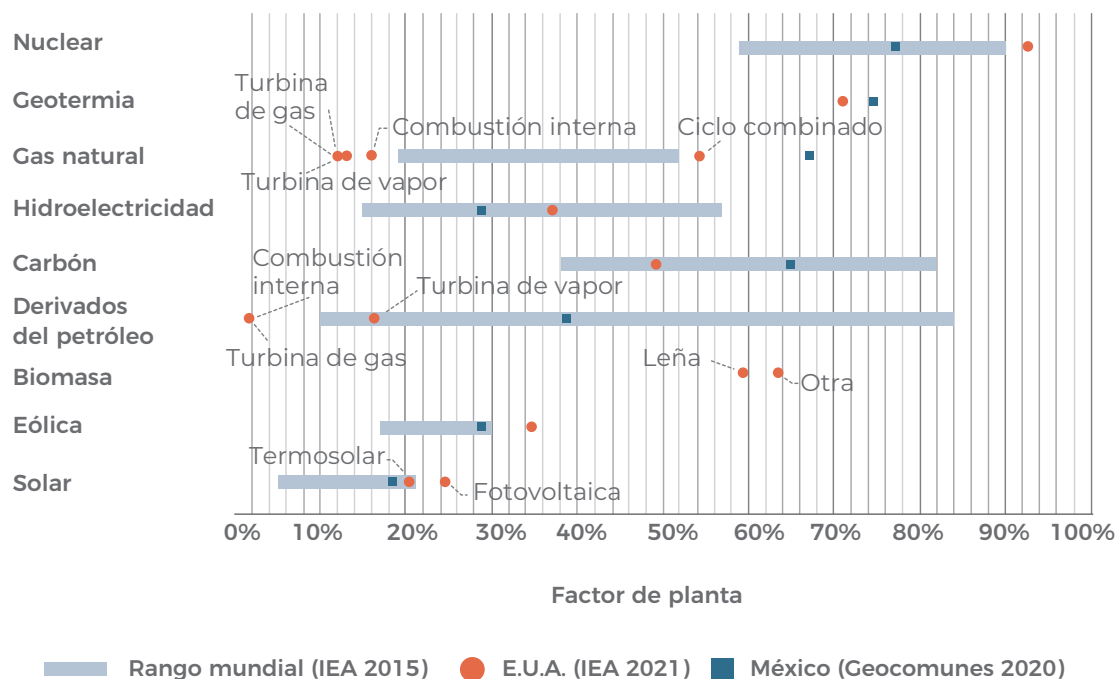
**Fuente:** retomado de Ferrari et al. (2024b).

Como se puede apreciar, los combustibles fósiles son dos órdenes de magnitud mayores que la energía solar y aún más que la hidroeléctrica, la eólica y la de biomasa. Lo anterior se puede explicar si consideramos que la radiación solar y el viento son recursos diluidos, por lo que la infraestructura para su aprovechamiento requiere de grandes espacios. Además, debido a su naturaleza intermitente no pueden generar energía de manera continua, debido a lo que la cantidad que pueden producir en el tiempo resulta incluso menor.

Esto afecta también a la hidroeléctrica que, si bien es una fuente controlable, rara vez genera de manera continua porque se usa para cubrir los picos de la demanda eléctrica. En el caso de la geotermia, la cantidad de energía que puede generar a través de las diversas transformaciones (de calor a energía cinética y de ésta a electricidad) es limitada, por lo que un pozo geotérmico produce una cantidad de energía de un orden de magnitud menor que el promedio de los pozos petroleros.

Un aspecto relacionado es el factor de carga (o factor de planta), que se define como el cociente entre la energía real generada durante un período (anual) y la energía generada si la planta hubiera trabajado a pleno rendimiento durante ese mismo lapso. La figura 66 muestra los valores recopilados a nivel mundial (EIA, 2015) para los Estados Unidos (EIA, 2021) y para México hasta el 2018 (Geocomunes, 2021).

**FIGURA 66. FACTOR DE PLANTA DE DIFERENTES FUENTES DE ENERGÍA PARA PRODUCCIÓN DE ELECTRICIDAD**



**Fuente:** retomado de Ferrari et al. (2024b).

Al analizar la figura 66 se observa que la energía nuclear tiene el mayor factor de planta dado que no permite disminuir la generación, lo que es una de sus características técnicas intrínsecas, salvo para trabajos de mantenimiento y recarga de combustible nuclear. La geotermia también tiene poca flexibilidad, ya que variar la extracción de vapor puede afectar la permeabilidad del yacimiento y la productividad de los pozos. Aunado a lo anterior, el factor de planta de las energías solar y eólica es significativamente inferior al de la nuclear debido a la irregularidad de la fuente. El factor de planta típico de la energía eólica se encuentra entre el 20 y el 35%, mientras que el de la solar fotovoltaica tiene valores inferiores, de entre el 15% y el 25%.

Otras fuentes controlables, como los combustibles fósiles y la hidroeléctrica, tienen un factor de planta muy cambiante porque se usan para compensar la variabilidad de las fuentes no controlables, así como la fluctuación de la demanda eléctrica que tiene que ser balanceada constantemente por la generación.

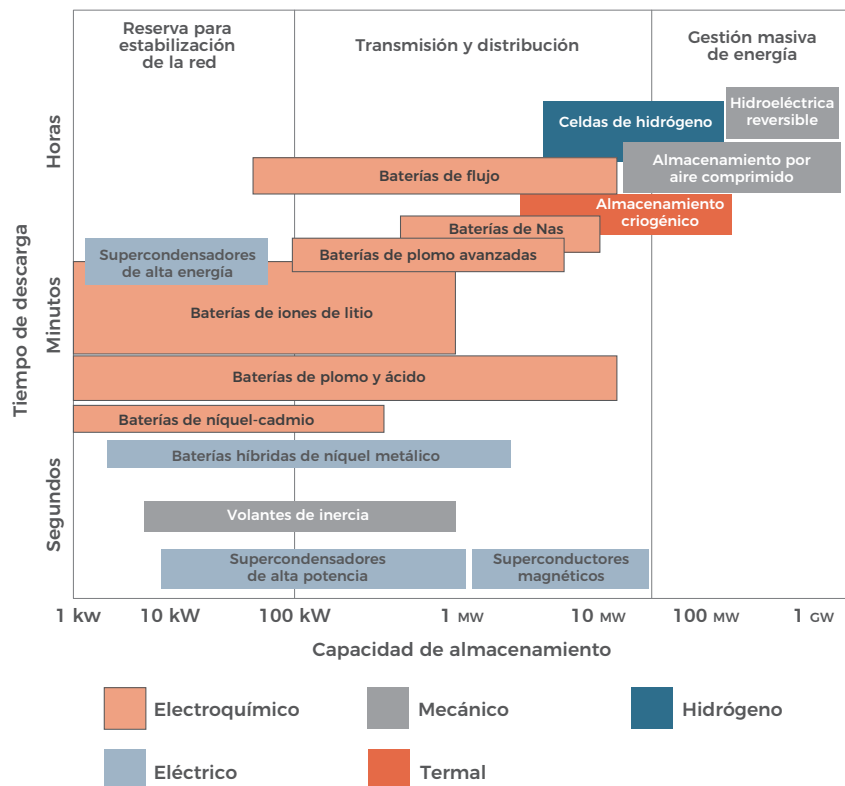
Al revisar las limitaciones anteriores, resulta lógico que las primeras fuentes de energía renovable en ser explotadas fueran la hidroeléctrica y la geotermia, ya que se pueden generar de manera controlada. Sin embargo, su disponibilidad queda limitada a ciertos lugares del planeta, ahí donde se dan las condiciones para su uso. Las fuentes eólica y solar, en cambio, son más ubicuas, pero presentan el problema

de no ser gestionables y de poseer una densidad energética aún menor. La solución al primer problema es almacenar la energía eléctrica que se produce en exceso para utilizarla cuando se demanda.

Sin embargo, el almacenamiento no sólo es caro, sino que tiene límites en cuanto a los tiempos de descarga de acuerdo con la potencia nominal. En la figura 67 se muestran los sistemas de almacenamiento existentes en función de su capacidad y tiempo de descarga. Los sistemas de almacenamiento basados en baterías tienen un rango de almacenamiento que va de los pocos kW hasta los 100 MW, y capacidad para proporcionar carga durante segundos y hasta horas.

La tecnología que tiene mayor capacidad de almacenamiento y proporciona más tiempo de carga es la que se conoce en inglés como *pumped hydropower storage* o almacenamiento por rebombeo hidráulico, que consiste en utilizar la energía excedente de una central solar o eólica para bombear agua hasta un reservorio a mayor altura en el que se almacena como energía potencial. Cuando se requiere electricidad se vuelve a bajar al agua generando energía hidroeléctrica.

**FIGURA 67. SISTEMA DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA**



Fuente: Sprake et al. (2017).

Los sistemas de almacenamiento por rebombeo hidráulico son también mucho más baratos que las baterías. De acuerdo con estudios recientes el costo total a paridad de tiempo de vida es diez veces menor (Krüger et al., 2018). Por esta razón, en 2020 el 90.3% del almacenamiento estaba basado en rebombeo hidráulico y sólo el 6.9% en baterías (Behabtu et al., 2020). Asimismo, la densidad energética de los sistemas de almacenamiento eléctrico (baterías) es también mucho menor que la de los derivados del petróleo: con un contenido energético de 49.5 MJ/kg, el diésel es de 61 a 117 veces más denso que las baterías de iones de litio, las cuales rondan entre 0.4 y 0.8 MJ/kg (Cushman-Roisin y Cremonini, 2021).

### Límites energéticos y materiales: dependencia de los combustibles fósiles y la minería

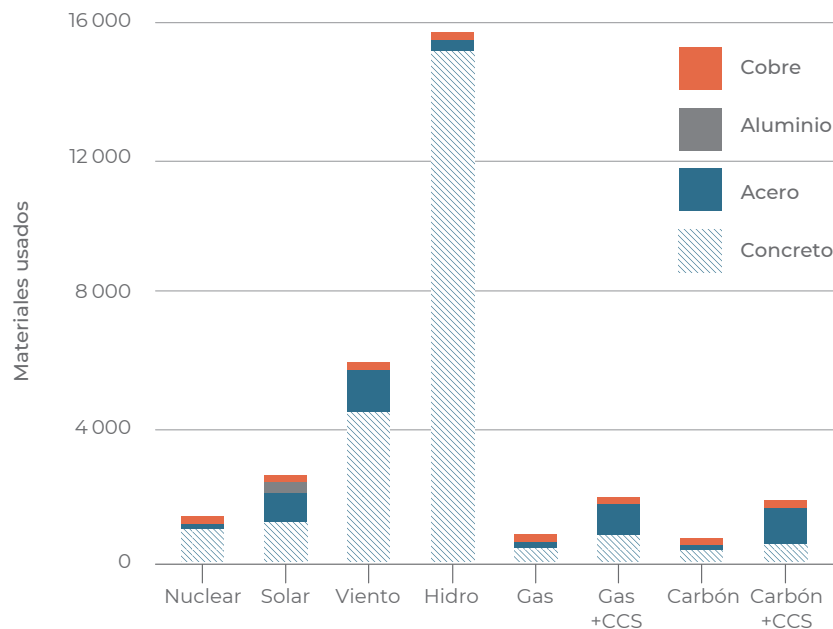
La infraestructura para el aprovechamiento de la energía solar, eólica e hidroeléctrica requiere energía fósil en todas las etapas de su ciclo de vida, desde la minería de sus componentes, la fabricación de los equipos, su instalación y mantenimiento, así como su desmantelamiento una vez que han completado su vida útil. Además, dada su baja densidad energética y factor de planta, las fuentes renovables requieren grandes cantidades de materias primas.

La figura 68 muestra los materiales requeridos durante la construcción de la infraestructura de distintas fuentes renovables en comparación con las centrales nuclear y de gas a paridad de generación eléctrica. Como se puede observar, hidroeléctrica, eólica y solar sobresalen en el uso de concreto y acero.

El concreto es indispensable para diferentes tipos de infraestructura renovable:

- La construcción de las cortinas de las presas hidroeléctricas.
- Las grandes torres de los concentradores solares, que alcanzan alturas del orden de 150 m.
- La construcción de la cimentación de los aerogeneradores.

El concreto se hace con cemento, el aglutinante que mantiene unida la arena o la piedra triturada. El cemento es uno de los productos que consume más energía, ya que necesita calcinar hasta 1450 °C la piedra caliza en enormes hornos que funcionan, casi exclusivamente, con combustibles fósiles, como el carbón y el coque de petróleo. Las reacciones químicas involucradas producen cantidades de CO<sub>2</sub> adicionales: por cada kilogramo de cemento que se produce, se envía un kg de CO<sub>2</sub> a la atmósfera (1 kg de cemento/1 kg de CO<sub>2</sub>); la producción de cemento y concreto genera cerca del 9% de todas las emisiones de CO<sub>2</sub>.

**FIGURA 68. MATERIALES REQUERIDOS PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LA INFRAESTRUCTURA DE DIFERENTES TECNOLOGÍAS DE GENERACIÓN ELÉCTRICA**

**Nota:** ccs - Captura y almacenamiento de carbono.

**Fuente:** adaptado del sitio de la World Nuclear Association.<sup>8</sup>

En lo que respecta al acero, se trata de un compuesto indispensable para varias partes de la infraestructura de renovables:

- Las turbinas hidráulicas y la tubería de las centrales hidroeléctricas.
- Las gigantescas torres de los aerogeneradores.
- Varias partes de las máquinas excavadoras y los motores eléctricos.
- La tubería de los pozos geotérmicos y los ductos que transportan el vapor.

En la actualidad, los combustibles fósiles son esenciales para la producción de acero. Cerca del 71% del acero se produce en un alto horno, donde el coque de carbón (carbono de alta pureza) reacciona con el mineral de hierro y la piedra caliza. La reacción extrae el oxígeno del óxido de hierro del mineral y deja hierro líquido liberando carbono y oxígeno en forma de CO<sub>2</sub>. Por cada tonelada de acero se emiten alrededor de dos toneladas de CO<sub>2</sub> (1 ton de acero/2 ton de CO<sub>2</sub>), lo que representa casi el 10% de dichas emisiones.

<sup>8</sup> World Nuclear Association. [world-nuclear.org](http://world-nuclear.org)

Los combustibles fósiles entran también en otras etapas de la fabricación de la infraestructura renovable:

- La minería está a la base de cualquier tecnología renovable, ya que requiere minerales tales como el cobre, litio, cadmio, cobalto, zinc, aluminio plata, tierras raras, entre otros. La minería se hace, exclusivamente, con maquinaria que funciona con diésel y no hay manera de electrificarla. La densidad energética del diésel es entre 60 y 100 veces mayor que la de una batería, por ende, es imposible que el transporte de roca se haga con camiones eléctricos. El procesado de minerales es otra área donde el consumo de energía fósil es imprescindible, sobre todo cuando se usan procesos pirometalúrgicos que necesitan alta temperatura.
- En la fabricación de paneles solares, si bien el silicio cristalino se puede obtener de hornos eléctricos la reacción química necesita de carbono que procede de fuentes fósiles (coque de carbón y astillas de madera). Esto se debe a que el silicio elemental (Si) no se encuentra sólo en la naturaleza, sino que debe de extraerse del cuarzo ( $\text{SiO}_2$ ) mediante la utilización de carbono (C) y calor en el proceso de reducción carbotérmico donde ocurre la reacción  $\text{SiO}_2 + 2\text{C} \leftrightarrow \text{Si} + 2\text{CO}$  a temperaturas de 2000 grados centígrados.
- Algunas partes de la infraestructura, por ejemplo las aspas de los aerogeneradores, son de materiales derivados del petróleo. Todo tipo de lubricantes, resinas y pinturas son también productos de la petroquímica y tienen como precursores los hidrocarburos.
- La instalación, el mantenimiento y el desmantelamiento al final del ciclo de vida de cada infraestructura se hace con maquinaria, camiones, barcos y hasta helicópteros que funcionan con refinados del petróleo (diésel y turbosina), particularmente en el caso de los gigantes aerogeneradores tanto en tierra como, sobre todo, costa fuera (estos últimos, los más exigentes en términos energéticos).

Algo que tampoco se puede olvidar es que dicha infraestructura no sólo requerirá de mantenimiento, sino que también necesita ser sustituida cada 15-25 años en el caso de los parques eólicos y solares, y partes de ellas en el caso una central geotérmica o hidroeléctrica. Los elementos que se emplean en la infraestructura renovable se reciclan en menos del 5% (UNEP, 2011).

## Límites económicos de las fuentes renovables

Es común escuchar que las fuentes renovables modernas como la eólica y la solar son cada vez más baratas y compiten en términos económicos con las fuentes fósiles. Para comparar los costos de las instalaciones renovables se acostumbra usar el costo nivelado de la energía (*Levelized Cost of Energy*, LCOE), que es el valor del costo total actual de construir y operar una instalación generadora de energía a lo largo de toda su vida útil. Mide los costos totales que esa instalación tendrá a lo largo de toda su vida y los divide entre la producción de energía que generará también durante todos sus años de operación.

Es cierto que en los últimos 15 años el costo nivelado de las instalaciones solares y eólicas ha bajado significativamente, y las ha llevado al rango de las fuentes fósiles, hidroeléctrica, geotermia; en algunos casos, sus costos son aún menores, lo que se explica por la mejora tecnológica y la economía de escala. Sin embargo, el costo nivelado de estas fuentes no despachables no puede compararse directamente con las demás fuentes, ya que no incluye varios costos adicionales necesarios para su integración en el sistema eléctrico:

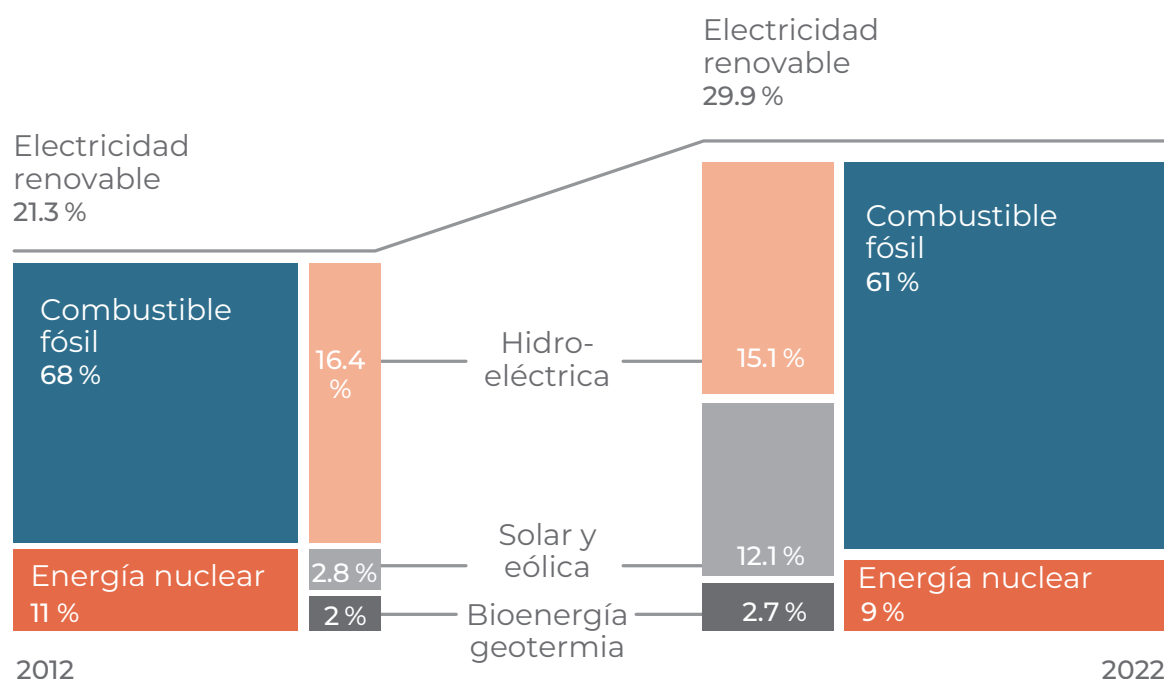
- Los costos para suplir su intermitencia. La generación de electricidad, cuando no hay sol ni viento, se compensa principalmente con centrales de ciclo combinado que funcionan con gas, con generación hidroeléctrica y, en mucho menor medida, mediante el almacenamiento. Todo lo anterior tiene costos importantes a nivel del sistema eléctrico.
- Los costos de conexión de las centrales solares y eólicas con la red eléctrica. Frecuentemente los lugares con mayor viento y sol no están cerca de las grandes ciudades o de los lugares donde hay mayor demanda. Un caso típico es el de los parques eólicos costa afuera.
- Los costos asociados al retiro (desmantelamiento) prematuro de las centrales tradicionales, normalmente planeadas para pagarse en 30-40 años, que ya no son necesarias por la introducción de las renovables.

El primer aspecto es el que más impacto tiene sobre los costos. Las estimaciones más recientes del costo nivelado (Lazard, 2023) incluyen también la compensación de la intermitencia de las fuentes solares y eólicas para los diferentes operadores del sistema eléctrico de los Estados Unidos. En algunos casos, por ejemplo en California, este costo puede llegar a duplicar el LCOE. Esto puede explicar por qué el costo de la electricidad para el consumidor es mayor en los países donde hay más penetración de las renovables no gestionables en la matriz de generación, como Alemania, Dinamarca o el estado de California, en los Estados Unidos.

## Las fuentes renovables en los usos finales

Un aspecto limitante adicional de las fuentes renovables es que, excluyendo la biomasa, éstas producen sólo energía eléctrica, que a nivel mundial representa, únicamente, la quinta parte de toda la energía que se consume. Como se puede apreciar en la figura 69 la aportación de las renovables a la generación eléctrica ha pasado de ser del 21.3% en el 2012 al 29.9% en el 2022, principalmente por el crecimiento de las fuentes eólicas y solar. Lo anterior muestra que, a pesar de los esfuerzos que se han venido realizando durante este lapso, el panorama eléctrico mundial no ha cambiado sustancialmente, dado que al mismo tiempo el consumo ha seguido incrementándose.

**FIGURA 69. COMPARACIÓN ENTRE LA GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD EN EL 2012 Y EL 2022**

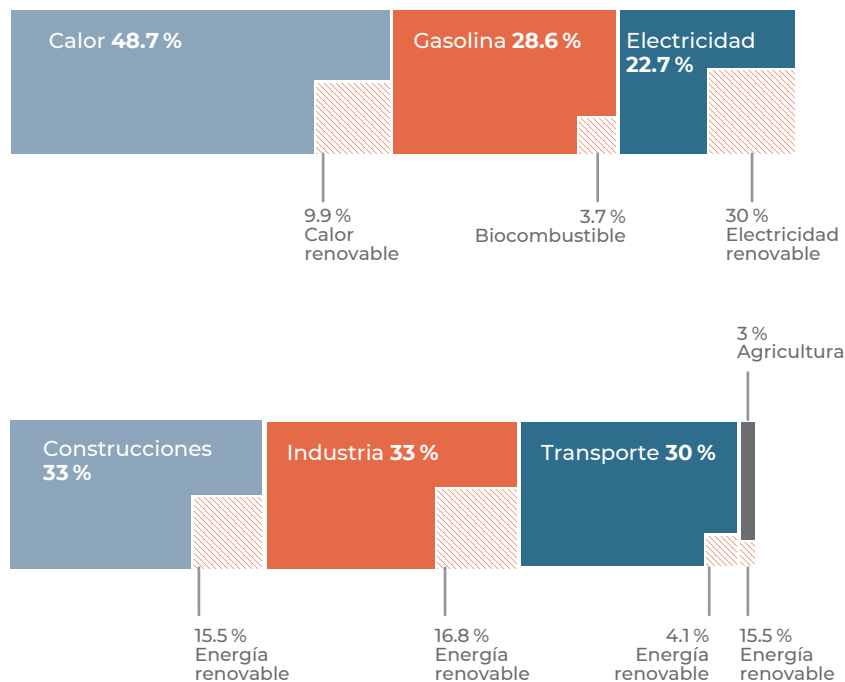


**Nota:** el tamaño de cada rectángulo es proporcional al valor absoluto.

**Fuente:** IRENA (2023).

El hecho de que, a excepción de la biomasa, las fuentes renovables sólo producen electricidad es relevante en la discusión sobre la transición energética, puesto que se necesita considerar de qué manera se suplirán el resto de los servicios no eléctricos que hasta la fecha han sido proporcionados por los hidrocarburos. Para ejemplificar este punto es útil observar cuánto inciden las renovables en los usos finales (figura 70).

**FIGURA 70. PENETRACIÓN DE LAS FUENTES RENOVABLES EN LOS DISTINTOS USOS FINALES A NIVEL MUNDIAL EN EL 2020**



Fuente: IRENA (2023).

Los datos disponibles para el 2020 mostraron, por un lado, que si bien las fuentes renovables habían llegado a proporcionar casi el 30 % de la electricidad, sólo representaban el 9.9 % del calor y el 3.7 % de los combustibles. Por otro lado, proporcionaron el 15.5 % de la energía utilizada en edificios (comercial, residencial, público), el 16.8 % en el sector industrial, el 15.5 % en la agricultura y, exclusivamente, el 4.1 % en el transporte. Incluso en este caso la fuente principal provino de los biocombustibles, ya que la electricidad sólo representó el 0.4 % del total de la energía consumida por el sector transporte.

### El hidrógeno como sustituto de las fuentes fósiles y como almacén de energía: ¿qué tan viable es?

Como hemos visto en la sección anterior, las fuentes renovables tienen serias limitaciones para sustituir a los combustibles fósiles en aplicaciones industriales y en el transporte. El sector industrial involucra procesos que necesitan temperaturas por encima de los 300 °C, lo que conlleva problemas a los que hay que hacer frente; estas temperaturas se pueden obtener con la combustión de la biomasa o el

calor geotérmico. Algunas limitantes pueden ser solventadas con hornos eléctricos o concentración solar, pero a una escala mucho menor, con obstáculos que no se plantean en la actualidad con los combustibles fósiles.

En lo que respecta al transporte, el reto es la sustitución del diésel para la maquinaria en la minería y la agricultura, así como para el transporte pesado por tierra y por mar. Otro uso fundamental de este recurso es en la petroquímica y, particularmente, en la producción de fertilizantes nitrogenados, donde el gas natural es un componente fundamental. Para todos estos usos, además de para el almacenamiento, se ha propuesto el hidrógeno. Si bien esto es teóricamente posible, hay límites técnicos, energéticos y económicos que restringen fuertemente esta sustitución, como se mostrará a continuación.

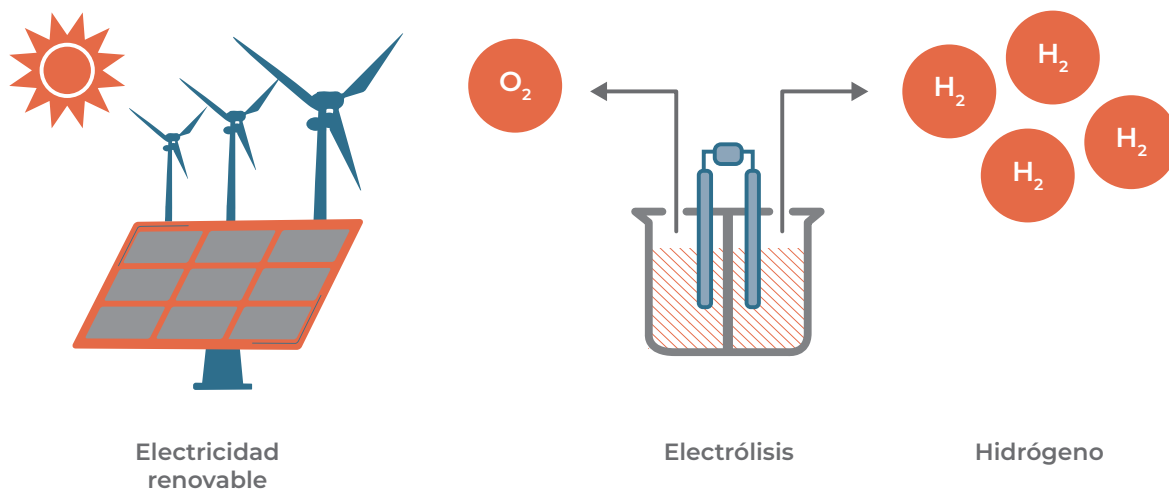
### ¿Cómo se produce el hidrógeno?

La energía que produce el hidrógeno proviene de la reacción electroquímica de este elemento con el oxígeno. Sin embargo, el hidrógeno sólo puede producir energía si se encuentra en forma libre, es decir, sin su enlace con el oxígeno con el que forma agua ( $H_2O$ ), o con el carbono, con el que forma hidrocarburos (por ejemplo metano o  $CH_4$ ). En este planeta, el hidrógeno no se encuentra en estado libre, en consecuencia, para extraerlo de estas moléculas se necesita invertir energía. En la actualidad, existen dos métodos principales para separar el hidrógeno:

1. A partir del metano o del carbón mediante el reformado con vapor de agua, que produce como resultado  $H_2 + CO_2$ . Es el método que provee el 96 % del hidrógeno usado en la industria. Sin embargo, este procedimiento no resuelve el problema ambiental o climático, ya que requiere de la quema de un combustible fósil que emite dióxido de carbono. De hecho, a este tipo de hidrógeno se le llama “negro” (si procede del carbón) o “gris” (si procede del metano). Asimismo, se ha propuesto la captura del  $CO_2$  como una alternativa para evitar las emisiones de GEI (hidrógeno “azul”). Sin embargo, esto incrementa los costos y no resuelve el problema del agotamiento de las fuentes fósiles.
2. Mediante electrólisis a partir del agua (figura 71). Esto consiste en pasar energía eléctrica entre un cátodo y un ánodo para separar el  $H_2$  y el  $O_2$ . Si la electricidad utilizada procede de fuentes renovables, el producto se define como hidrógeno “verde”, que se promueve para almacenar la electricidad excedente de parque eólicos y solares, y que se utiliza en la petroquímica o en aplicaciones que requieren una alta intensidad energética al recombinarlo con oxígeno en una reacción de combustión.

Otro método consiste en convertirlo nuevamente en electricidad a través de una pila de combustible de hidrógeno. En este caso el hidrógeno se convierte en un almacén de energía.

**FIGURA 71. ESQUEMA DE PRODUCCIÓN DEL HIDRÓGENO VERDE**



**Fuente:** elaboración propia.

### Coste y eficiencia de la producción de hidrógeno

La razón por la que sólo un 2-3% del hidrógeno que se produce actualmente procede de la electrólisis del agua es la económica. El hidrógeno verde cuesta hasta cuatro veces más que el que se produce a partir del gas natural (Ahman, 2021), por ende sólo se usa para aplicaciones que requieren un producto extremadamente puro, como el combustible de los cohetes espaciales. El costo de producción está relacionado con el costo energético. Como sabemos por la primera ley de la termodinámica, en cada transformación de una forma de energía a otra, perdemos una parte de ella en forma de energía calorífica. En el caso del hidrógeno verde, tenemos primero que producir electricidad (normalmente un proceso poco eficiente), para luego producir el hidrógeno con la electrólisis (eficiencia del 70%), y posteriormente licuarlo y transportarlo.

Si además lo queremos usar para el transporte, necesitamos volver a producir electricidad en una pila de combustible de hidrógeno (eficiencia máxima del 60%) y usar esta electricidad para mover un vehículo (eficiencia del 85%), además de la resistencia aerodinámica y a la fricción (eficiencia del 97%). En el mejor de los casos, contando sólo las pérdidas de la electrólisis y de una pila de combustible óptima, tenemos un

rendimiento del 42%. Pero si sumamos las pérdidas por licuar y almacenar el hidrógeno y las propias del vehículo eléctrico, el rendimiento no supera un 33%; si usamos la electricidad directamente en un vehículo eléctrico con batería el rendimiento es del 77% (Endesa, 2023).

## Los problemas del transporte del hidrógeno

Al ser la molécula más pequeña del universo, el hidrógeno tiende a escaparse de cualquier contenedor. Además, es altamente corrosivo y fragiliza los metales. A temperatura ambiente, los átomos de hidrógeno pueden ser absorbidos por las aleaciones de acero al carbono. Con el tiempo, el hidrógeno penetra hacia los límites de los granos metálicos y forma burbujas que ejercen presión sobre los mismos. La presión puede aumentar a niveles en los que el metal tiene ductilidad y resistencia reducidas. Por lo anterior, para poder utilizarlo se necesita almacenarlo como un líquido criogénico o como un gas altamente comprimido, lo que requiere mucha energía. En cualquier caso, existen serios problemas provocados por la baja densidad del hidrógeno.

Para transportarlo en forma líquida a  $-253^{\circ}\text{C}$  (sólo  $20^{\circ}\text{C}$  por encima del cero absoluto), se necesita un tanque de un volumen de 180 l, que pesaría casi 100 kg para sólo 4 kg de hidrógeno, con un rendimiento de unos 400 km como combustible para un vehículo. Por lo tanto, el hidrógeno no soluciona el problema del volumen y del peso de las baterías de un coche eléctrico, ya que, si bien la densidad energética del combustible es mayor que la de las baterías, el peso y volumen del depósito es mucho mayor y apenas compensa la diferencia. Por las mismas razones, el transporte de hidrógeno del sitio de producción a la estación de distribución necesita tuberías de acero especial muy caras.

## ¿Es viable el hidrógeno verde para sustituir las fuentes fósiles?

Como se argumentó antes, el hidrógeno se promueve como un vector para sustituir las funciones que no pueden ser electrificadas, que actualmente generan el 27% de las emisiones GEI. Esto corresponde a 2000 millones de toneladas equivalentes de petróleo por año, que necesitan sustituirse por 10000 millones de toneladas de hidrógeno/año ( $\text{MtH}_2/\text{a}$ ).

De acuerdo con el estudio de Prieto (2021) la electricidad necesaria para producir este hidrógeno sería de 52.174 TWh/año sólo para este fin. Esto es aproximadamente dos veces la demanda mundial de electricidad del 2018, de la que solamente el 26% se generaba a partir de fuentes renovables. En otras palabras, se necesitaría crecer casi ocho veces la generación renovable, tan sólo para este propósito. La limitación

de espacio, minerales críticos y capacidad industrial hacen de esto una tarea casi imposible, además de implicar altos costos ambientales relacionados con la minería y los procesos industriales asociados.

En conclusión, si bien el hidrógeno puede sustituir los combustibles fósiles en diversas aplicaciones, su baja eficiencia, altos costos y limitada escalabilidad indican que su uso debería limitarse para un número muy restringido de fines, altamente prioritarios para la sociedad.

## 7.9 ACTIVIDADES Y ESTRATEGIAS SUGERIDAS

### Actividad 1. Energía hidroeléctrica

#### Reflexión sobre la capacidad hidroeléctrica

Revisa la figura 51 que muestra el porcentaje de generación correspondiente a la energía hidroeléctrica para el año 2022.

#### Sugerencias sobre el contenido

- Encuentra un mapa en el que se muestren los países con mayores contribuciones a la matriz energética eléctrica mundial a partir de la hidroeléctrica.
- Obtén las matrices energéticas de aquellos países que mayor aportación tienen a la matriz energética eléctrica mundial a partir de la hidroeléctrica.

#### Preguntas guía:

- ¿Cuáles son los países que contribuyen más a partir de la fuente hidroeléctrica a nivel mundial? ¿Qué características comparten?
- Indaga acerca de las presas construidas en esos países y sus potenciales de generación eléctrica.
- Con base en lo aprendido, ¿qué tanto crees que pueda crecer la generación hidroeléctrica?

## Actividad 2. Geotermia

### Reflexión sobre la capacidad geotérmica

Revisa los porcentajes de generación de energía eléctrica por parte de la geotermia en el sitio de la Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA): <https://www.irena.org/>

### Sugerencias sobre el contenido:

- Encuentra un mapa en el que se muestren los países con mayores contribuciones a la matriz energética eléctrica mundial a partir de la geotermia.
- Obtén las matrices energéticas de aquellos países que mayor aportación tienen a la matriz energética eléctrica mundial a partir de la geotermia.

### Preguntas guía:

- ¿Cuáles son los países que contribuyen más a la matriz energética eléctrica a partir de la geotermia a nivel mundial? ¿Qué características comparten?
- Indaga acerca de los campos geotérmicos en esos países y sus potenciales de generación eléctrica.
- Con base en lo aprendido, ¿qué tanto crees que pueda crecer la generación geotérmica?

### Actividad 3. Eólica

#### Generación eólica: comparación entre países

Busca en línea información sobre los países con mayor cantidad de parques eólicos, tanto en tierra como costa afuera. Algunos sitios posibles son:

- Our World in Data<sup>9</sup>
- Statista<sup>10</sup>
- Agencia Internacional de Energía Renovable<sup>11</sup>

#### Actividades sugeridas:

- Elabora una tabla comparativa en la que incorpores los siguientes datos de los seis países con mayor generación eléctrica eólica: capacidad eólica instalada, y generación anual y crecimiento en la última década.
- ¿Dónde crees que el recurso eólico puede crecer más en el futuro?

<sup>9</sup> Our World in Data. <https://ourworldindata.org>

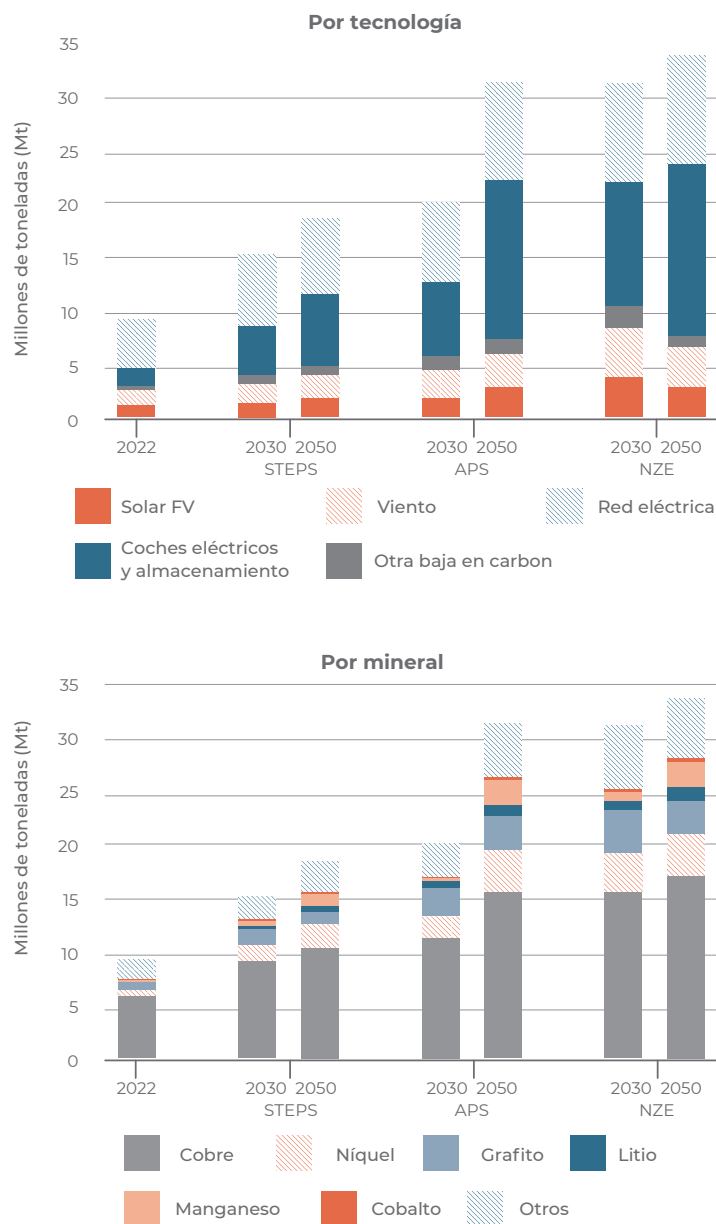
<sup>10</sup> Statista. <https://www.statista.com>

<sup>11</sup> Agencia Internacional de Energía Renovable (IRENA). <https://www.irena.org>

Actividad 4. Minerales críticos en la tecnología solar y baterías

Revisa la siguiente imagen:

**FIGURA 72. REQUERIMIENTOS DE MINERALES PARA TECNOLOGÍAS RENOVABLES POR ESCENARIO**



**Nota:** STEPS = Escenarios de políticas declaradas; APS = Escenario de Promesas Anunciadas; NZE = Escenario de emisiones netas cero. No incluye el acero ni el aluminio.

**Fuente:** IEA (2023).

### Sugerencias sobre el contenido:

- El despliegue de las diferentes tecnologías renovables requiere multiplicar la extracción de minerales.
- La disponibilidad de estos minerales no está garantizada y el coste económico y ambiental de su extracción puede ser muy alto.

### Preguntas guía:

- Investiga qué minerales son necesarios para la generación eléctrica fotovoltaica y para la construcción de baterías, en qué países del mundo se encuentra concentrada su extracción y dónde se producen los paneles solares y las baterías.
- ¿Qué implica esta distribución para los países que no disponen de los minerales o de la tecnología de fabricación?

### Actividad 5. Biomasa

#### Reflexión sobre el área de cultivo que los cultivos dedicados para biocombustibles

Revisa el análisis que realizó Tom Murphy en la p. 233 de su libro *Energy and Human Ambitions on a Finite Planet* (2021), donde estima la superficie necesaria para sustituir el consumo de petróleo de los Estados Unidos con etanol de maíz con una TRE de 1.2.



**Sugerencias sobre el contenido:**

- Reflexiona sobre el proceso de análisis y las conclusiones a las que se llega.

**Preguntas guía:**

- Usando la misma metodología calcula la superficie equivalente para sustituir el consumo de petróleo en México.

**Actividad 6. Comparativa****Comparación de las fuentes renovables**

- Elabora una tabla de doble entrada en la que compares las ventajas y desventajas de cada fuente de energía mencionadas en este capítulo considerando las diversas variables presentadas a lo largo del mismo.
- Acompaña la tabla con gráficas que demuestren lo aseverado en ella.

**Solar****Ventajas**

- Es limpia y renovable, no cuesta dinero.
- Disminución de la dependencia energética con el exterior.
- Evita el despoblamiento progresivo de determinadas zonas.
- Permite alimentar a zonas alejadas de la red eléctrica.
- Instalaciones fácilmente modulables.
- Mantenimiento y riesgo de avería muy bajo, instalaciones silenciosas y sencillas.
- Energía descentralizada que puede ser captada y utilizada en todo el territorio.
- Tecnología de rápido desarrollo que tiende a reducir el costo y aumentar el rendimiento.

### Desventajas

- No despachable (intermitencia), lo que reduce el factor de planta.
- Alta inversión inicial.
- Depende de materias primas no renovables que se reciclan muy poco.
- Se utilizan combustibles fósiles para la extracción de materias primas, para su fabricación, instalación y retiro.
- No todas las áreas son potencialmente aptas para su generación.
- Se requiere de grandes áreas para su instalación.
- Se explotan primero las mejores áreas (alto potencial y corta distancia con la red nacional de electricidad).

### Hidráulica

#### Ventajas

- Bajos costos de operación y costo de construcción predecible.
- No hay residuos ni emisiones durante la operación.
- Tecnología sencilla y probada.
- Tiempo de vida de 50, 60 o 150 años.
- La turbina hidráulica es una máquina sencilla y segura.

#### Desventajas

- Alta inversión inicial.
- Significativos requerimientos de terrenos.
- Ubicación condicionada por la geografía (si está ubicada lejos de los centros de consumo requiere de la construcción de sistemas de transmisión).
- Afectación social (relocalización) por inundación de grandes áreas.
- Impacto ambiental (biológico, climático).
- Disponibilidad que fluctúa dependiendo del régimen de lluvias.
- Peligro potencial por derrumbes.

Nota: la mayor parte de los sitios han sido explotados ya, quedan lugares cada vez más pequeños o remotos.

## Eólica

### Ventajas

- Tecnologías conocidas, instalación y desmonte rápido.
- No hay costos de combustibles ni de residuos durante la operación.
- Soluciones limpias para áreas remotas, fácilmente escalable.
- Muy bajo uso de agua comparado con otros recursos.
- Instalación rápida (un parque eólico de 50 MW se puede instalar en un año).

### Desventajas

- No despachable (intermitencia). Tiene una variabilidad menos predecible que la fotovoltaica.
- Retos de integración a la red por la variabilidad.
- Dependencia de combustibles fósiles para construcción y mantenimiento.
- Alto costo inicial en comparación con fuentes térmicas.

## Geotermia

### Ventajas

- Única renovable que puede proporcionar suministro de carga base constante.
- Impacto ambiental y visual reducido.
- No requiere repositorios finales de almacenamiento de residuos.
- Bajas emisiones de CO<sub>2</sub>.

### Desventajas

- No es completamente renovable.
- Alto riesgo en la fase de exploración.
- Sólo disponible en ciertos lugares.
- Puede producir fluidos contaminantes

## Biomasa

### Ventajas:

- Es almacenable.
- Permite satisfacer la mayor parte de los usos finales.
- Es ubicua.
- Es escalable.
- Es comercialmente madura.

### Desventajas:

- Pueden competir con la producción agrícola para comida (agua, tierras) cuando se trata de un cultivo dedicado.
- Puede promover la monocultura extensiva y reducir la biodiversidad.
- Puede emitir partículas tóxicas en su combustión.
- Puede incrementar la erosión y la degradación de los suelos.
- Los sistemas bioenergéticos presentan en general costos de capital comparativamente más elevados que los sistemas convencionales basados en energía fósil.
- Normalmente no existe un marco institucional eficiente para estimular la producción y utilización racional de la bioenergía.

## Actividad 7. Generación de electricidad

Revisa las siguientes imágenes sobre la evolución de la generación eléctrica de los Estados Unidos de 2018 a 2024:



**Preguntas guía:**

- ¿Cuáles son las fuentes de energía eléctrica que más utilizan los Estados Unidos?
- ¿Cómo han evolucionado cada una de ellas? ¿Qué tendencias observas?
- ¿Qué porcentaje de la generación procede de fuentes renovables?

Nota: puedes realizar el ejercicio anterior para otros países que consideres de gran relevancia. Indica el motivo de tu elección.

Ahora revisa la generación eléctrica del estado de California en el sitio del California Independent System Operator.<sup>12</sup>

- ¿Qué diferencias observas con los Estados Unidos en su conjunto?
- ¿Cómo compensa California la variabilidad de la generación solar?

## 7.10 REFLEXIONES FINALES Y DIARIO REFLEXIVO

### Transición energética: ¿una utopía o una realidad?

A partir de lo revisado en relación con las fuentes de energía renovables y no renovables, desarrolla una crítica reflexiva acerca de la tesis planteada en el título de este apartado reflexiva.

**Sugerencias:**

- Revisa los factores de planta de cada una de las tecnologías de generación eléctrica de México para el último año disponible.
- Revisa la matriz energética y los usos finales para el último año disponible.
- A partir de lo anterior reflexiona sobre qué tanto las fuentes renovables pueden servir para sustituir a las fuentes no renovables.

<sup>12</sup> California Independent System Operator. <https://www.caiso.com/todays-outlook/supply>







## 8. Estudio de caso

En este capítulo se presenta el estudio de caso de México como estrategia pedagógico-didáctica cuyo propósito es contextualizar lo explicado a lo largo del libro y enfocarlo en un caso real para que, de esta manera, se pueda comprender mejor el planteamiento teórico.

El objetivo del estudio de caso es analizar el estado de cada una de las fuentes de energía en México, pero con la finalidad última de mostrar que éste es extrapolable a cualquier otro país o región del mundo.

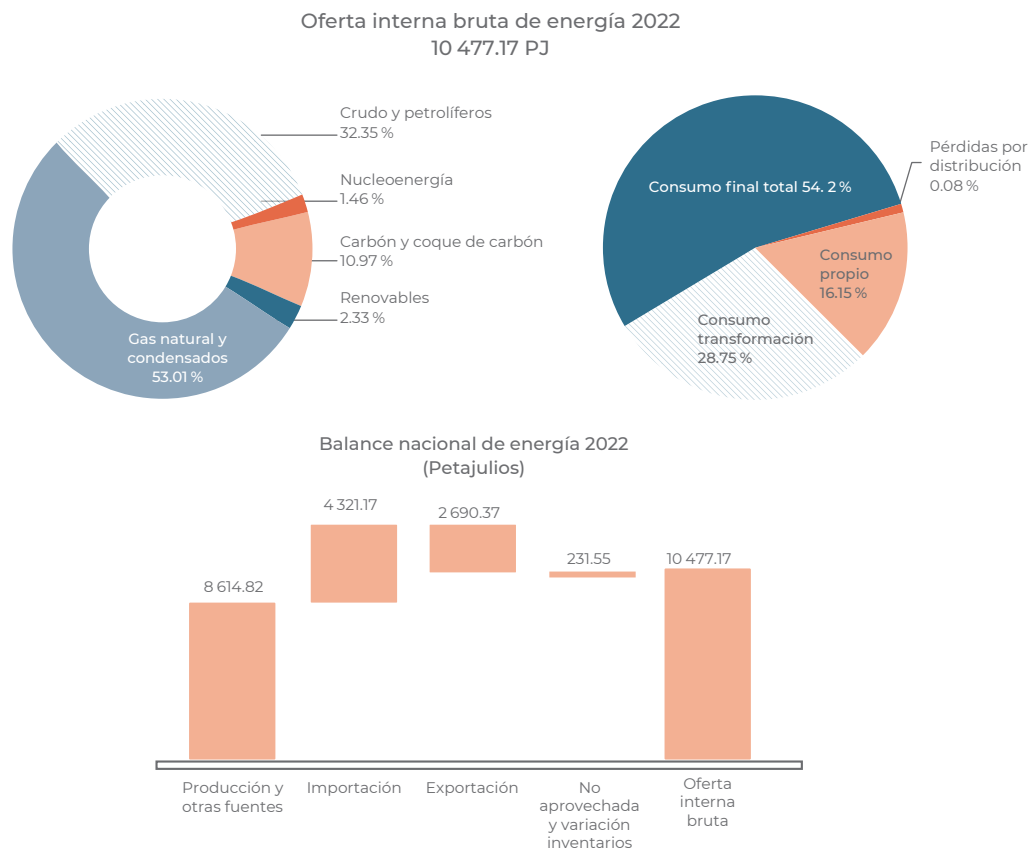
### 8.1 MATRIZ ENERGÉTICA Y FLUJO DE ENERGÍA

La matriz energética de un país es la combinación de las fuentes de energía primaria que se utilizan, con el porcentaje relativo de cada una de ellas. Esta muestra todos los tipos de energía que entran al sistema energético de un país antes de cualquier transformación. Incluye la energía que se importa de otros países y excluye la que se exporta, por lo que se define también como oferta interna bruta de energía.

De acuerdo con los últimos datos disponibles en el Balance Nacional de Energía (Sener, 2023a), en México la oferta interna bruta de energía para el 2022 fue de 10 477.17 petajulios (PJ), de los cuales un 87.5% estaba constituido por combustibles fósiles, un 1.5% por energía nuclear y un 11% por renovables (figura 73). La figura muestra también dos datos muy importantes:

- La energía que México importa (4 321.17 PJ) es mucho mayor que la que exporta (2 690.37 PJ)
- La energía que llega al consumo final (5 682.55 PJ) es sólo el 54% de la energía primaria que entra al sistema, ya que un 28.75% se pierde en las transformaciones y otro 16.15% se reinvierte en el propio sector energético para producir la energía primaria.

**FIGURA 73. OFERTA INTERNA BRUTA DE ENERGÍA, PÉRDIDAS EN TRANSFORMACIÓN Y BALANCE NACIONAL DE ENERGÍA EN MÉXICO PARA 2022**

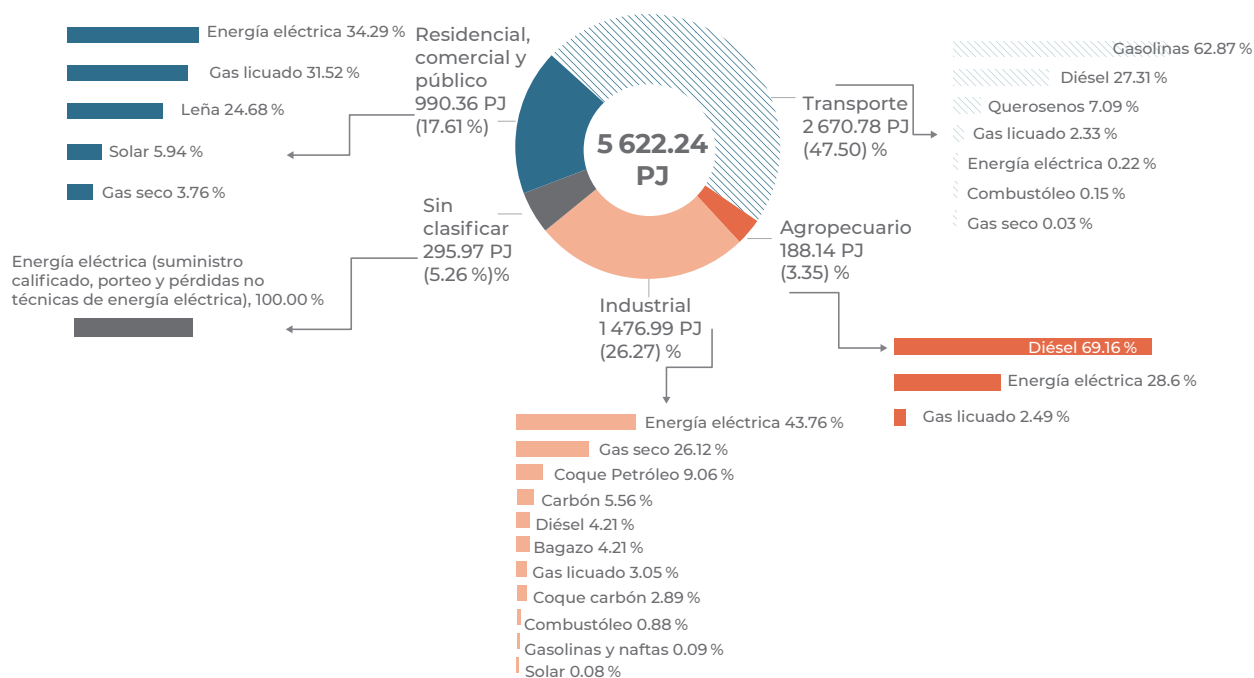


**Fuente:** Sener (2023a).

En lo que al uso final se refiere (figura 74), el sector que domina es el transporte, con un 47.5%; seguido por el sector industrial, con un 26.7%; el residencial y comercial, con un 17.6%; y el agropecuario, con 3.3%. Cabe mencionar que el Balance Nacional de Energía para el 2022 no asigna un 5.26% a ningún sector de uso final. Este porcentaje corresponde a energía eléctrica para los usuarios de suministro calificado, porteo (transmisión de energía) y pérdidas no técnicas.

En gran parte esta energía se refiere a usuarios de grandes empresas privadas, por lo que se puede deducir que el sector industrial cuenta con, por lo menos, el 30% del consumo final. Al revisar los diferentes sectores, podemos observar que el uso de la electricidad se destina, principalmente, al sector industrial y residencial, mientras que el sector transporte está totalmente basado en los combustibles fósiles.

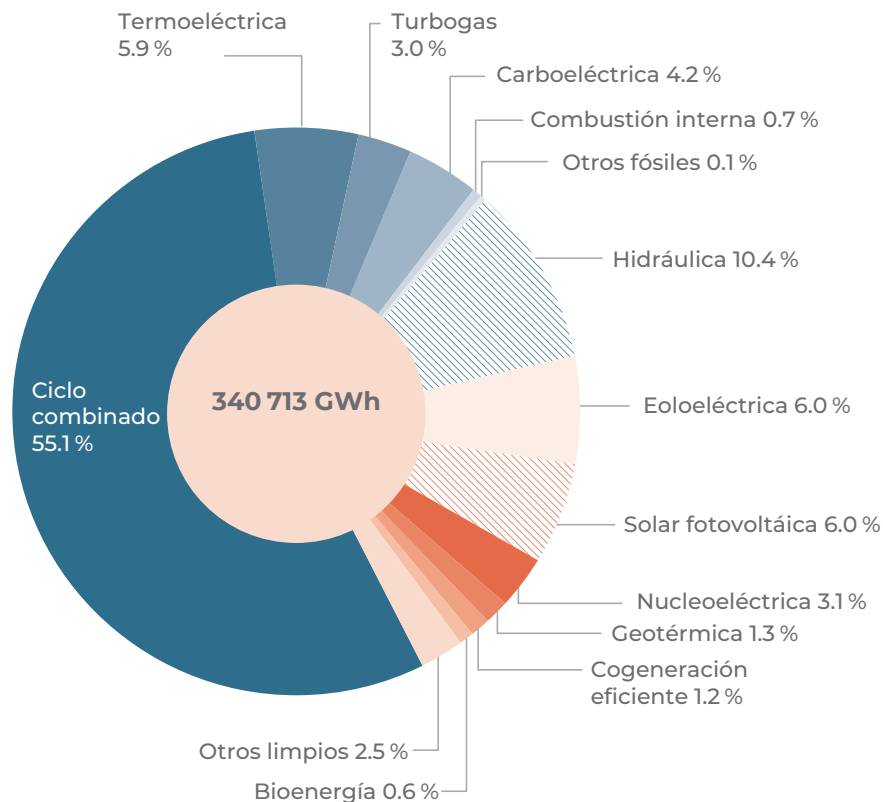
FIGURA 74. CONSUMO FINAL DE ENERGÍA EN MÉXICO POR SECTOR



Fuente: Sener (2023a).

En lo que respecta a la generación eléctrica, para el 2022 (Sener, 2023b) esta recae principalmente en las fuentes no renovables con un 69%, mientras que las renovables representan el 25.5% del total, la nuclear el 3.1% y "otros limpios" 2.5%. Estas últimas incluyen las que ahora la Secretaría de Energía (Sener) define como "energías generadas con el calor residual de un sistema que haya utilizado gas natural u otro combustible fósil".

Dentro de las fuentes renovables, la principal es la hidroeléctrica, con un 10.4%, mientras que la eólica y la solar tienen una participación del 6% cada una, y la geotermia del 1.3%. Hay que recordar que, si bien las fuentes renovables generan principalmente electricidad, existen otras aportaciones, como el uso térmico por parte de la geotermia y los biocombustibles a partir de biomasa.

**FIGURA 75. GENERACIÓN ELÉCTRICA DE MÉXICO POR FUENTE EN 2022**

**Fuente:** Sener (2023b).

Otra forma de dar cuenta del sistema energético mexicano es por medio de un diagrama de Sankey, en el que se muestran los flujos de energía desde las fuentes primarias, sus transformaciones y hasta los usos finales (ver figura 51 de la parte 1). En este tipo de diagramas el grosor de la flecha es proporcional a la cantidad de energía que fluye. El diagrama, que se refiere al año 2020, muestra algunos puntos importantes:

- El grueso de la energía que produce México es petróleo y gas natural.
- Se exporta menos energía en forma de petróleo de la que se importa en forma de productos refinados y gas natural.
- Una parte importante del gas es consumido por el propio sector energético (“consumo propio”).
- La electricidad está representada con cerca de una quinta parte del total; ésta se produce principalmente con gas natural y casi la mitad de lo que entra se pierde en la transformación.
- Los sectores de mayor consumo son el de transporte y el industrial.

## 8.2 FUENTES NO RENOVABLES

Una vez expuesto el panorama general, mostraremos cada uno de los recursos energéticos de México donde podremos reconocer muchas de las características que hemos observado en los capítulos anteriores.

### Petróleo y gas

En primer lugar, se presentan las provincias petroleras de México identificadas a partir de exploración sísmica 3D (figura 76). La principal región petrolera del país es el golfo de México y las áreas continentales que lo rodean. En ella se dieron las condiciones necesarias para la generación de hidrocarburos, puesto que se trata de un margen pasivo, en el que no ha habido vulcanismo. Otro evento determinante ocurrió hace 65 millones de años, la caída del meteorito en la esquina noroccidental de la península de Yucatán que dejó el gran cráter de Chicxulub. Este impacto acabó no sólo con los dinosaurios, sino también con el 80 % de la vida en la Tierra, y el evento se toma como el límite entre la era Mesozoica y la Cenozoica.

La relevancia para los sistemas petroleros es que, al impactar, fracturó la roca caliza de la plataforma de Yucatán y creó una espesa brecha sedimentaria, un depósito de roca muy porosa y permeable en la que, posteriormente, se establecieron los yacimientos petroleros supergigantes de México.

**FIGURA 76. PROVINCIAS PETROLERAS DE MÉXICO**



Fuentes: Ferrari y Hernández (2024).

En el resto del país no hay petróleo dado que no han existido en el territorio las condiciones para su formación, o debido a que el vulcanismo y la deformación han llevado al aumento de las temperaturas y a la destrucción de los reservorios. Desde el inicio del siglo pasado México ha perforado más de 31 000 pozos en centenares de campos identificados por medio de exploración geofísica. La ubicación de los pozos perforados en la historia de México se puede desplegar en el visualizador de la Comisión Nacional de Hidrocarburos (CNH)<sup>1</sup> si seleccionamos “Información CNH” del menú.

Asimismo, en el sitio de la base nacional de campos petroleros<sup>2</sup> se puede obtener información de cada uno de los campos existente en México. A pesar de la gran cantidad de campos y pozos existentes la distribución del recurso no es homogénea. El 8% de la producción actual se encuentra en la provincia petrolera de las cuencas del sureste (figura 76) que, históricamente, ha producido el 8% de todo el petróleo. Esto no sorprende, porque en la zona de aguas someras de esta provincia, la llamada sonda de Campeche, es donde se encuentran los campos supergigantes de México: Cantarell (Akal), Ku, Maloob y Zaap.

Los primeros campos de petróleo de México los descubrieron y explotaron empresas extranjeras (inglesas y estadounidenses) a principios del siglo pasado. En 1938 el presidente Lázaro Cárdenas nacionalizó el petróleo por considerarlo un bien de la nación, lo que conllevó la fundación de Petróleos Mexicanos (Pemex), institución que se encarga de la industria petrolera a todos los niveles. En el periodo comprendido entre 1938 y 1959, la extracción fue exclusivamente terrestre. En 1959 se descubrió el primer campo marino y se empezó a extraer petróleo en aguas someras.

Si se revisa la evolución de la producción petrolera desde 1960 hasta el 2022 (figura 77), observamos que el gran cambio ocurrió en 1976, cuando se descubrió el campo supergigante de Cantarell (Akal en la nomenclatura de Pemex), que recibió el nombre del pescador que advirtió a Pemex de las emanaciones de petróleo que existían en esta región. Este yacimiento resultó el segundo campo petrolero más grande del mundo por producción, y a raíz de su explotación la producción de petróleo nacional despuntó, lo que convirtió a México en uno de los principales países petroleros del mundo. En su auge, Cantarell llegó a una producción de 2 millones de barriles diarios (MMbd), equivalente al 60% de la producción, con sólo 200 pozos.

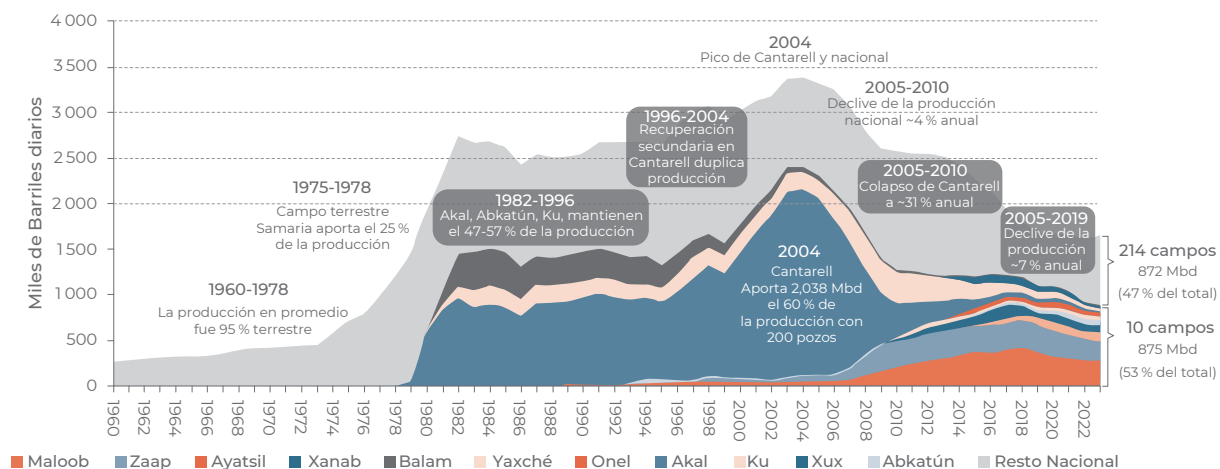
Hacia el año 1996, la producción de Cantarell comenzó a declinar, lo que llevó a que se recurriera a métodos de recuperación secundaria con inyección de N<sub>2</sub> para empujar el aceite hacia los pozos productores. Esto produjo un incremento de la producción que se alargó por escasos años, ya que en el 2004 comenzó a caer defi-

<sup>1</sup> Comisión Nacional de Hidrocarburos. <https://mapa.hidrocarburos.gob.mx/>

<sup>2</sup> Base nacional de campos petroleros. <https://campos.hidrocarburos.gob.mx/>

nitivamente y con él toda la producción de México. El 2004 queda entonces como el año en el que se alcanzó el pico mexicano de producción petrolera.

**FIGURA 77. EVOLUCIÓN DE LA PRODUCCIÓN PETROLERA DE MÉXICO DESDE 1960 HASTA EL 2023**



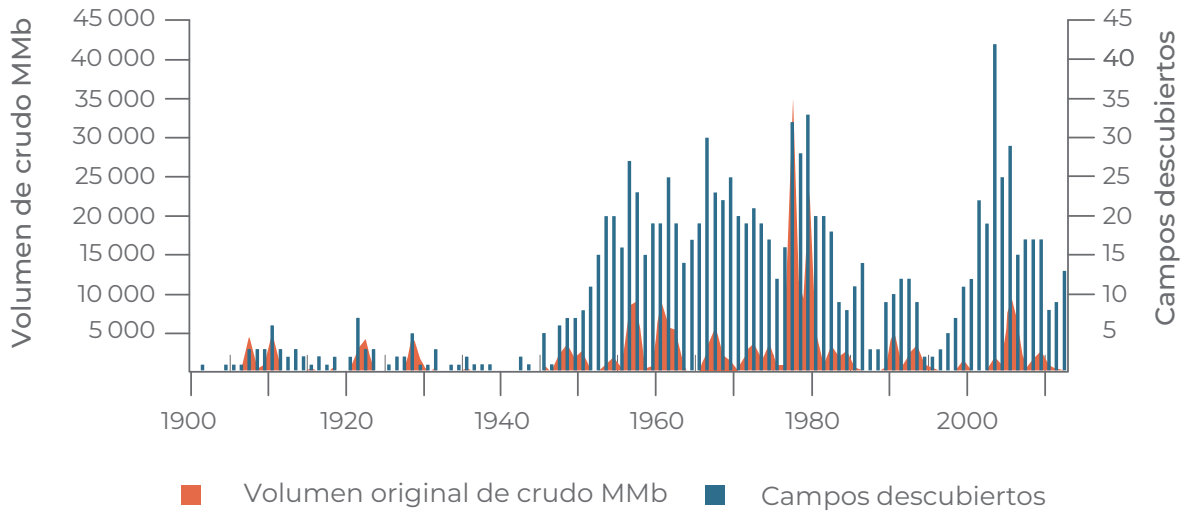
**Fuente:** Ferrari et al. (2024).

Como se observa en la figura 77, la caída de Cantarell fue parcialmente compensada por los tres grandes campos supergigantes: Ku, Maloob y Zaap; sin embargo, en su conjunto sólo llegan a producir 0.8 MMbd contra los 2 MMbd del pico de Cantarell. Posteriormente, para suplir el inicio del declive de estos tres campos, entraron en producción un número creciente de campos cada vez más pequeños, tanto que en el 2023 los 10 campos más grandes sólo generaron un 40% de lo que producía Cantarell por sí solo (figura 77).

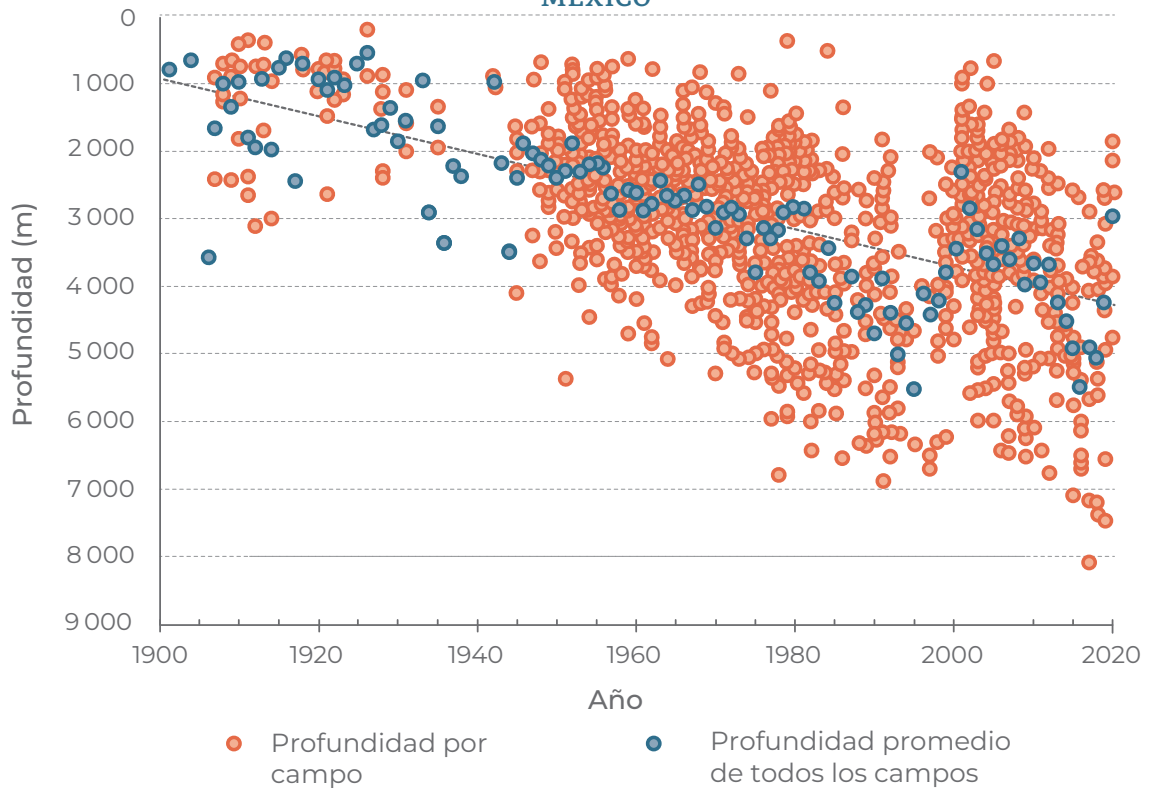
Lo anterior es ejemplo de un fenómeno que se observa en todo el mundo (ver capítulo 3, parte 1) y que se explica mediante la ley de rendimientos decrecientes. En el caso de México (figura 78a), el máximo volumen de petróleo descubierto se dio en la segunda mitad de los años setenta. Aunque en los años posteriores se descubrieron más campos, su tamaño fue menor. Además, se observa una tendencia a descubrir campos cada vez más profundos (figura 78b).

En resumen, con el tiempo se van explotando campos de menor tamaño, más profundos y con petróleo más ligero o exclusivamente de gas. De hecho, los campos mayores descubiertos y puestos en producción en los últimos años (Ixachi, Quesqui, Tupilco) son yacimientos profundos con altas presiones y temperaturas, que producen, principalmente, gas y condensados (> 40 °API).

**FIGURA 78.**  
**A) VOLUMEN Y NÚMERO DE CAMPOS DESCUBIERTOS DE 1900 A 2015**



**B) PROFUNDIDAD PROMEDIO DE LOS CAMPOS DESCUBIERTOS EN MÉXICO**



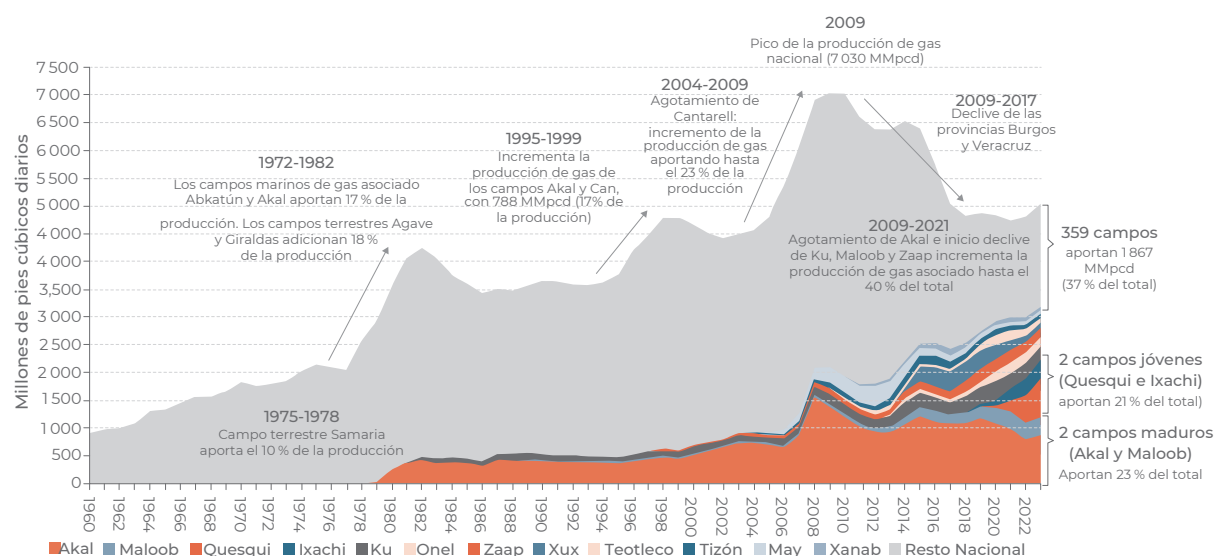
**Fuente:** Ferrari y Hernández Martínez (2024).

Todo lo expuesto implica, finalmente, mayores costos de producción. Desde el 2000, el costo de producción del petróleo mexicano se ha quintuplicado y la producción se ha reducido a la mitad (Ferrari y Hernández, 2024; Ferrari et al., 2024). Como resultado, la productividad por pozo ha bajado a un 33% y el rendimiento de la inversión se ha desplomado diez veces: en el 2000, por cada millón de pesos invertido en Pemex Exploración y Producción, se produjeron 66 barriles diarios, mientras que en el 2020 la cantidad se redujo a 6 barriles diarios (Ferrari y Hernández, 2024).

En lo que respecta al gas, la historia de producción es muy similar (figura 79), ya que, en gran medida, la producción de este insumo viene asociada al petróleo, salvo en los yacimientos de la provincia de Burgos que son de gas seco. El pico de producción del gas tuvo lugar en el 2009, poco después del colapso de Cantarell (2004), lo que es normal dado que los campos petroleros producen más gas en su fase final de producción.

Aunque el descubrimiento y la explotación de campos terrestres profundos (Quesqui, Ixachi) (figura 79) está incrementando temporalmente la producción de gas en el mediano y largo plazo, ésta seguirá aproximadamente la misma trayectoria que la del petróleo, con un desfase de cinco a diez años. El problema adicional del gas es que de él depende buena parte de la generación de electricidad, y México está importando cantidades crecientes de este combustible.

**FIGURA 79. EVOLUCIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE GAS EN MÉXICO**



**Fuente:** Ferrari et al. (2024).

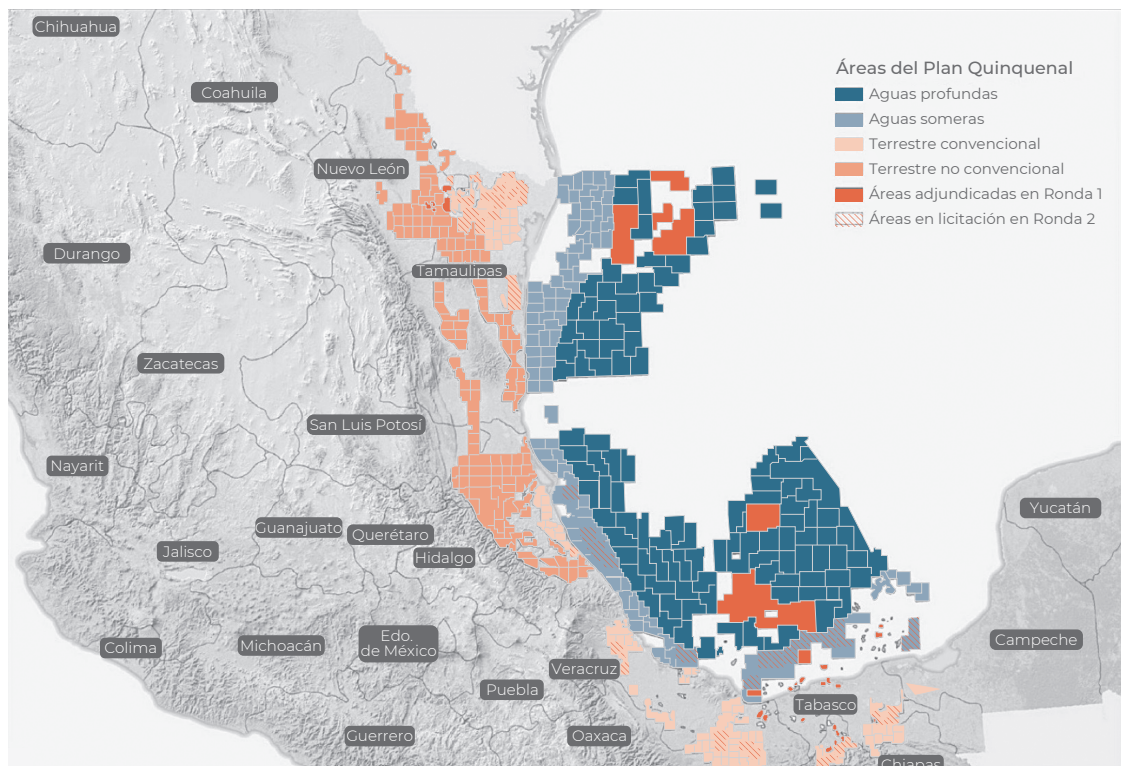
Además de lo que implica esta dependencia del extranjero, existe el riesgo de que el gas no convencional, que en la actualidad representa el 82 % de la producción de los Estados Unidos, empiece a declinar (Berman, 2022). A pesar de ello, en el periodo

2019-2023, la CFE ha invertido casi 6 000 millones de dólares para construir 7 GW de capacidad adicional en 10 nuevas centrales de ciclo combinado, una de turbo gas, además de dos térmicas. Por su parte, el Programa Indicativo para la Instalación y Retiro de Centrales Eléctricas 2023-2037 (Sener, 2023b) prevé que el 13% del crecimiento adicional de la capacidad entre el 2027 y el 2037 sea nuevamente con centrales de ciclo combinado.

### Hidrocarburos no convencionales

Los recursos no convencionales identificados en México son, por un lado, el petróleo y el gas de lutitas en tierra y, por otro lado, el petróleo de aguas profundas. La ubicación de los bloques identificados por la CNH se muestra en la figura 80.

**FIGURA 80. UBICACIÓN DEL PETRÓLEO NO CONVENCIONAL Y DE AGUAS PROFUNDAS EN MÉXICO DE ACUERDO CON EL PLAN QUINQUENAL DE LICITACIÓN DEL SEXENIO 2012-2018**



Fuentes: Fundar (2017).

En lo referente a las aguas profundas, la estructura geológica del golfo de México hace que las únicas zonas con áreas potenciales se encuentren a las afueras de Tabasco y Campeche, y en la terminación suroccidental de los yacimientos *off-shore*

de Texas (Franja de Perdido). Esto porque son los dos márgenes pasivos que se formaron durante la apertura del golfo de México en el Jurásico.

Para el 2022, en México sólo se habían perforados 34 pozos de aguas profundas en la Franja de Perdido, lo que es un valor muy reducido si se compara con los más de 2000 pozos de aguas profundas de la parte estadounidense del golfo. Los pozos de Perdido tienen un tirante de agua de hasta 2600 m y una profundidad total máxima de 7632 m. De acuerdo con la CNH, únicamente 17 de ellos producen, principalmente, gas o petróleo pesado, mismos que no siempre son explotables desde el punto de vista comercial.

En lo que respecta al petróleo y al gas de lutitas los recursos se ubican en la zona fronteriza de Coahuila, Nuevo León y Tamaulipas, donde terminan los yacimientos de la Formación Eagle Ford de los Estados Unidos (primordialmente de gas), y en el norte de Veracruz, donde hay potencial de petróleo en formaciones del Jurásico. Hasta la fecha, se han perforado 19 pozos exploratorios en el NE de México para estimar los recursos potenciales. De estos, únicamente diez son productores comerciales de gas y uno de aceite y gas. No obstante, con base en los datos proporcionados por Pemex, el *fracking* ha sido utilizado también en 924 pozos convencionales (Cartocrítica, 2019).

- En la actualidad hay quien cree que México debería explotar el petróleo no convencional como lo hicieron los Estados Unidos, ya que esto puede revertir el declive de la producción. Sin embargo, aún sin considerar los graves impactos ambientales que conlleva la perforación masiva de pozos con el uso del *fracking*, la explotación del no convencional en México tiene fuertes limitaciones.
- Sólo tenemos una pequeña fracción de lo que tienen los Estados Unidos y no hay todavía reservas certificadas sino “recursos prospectivos”, que son más inciertos que las reservas.
- En el caso del gas hay grandes discrepancias entre las estimaciones de la Agencia de Energía de los EE. UU. y la CNH: 545000 millones de pies cúbicos (MMMpc) contra 141 (MMMpc).
- Dado el bajo factor de recuperación del no convencional, quizás un 10% pueda traducirse en reservas técnicamente recuperables. Si esto sucediera, se estaría hablando de 5.5 años de la producción actual de petróleo y 4.7 años del consumo actual de gas.
- El costo promedio de equilibrio (*breakeven*) para la extracción de petróleo no convencional en los Estados Unidos para el 2023 se estimó en 54 USD/b, que es tres veces más alto que el costo de extracción de crudo de Pemex (17.8 USD/b en 2022).

- Considerando el costo de extracción de los Estados Unidos, se necesitarían 3.4 billones de pesos, equivalente a 7.5 veces el presupuesto de Pemex Exploración y Producción en 2023. Pero el desarrollo de estos recursos en México tendría un costo mayor que en los Estados Unidos por la falta de la infraestructura (caminos, ductos, estaciones de bombeo entre otros) y un mayor costo del capital y de los insumos.

Por todo lo anterior resulta evidente que la explotación de recursos no convencionales en México sería una apuesta de corto plazo con un altísimo costo económico y ambiental, que no resolvería el problema de fondo del agotamiento de los recursos fósiles. El caso de México es típico de todos los países que han pasado el pico de la producción de hidrocarburos, casos que se han examinado en el capítulo 3 los costos de extracción crecen constantemente por la disminución de la Tasa de Retorno Energético (EROI). Desde el pico del 2004, el país ha entrado en un proceso irreversible de retornos decrecientes, que implica un incremento de los costos energéticos y económicos tanto de exploración como de producción.

Además, desde el 2015, México es importador neto de energía; esto es, importa más energía en forma de gasolina, diésel y gas que la que exporta como petróleo crudo (Sener, 2023a). Sin embargo, de acuerdo con las estimaciones más recientes, aunque México refinara todo el petróleo que produce, no sería suficiente para la demanda de gasolina nacional (Ferrari et al., 2024).

Por lo tanto, dado que no es posible subir la producción de hidrocarburos, la soberanía energética sólo se puede alcanzar reduciendo de manera importante la demanda de gasolina, es decir del coche particular, por medio de un incremento del transporte público electrificado. Una disminución del consumo de derivados del petróleo en el sector transporte contribuiría, además, y de una forma más rápida, a la reducción de las emisiones de GEI.

## Carbón

El carbón representa una parte menor de la matriz energética de México (2.3%), y aunque existen ocurrencias en Sonora, Chihuahua, Guerrero y Oaxaca, casi la totalidad de la producción nacional procede de la región carbonífera de Coahuila, ubicada en la zona noreste del país (Secretaría de Economía, 2022) (figura 81). En ella existen tres cuencas principales: 1) Sabinas–Monclova, 2) Río Escondido y 3) Colombia–San Ignacio. La producción de carbón ha venido bajando paulatinamente en la última década debido, también, a la menor demanda del sector eléctrico en su transición a combustibles menos sucios (SGM, 2021).

**FIGURA 81. UBICACIÓN DE LAS ZONAS CON POTENCIAL CARBONÍFERO DE MÉXICO**



**Fuente:** SGM (2021).

México exporta una cantidad muy limitada de carbón, principalmente de tipo antracita, a los Estados Unidos. Para el 2019 las exportaciones eran menores del 1 % de la producción nacional, pero las importaciones eran un orden de magnitud mayor, en gran medida por la importación de hulla bituminosa procedente de los Estados Unidos (SGM, 2021). Por lo que en este caso México es, también, importador neto de este recurso. El Programa Indicativo para la Instalación y Retiro de Centrales Eléctricas 2023-2037 (Sener, 2023b) no prevé adiciones de centrales térmica de carbón después del 2026.

## Nuclear

México cuenta con una central nuclear conocida como Laguna Verde, ubicada en la costa de Veracruz. La central tiene una capacidad de 1640 MW por medio de dos reactores nucleares tipo BWR de 820 MW eléctricos cada uno. Para el 2022 produjo cerca del 3.1 % de la electricidad de México (figura 75).

Laguna Verde entró en operación en 1990. Su funcionamiento y distribución se encuentra a cargo de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) y de la responsable de las actividades relacionadas con la energía nuclear en México, la Comisión Nacional de Energía Nuclear (CNEN), que nació en 1956. El encargado del almacenamiento del combustible nuclear y de la eliminación de su residuo es el propio gobierno de México a través de la Secretaría de Energía.

México no es uno de los países que más energía eléctrica genera a partir de la nuclear, se encuentra en el lugar 26 a nivel mundial. La conveniencia de crecer la energía nuclear en México se volvió a presentar en el 2023 en la voz de algunos grupos políticos. No obstante, existen una serie de argumentos en contra de la construcción de nuevas centrales nucleares:

- Disponibilidad del combustible y de la tecnología. México no cuenta con producción propia de uranio y sólo tiene reservas extraíbles muy limitadas (Grancea et al., 2020). Tampoco cuenta con la tecnología para la fabricación del combustible o para la construcción de los reactores, por lo que, de crecer su potencial nuclear, se incrementaría también la dependencia energética del extranjero.
- Escasez de sitios adecuados. Gran parte del territorio nacional tiene un alto riesgo sísmico, volcánico, hidrometeorológico y geológico. Asimismo, más de la mitad del territorio tiene escasez de agua, que es necesaria para el enfriamiento de los reactores. Por esta razón, la central que existe se construyó en la costa del golfo de México, que, no obstante, está sujeta a los riesgos que conlleva la llegada de huracanes.
- Costos y tiempo de desarrollo. Como vimos en el capítulo correspondiente, la construcción de una planta nuclear requiere grandes capitales y largos periodos de tiempo. Dada la necesidad de disminuir rápidamente las emisiones de GEI, la fuente nuclear no es la más adecuada para este propósito.
- En cuanto al papel de la energía nuclear para sustituir la importación de gas de los Estados Unidos, hay que recordar que la generación nuclear no es flexible y sólo puede servir como carga base, mientras que el gas se usa principalmente como una fuente versátil para cubrir las fluctuaciones de la demanda y de la generación eólica y fotovoltaica.

## 8.3 FUENTES RENOVABLES

### Energía hidroeléctrica

La energía hidroeléctrica en México se ha aprovechado desde hace ya un siglo, y en el 2022 representó el 10.2% de la energía eléctrica generada, con una capacidad instalada de 12614 MW (Sener, 2023b). El sistema de presas que más aporta a la generación hidroeléctrica de México es el Grijalva, con un porcentaje del 44%. Las

últimas centrales construidas, que pertenecen al sistema hidroeléctrico Santiago (Aguamilpa, El Cajón y La Yesca), funcionan a capacidad reducida debido a la falta de caudal suficiente durante muchos meses del año. De hecho, sólo se usan para cubrir los picos de la demanda, por lo que su factor de planta es muy bajo, del orden del 20%.

El potencial de crecimiento de la hidroeléctrica en México es bajo, ya que todos los ríos con un caudal apropiado ya se han aprovechado. Quedan lugares cada vez más remotos, de menor generación o con serios impactos ambientales y sociales. El problema con el recurso hídrico en México es que el territorio es dispar en cuanto a precipitaciones, las lluvias son abundantes en el sureste, mientras que en toda la parte norte del país la lluvia es mínima. Sin embargo, estas últimas son las que cuentan con mayor densidad de población y mayor actividad económica y, por ende, mayor demanda eléctrica.

A esto se le debe de agregar la variabilidad de las precipitaciones, que está siendo exacerbada por el cambio climático. Sólo en el periodo 2018-2022, la variación de la generación hidroeléctrica ha sido hasta del 35%. Pero en el 2023 bajó de un 47% con respecto al año anterior por efecto de la sequía que afectó México. No obstante, el crecimiento puede darse a pequeña escala. El Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) estima que hay 362 presas destinadas a riego con un potencial eléctrico de entre micro y pequeña generación. Ello aumentaría la capacidad en 484.41 MW y proporcionaría 1697 GWh de generación anual (Palacios et al., 2024).

Por su parte, el Programa Indicativo para la Instalación y Retiro de Centrales Eléctricas 2023-2037 (Sener, 2023b) prevé hasta el 2026 un incremento neto de 20 GW con nuevas centrales eléctricas, de las cuales el 2.2% correspondería a la hidroeléctrica. Para el periodo 2027-2037 prevé un crecimiento neto 44 GW, donde la hidroeléctrica contribuiría con un 5.7%.

## Energía geotérmica

México lleva más de 50 años explotando la energía geotérmica y actualmente se ubica en el 6° lugar a nivel mundial, con una capacidad instalada de 976 MW en el 2022. En materia de generación, la tecnología geotermoeléctrica representa en México el 1.3% del total, con 4412 GWh al cierre del 2021 (Sener, 2023b). México cuenta con cinco campos en operación, que en orden de capacidad instalada son: Cerro Prieto (570 MW), Los Azufres (242 MW), Los Humeros (95 MW), Domo San Pedro (50 Mw) y Tres Vírgenes (10 MW) (figura 82).

**FIGURA 82. CAMPOS GEOTÉRMICOS Y FLUJO DE CALOR EN MÉXICO**

**Fuente:** ve el original en <https://www.dropbox.com/scl/fi/yguaitllcx4kpb8cko5ju/Fig-82-Flujo-calor-y-geotermia.jpg?rlkey=q2zxbdud01wdjlf9rq6lwoy09&e=1&st=os4ey4bg&dl=0>

**Fuente:** Ferrari (2024).

Desde un punto de vista geológico, los campos mexicanos son de dos tipos (Ferrari, 2024):

1. Asociados a vulcanismo silíceo reciente, indicador de la presencia de una cámara magmática en enfriamiento a profundidad (calderas y complejos de domos del Pleistoceno superior y Holoceno). Entre los campos de este tipo se encuentran: Los Azufres, Los Humeros, La Primavera, Tres Vírgenes y San Pedro; como áreas potenciales existen Acozulco, el volcán Chichón y el volcán Tacaná.
2. Asociados a anomalías térmicas regionales profundas en áreas caracterizadas por extensión cortical, con o sin vulcanismo reciente, pero con fallas corticales mayores. Es el caso del campo gigante de Cerro Prieto, no obstante, existen áreas potenciales asociadas con la Faja Volcánica Transversal Mexicana occidental y central.

Al analizar a detalle los campos geotérmicos mexicanos, se descubre que el 90% de la generación procede tan sólo de dos campos: Cerro Prieto (60%) y Los Azufres

(30%), con los otros tres campos con porcentajes cada vez menores (Ferrari, 2024). Esta distribución fractal repite, a pequeña escala, lo que sucede con el petróleo. En esta comparación, Cerro Prieto sería el Cantarell de la geotermia, y Los Azufres equivaldría al complejo Ku-Maloob-Zaap.

El potencial estimado de producción geotérmica de México, según dos de los estudios más detallados, indican lo siguiente:

1. Estudio por parte de la Comisión Federal de Electricidad (CFE), en el que se estimaban las reservas mediante el método volumétrico del United States Geological Survey (USGS). Se llegó a la conclusión de que el potencial de crecimiento en los campos existentes podría ser de 186 MW más, mientras que las reservas probables podrían alcanzar los 1643 MW, y las posibles otros 5691 MW adicionales (Ordaz Méndez et al., 2011).
2. Estudio que evaluó detalladamente 20 campos geotérmicos prospectados tomando en cuenta sus características geológico-técnicas. A partir de éstos, se estimó que pudiera haber un crecimiento de entre 700 y 750 MW. Esto implica un poco menos de la capacidad instalada actualmente (Hiriart et al., 2011).

Por lo tanto, las reservas probadas en México son inferiores a la capacidad instalada actual. El potencial de crecimiento recae en *plays* medianos y pequeños, con capacidad instalable de un orden de magnitud inferior a los campos gigantes como Cerro Prieto y Los Azufres. De manera optimista se pudiera vislumbrar una duplicación de la capacidad instalada en el periodo de una década, a partir de las inversiones necesarias. Un incremento mayor podría venir de recursos no convencionales explotables con tecnologías EGS.

A pesar de ello, aún no existen ejemplos de generación comercial con potencia significativa para este tipo de recursos. Sin embargo, el Programa Indicativo para la Instalación y Retiro de Centrales Eléctricas 2023-2037 (Sener, 2023b) no prevé adición de capacidad adicional de la fuente geotérmica.

## Energía eólica

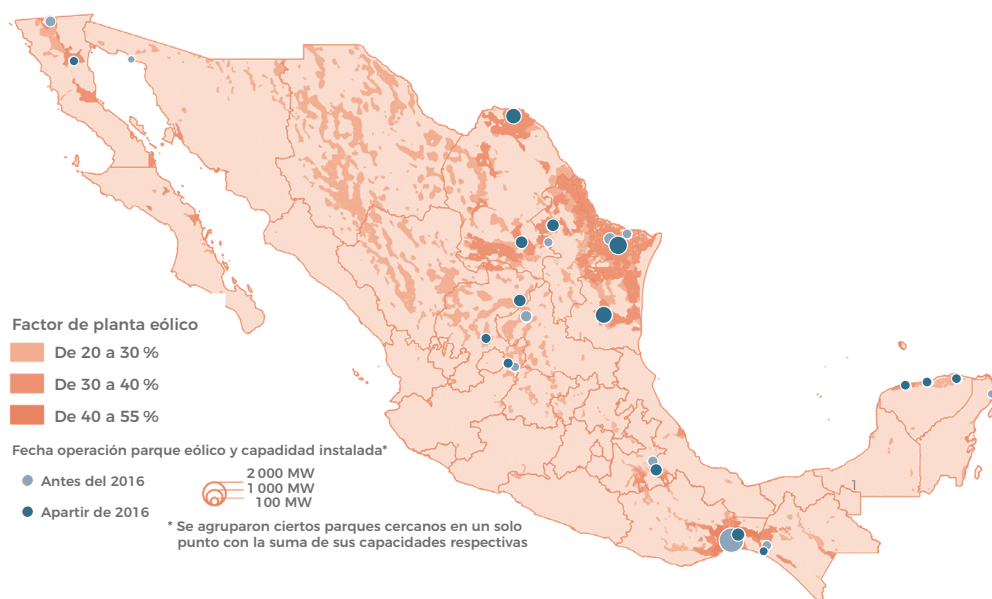
El desarrollo de la fuente eólica en México es relativamente reciente. A pesar de que en 1994 se construyó el primer parque eólico en el Istmo de Tehuantepec (La Venta), fue hasta finales de la primera década de este siglo que esta fuente empezó a tener un crecimiento sostenido. Para el 2021 México contaba ya con 68 parques eólicos, con una capacidad instalada de 7354 MW. En ese año la generación

eléctrica a partir de la fuente eólica fue de 21259 GWh, lo que implicó el 6.5% de generación eléctrica de todo el país.

En la figura 83 se muestran la ubicación de los parques eólicos existentes junto con las zonas de mayor factor de planta potencial identificados en el Atlas Nacional de Zonas con Alto Potencial de Energías Limpias (Azcl, actualmente discontinuado). Se observa que la zona de mayor potencial está localizada en el Istmo de Tehuantepec, donde se han instalado los primeros parques antes del 2016.

Otras de las zonas con un buen factor de planta potencial se ubican en Tamaulipas, Oaxaca, Coahuila, Baja California y la parte central del país. Varias de estas áreas tienen excelentes factores de planta a nivel mundial, pero en muchos casos se encuentran alejadas de las ciudades y otros centros de consumo, lo cual implica costos de conexión significativos para la construcción de líneas de alta tensión o el riesgo de la congestión de las líneas existentes.

**FIGURA 83. MAPA DE LOS PARQUES EÓLICOS EN OPERACIÓN EN MÉXICO ANTES Y A PARTIR DE 2016 Y, ASÍ COMO DEL FACTOR DE PLANTA DE LA GENERACIÓN EÓLICA**



**Nota:** estimado por el Atlas de zonas con alto potencial de energías limpias.

**Fuente:** retomado de Deniau et al. (2023).

Con los datos disponibles, en el 2021 el factor de planta promedio de la generación eólica mexicana fue aproximadamente del 33%, lo que representó uno de los mejores valores mundiales para las instalaciones en tierra. No obstante, es probable que a futuro este valor vaya decreciendo, a medida que se vayan ocupando sitios

de menor potencial. El Programa Indicativo para la Instalación y Retiro de Centrales Eléctricas 2023-2037 (Sener, 2023b) prevé la instalación de 1.9 GW de capacidad adicional para el 2026 y otros 3.8 GW para el 2037.

## Energía solar

Debido a su posición geográfica, el territorio mexicano, sobre todo el noroeste, es una de las mejores regiones del mundo en cuanto a insolación se refiere. No obstante, el desarrollo de la generación eléctrica fotovoltaica ha sido muy reciente, se ha dado sobre todo a partir del 2016. El crecimiento ha sido muy rápido, creció de tan sólo 189 MW, en el 2016, a 6 689 MW para finales del 2021. La generación en ese año fue de 17 070 GWh, que se traduce en un 5.2% del total de la electricidad. Esto implica que se produce más con solar que con geotermia, con la diferencia de que la fuente geotérmica es gestionable. El factor de planta para el 2021 era de cerca del 25%, tomando en cuenta los datos de Cenace (Denaiu et al., 2023).

En la actualidad, el parque solar más grande en México es el de Villanueva, Coahuila, construido por ENI Greenpower, cuya capacidad instalada es de 750 MW y cuenta con 2.3 millones de paneles que ocupan 2 400 hectáreas para generar 1.5 TWh/año. Sin embargo, pronto será superado por el parque solar fotovoltaico que CFE está construyendo en Puerto Peñasco, Sonora. Se prevé que esta instalación llegue a tener una capacidad instalada de 1 000 MW y una generación de 2.5 TW/año en el 2026. La central tendrá, además, un almacenamiento a base de baterías de 192 MW.

Aunque será la central fotovoltaica más grande de América Latina, es importante dimensionar su contribución. Si se compara con el consumo eléctrico de México, la generación anual de esta central representa el 0.7% del total. Además, tendrá un costo de 1 615 millones de dólares. Otro aspecto relevante es que México no cuenta con una industria para la fabricación de paneles solares, en el país sólo se ensamblan partes. En el caso de la central de Puerto Peñasco se están instalando 1.8 millones de paneles fabricados en China, que son transportados por vía marítima hasta el Puerto de Manzanillo y de allí durante otros 2 000 km, vía terrestre.

El potencial de crecimiento de la energía solar en México es elevado, pero es necesario tomar en cuenta diferentes factores limitantes:

- La variabilidad de la generación (intermitencia).
- La distancia de la red nacional de transmisión, ya que, para distancias de más de 30 km, el encarecimiento es muy elevado.
- La topografía y la altura, que pueden disminuir el potencial.
- Las áreas que no pueden ser utilizadas por sus diferentes usos: áreas de conservación de especies, Áreas Naturales Protegidas, zonas de conflictos

ambientales, zonas mineras, zonas de recarga de acuíferos, zonas arqueológicas, tierras cultivables, zonas de uso agropecuario, entre otras.

El solar fotovoltaico es la fuente para la cual se prevé el mayor crecimiento en el “Programa indicativo para la instalación y retiro de centrales eléctricas 2023-2037” (Sener, 2023b). Se pronostica la instalación de 6.1GW de capacidad adicional hasta el 2026 y otros 16.4GW para el 2037.

## 8.4 ACTIVIDADES Y ESTRATEGIAS SUGERIDAS

### Actividad 1. Sistema energético mexicano

Para esta actividad utilizarás los datos disponibles en la Plataforma Nacional Energía Ambiente y Sociedad (Planeas)<sup>3</sup> y en el Sistema de Información Energética<sup>4</sup> para conocer el estado del sistema energético mexicano.

#### Fuentes renovables y combustibles fósiles en México

Utiliza los datos a tu alcance para representar gráficamente cómo ha cambiado la generación de energía geotermoeléctrica, solar, eólica e hidroeléctrica, nuclear y de biomasa.

¿Qué patrones puedes observar?

¿Qué tipo de energía ha tenido mayor generación hasta la fecha?, ¿a qué crees que se deba?

¿Se puede observar alguna tendencia positiva o negativa en alguna energía en particular? ¿Y para todas en conjunto?

<sup>3</sup> Plataforma Nacional Energía Ambiente y Sociedad (Planeas). <https://energia.conacyt.mx/planeas/>

<sup>4</sup> Sistema de Información Energética. <https://sie.energia.gob.mx/inicio/#/>

Utiliza los datos disponibles sobre la generación de energía mediante combustibles fósiles durante el mismo periodo. Compara tus resultados con los gráficos anteriores.

¿Qué tendencia observas en la relación entre los diferentes combustibles fósiles?

¿Las energías renovables están sustituyendo a los combustibles fósiles?

### Factor de planta de las diferentes fuentes en México

Tomando en cuenta la capacidad instalada y la generación, además de los datos consignados en el sitio Planeas, estima el factor de planta real de cada fuente por cada año y preséntala en graficas comparativas.

- a. ¿Qué fuentes tienen mejor factor de planta y por qué?
- b. ¿Ha habido variaciones a través del tiempo? ¿A qué piensas que se debe?

## Actividad 2. Conflictos sociales

### Reflexión sobre los conflictos sociales ligados a los megaproyectos de energía renovable

Los conflictos socioambientales en áreas rurales continúan en aumento en el mundo, y en particular en México, debido a la destrucción de los recursos naturales más inmediatos (agua, aire, tierra) y a la ruptura del tejido social, producto de modelos económicos que priorizan la sobreexplotación de recursos naturales.

#### Sugerencias sobre el contenido:

- Busca la información sobre conflictos socioambientales relacionados con proyectos energéticos en artículos y en los siguientes sitios:
  - Observatorio de Conflictos Socioambientales<sup>5</sup>

<sup>5</sup> Observatorio de Conflictos Socioambientales. <https://ocsa.iberomex.mx/>

- Atlas Global de Justicia Ambiental<sup>6</sup>
- CartoCrítica<sup>7</sup>

**Preguntas guía:**

- ¿Cuáles son los principales conflictos socioambientales de México?
- Indagar sobre las afectaciones de cada una de las fuentes renovables y no renovables.
- Analiza uno de los conflictos que más te atraiga y exponlo en el aula.

---

<sup>6</sup> Atlas Global de Justicia Ambiental. <https://ejatlas.org/>

<sup>7</sup> Carto Crítica. <https://cartocritica.org.mx/>

## REFERENCIAS

- Alberta Geological Survey (5 de febrero de 2012). *Alberta Oil Sands Map*. [https://www.researchgate.net/figure/Alberta-Oil-Sands-Regional-Map-Alberta-Geologic-Survey-2012\\_fig1\\_273319300](https://www.researchgate.net/figure/Alberta-Oil-Sands-Regional-Map-Alberta-Geologic-Survey-2012_fig1_273319300)
- Aleklett, K., Höök, M., Jakobsson, K., Lardelli, M., Snowden, S. y Söderbergh, B. (2010). The Peak of the Oil Age—analyzing the World Oil Production Reference Scenario in World Energy Outlook 2008. *Energy policy*, 38(3), 1398-1414.
- Åhman, M. (2021). *When Gold Turns to Sand: A Review of the Challenges for Fossil Fuel Rich States Posed by Climate Policy*. Lund University.
- Angelakis, A., Valipour, M., Dietrich, J., Voudouris, K., Kumar, R., Salgot, M., Mahmoudian, S. A., Rontogianni, A. y Tsoutsos, T. (2022). Sustainable and Regenerative Development of Water Mills as an Example of Agricultural Technologies for Small Farms. *Water*, 14(10), 1621.
- Bandoc, G., Práválie, R., Patriche, C. y Degeratu, M. (2018). Spatial Assessment of Wind Power Potential at Global Scale. A Geographical Approach. *Journal of Cleaner Production*, 200, 1065-1086.
- Barrera Zapata, R., Pérez Bayer, J. F. y Salazar Jiménez, C. (2014). Carbones colombianos: clasificación y caracterización termoquímica para aplicaciones energéticas. *Revista Ion*, 27(2), 43-54.
- Berman, A. (2024). *Beginning of the End for the Permian*. <https://www.artberman.com/blog/beginning-of-the-end-for-the-permian/>
- Bertani, R. (2016). Geothermal Power Generation in the World 2010–2014 Update Report. *Geothermics*, 60, 31-43.
- Behabtu, H. A., Messagie, M., Coosemans, T., Berecibar, M., Anlay Fante, K., Kebede, A. A. y Mierlo, J. V. (2020). A Review of Energy Storage Technologies' Application Potentials in Renewable Energy Sources Grid Integration. *Sustainability*, 12(24), 10511.

- Bosák, M., Dugas, J., Szaryszová, P. y Kuhnová, L. (2023). Sustainable Development and Coal Consumption in Slovakia. *E3S Web of Conferences*, 451, 02002.
- British Petroleum (2022). Statistical Review of World Energy 2021. <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2021-full-report.pdf>
- British Petroleum (2022). Statistical Review of World Energy 2022. <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2022-full-report.pdf>
- Carbon Brief (2022). Coal Trade Around the World. <https://www.carbonbrief.org/mapped-the-global-coal-trade/>
- CartoCrítica (2019). Actualidad de la fracturación hidráulica en México. <http://cartocritica.org.mx/2019/actualidad-de-la-fracturacion-hidraulica-en-mexico/>
- Castillo Reynoso, J.C., L. Ferrari, A. Billarent-Cedillo, G. Levresse y C. Inguaggiato (2022). Unraveling the Origin of Geothermal Heat in Absence of Recent Volcanism: The Santiago Papasquiario Hydrothermal Area, Central-Eastern Sierra Madre Occidental, México. *Geothermics*, 104, 102432.
- Chiriboga, G., De La Rosa, A., Molina, C. y Velarde, S. (2020). Energy Return on Investment (EROI) and Life Cycle Analysis (LCA) of Biofuels in Ecuador. *Heliyon*, 6(6) e04213.
- Concerned Health Professionals of New York and Physicians for Social Responsibility, (CHPNY-PSR) (2023). *Compendium of Scientific, Medical, and Media Findings Demonstrating Risks and Harms of Fracking and Associated Gas and Oil Infrastructure*. <http://concernedhealthny.org/compendium/>
- Cushman-Roisin, B. y Cremonini, B. T. (2021). *Data, Statistics, and Useful Numbers for Environmental Sustainability: Bringing the Numbers to Life*. Elsevier.
- Deniau, Y., Pérez L, Canales, D. y Palacios, R. (2023). *El Sistema Eléctrico Nacional. Parte 1. Programa Nacional Estratégico sobre Energía y Cambio Climático (Pronaces ECC), Plataforma Nacional Energía Ambiente y Sociedad (Planeas). Cuaderno temático 3*. <https://conahcyt.mx/cuaderno-tematico-3/>

- ENDESA (2023). *Why are Neither Hydrogen nor E-fuels a Solution for Road Transport?* <https://www.endesa.com/en/the-e-face/Sustainable-mobility/hydrogen-e-fuels-not-solution-road-transport>
- Energy Information Administration (EIA) (2011). *The Geology of Natural Gas Resources*. <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=110>
- Energy Information Administration (EIA) (2014). *Benchmarks Play an Important Role in Pricing Crude Oil*. <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=18571>
- Energy Information Administration (EIA) (2019). *Almost all U.S. Coal Production is Consumed for Electric Power*. <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=44155>
- Energy Information Administration (EIA) (2020). *U.S. Crude Oil Production Efficiency Continues Year-over-year Improvements*. <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=42595>
- Energy Information Administration (EIA) (2023). *Drilling Productivity Report*. <https://www.eia.gov/petroleum/drilling/>
- Engineering ToolBox (2007). *API Gravity*. [https://www.engineeringtoolbox.com/api-gravity-d\\_1212.html](https://www.engineeringtoolbox.com/api-gravity-d_1212.html)
- Erickson, P., Down, A., Lazarus, M. y Koplow, D. (2017). Effect of Subsidies to Fossil Fuel Companies on United States Crude Oil Production. *Nature Energy*, 2(11), 891-898.
- Ferrari, L., (2024). Energía geotérmica. En L. Ferrari, O. Masera y A. Straffon (coord.), *Transición energética justa y sustentable*. Conahcyt/FCE.
- Ferrari, L. y Hernández Martínez, D. (2024). Sector hidrocarburos: evolución histórica, situación actual y escenarios sobre la soberanía energética. En L. Ferrari, O. Masera y A. Straffon (coord.), *Transición energética justa y sustentable*. Conahcyt/FCE.
- Ferrari, L., Masera O., Ávila Calero S. y Flores Hernández, J. R. (2024b). Límites de las fuentes renovables. En L. Ferrari, O. Masera y A. Straffon (coord.), *Transición energética justa y sustentable*. Conahcyt/FCE.

- FUNDAR (2017). *Planes de desarrollo petrolero y gasífero en el marco de la Reforma Energética*. <https://fundar.org.mx/mexico/pdf/2.2.Planesdedesarrollo.pdf>
- GeoComunes (2021). Alumbrar las contradicciones del Sistema eléctrico mexicano y de la transición energética. *Rosa Luxemburg Stiftung*. [http://geocomunes.org/Analisis\\_PDF/GC\\_SistemaElectrico\\_2020.pdf](http://geocomunes.org/Analisis_PDF/GC_SistemaElectrico_2020.pdf)
- Grancea, L., M. Mihalasky, M. Fairclough, J.R. Blaise, A. Boytsov, A. Hanly y R. Vance (2020). Uranium Resources, Production and Demand 2020. *Nuclear Energy Agency (NEA)*, 7551. [https://www.oecd-nea.org/jcms/pl\\_52718/uranium-2020-resources-production-and-demand?details=true](https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_52718/uranium-2020-resources-production-and-demand?details=true)
- Grill, G., Lehner, B., Thieme, M., Geenen, B., Tickner, D., Antonelli, F. y Zarfl, C. (2019). Mapping the World's Free-flowing Rivers. *Nature*, 569(7755), 215-221.
- Heinberg, R. (2017). *Why Climate Change Isn't Our Biggest Environmental Problem, and Why Technology Won't Save Us*. <https://www.postcarbon.org/why-climate-change-isnt-our-biggest-environmental-problem-and-why-technology-wont-save-us/>
- Hirirart, G. H., Gutiérrez-Negrín, L. C., Quijano León, H. L., Ornelas Celis, A., Espíndola, S. y Hernández Carrillo, I. (2011). *Evaluación de la energía geotérmica en México*. Banco Interamericano de Desarrollo y la Comisión Reguladora de Energía. <https://www.cre.gob.mx/documento/2026.pdf>
- Höök, M., Hirsch, R. y Aleklett, K. (2009). Giant Oil Field Decline Rates and Their Influence on World Oil Production. *Energy Policy*, 37, 2262–2272.
- Höök, M., Davidsson, S., Johansson, S. y Tang, X. (2013). Decline and Depletion Rates of Oil Production: A Comprehensive Investigation. *Philosophical Transactions. Series A, Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 372(2006), 0120448.
- Howarth, R. W. (2015). Methane Emissions and Climatic Warming Risk from Hydraulic Fracturing and Shale Gas Development: Implications for Policy. *Energy and Emission Control Technologies*, 2015(3), 45-54.
- International Atomic Energy Agency (IAEA) (s.f.). *International Nuclear and Radiological Event Scale (INES)*. <https://www.iaea.org/resources/databases/international-nuclear-and-radiological-event-scale>

- International Atomic Energy Agency (IAEA) (2022). *Status and Trends in Spent Fuel and Radioactive Waste Management*. <https://www.iaea.org/publications/14739/status-and-trends-in-spent-fuel-and-radioactive-waste-management>
- International Energy Agency (IEA) (2020). *Renewables 2020*. <https://www.iea.org/reports/renewables-2020>
- International Energy Agency (IEA) (2022). *Renewables 2022*. <https://www.iea.org/reports/renewables-2022>
- International Renewable Energy Association (IRENA) (2023). *World Energy Transitions Outlook 2023*. <https://www.irena.org/Digital-Report/World-Energy-Transitions-Outlook-2023>
- Kępińska, B. (2004). *Lectures on Geothermal Resources and Utilization in Poland and Europe*. United Nations University. <https://geocom.geonardo.com/assets/elearning/1.29.UNU-GTP-2003-02.pdf>
- Krüger, I. K., Mann, M. S. P., van Bracht, M. S. N. y Moser, D. I. A. (2018). Li-ion Battery Versus Pumped Storage for Bulk Energy Storage-A Comparison of Raw Material, Investment Costs and CO<sub>2</sub>-footprints. *HydroVision 2018, Charlotte*. [https://f.hubspotusercontent40.net/hubfs/5069195/06\\_27\\_HydroVision\\_Li-Ion\\_Vs\\_Pumped\\_Storage.pdf](https://f.hubspotusercontent40.net/hubfs/5069195/06_27_HydroVision_Li-Ion_Vs_Pumped_Storage.pdf)
- Lazard (2023). *2023 Levelized Cost Of Energy+ (lcoe+)*. <https://www.lazard.com/research-insights/2023-levelized-cost-of-energyplus/>
- Limberger, J., Boxem, T., Pluymaekers, M., Bruhn, D., Manzella, A., Calcagno, P., Beekman, F., Cloetingh, S. y van Wees, J. D. (2018). Geothermal Energy in Deep Aquifers: A Global Assessment of the Resource Base for Direct Heat Utilization. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82(1), 961-975. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.084>
- López Anadón, E., Casalotti, V., Masarik, G. y Halperín, F. (2015). *El abecé de los hidrocarburos en reservorios no convencionales*. Instituto Argentino del Petróleo y del Gas.
- Lu, S.M. (2018). A Global Review of Enhanced Geothermal Systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81(2), 2902-2921. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.06.097>

- Martí Herrero, J., (2008). *Biodigestores familiares: guía de diseño y manual de instalación*. GIZ.
- Middleton, M.F. (2016). Radiogenic Heat Generation in Western Australia - Implications for Geothermal Energy. *Advances in Geothermal Energy*, 49. <https://doi.org/10.5772/61963>
- Murphy, T., *Energy and Human Ambitions on a Finite Planet*. eScholarship, UC San Diego, 2021
- Nordregio (2019). *Resources in the Arctic 2019*. <https://nordregio.org/maps/resources-in-the-arctic-2019/>
- Ordaz Méndez, C. A., Armenta, M. F. y Silva, G. R. (2011). Potencial geotérmico de la República Mexicana. *Geotermia*, 24(1), 50-8. <https://publications.mygeoenergynow.org/journals/Geotermia-Vol24-1.pdf#page=52>
- Palacios, R., Valles, X., Solís, A., Becerril, A. S., Rodríguez, F., Martínez, H., Rodríguez, J. I., De La Pascua, L. E., Pleitez, R. O., Hernández, F. y Zamudio, J. P. (2022). *Estudio del balance nacional de energía 2020*. Programa Nacional Estratégico sobre Energía y Cambio Climático (Pronace ECC), Plataforma Nacional Energía Ambiente y Sociedad (Planeas). Cuaderno temático, 2. <https://conahcyt.mx/cuaderno-tematico-2/>
- Perera, D., Smakhtin, V., Williams, S., North, T. y Curry, A. (2021). *Ageing Water Storage Infrastructure: An Emerging Global Risk*. UNU-INWEH Report Series (United Nations University Institute for Water, Environment and Health). <http://collections.unu.edu/view/UNU:7930#viewMetadata>
- Plumer, B. (2015). *Fracking Explained*. <https://www.vox.com/2014/4/14/18076690/fracking>
- Prieto, P. (2021). *Informe: descarbonización 100% con 100% renovables*. 15-15-15. <https://www.15-15-15.org/webzine/2021/04/02/informe-descarbonizacion-100por100-con-100por100-renovables/>
- REN21 (2018). *Renewables 2018 Global Status Report*. [https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR2018\\_Full-Report\\_English.pdf](https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR2018_Full-Report_English.pdf)

- REN21 (2021). *Renewables 2021 Global Status Report*. [https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR2021\\_Full\\_Report.pdf](https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR2021_Full_Report.pdf)
- REN21 (2022). *Renewables 2022 Global Status Report*. [https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR2022\\_Full\\_Report.pdf](https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR2022_Full_Report.pdf)
- REN21 (2023). *Renewables 2023 Global Status Report*. [https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR2023\\_GlobalOverview\\_Full\\_Report\\_with\\_endnotes\\_web.pdf](https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR2023_GlobalOverview_Full_Report_with_endnotes_web.pdf)
- Sánchez, D. L., Nelson, J. H., Johnston, J., Mileva, A. y Kammen, D. M. (2015). Biomass Enables the Transition to a Carbon-negative Power System Across Western North America. *Nature Climate Change*, 5(3), 230-234.
- Schenk C.J., Cook, T.A., Charpentier, R.R., Pollastro, R.M., Klett, T.R., Tennyson, M.E., Kirschbaum, M.A., Brownfield, M.E. y Pitman, J.K. (2009). *An Estimate of Recoverable Heavy Oil Resources of the Orinoco Oil Belt, Venezuela: U.S. Geological Survey Fact Sheet 2009-3028*. <https://pubs.usgs.gov/fs/2009/3028/>
- Secretaría de Economía (2022). *Perfil de mercado del carbón*. [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/692304/4.\\_Perfil\\_Carb\\_n\\_2021\\_\\_T\\_.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/692304/4._Perfil_Carb_n_2021__T_.pdf)
- Secretaría de Energía (Sener) (2023a). *Balance Nacional de Energía Preliminar 2022*. <https://base.energia.gob.mx/BNE/BalanceNacionalDeEnerg%C3%A1Da2022.pdf>
- Secretaría de Energía (Sener) (2023b). *Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional (Prodesen) 2023-2037*. <https://www.gob.mx/sener/articulos/programa-de-desarrollo-del-sistema-electrico-nacional-2023-2037>
- Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat) (2021). *Estadísticas del agua en México: Agua renovable*. [https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/indicadores\\_verdes16/indicadores/00\\_intros/03\\_CN.html](https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/indicadores_verdes16/indicadores/00_intros/03_CN.html)
- Servicio Geológico Mexicano (SGM) (2021). *¿Qué es el carbón mineral?* <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/157798/Que-es-el-carbon-mineral.pdf>

- Simmons, M. (2002). *The World's Giant Oilfields*. <https://energyskeptic.com/wp-content/uploads/2011/07/Simmons-Giant-Oil-Fields.pdf>
- Spang, E. S., Moomaw, W. R., Gallagher, K. S., Kirshen, P. H. y Marks, D. H. (2014). The Water Consumption of Energy Production: An International Comparison. *Environmental Research Letters*, 9(10), 105002.
- Sprake, D., Vagapov, Y., Lupin, S. y Anuchin, A. (2017). *Housing Estate Energy Storage Feasibility for a 2050 Scenario*. 7th International Conference on Internet Technologies and Applications. Wrexham, RU.
- Sun, S., Liu, T., Shi, S. y Russell, T. P. (2021). Nanoparticle Surfactants and Structured Liquids. *Colloid and Polymer Science*, 299, 523-536.
- van der Zwaan, B. y Dalla Longa, F. (2019). Integrated Assessment Projections for Global Geothermal Energy Use. *Geothermics*, 82, 203-211.
- United Nations Environment Programme (UNEP) (2011). *Recycling Rates of Metals: A Status Report*. <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/8702>
- Vega, A. A. G., Tambaco, A. J. C., Vélez, C. E. A., Roldan, V. L. M. y Caicedo, P. L. O. (2024). Energía solar en aplicaciones mecánicas. *Ibero-American Journal of Engineering & Technology Studies*, 4(1), 22-30.
- Villa, V. y Singh, R. P. (2020). Hydraulic Fracturing Operation for Oil and Gas Production and Associated Earthquake Activities Across the USA. *Environmental Earth Sciences*, 79(11), 271.
- World Nuclear Association (2023). *World Uranium Mining Production*. <https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/mining-of-uranium/world-uranium-mining-production.aspx>
- World Steel Association (2023). *Steel and Raw Materials*. <https://worldsteel.org/wp-content/uploads/Fact-sheet-raw-materials-2023.pdf>





# Tercera parte

## Crisis civilizatoria y alternativa

### 9. Geopolítica de la energía

*No podemos resolver nuestros problemas con la misma manera de pensar que utilizamos cuando los creamos.*

ALBERT EINSTEIN

*Los imperios son estructuras de corta duración creadas y mantenidas por la disponibilidad de recursos minerales y combustibles fósiles, y tienden a declinar y caer con la disminución de los recursos que los crearon.*

UGO BARDI

#### 9.1 INDAGACIÓN PREVIA

##### Preguntas sugeridas:

- ¿Qué te sugieren las aseveraciones de Einstein y de Ugo Bardi? Busca ejemplos en la historia e identifica a qué le otorgaban valor en cada uno de los casos.
- ¿Qué te sugiere la expresión latina *divide et impera* (divide y vencerás)?
- ¿Recuerdas algún ejemplo en la historia?
- ¿Qué piensas de la aseveración de algunos autores acerca de que cuando un país dominante ya no puede controlar a otro país lo deja sumido en el caos?

Ponlo en común en tu clase, en un círculo de estudio o círculo reflexivo.

## 9.2 CONFLICTOS EN LA ERA DE LA BIOMASA

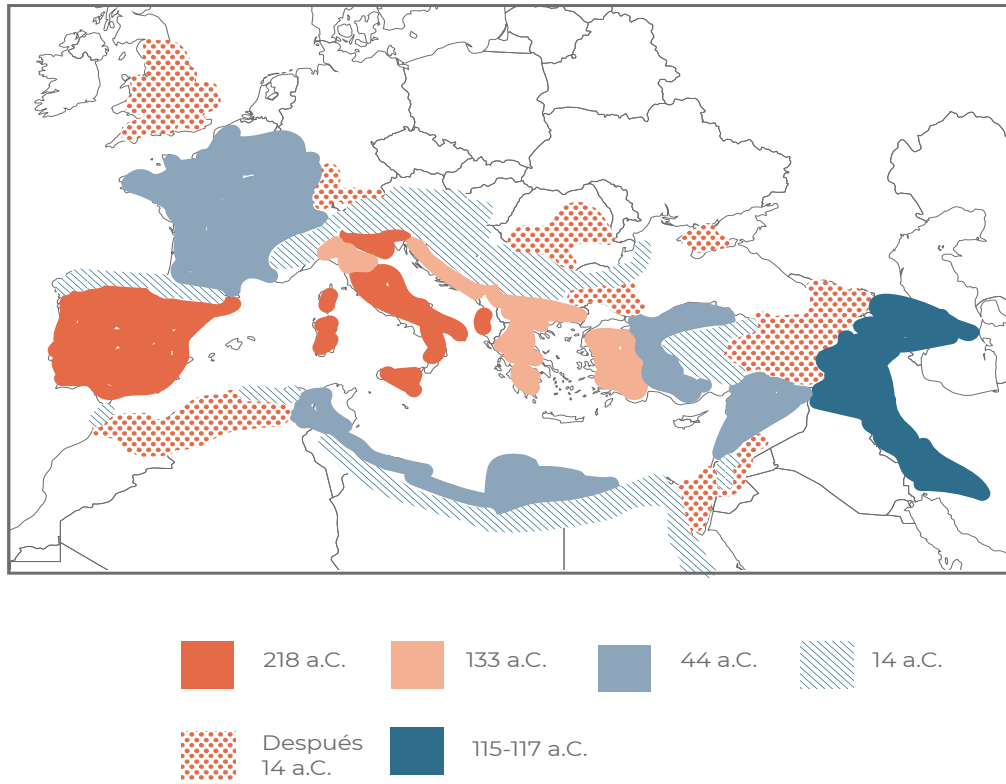
*En sus raíces, los conflictos territoriales en las especies humanas y no humanas son intentos de controlar más de los productos de la conversión de energía solar. Controlar más tierra significa tener más radiación solar incidente. En las sociedades humanas premodernas, la riqueza resultante podía obtenerse indirectamente a través del pago de impuestos o tributos de los pueblos sometidos.*

TAINTER Y PATZEK

Como lo menciona la cita de Tainter y Patzek, en buena medida la historia humana se puede interpretar como una lucha para tener más energía. En la era de la biomasa la disputa tenía el objetivo de la anexión de nuevos territorios que proveían no sólo materias primas, sino mayor posibilidad de explotar la energía solar a través de tierra cultivable y energía física de los esclavos. Esto fue el *modus operandi* de todos los imperios antes del siglo XX, pero el caso del Imperio romano es un ejemplo muy estudiado de esta tendencia. El Imperio creció constantemente durante casi tres siglos hasta alcanzar su máxima expansión para el año 117 d.C., bajo el emperador Trajano (figura 1). Desde este momento, el imperio no pudo expandirse más y empezó un proceso de fragmentación y colapso.

El antropólogo Joseph Tainter describe en detalle este proceso en su libro *El colapso de las civilizaciones complejas* (1988), donde plantea que, con el paso del tiempo, las sociedades se vuelven inexorablemente más complejas, tanto técnicamente como desde el punto de vista organizacional (jerarquía, burocracia). Esto a su vez demanda un flujo de energía creciente para mantenerlas, por lo que, cuando ya no es posible conseguir más energía empieza un declive o un verdadero colapso, lo que se traduce en una simplificación del sistema. En el caso del imperio romano eso se tradujo en la fragmentación hasta llegar al feudalismo.

**FIGURA 1. EXTENSIÓN Y EXPANSIÓN DEL IMPERIO ROMANO**



**Fuente:** adaptado de Wikipedia Commons.

En la era moderna el recurso que empezó a mover el mundo fue, en primer lugar, el carbón y, posteriormente, el petróleo. Este último, en particular, empezó a ser el recurso más codiciado por su versatilidad y densidad energética. Como vimos en la primera parte de este libro, por lo general los países que más consumen no son los que más reservas tienen. Como se muestra en la figura 2, los países en donde se concentran las mayores reservas de petróleo convencional son Arabia Saudita, Irán, Iraq, Kuwait, Catar y Emiratos Árabes.

En consecuencia, desde el final de la segunda guerra mundial el objetivo primordial para los países que más petróleo consumen (los Estados Unidos y Europa Occidental) fue tratar de controlar el flujo de este recurso vital para su expansión económica. Se puede decir que la lucha por este recurso energético se dio bajo el mismo *modus operandi* de los imperios del pasado, pero optando por medios de presión económico-financiera en lugar de los militares, aunque, como veremos, muchas de las guerras libradas en los últimos 80 años tienen como motivación el control de los hidrocarburos.



su representante Mark Sykes, quienes en 1916 acordaron bajo el control de qué país quedarían los territorios del Oriente Medio después de la derrota del Imperio Otomano (Figura 3). Los franceses se quedaron con la parte norte (área A), que englobaría, principalmente, la actual Siria y Líbano, mientras que los ingleses acordaron controlar el área B, que incluiría los actuales Iraq, Jordania y parte de Palestina.

Después de la Segunda Guerra Mundial estas regiones se dividieron: se crearon Estados sin una identidad nacional clara, ya que, frecuentemente, contenían diferentes etnias, culturas y religiones. Con esto los poderes occidentales siguieron la famosa máxima romana del *divide et impera* (divide y vencerás), es decir, dividir los pueblos que se quieren controlar para impedir así su coalición en contra de las potencias dominantes. La aplicación de esta política fue favorecida por la coincidencia de los mayores recursos de hidrocarburos en una región con una gran variedad de etnias y religiones. Un mapa detallado que muestra la ubicación de los principales campos de petróleo y gas y las diferentes religiones del Oriente Medio se puede descargar en el sitio The Intercept.<sup>1</sup>

**FIGURA 3. MAPA DEL ACUERDO SECRETO, EN 1916, ENTRE FRANCESES E INGLESES PARA DIVIDIRSE EL ORIENTE MEDIO**



**Nota:** ve el original en [https://en.wikipedia.org/wiki/Sykes%E2%80%93Picot\\_Agreement#/media/File:MPK1-426\\_Sykes\\_Picot\\_Agreement\\_Map\\_signed\\_8\\_May\\_1916.jpg](https://en.wikipedia.org/wiki/Sykes%E2%80%93Picot_Agreement#/media/File:MPK1-426_Sykes_Picot_Agreement_Map_signed_8_May_1916.jpg)

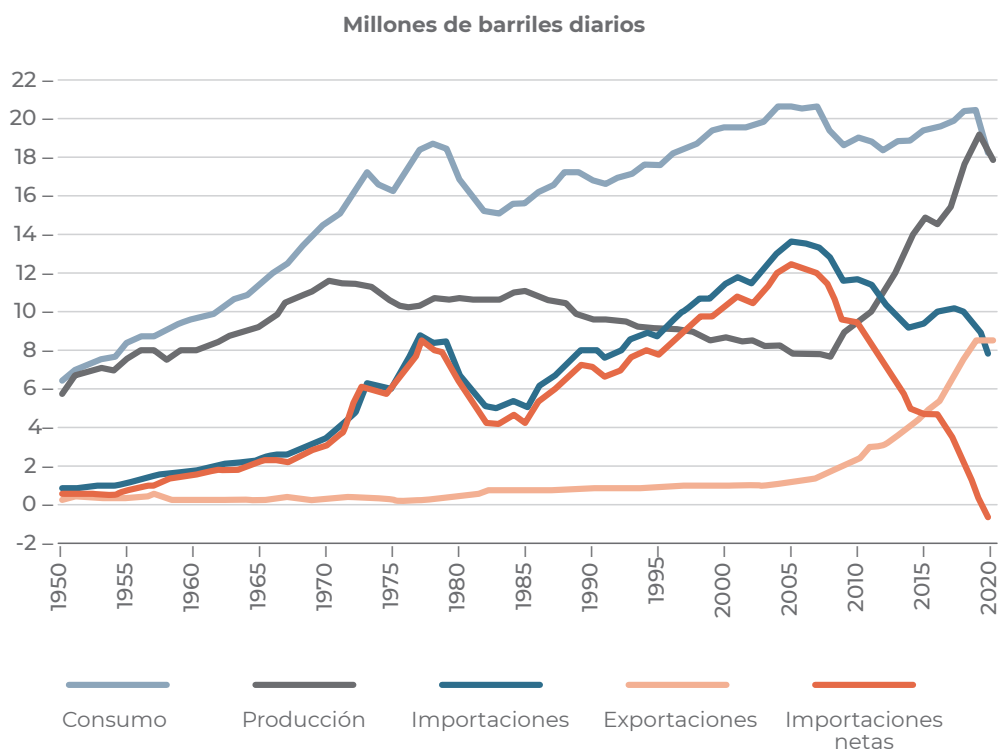
**Fuente:** imagen de dominio público disponible en Wikipedia.

<sup>1</sup> The Intercept. <https://theintercept.com/wp-content/uploads/2016/01/Shia-and-Oil-lg.jpg>

En el caso de los Estados Unidos, si bien al final de la Segunda Guerra Mundial era el país con mayor producción de petróleo, también era ya el que más consumía. Su importación era inicialmente limitada, sin embargo, la situación se volvió crítica en 1971, año en que alcanzó el pico del petróleo convencional, al tiempo que su consumo interno se había duplicado desde el final de la Segunda Guerra Mundial. Desde ese momento los Estados Unidos empezó a depender cada vez más de la importación de petróleo del Oriente Medio (figura 4).

Aunque la importación disminuyó en los años 80 por el descubrimiento y explotación de los yacimientos de Alaska, esto fue algo temporal y la importación volvió a crecer en los años 90 y hasta el 2008, cuando se promovió la extracción de petróleo no convencional (petróleo de lutitas) (figura 4). La política exterior de los Estados Unidos hacia el Oriente Medio se puede leer en buena medida en la perspectiva de esta dependencia de los recursos energéticos de esta región.

**FIGURA 4. EVOLUCIÓN DE LA PRODUCCIÓN, CONSUMO E IMPORTACIÓN DE PETRÓLEO DE LOS ESTADOS UNIDOS ENTRE 1950 Y 2020**



**Fuente:** adaptado de EIA (2021).

El control de los recursos petroleros del Oriente Medio se dio, por un lado, a través de la instalación de monarquías o gobiernos autocráticos pro occidentales y, por el

otro, por medio de la alianza de un grupo de compañías petroleras angloamericanas conocido como “las siete hermanas” (Exxon, Mobil, Shell, BP, Stándard Oil, Chevron y Texaco), las cuales funcionaban como un cártel, al dificultar la libre competencia de otras petroleras emergentes y al mantener el precio del crudo producido en otros países de manera artificialmente baja. Para contrarrestar este cártel, en 1960 se forma la Organización de Países Exportadores de Petróleo (OPEP), formada por los principales países productores del Oriente Medio, Norte de África y Venezuela, que acordaron cuotas de producción de cada país miembro con el fin de obtener un precio mayor al controlar la oferta en una situación de demanda creciente.

Esta política exacerbó la presión de Inglaterra y los Estados Unidos, quienes desde los años 50 habían tratado ya de influir sobre los gobiernos de la región mediante un golpe de Estado en Irán, en 1953, e intervenciones militares en apoyo al recién creado Estado de Israel en 1947 y 1956. Todo ello en la situación de confrontación de la llamada Guerra Fría entre los Estados Unidos y la Unión Soviética, cada uno con sus países aliados.

### El trasfondo de los conflictos de Oriente Medio

Desde el final de la Segunda Guerra Mundial los Estados Unidos se habían convertido en el país con el mayor consumo de petróleo y, por ende, el control de este energético se volvió estratégico para este país. Gran parte del petróleo que importaban los EE. UU. procedía de Arabia Saudita, donde la compañía americana Arabian American Oil Co. (Aramco) dejaba pocas ganancias al país árabe. En 1950 el rey de Arabia Saudita, Abdelaziz, amenazó con nacionalizar las instalaciones petrolíferas pertenecientes a la compañía y presionó así a la empresa americana para que accediera a compartir beneficios al 50%.

Más tarde, en 1973, como consecuencia del apoyo de los Estados Unidos a Israel durante la Guerra de Yom Kipur, el gobierno de Arabia Saudita adquirió una participación del 25% en Aramco, misma que se convirtió en un 60%, en 1974 y, finalmente, en 1980 logró tener el control total de la empresa, que se convirtió en Saudi Aramco.

Por otro lado, en este periodo en otros países árabes se dio el ascenso al poder de líderes nacionalistas contrarios a los intereses de las potencias occidentales. Tal es el caso de Mohammad Mosaddeq, político progresista que fue elegido democráticamente en Irán en 1951. Gamal Abdel Nasser, militar y estadista egipcio y principal líder político árabe impulsor del panarabismo y del socialismo árabe, que ascendió al cargo de presidente de Egipto en 1954. Muamar Gadafi, militar y político que derrocó a la monarquía de Libia y se convirtió en su presidente desde 1969. Hafez El Asad, también militar y presidente del Partido Baaz Árabe Socialista de Siria, quien

llegó a gobernar la República Árabe Siria desde 1971 (Tareq, 1976). Los recurrentes conflictos bélicos, el Estado de Israel y los países árabes pueden leerse dentro de la pugna de Occidente, particularmente de los Estados Unidos, por controlar los recursos energéticos del Oriente Medio.

### Las guerras árabe-israelíes de 1948 a 1973

La creación de un Estado judío en la región de Palestina era un objetivo largamente perseguido por el movimiento sionista que se concretó al final de la Segunda Guerra Mundial gracias a la decisión de las potencias ganadoras, particularmente Inglaterra, que tenía mandato sobre la región. La creación del Estado de Israel se justificó en parte como compensación por las pérdidas sufridas durante el Holocausto llevado a cabo por la Alemania nazi.

El plan de repartición de la región entre un Estado judío y otro palestino, se propuso en 1947, con el apoyo de la ONU para que se llevara a cabo al término del mandato británico en 1948; sin embargo, esta propuesta fue rechazada por los países árabes, por lo que desató el primer conflicto en 1948, cuando Israel declaró su independencia y fue atacado por los Estados árabes aledaños (Morris, 2008). La guerra terminó con un armisticio que consolidó la posición de Israel y dejó frustración en los países árabes.

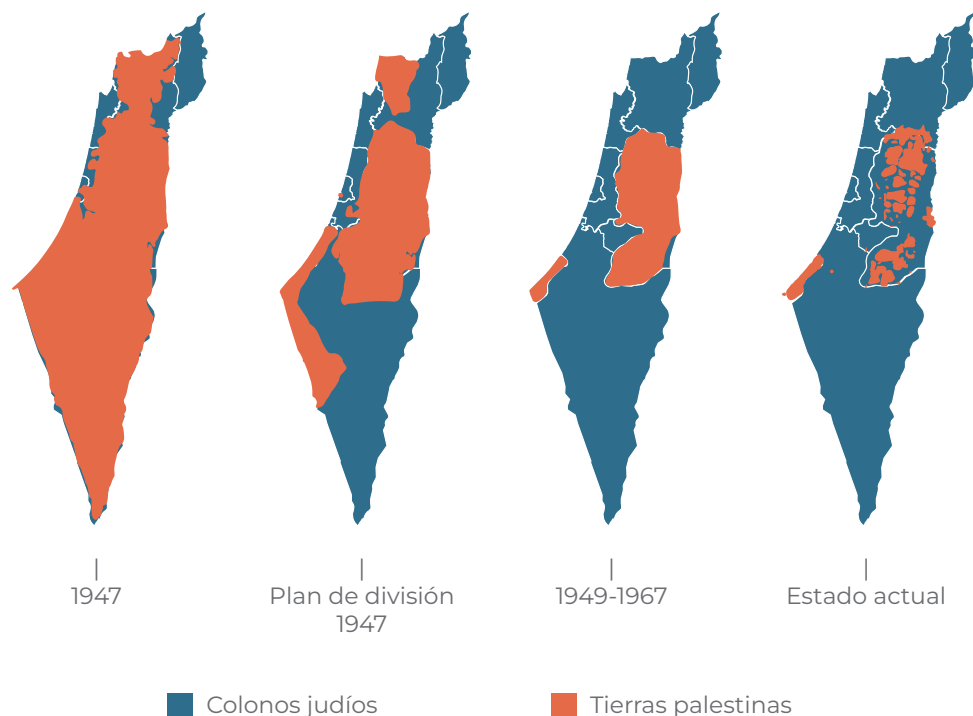
Esto dio pie a una creciente confrontación militar en la que, a través de una serie de guerras, Israel fue anexando territorios gracias al creciente apoyo de los Estados Unidos (figura 5). Para mantener su influencia en la región, los EE.UU. empezaron a apoyar económica y militarmente a Israel. De esta manera, Israel se convirtió en un aliado estratégico y una puerta de entrada a la región más rica de petróleo y, más recientemente, a los yacimientos de gas del Mediterráneo.

Después de la guerra de 1948, las tensiones entre los países árabes e Israel crecieron. En junio de 1956, y con base en un programa nacionalista, Gamal Abdel Nasser fue elegido presidente de Egipto. Como reacción, los EE. UU., Francia y Gran Bretaña se negaron a financiar la construcción de la Presa de Asuán (Egipto). En respuesta, el 26 de junio de 1956 Nasser decidió nacionalizar el Canal de Suez, bloqueando el acceso al principal puerto mercantil de Israel en el golfo de Aqaba, por medio del cual se accede al Mar Rojo (Smith, 2016). Ante esta situación, Gran Bretaña y Francia establecieron una alianza militar con Israel. El 29 de octubre el ejército israelí atacó a Egipto por la península del Sinaí. Gran Bretaña y Francia lanzaron un ultimátum para que Egipto se retirara del Canal.

Como esto no sucedió, entre el 4 y el 6 de noviembre derrotaron a las tropas egipcias junto con el ejército israelí y avanzaron por el Sinaí. A finales de noviembre de ese mismo año, y después de la mediación de los Estados Unidos, se estableció una

resolución de la ONU que preveía la salida israelí del territorio egipcio y el envío de una Fuerza de Emergencia de las Naciones Unidas (UNEF, por sus siglas en inglés), con la misión de supervisar la retirada de todas las tropas extranjeras (Smith, 2016).

**FIGURA 5. EXPANSIÓN TERRITORIAL DE ISRAEL DESDE 1947**



**Fuente:** elaboración propia a partir de información del sitio [The Final Call](https://new.finalcall.com/2022/07/26/u-s-s-support-emboldening-israel-to-expand-settlement-activities-hamas/).<sup>2</sup>

Este precario equilibrio se rompió en mayo de 1967, cuando el presidente egipcio Nasser expulsó a UNEF de la península del Sinaí, donde estaba situada desde el final de la Crisis de Suez. Egipto aglomeró tropas y equipo bélico en la frontera con Israel y cerró los Estrechos de Tirán que permiten a Israel el acceso al Mar Rojo. Israel lanzó un ataque preventivo contra la fuerza aérea egipcia, a lo que Jordania respondió atacando las ciudades israelíes de Jerusalén y Netanya. La guerra terminó el 10 de junio de 1967, tan sólo seis días después gracias a la superioridad de Israel, ahora claramente apoyado por los Estados Unidos (Bowen, 2013).

Esto se observa claramente cuando vemos el saldo de la guerra: 23000 muertos, 45000 heridos, 6000 prisioneros y más de 800 aviones derribados por parte de Egip-

<sup>2</sup> The Final Call. <https://new.finalcall.com/2022/07/26/u-s-s-support-emboldening-israel-to-expand-settlement-activities-hamas/>

to, Siria y Jordania contra las bajas israelíes de 800 soldados, 2 500 heridos, 15 prisioneros y solo 46 aviones perdidos. Al finalizar la guerra, Israel conquistó la península del Sinaí, la Franja de Gaza, Cisjordania, Jerusalén Este y los Altos del Golán (Siria).

El siguiente conflicto ocurrió a finales de 1973 con la llamada Guerra del Yom Kippur (festividad religiosa judía que coincide con el inicio de las hostilidades). Esta fue librada por una coalición de países árabes liderados por Egipto y Siria contra Israel, entre el 6 y 25 de octubre de 1973. Las acciones militares tuvieron lugar, principalmente, en los territorios del Sinaí y en los Altos del Golán, que Egipto y Siria querían recuperar después de haberlos perdido en la guerra de 1967. El nuevo presidente egipcio, Anwar Sadat, también deseaba recuperar el Canal de Suez.

Después del ataque sorpresa de Egipto y Siria, Israel, con el respaldo de los Estados Unidos, retoma parte del territorio perdido. La guerra, que duró 19 días, tuvo pérdidas cuantiosas: por un lado, Egipto tuvo 7 700 muertos, 450 aviones y 1 900 blindados destruidos; Siria tuvo 3 500 muertos, 200 aviones y 1 000 blindados destruidos; por el otro lado, Israel tuvo 2 552 muertos, 180 aviones y 800 blindados destruidos.

### El petróleo como arma: los choques petroleros de 1973-1974 y 1979

A partir de este momento los países árabes recurren al “arma del petróleo” como instrumento para influir sobre la geopolítica. El 16 de octubre de 1973, en reacción a la guerra del Yom Kippur, la OPEP detuvo la producción de crudo y estableció un embargo para los envíos petrolíferos hacia Occidente, especialmente hacia los Estados Unidos y los Países Bajos. Los efectos del embargo fueron inmediatos sobre el precio del petróleo (figura 6), que se cuadruplicó hasta llegar casi a los 12 dólares por barril (60 dólares descontando la inflación).

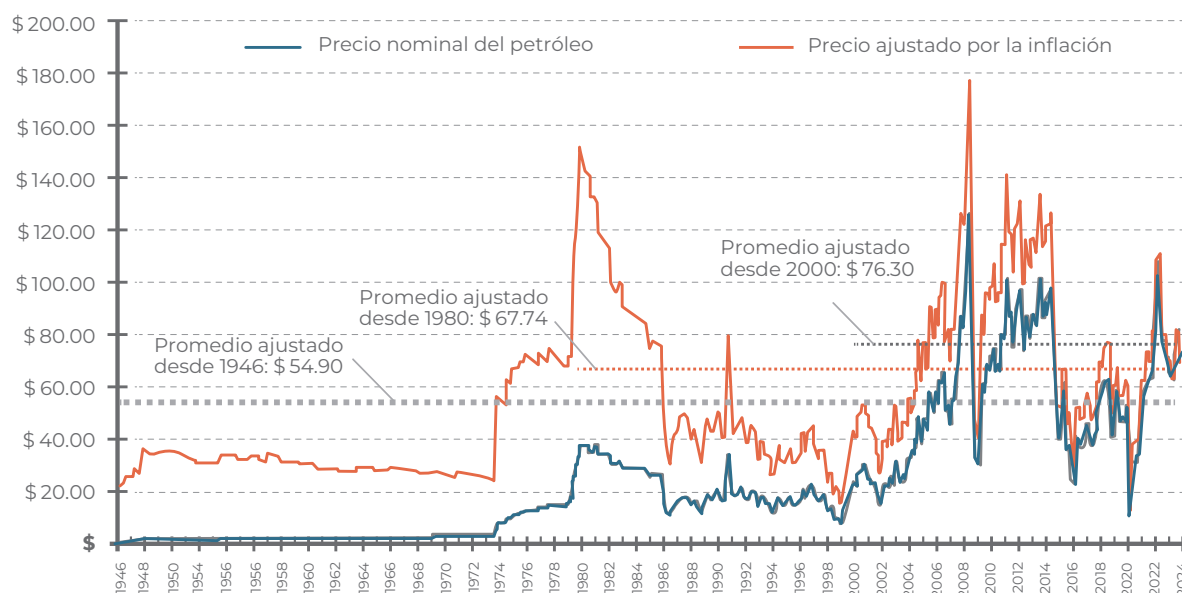
Otro de los “choques petroleros” relacionados con el conflicto de Oriente Medio siguió a la llamada Revolución islámica de Irán, en 1979 (figura 6). Irán (antigua Persia) es un país que tiene cultura e idioma distintos de los árabes y cuya religión es la rama chiita del islam, a diferencia de la gran mayoría de los países árabes, que se adhiere a la rama sunita. En 1951 el primer ministro Mohammad Mosaddeq, elegido democráticamente, decretó la nacionalización del petróleo.

A raíz de este hecho, en 1953, los Estados Unidos y Gran Bretaña urdieron un golpe de Estado organizado por la Central Intelligence Agency (CIA), de los Estados Unidos, y alentado por el Secret Intelligence Service (SIS), de Gran Bretaña, más conocido como MI6, que terminó con el derrocamiento de Mosaddeq y estableció una dictadura monárquica encabezada por Mohammad Reza Pahlavi (Kinzer, 2008).

El también llamado sha de Persia comenzó a aplicar una serie de reformas “modernizadoras” en el marco de una dictadura corrupta y bajo una fuerte influencia estadounidense (Afkhami, 2009). Con el tiempo, esto fue engendrando un progresivo

descontento social, encauzado por el clero chiita. La situación culminó entre 1978 y 1979, cuando tras largos meses de protestas, y pese a la brutal represión de las fuerzas policiales, se desencadena la huida al extranjero del sha Reza Pahlavi y el regreso, el 1º de febrero de 1979, del líder espiritual chiita, el ayatola Jomeini, desde su exilio en Francia.

**FIGURA 6. EVOLUCIÓN DEL PRECIO DEL PETRÓLEO NOMINAL Y AJUSTADO POR LA INFLACIÓN (A NOVIEMBRE DE 2023)**



**Fuente:** adaptado del sitio [Historical Oil Prices Chart](https://inflationdata.com/articles/inflation-adjusted-prices/historical-oil-prices-chart/).<sup>3</sup>

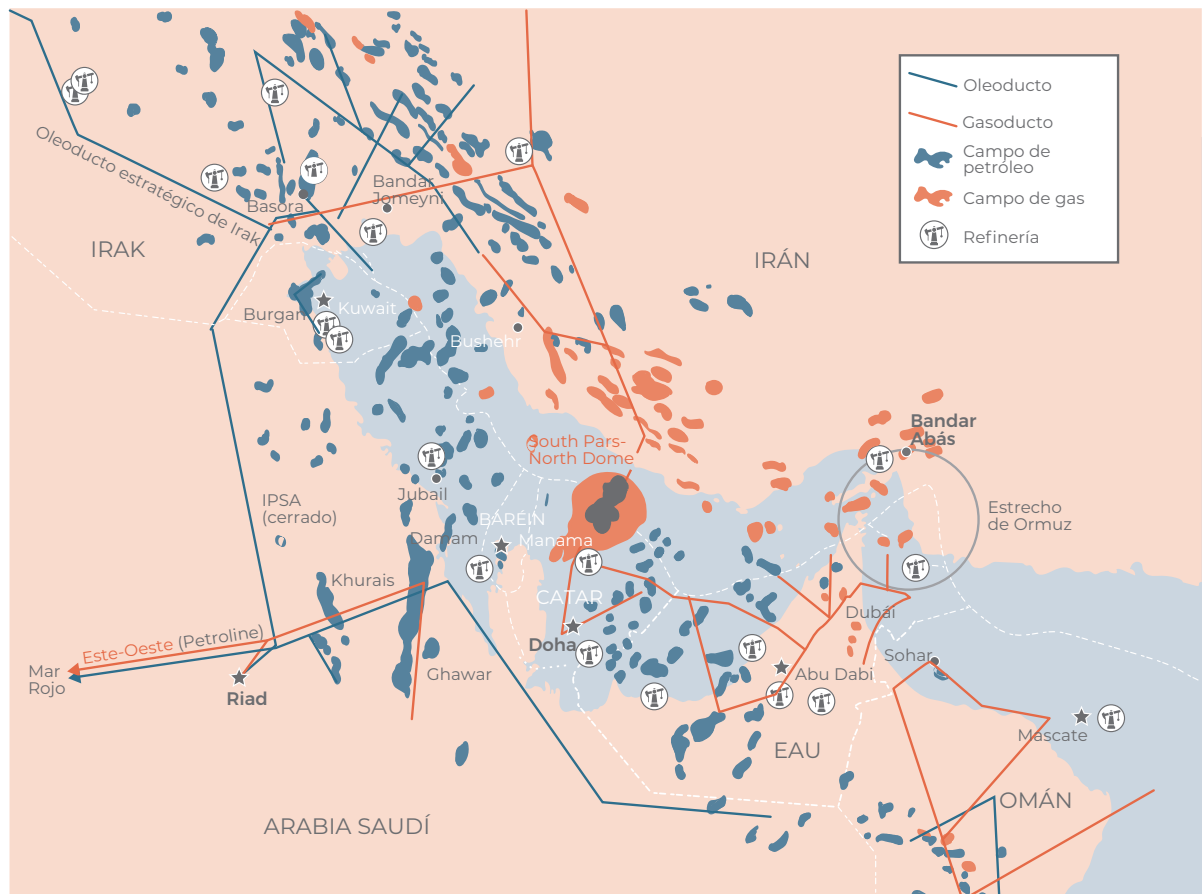
A raíz de la Revolución iraní se generó una segunda crisis del petróleo como consecuencia del embargo que los Estados Unidos aplicaron al petróleo de Irán. En esta ocasión, el precio del crudo se multiplicó por tres (figura 6). En este periodo de incertidumbre, Irak, país vecino que contaba con el apoyo técnico y armamentístico de los Estados Unidos, invadió Irán en 1980, aprovechando el desequilibrio interno de este país provocado por la Revolución islámica (Murray y Woods, 2014).

Si bien la motivación principal de la guerra fue el deseo de Irak de revertir la delimitación de fronteras con Irán establecida en 1975 para conseguir la anexión de la región fronteriza rica en petróleo (figura 7), varios países occidentales los apoyaron con el propósito de debilitar el nuevo gobierno iraní. De hecho, Irak recibió apoyo

<sup>3</sup> [Historical Oil Prices Chart](https://inflationdata.com/articles/inflation-adjusted-prices/historical-oil-prices-chart/). <https://inflationdata.com/articles/inflation-adjusted-prices/historical-oil-prices-chart/>

técnico y armas de los Estados Unidos, incluidas armas químicas producidas con materiales otorgados por este país y compañías alemanas. Por esto se ha hablado de una “guerra por delegación” (*proxy war*) en contra de Irán. La guerra fue sangrienta y finalizó ocho años después, sin un claro vencedor (Murray y Woods, 2014). Durante este periodo de contienda se paralizó la exportación de crudo de estos dos países miembros de la OPEP.

**FIGURA 7. PRINCIPALES CAMPOS DE PETRÓLEO Y GAS EN EL GOLFO PÉRSICO**



**Fuente:** retomado de Merino (2021).

Dos años más tarde, en agosto de 1990, Saddam Hussein, presidente de Irak, invadió e intentó anexionar Kuwait para apoderarse de sus reservas de petróleo y poder paliar, en cierta medida, la crisis económica en la que se encontraba sumergido el país después de la larga guerra contra Irán (Hassan, 1999). Pocos meses más tarde, en enero de 1991 y en respuesta a la anexión de Kuwait, una fuerza de coalición compuesta por 34 países y liderada por los EE.UU. invade Irak. A pesar de ganar la guerra, el

presidente Bush (padre) no derrocó a Saddam Hussein por temor a que Irán, su gran enemigo, pudiera aprovechar la situación de debilidad de Irak e invadirla, así que Irak quedó dividida y bajo el control estadounidense.

En esta situación inestable, la guerra vuelve a desatarse 10 años más tarde, cuando con la justificación de los atentados a las Torres Gemelas de Nueva York, los Estados Unidos proclamó la “guerra contra el terrorismo internacional” y, sin prueba alguna, culpa a Saddam Hussein de estar detrás de los atentados y de tener armas de destrucción masiva. Con base en estas acusaciones, entre el 20 de marzo y el 1 de mayo de 2003 los Estados Unidos promovieron la invasión de Irak, con el apoyo de Reino Unido, Australia y Polonia, pero sin el aval de la ONU (Cramer y Thrall, 2012).

Las razones que ofreció el presidente George W. Bush para la invasión fueron: 1) quitarle a Irak armas de destrucción masiva, las cuales nunca llegaron a encontrarse ni su existencia quedar demostrada; 2) poner fin al supuesto apoyo brindado por Saddam Hussein al terrorismo islámico; y 3) lograr la libertad del pueblo iraquí.

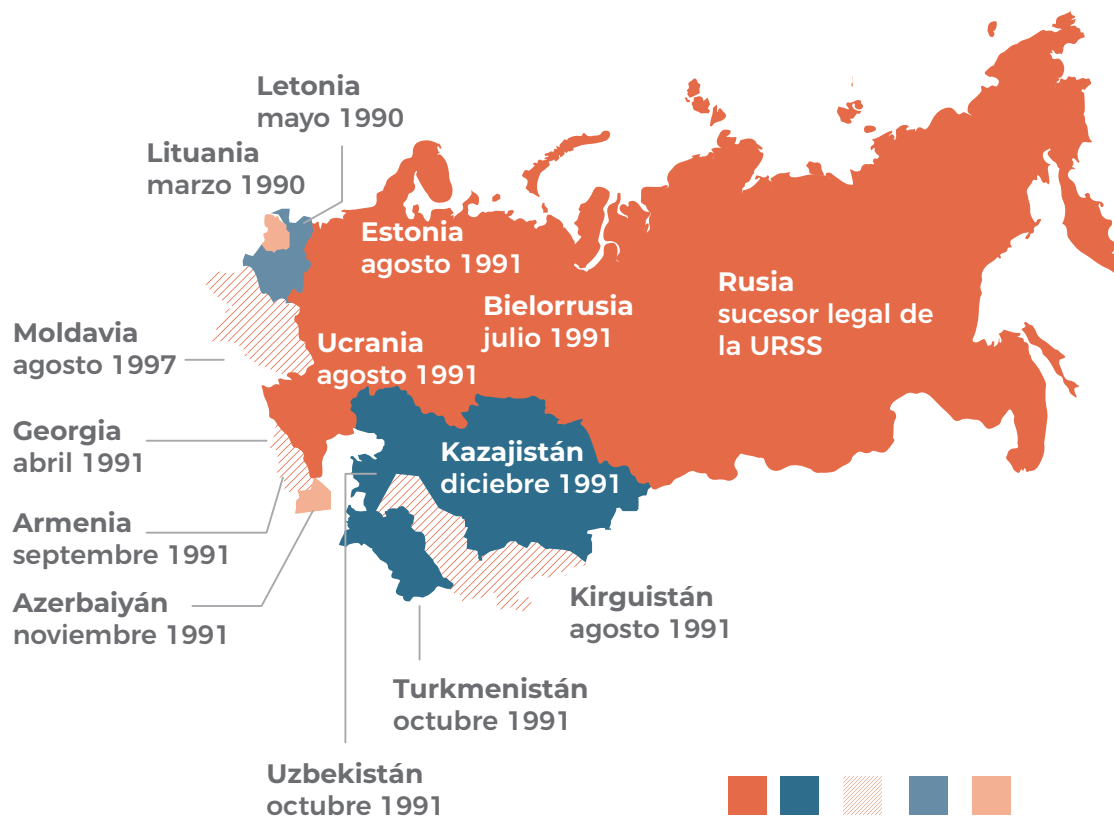
En realidad, estas razones eran pretextos para justificar la invasión, motivada por intereses meramente económicos, puesto que Irak e Irán cuentan con las mayores reservas de petróleo después de Arabia Saudita (Cramer y Thrall, 2012). Finalmente, después de la invasión y el derrocamiento de Saddam Hussein, Irak quedó dividida en tres regiones a través de un gobierno de coalición controlado por los Estados Unidos:

- La zona norte, bajo el control de la etnia kurda.
- La zona suroeste, dominada por población sunita.
- La zona que colinda con Irán, dominada por los chiitas.

### **La pugna por el control de los recursos energéticos y materiales de Eurasia después de la caída de la Unión Soviética**

La invasión de Irak de 2003 ocurrió en un momento de auge del poder de los Estados Unidos que siguió a la caída de la Unión Soviética en 1991. Tras décadas de desarrollo militar, en detrimento del progreso de la economía doméstica, el crecimiento económico de la URSS llegó a un punto muerto. Los fallidos intentos de reformar una economía estancada y la guerra de Afganistán provocaron un paulatino sentimiento de descontento, especialmente en las repúblicas bálticas y en la Europa del Este.

El proceso terminó con la disgregación de la Unión Soviética a través de la independencia de 15 repúblicas, entre el 11 de marzo de 1990 y el 25 de diciembre de 1991 (figura 8). Esto convirtió a los Estados Unidos en la única potencia mundial. Cabe mencionar que, en el momento de su disolución, la Unión Soviética todavía no alcanzaba su pico de petróleo.

**FIGURA 8. SEPARACIÓN DE LA UNIÓN SOVIÉTICA**

**Fuente:** retomado de Gil (2018).

En los años posteriores a la caída de la Unión Soviética se extendió el rechazo al comunismo y la idea de que el “libre mercado” puede llevar el bienestar a las poblaciones antes sujetas a una economía controlada centralmente. Incluso, Francis Fukuyama, en su famoso libro *El fin de la Historia y el último hombre*, proclamó el fin de la Historia como lucha de ideologías y el inicio de un mundo en el que la llamada democracia liberal occidental quedaba como la única opción tras el fin de la Guerra Fría.

Apoyados por esta narrativa, comenzó una carrera de los países occidentales por aprovechar los recursos energéticos y materiales de la antigua Unión Soviética a precio de remate. Como se puede apreciar en la figura 9, el territorio la ex Unión Soviética tiene grandes reservas de petróleo y gas convencionales. La actual Rusia es también el primer productor mundial de diamantes; segundo productor mundial de platino, vanadio y cobalto; tercer productor mundial de oro, níquel y azufre; cuarto productor mundial de plata y fosfato; y quinto productor mundial de mineral de hierro (Bortnikov et al., 2022).

**FIGURA 9. PRINCIPALES CUENCAS PRODUCTORAS Y DUCTOS DE PETRÓLEO Y GAS DE RUSIA Y PAÍSES DE LA EX UNIÓN SOVIÉTICA**

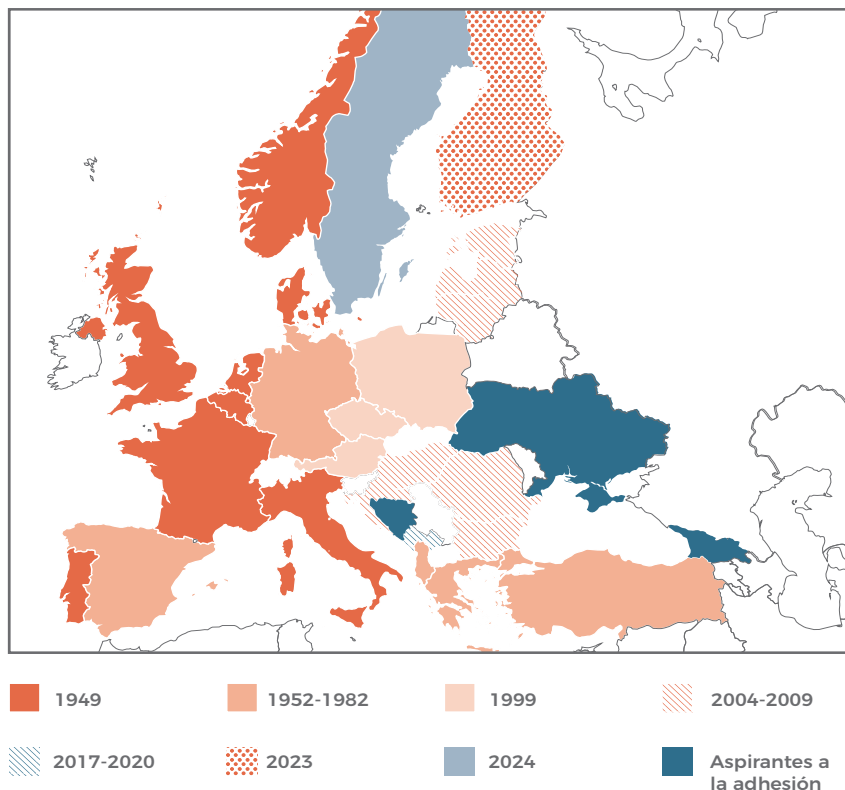


**Fuente:** elaboración propia.

Después de una década de apertura desordenada en pro de una economía de mercado controlada por un grupo de oligarcas, fue con la llegada al poder de Vladimir Putin en 1999 que Rusia emprendió, paulatinamente, una política nacionalista orientada a restaurar la capacidad industrial y el poder militar de la ex Unión Soviética. Inicialmente, Putin trató de llegar a acuerdos con las potencias occidentales, sin embargo, la Organización de Tratado del Atlántico Norte (OTAN), a pesar de la promesa inicial de no extenderse hacia el este, empezó a incorporar a los países antiguamente aliados o parte de la Unión Soviética (figura 10).

A pesar de que la OTAN supuso ser una alianza defensiva producto de la Guerra Fría, no sólo continuó existiendo tras el fin de esa era, sino que además se extendió progresivamente hacia el este, permitiendo así que los Estados Unidos pudieran contar con bases militares cada vez más cerca de Rusia.

**FIGURA 10. PAÍSES DE LA OTAN SEGÚN SU AÑO DE INGRESO**



**Fuente:** adaptado de Statista.<sup>4</sup>

La expansión al este de la OTAN fue percibida como una amenaza existencial por parte de Rusia, que había sido invadida en dos ocasiones por países de Europa Occidental: Francia en el siglo XIX y la Alemania nazi en el siglo XX. Estos eventos son el prelude de la actual guerra entre Rusia y Ucrania, la cual se gesta por lo menos desde el inicio de este siglo (Mearsheimer, 2014).

Como antecedente, hay que recordar que Ucrania no es una entidad étnica y culturalmente homogénea. La parte central fue una provincia del imperio ruso (figura 11) y, posteriormente, ya siendo parte de la Unión Soviética, Lenin le agregó la parte suroriental llamada Novorossya y, años más tarde, Stalin le anexó una parte de Polonia y Rumania. Por su parte, la península de Crimea, que siempre había sido rusa, fue cedida a Ucrania en febrero de 1954 por el entonces líder de la URSS Nikita Krushchev,

<sup>4</sup> Statista. <https://es.statista.com/grafico/26704/paises-europeos-segun-su-ano-de-ingreso-en-la-otan/>

de origen ucraniano. Sin embargo, esto no fue mayor problema mientras Ucrania y Rusia eran parte de la misma Unión Soviética.

**FIGURA 11. TERRITORIOS ANEXADOS A UCRAVIA EN LA HISTORIA**

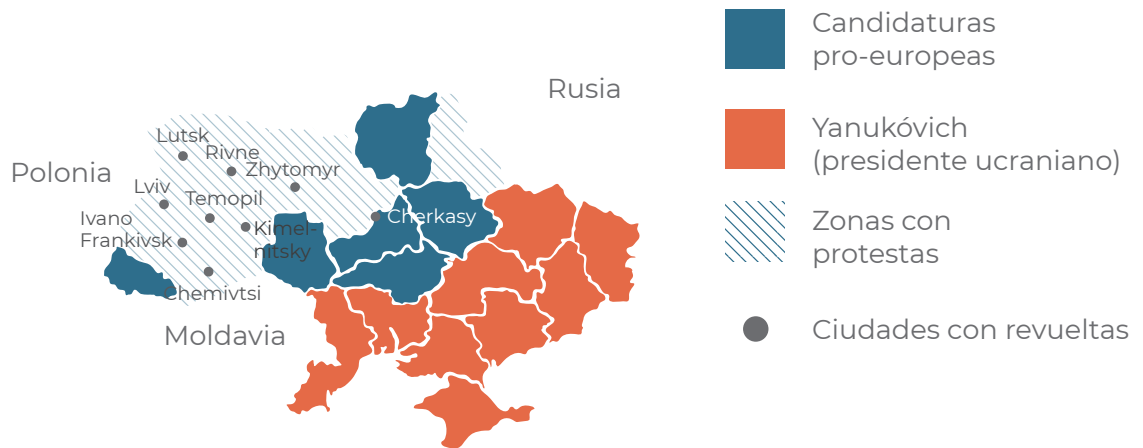


**Fuente:** adaptado de Naydenov y Maslov (2014).

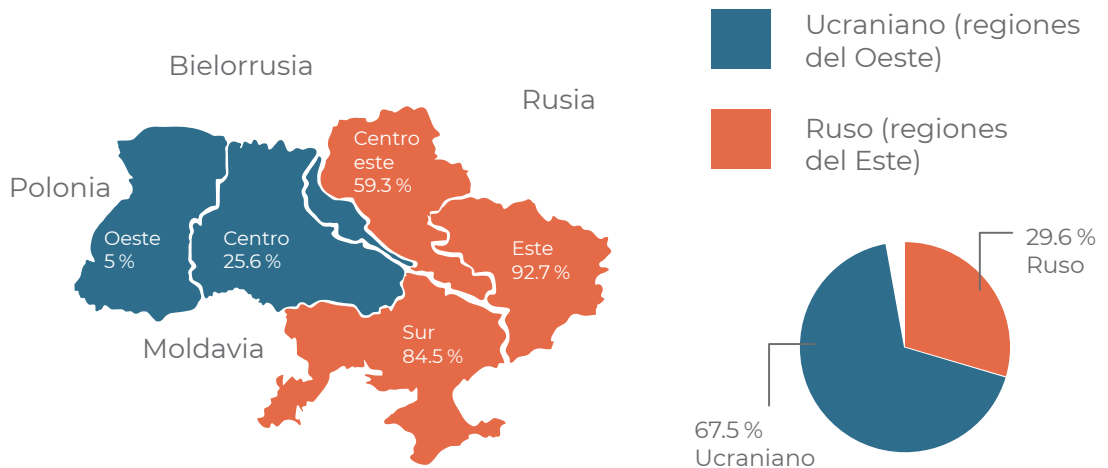
Con la disolución de la Unión Soviética y la independencia de Ucrania, se creó una situación de inestabilidad debido a las grandes diferencias que existen entre la parte occidental, políticamente afín a Occidente y con idioma propio, y la parte oriental, prorrusa y de lengua materna rusa (figura 12). Las tensiones internas empezaron a crecer a principio del siglo en ocasión de las elecciones presidenciales de 2004, en las que ganó el candidato prorruso Victor Yanucovich. El movimiento pro occidental, llamado “revolución naranja”, generó fuertes protestas y acusaciones de fraude que llevaron a repetir las elecciones; sin embargo, al final volvió a ganar la coalición prorrusa. En las siguientes elecciones, en 2010, ganó nuevamente Victor Yanucovich, con el detrimento de que el país se encontraba cada vez más dividido (figura 12).

**FIGURA 12. PREFERENCIAS POLÍTICAS Y LENGUA MATERNA EN UCRAINA**

**Cómo votaron las regiones en 2010**



**Cómo votaron las regiones en 2010**



**Fuente:** elaboración propia con información de *El País* (2014).

En el 2013 comenzaron una serie de protestas contra el gobierno de Yanukovich por parte de grupos a favor de la firma del Acuerdo de Asociación con la Unión Europea y contrarios a un acuerdo con la Federación Rusa. Después de protestas cada vez más

violentas, que se alega fueron fomentadas por organizaciones financiadas por la CIA y algunos países europeos, en 2014 se derrocó por la fuerza del presidente Yanukovich y la instalación de un gobierno pro occidental con facciones que hacen abierta referencia a los personajes históricos de la Ucrania nazista en la época de la ocupación alemana en la segunda guerra mundial.

A raíz de este golpe de Estado iniciaron las protestas prorrusas en diferentes lugares de la región oriental, mismas que fueron reprimidas violentamente (Odessa, Mariupol, entre otros). A mediados de marzo del 2014, Crimea lleva a cabo un plebiscito, que tiene por resultado que más del 90% acepta la anexión a Rusia. El 7 de abril se proclamó la República Popular de Donetsk (RPD) en la ciudad homónima, y el 28 de abril la República Popular de Lugansk (RPL). Esto, a raíz de un referéndum donde la mayoría de los votantes de esas provincias optó por separarse de Ucrania. Así, para el 1º de mayo un total de 16 ciudades y pueblos del este ucraniano se hallaban parcial o totalmente en manos de los grupos armados prorusos en la llamada región del Donbass.

Las autoridades de Kiev pusieron en marcha una operación militar para recuperar estas provincias. En los años sucesivos, los gobiernos de los presidentes Poroshenko y luego Zelenski, llevaron a cabo operaciones militares donde el ejército ucraniano avanzó hacia el este bombardeando zonas civiles y provocando 14.000 muertos según la ONU (Naciones Unidas, 2022). El conflicto se logró detener parcialmente con los acuerdos de Minsk, donde Ucrania, Rusia y la Organización para la Seguridad y la Cooperación en Europa (OSCE) con la mediación de los líderes de Francia y Alemania, establecen un alto al fuego, la retirada de armas pesadas de la línea del frente, la liberación de prisioneros de guerra y una reforma constitucional que concedía el autogobierno a determinadas zonas del Donbass.

Sin embargo, en los años subsecuentes los acuerdos no se respetaron. En este sentido, es importante subrayar que en 2022 la excanciller alemana Ángela Merkel admitió que los acuerdos se firmaron para ganar tiempo y permitir que la OTAN armara y preparara el ejército ucraniano para continuar con una acción militar.

A finales de 2021, Rusia solicitó formalmente a la Unión Europea garantías para disminuir las tensiones en Ucrania, entre las que se encontraba la no anexión de dicho país a la OTAN, ya que eso implicaría tener armas nucleares a pocos centenares de kilómetros de Moscú, lo que se traduciría en una amenaza existencial para Rusia. La UE y la OTAN no dan garantías y respuestas claras a tal petición. En cambio, el ejército ucraniano, apoyado por la OTAN, comenzó a acumular fuerzas en la frontera con el Donbass y Rusia procedió de igual manera en su frontera.

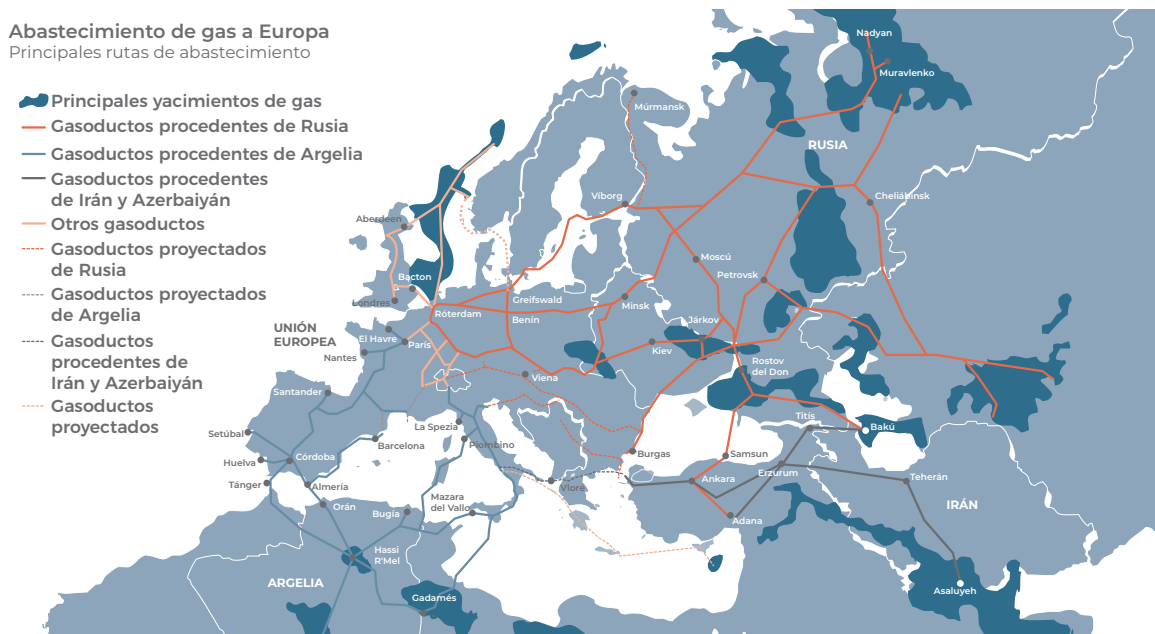
El 21 de febrero de 2022 Rusia, finalmente, reconoció la independencia de las repúblicas separatistas de Donetsk y Lugansk y, poco después, el presidente Putin firmó un decreto de apoyo militar mutuo lo que permite desplegar militares rusos en los territorios de las repúblicas de Donetsk y Lugansk.

El 23 de febrero Rusia inició la llamada Operación Militar Especial en Ucrania, con los objetivos declarados de “desmilitarizar” y “desnazificar” a esa nación, además de la defensa de los ciudadanos rusos del Donbass (Roberts, 2020). Tropas rusas entraron no solo al territorio del Donbass, sino también en otras partes de Ucrania. Por su parte, los países de la OTAN empezaron de inmediato su apoyo militar, logístico y de inteligencia a Ucrania con el objetivo de “defenderla de la invasión rusa”.

Mas allá de las declaraciones oficiales, en la práctica la guerra se convierte en una confrontación entre Rusia y la OTAN que entre sus causas tiene también el control sobre los recursos energéticos y materiales de Ucrania y, finalmente, de Rusia. De hecho, la parte oriental de Ucrania tiene la principal cuenca carbonífera y de petróleo no convencional de Ucrania (Faiola y Bennett, 2022) y cuenta con grandes reservas de minerales estratégicos como litio, tierras raras y titanio (Covatiaru, 2022).

El conflicto ucraniano tiene, asimismo, otra relación con la energía. Desde más de una década Europa Occidental había venido incrementando su dependencia energética de Rusia, particularmente en lo que respecta al gas natural, que alimentaba a través de gasoductos que pasaban por Ucrania (figura 13). Mucho antes de la guerra, ante el panorama de hostilidad de países como Ucrania y Polonia, Rusia decidió promover la construcción de dos gasoductos que pasaran por el Mar Báltico evitando estos países, para seguir alimentando a Alemania y Europa central de gas. Para ello se construyó el gasoducto North Stream 1 que fue terminado en el 2011 y North Stream 2, que se completó a finales del 2021 (Gil, 2021).

**FIGURA 13. PROCEDENCIA DEL GAS QUE CONSUMÍA EUROPA HASTA 2022**



Fuente: Gil (2021).

Los Estados Unidos siempre manifestaron su contrariedad con la construcción del gasoducto Nord Stream 2, puesto que incrementaba la dependencia energética de Europa hacia Rusia. No obstante, la razón más profunda era que la alianza entre una potencia energética como Rusia y una potencia industrial como Alemania, constituía una amenaza para la hegemonía estadounidense en Europa Occidental. Con el conflicto en Ucrania, los Estados Unidos tuvieron la ocasión de debilitar la relación entre Europa y Rusia, primero con una gran cantidad de sanciones económico-financieras contra Rusia y, finalmente, llegando a rescindir físicamente la conexión energética.

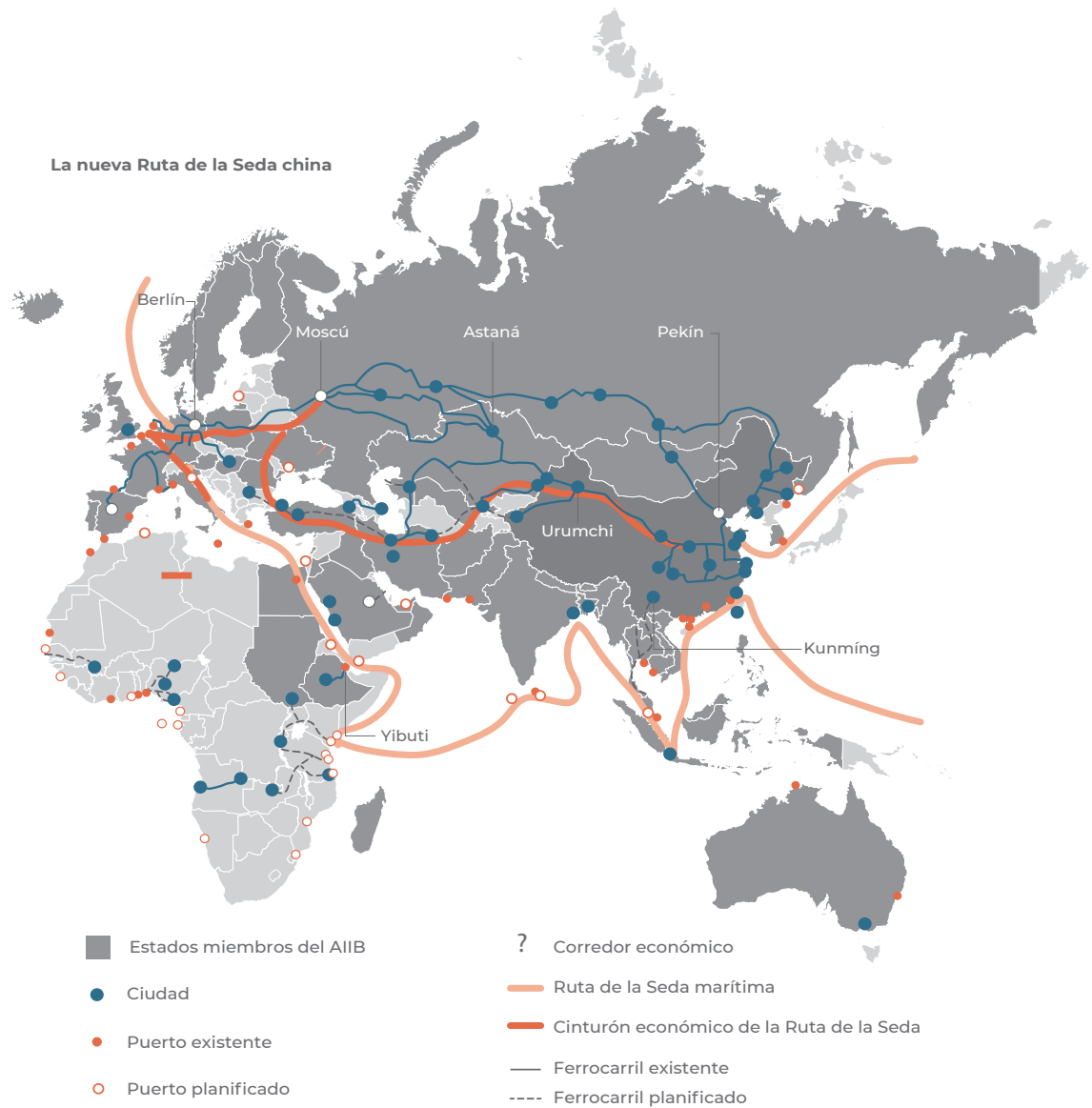
El 26 de septiembre de 2022 unas explosiones submarinas rompieron los gasoductos Nord Stream 1 y 2 interrumpiendo definitivamente el flujo de gas ruso hacia Europa. El periodista y ganador de un premio Pulitzer Seymour Hersh ha asegurado que fueron los Estados Unidos, con ayuda de Noruega, quienes sabotearon y destruyeron los gasoductos de Nord Stream (Hersh, 2023).

Frente a la hostilidad de Occidente, Rusia ha volteado hacia otros países de Asia para exportar su gas y petróleo. En particular, China, que sedienta de fuentes de energía para alimentar su creciente industria, está más que dispuesta a adquirir los energéticos que Europa ya no obtiene. Para ello, los dos países han celebrado acuerdos para la construcción de un conjunto de ductos que transportarán petróleo y gas desde la región de Siberia hasta China (Power of Siberia), mismos que entrarán en función en el 2025.

Este plan se inserta en el proyecto de integración euroasiática que persigue China desde hace ya dos décadas, llamado *Belt and Road Initiative* o “el nuevo camino de la seda”, un proyecto que está integrando a otros países estratégicos del continente en una red de infraestructura y comercio continental (Rana y Ji, 2020) (figura 14). En este contexto, el conflicto militar en Ucrania puede leerse como parte de la confrontación de las grandes potencias para el control de los recursos energéticos y materiales del continente euroasiático.

Los pactos que China y Rusia están estableciendo para evitar la dependencia de Occidente, se están llevando también al terreno económico-financiero con acuerdos para el intercambio comercial sin usar el dólar americano y, además, la creación del banco de desarrollo de los países brics (Brasil, Rusia, India, China y Sudáfrica) como alternativa al Banco Mundial (Stuenkel, 2020). El grupo de los brics ha sido recientemente ampliado a Irán, Arabia Saudita, Emiratos Árabes, Egipto y Etiopía, con lo que se refuerza el control sobre gran parte de los recursos fósiles convencionales remanentes. Este gran plan de integración económica y energética está reduciendo progresivamente la hegemonía de los Estados Unidos en Eurasia, reactivando los conflictos históricos del Oriente Medio, ya que Israel representa el principal aliado y receptor de la ayuda militar de este país.

**FIGURA 14. MAPA DEL PROYECTO DE INTEGRACIÓN EUROASIÁTICA DE CHINA “EL NUEVO CAMINO DE LA SEDA”**



Fuente: adaptado de Sieren (2019).

## 9.4 CRÍTICAS A LA NARRATIVA OFICIAL

### Argumentación 1. El pilar financiero de la geopolítica occidental

Como hemos visto, las presiones militares de los Estados Unidos y sus aliados han sido frecuentes para tener acceso a precios baratos a los recursos energéticos de los

cuales dependen. Sin embargo, el sector militar es sólo uno de los pilares de la hegemonía estadounidense. El otro pilar, menos obvio, es el control del sistema financiero internacional que se ha construido sobre el sistema de los petrodólares.

### El sistema de los petrodólares

Después de los acuerdos de Bretton Wood en 1944, el dólar estadounidense empezó a sustituir la libra esterlina inglesa como divisa de intercambio. Esta supremacía del dólar sobre otras divisas se define como “señoraje”. A partir de 1944 el dólar se podía cambiar por oro a una tasa fija de 35 dólares por onza, lo que le daba una notable solidez, pero también limitaba la ampliación de la cantidad en circulación. Además, en los años 60, en un intento de reducir la influencia económica de los Estados Unidos, el gobierno francés del presidente De Gaulle empezó a reducir sus reservas en dólares intercambiándolas por oro. Estos factores determinaron la decisión del presidente Nixon, primero, de devaluar el dólar con respecto al oro (1971) y, finalmente, desvincularlo por completo de este metal a finales de 1973.

Al no estar anclado a un bien físico, el banco central de los Estados Unidos (la Reserva Federal) quedó libre de imprimir cualquier cantidad de dólares, pero esto conllevaba el riesgo de una devaluación. Para asegurar que la demanda internacional de dólares continuara sostenida, el gobierno de Nixon –a través del secretario de Estado, Henry Kissinger– llegó a un acuerdo con Arabia Saudita que dio origen al sistema de petrodólares. Los términos del acuerdo eran simples: los sauditas iban a aceptar sólo dólares a cambio de su petróleo y reinvertirían los excedentes en bonos del Tesoro de los Estados Unidos (Oweiss, 1884).

A cambio, los Estados Unidos proporcionarían armas y garantizar seguridad a los saudíes, preocupados por los conflictos en el mundo árabe y el ascenso de gobiernos seculares en Egipto, Siria, Libia e Irak. Arabia Saudita era el mayor exportador de petróleo y el país dominante de la OPEP, así que todos los demás países exportadores adoptaron el dólar y, dado que el petróleo es la materia prima con mayor demanda a nivel mundial, también las demás *commodities* se empezaron a comerciar en dólares. Esto aseguró que los bancos centrales de todos los países compraran dólares para las transacciones comerciales internacionales.

### Argumentación 2. El debilitamiento de la hegemonía americana El lento declive del imperio americano

Si bien se sigue pensando a los Estados Unidos como la principal potencia mundial, en la actualidad este país enfrenta una serie de problemas para mantener su supremacía global:

- Sus reservas de energía están menguando, los hidrocarburos no convencionales (“*shale*”) es lo último que le queda y está por llegar a su máximo. Debido al estilo de vida derrochador de una parte de su población y al enorme gasto militar, consume más energía y recursos materiales de los que tiene.
- La globalización y la consecuente política de *outsourcing* a China y otros países ha provocado una desindustrialización que se está tratando de paliar tardíamente con el llamado *nearshoring*.
- Tiene el déficit gubernamental y la deuda total más grande del mundo, que solo pudo darse por el señoreaje del dólar. Sin embargo, el dólar está siendo lentamente abandonado como divisa de intercambio internacional y reserva de los bancos centrales por los países BRICS+.
- A pesar del enorme presupuesto militar, los Estados Unidos no ha ganado ninguna guerra en los últimos 20 años. Sus intervenciones militares han fracasado en el objetivo de controlar los países objetivo y en muchos casos han dejado solo caos y destrucción: Irak, Somalia, Libia, Siria, Afganistán y ahora Ucrania.

### Reflexión final: conflictos territoriales por conseguir la hegemonía de los recursos energéticos

Como se puede observar, los conflictos siguen formando parte de nuestro comportamiento humano. Parece ser que no se ha aprendido nada de la historia pasada, ya que se sigue justificando la violencia como medio para alcanzar un fin. Pero lo que es peor: las armas de las que ahora disponemos son de destrucción masiva y pueden provocar una violencia más global y extendida.

¿Dónde ha quedado la premisa de Freud de que la pulsión de muerte sirve en la medida en la que hace surgir la cordura y no como excusa maquiavélica de que el hombre es malo por naturaleza y que se ha de expresar de alguna manera? Es una pregunta compleja de resolver puesto que presenta muchas aristas provenientes, de la personalidad y del temperamento individual, pero también de una memoria histórica que hace casi imposible domar la pulsión cultural de la venganza asumida como un sistema de creencias sin cuestionamiento alguno que permea en cada uno de nosotros como la humedad de una fría noche de invierno.

Independientemente de que el origen de esta violencia proceda de un miedo a la incertidumbre generada por la escasez de recursos o de la naturaleza colonizadora de la cultura occidental, lo que está claro es que, para restaurar el tejido social y la biósfera, las estrategias se han de construir desde un lugar muy distintos del que estamos procediendo hasta ahora.





# 10. La civilización industrial frente al declive de las fuentes fósiles

En este capítulo analizaremos cómo puede impactar sobre diferentes aspectos de la civilización industrial la disminución del uso de combustibles fósiles, tanto por el declive geológico de la producción como por la necesidad de reducir su uso debido a los impactos ambientales que conllevan.

## 10.1 INDAGACIÓN PREVIA

Revisa en los distintos medios de comunicación, noticias acerca de:

- La electricidad y su fuente de procedencia.
- La tecnología como medio de solución de los problemas de la civilización.
- El coche eléctrico.
- El futuro sin combustibles fósiles.
- Los objetivos de desarrollo sostenible para 2030.
- El consumo de agua en los distintos procesos.

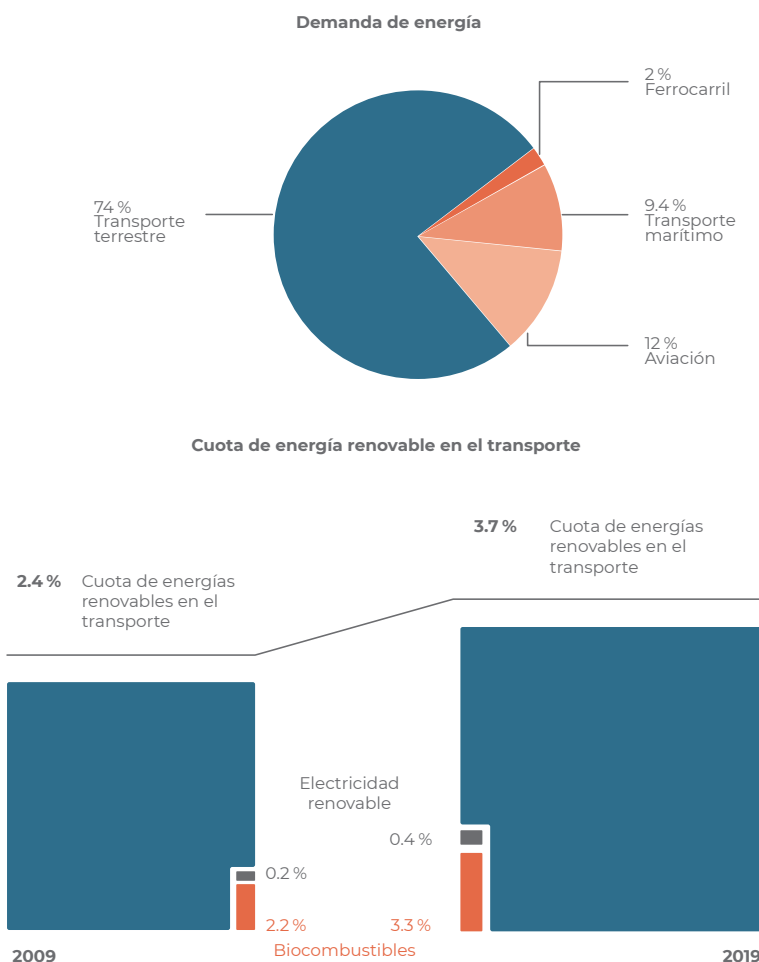
Compártelo en tu clase, en un círculo de estudio o círculo reflexivo.

Explica en qué conceptos erróneos basan sus argumentaciones y cuáles son sus fuentes.

## 10.2 SECTOR TRANSPORTE

El principal sector que depende de los combustibles fósiles es el del transporte, el cual consume el 32% de la energía global (IEA, 2023). Como se muestra en la figura 15, el 74% de esta energía es consumida por el transporte por carretera; el 12%, por el transporte aéreo; el 9%, por el transporte marítimo y el 2%, por el transporte en tren.

**FIGURA 15. FUENTES DE ENERGÍA EN EL TRANSPORTE**



**Fuente:** IRENA (2022).

Otro dato relevante en el que nos tenemos que fijar es que el 96.3% de ese 32% procede de combustibles fósiles, esencialmente derivados del petróleo, y podemos observar que entre el 2009 y el 2019 el uso de los combustibles fósiles sólo se redujo en un 1.3%. También es importante notar que únicamente el 0.4% de la energía para el transporte procede de electricidad generada por fuentes renovables, mientras que el 3.3% proviene de biocombustibles.

La sustitución de los combustibles fósiles en el sector transporte es un reto mayúsculo debido al gran número de vehículos que existen en el mundo. De acuerdo con la información disponible en el 2024, el número total de automóviles en el mundo fue de 1 475 millones (Hedges Company, 2024). Eso significa que había más de un automóvil por cada cinco personas. No obstante, la distribución es muy desigual, ya que el 19% de este monto se da en los Estados Unidos, que es el país que más vehí-

culos tiene per cápita, aunque el que más tiene, en términos absolutos, es China. La gran desigualdad en la distribución se resume en el siguiente apartado:

### Distribución de los vehículos en el mundo

- América del Norte: 359 millones de vehículos; 0,71 vehículos per cápita/710 vehículos por cada 1000 habitantes.
- Europa: 413 millones de vehículos; 0,52 vehículos per cápita/520 vehículos por cada 1000 habitantes.
- América del Sur: 84 millones de vehículos; 0,21 vehículos per cápita/210 vehículos por cada 1000 habitantes.
- Oriente Medio: 50 millones de vehículos; 0,19 vehículos per cápita/190 vehículos por cada 1000 habitantes.
- Asia/Oceanía: 543 millones de vehículos; 0,14 vehículos per cápita/140 vehículos por cada 1000 habitantes.
- África: 26 millones de vehículos; 0,06 vehículos per cápita/58 vehículos por cada 1000 habitantes.

En lo que respecta al tráfico marítimo, a pesar de que implique un gasto energético inferior al del transporte carretero, resulta un tanto abrumador ver que en la actualidad cerca 118 000 barcos comerciales surcan los océanos diariamente (enero, 2023). Un mapa en tiempo real del tráfico marítimo puede verse en el sitio: [Marinetraffic](https://www.marinetraffic.com).<sup>1</sup>

Los principales tipos de barcos navegando son:

### Flota de barcos mundial (Statista, 2023)

- Barcos de carga en general: 17 784.
- Buques cargueros: 12 941.
- Buques petroleros: 8 258.
- Buques con materiales químicos: 6 122.
- Buques transbordadores de contenedores: 5 574.
- Barcos de pasajeros: 5 369.
- Buques de gas licuado: 2 180.

Finalmente, en el caso del transporte aéreo, el número de vuelos comerciales ronda en torno a los 100 000 diarios y el número total en 200 000, como se puede apreciar

<sup>1</sup> [Marinetraffic. https://www.marinetraffic.com](https://www.marinetraffic.com)

en la página web del sitio Flight Radar<sup>2</sup>. En el submenú de estadísticas de este sitio se puede también observar que, si bien la pandemia del covid-19 afectó profundamente a la aviación, se recuperó en el 2023 y se superó nuevamente el número de vuelos de 2019.

Como en el caso de la movilidad terrestre, también en los vuelos hay una gran disparidad. Los países que más vuelos tienen son los Estados Unidos, Europa y China; los EE. UU. tienen 20 veces más vuelos domésticos que México, aunque su población es sólo dos veces y media comparada con la mexicana.

## 10.3 CRÍTICAS A LA NARRATIVA OFICIAL

### Argumentación 1. Sustitución de los combustibles fósiles en el transporte

Es común escuchar que necesitamos dejar de utilizar los combustibles fósiles para pasar a utilizar exclusivamente recursos renovables y con esto solucionar el problema del cambio climático. No obstante, esta narrativa simplista no tiene en cuenta la realidad compleja del sistema, construido sobre la energía concentrada, controlable, versátil y abundante en el pasado que representan los hidrocarburos, particularmente el petróleo. El sector del transporte es uno de los más problemáticos en este sentido, ya que dejar de usar los derivados del petróleo sin cambiar profundamente este sector es prácticamente imposible, como se muestra a continuación.

#### ¿Qué implicaría electrificar el transporte?

La narrativa promovida cada vez con más fuerza es que una movilidad sustentable, libre de combustible fósiles (CF), pasa por electrificar el transporte. De antemano, hay que recordar que, como se ha comentado a lo largo del libro, la infraestructura para el aprovechamiento de fuentes renovables para producir electricidad necesita de los CF en cada etapa de su ciclo de vida: desde la extracción y procesamiento de minerales, la fabricación, el transporte y la instalación hasta el mantenimiento y el desmantelamiento final.

Los datos más recientes disponibles nos dicen que, en el 2021, la energía eléctrica a nivel mundial representaba cerca del 21% del uso final de la energía y el sector transporte representaba el 32% (IEA, 2023). Dado que sólo un 0.4% del transporte se basa en

<sup>2</sup> Flight Radar. <https://www.flightradar24.com>

electricidad renovable (figura 15) una estimación burda indica que se necesitaría más que duplicar la generación eléctrica para sustituir el consumo de CF en el transporte.

Dado que el 62% de esta electricidad procede de los CF, el crecimiento de fuentes renovables debería ser mucho mayor. Adicionalmente existen problemas tecnológicos, puesto que, actualmente, no hay una solución viable para electrificar el transporte aéreo, y en lo que al transporte marítimo respecta resulta muy complejo hacerlo. Una estimación más precisa del reto de electrificar el transporte se presenta en el siguiente apartado.

## Estimación cuantitativa de los requerimientos para sustituir los combustibles fósiles en el sector del transporte

### Requerimientos energéticos

En un extenso informe para el Servicio Geológico Finlandés, Simón Michaux, investigador experto del sector minero, estimó los requerimientos necesarios para sustituir por completo los CF por fuentes renovables (Michaux, 2021). Uno de los capítulos de este informe analiza los requerimientos energéticos para sustituir el transporte existente en 2018 por fuentes renovables, dejando de lado el sector aéreo, puesto que actualmente no hay tecnología viable para electrificarlo.

Los cálculos realizados por Michaux arrojaron datos alarmantes pero lógicos a la vez, si se piensa en que nuestra forma de vida se ha basado en la densidad energética de los combustibles fósiles. El resultado obtenido fue que se requeriría de 10895TWh adicionales, lo que implica el 41% de la producción mundial de electricidad generada en el 2018 (26614TWh), si se tiene en cuenta que el 75% de la cual fue obtenida a partir de combustibles fósiles. Ese año la generación de electricidad por medio de las fuentes renovables, más la nuclear, fue de 9528TWh, y de 6826.6TWh excluyéndola.

Es decir, solo para sustituir los CF en el sector del transporte se necesitaría multiplicar por cuatro la generación eléctrica renovable, si se incluye la nuclear, y 5.5 veces si se le excluye.

### Requerimientos materiales

El otro problema que enfrenta la electrificación del sector transporte se vincula con los requerimientos de minerales para la construcción de las baterías. Las celdas de una batería con capacidad de 60 kilovatios-hora (kWh), típica de un coche eléctrico de gama media, contienen en promedio aproximadamente 185kg de minerales (Bhutada, 2022): 52kg de grafito, 50kg de aluminio, 29kg de níquel, 20kg de cobre, 20kg de acero, 10kg de manganeso, 8kg de cobalto, 6kg de litio y 5kg de hierro.

El informe de Michaux (2021) estima también los requerimientos de estos metales para el caso de sustitución total del parque vehicular terrestre y marítimo. Los cálculos muestran que las reservas globales pueden no ser suficientes para abastecer la cantidad de baterías necesarias. En teoría, existen suficientes reservas globales de níquel y litio si se utilizaran exclusivamente para producir baterías de iones de litio para vehículos, pero no hay suficiente cobalto. No obstante, hay tres problemas mayores:

1. Las baterías sólo tienen una vida útil de ocho a diez años. Por ende, después de este tiempo se necesitarán baterías nuevas de repuesto;
2. Dado que la energía eléctrica generada a partir de fuentes solares y eólicas es intermitente, tanto a nivel diario como estacional, se requieren sistemas de almacenamiento que, por lo menos en parte, son también basados en baterías. Tomando en cuenta estos requerimientos las reservas minerales, actuales no son suficientes;
3. Aunque existieran suficientes reservas para extraer esas ingentes cantidades de minerales, con la tasa de extracción de 2018 tardaríamos 56 años para el cobalto, 72 años para el litio y 67 años para el grafito. En el caso del cobre, en toda la historia de la humanidad se han extraído 700 millones de toneladas, pero para satisfacer los escenarios de “crecimiento verde” se necesitaría extraer esta misma cantidad en tan sólo 22 años.

No podemos olvidar que, además, las operaciones mineras sólo se pueden hacer con diésel y que la disminución de la concentración de mineral que se observa históricamente implica un consumo creciente de estos derivados del petróleo. Las conclusiones a las que llega Michaux (2021) no dejan lugar a dudas sobre el predicamento al que nos enfrentamos como especie.

En conclusión, este informe sugiere que reemplazar el actual sistema impulsado por combustibles fósiles utilizando tecnologías renovables, como paneles solares o turbinas eólicas, no será posible para toda la población humana mundial. Simplemente no hay tiempo ni recursos suficientes para hacerlo según el objetivo actual fijado por las naciones más influyentes del mundo. Por lo tanto, lo que se vuelve necesario es una reducción significativa de la demanda social de todos los recursos de todo tipo. Esto implica un contrato social muy diferente y un sistema de gobernanza radicalmente diferente al que existe hoy.

## Argumentación 2. El coche eléctrico

### El coche eléctrico como falsa solución al cambio climático

El discurso recurrente en los medios de comunicación y entre los debates políticos es que el coche eléctrico es una solución para descarbonizar el sector del transporte y con eso atender la crisis climática. Si bien es cierto que los coches eléctricos no emiten gases de efecto invernadero durante su uso, que su motor es más eficiente que el de combustión interna (80% frente a un 40-25%) y también dura más, ya que contiene menos partes mecánicas; el problema es el “combustible” puesto que las mejores baterías de ion-litio poseen entre 60 y 100 veces menos densidad energética que la gasolina o el diésel, lo que aumenta el peso y el volumen del coche, al mismo tiempo que reduce su autonomía. Además de los requerimientos de materiales que vimos en el apartado anterior, los restantes problemas asociados a las baterías y en general al coche eléctrico son:

- *Falta de asequibilidad.* Al requerir muchas más materias primas, que además están volviéndose más caras, su precio es cerca del doble que uno de gasolina con las mismas prestaciones. Es un producto para la parte más acaudalada de la población, que frecuentemente lo adquiere como segundo coche.
- *Falta de estaciones de recarga.* Sólo una minoría de los poseedores de coches tiene cochera propia donde poder cargar un coche eléctrico. Todos los demás necesitarían puntos de recargas públicos. La recarga tarda entre seis y diez veces más que llenar el tanque de un coche de gasolina, por lo que para una sustitución total se requeriría crecer diez veces las electrolineras con respecto a las gasolineras.
- *No representa una movilidad “limpia”.* La huella ecológica de un coche eléctrico es mayor a la de un coche de gasolina por la mayor cantidad de energía y materiales necesarios para su construcción. Sólo después de muchas decenas de miles de kilómetros de uso se puede empezar a verse una cierta ganancia ecológica pero las baterías tienen que cambiarse cada siete u ocho años.
- *No resuelve la congestión de las ciudades.* Paradójicamente, lo más probable es que el tema del tráfico se resolverá porque no habrá tantas personas que puedan permitirse comprar un coche eléctrico.

Finalmente, las emisiones de GEI de los coches de gasolina representan simplemente el 7-8 % de las emisiones globales, así que, con todas las limitantes que

hemos visto, la introducción de coches eléctrico sólo reduciría marginalmente las emisiones.

## Geografía de los minerales críticos y conflictos socio-ambientales

La construcción de baterías para la masificación del coche eléctrico se enfrenta, a su vez, con el tema de la desigualdad y el neocolonialismo. Los coches eléctricos se promueven en los países más ricos de la OECD (los Estados Unidos, Europa Occidental) para descarbonizar el transporte, sin embargo, como se observa en la tabla 7, gran parte de los elementos que se requieren para la elaboración de las baterías proceden de países del sur global.

**TABLA 7. GEOGRAFÍA DE LOS MINERALES USADOS PARA ELABORAR BATERÍAS**

ELEMENTO	EXTRACCIÓN	PROCESADO
Cobre	Chile 28%	China 40%
Níquel	Indonesia 33%	China 35%
Cobalto	Rep. Dem. Congo 69%	China 65%
Tierras raras	China 60%	China 87%
Litio	Australia 52 %	China 58%

**Fuente:** IEA (2021).

La presión para obtener más cantidades de estos elementos críticos para el “crecimiento verde” sólo puede exacerbar el impacto socioambiental de la minería en las llamadas “zonas de sacrificio” (Marin et al., 2023), ya que implica una invasión y perturbación del medio ambiente y de las comunidades que allí viven. Incluso ahora ya se libran conflictos relacionados con las materias primas críticas necesarias para los vehículos eléctricos, que van desde las minas de cobalto, en Marruecos y Congo, donde se ha denunciado contaminación del agua y de los ecosistemas, condiciones laborales similares a las de la esclavitud, hasta la lluvia ácida y las emisiones de dióxido de azufre provocadas por la minería de níquel en Glencore, Zambia, las luchas del pueblo indígena Karonsi'e Dongi contra la empresa minera Vale, S.A., en Indonesia, y el conflicto abierto por los recursos de litio en el salar Uyuni, Bolivia (Velasco-Fernández y Pérez, 2022).

En China se han reportado conflictos relacionados con los depósitos de tierras raras en el oeste de Mongolia interior, donde los habitantes han denunciado la contaminación masiva del suelo y el agua, así como el envenenamiento de animales y humanos (Velasco-Fernández y Pérez, 2022).

Asimismo, China controla gran parte de la cadena de producción mundial de baterías de iones de litio, hasta el punto de producir el 77% de éstas en el 2022 (Bouthada, 2023).

## 10.4 IMPACTO DEL AGOTAMIENTO DE LOS COMBUSTIBLES FÓSILES Y EL SISTEMA AGROINDUSTRIAL

### Indagación previa

Revisa en distintos medios de comunicación las noticias sobre estos temas:

- El encarecimiento de la canasta básica.
- El origen dispar de los distintos productos de tu canasta básica.
- El promedio de kilómetros recorridos por los productos de tu canasta básica.
- El agua virtual consumida en la cadena de generación de los productos de tu canasta básica.

Compártelo en tu clase, en un círculo de estudio o círculo reflexivo.

Explica en qué conceptos erróneos basan sus argumentaciones y cuáles son sus fuentes.

### Sector agroindustrial

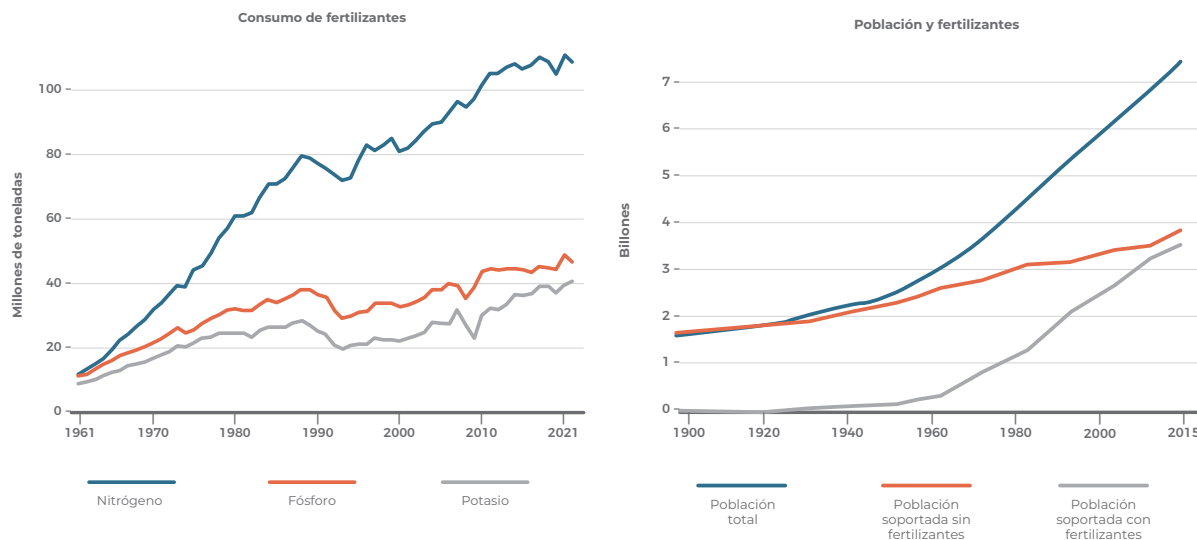
Otro sector crítico basado en derivados de los combustibles fósiles, particularmente en los hidrocarburos, es el de la agricultura, es decir, la producción de comida. La forma de cultivar ha sufrido cambios radicales desde sus orígenes. Durante gran parte de la historia la agricultura se basó en la energía del ser humano y de los animales, con mejoras paulatinas basadas en la selección de semillas y el desarrollo de sistemas de irrigación. La aplicación del petróleo y el gas natural produjo un cambio llamado la “Revolución Verde” entre los años 50 y 70, en la que aparecieron una serie de tecnologías aplicadas a los cultivos:

- El uso de fertilizantes y pesticidas.
- Las nuevas variedades híbridas de semillas.
- La mecanización, que permitió la monocultura y el cultivo intensivo de grandes extensiones.
- La irrigación basada en la explotación masiva del agua subterránea con la consecuente sobreexplotación de los acuíferos.

En fechas más recientes se introdujo la ingeniería genética y la biotecnología hasta llegar a los transgénicos.

Todos estos inventos y aplicaciones dependen del petróleo y el gas natural, y han permitido multiplicar la productividad agrícola y reducir, drásticamente, la cantidad de población que se dedica a la producción de comida. De hecho, hasta el siglo antepasado, el 70% de la población se dedicaba al sector de la agricultura, mientras que, en la actualidad, sólo es el 3%. Uno de los aspectos a destacar de la Revolución Verde es el de los fertilizantes sintéticos con base en nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K), pues fueron los que más contribuyeron al incremento de la productividad y el crecimiento poblacional (figura 16).

**FIGURA 16. CONSUMO DE FERTILIZANTES Y CRECIMIENTO DE LA POBLACIÓN MUNDIAL SOPORTADA POR LA AGRICULTURA BASADA EN FERTILIZANTES NITROGENADOS**



**Fuente:** Our World in Data (2023).

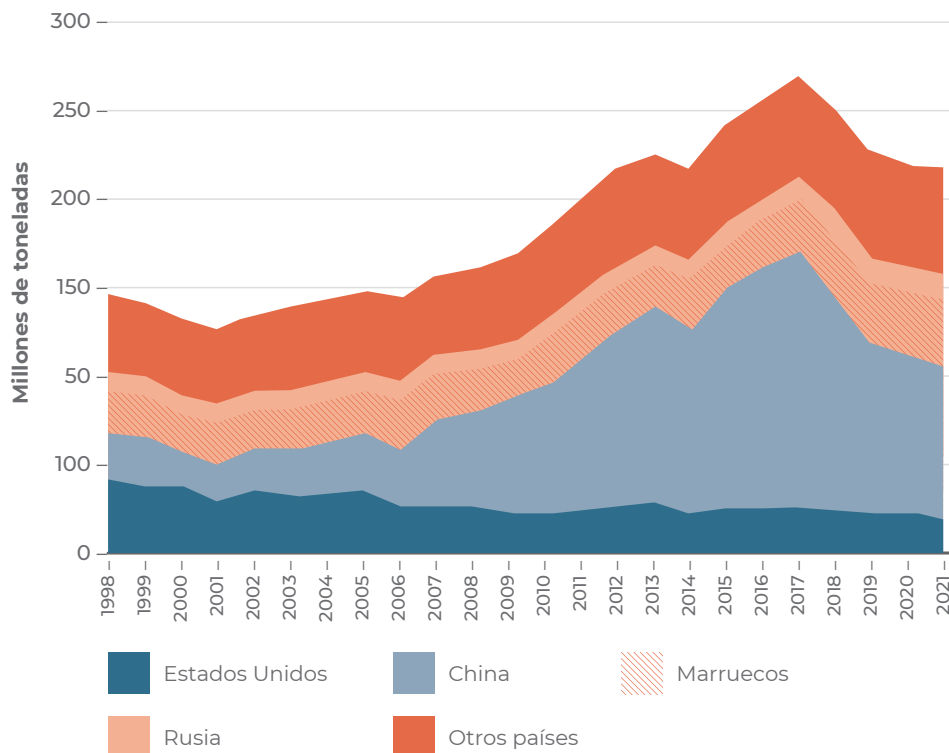
Estas sustancias se tuvieron que introducir debido a la pérdida de fertilidad de la tierra ocasionada por la sobreexplotación a la que se le sometió al reducir o

eliminar los periodos de barbecho, lo que provocó una caída en la capacidad de producción natural.

El empleo de fertilizantes no es nuevo, pero en el pasado eran de tipo natural, a partir del excremento animal, incluso fósil, como en el caso de los nitratos procedentes de los yacimientos de guano de pájaros. Sin embargo, a principios del siglo pasado, los químicos alemanes, Haber y Bosch, inventaron el proceso de producción de amoníaco y sus derivados (urea) a partir del nitrógeno del aire y del gas natural (metano,  $\text{CH}_4$ ) y agua, invento gracias al cual ganaron el premio Nobel en 1918 y 1931, respectivamente.

En el caso de los fertilizantes nitrogenados la dependencia de la petroquímica es total. En lo que respecta al fósforo, si bien no es un compuesto de síntesis, tiene otro inconveniente, ya que sólo se puede producir a partir de rocas fosfatadas, es decir, procede de una cantidad finita de yacimientos que se explota con minería y, por ende, con derivados del petróleo. La producción de fósforo pasó ya su pico en el 2017, principalmente determinado por la producción de China (figura 17). El país con mayores reservas es China, seguido por Marruecos en el territorio ocupado del Sahara Occidental.

**FIGURA 17. PRODUCCIÓN DE FÓSFORO A NIVEL MUNDIAL Y PRINCIPALES PAÍSES PRODUCTORES**



Fuente: Ryszko et al. (2023).

La ventaja que trajeron los fertilizantes fue la posibilidad de cultivos intensivos sin tiempos de descanso para la tierra. Sin embargo, esto provocó, como consecuencia, que la tierra ya no pudiese alimentar los cultivos sin la adición de dichas sustancias artificiales. Además, el aumento del uso de nitrógeno procedente del aire alteró el ciclo natural de este elemento, lo que provocó la eutrofización de los ríos y mares por el crecimiento desmesurado de algas y bacterias que acaban con el  $O_2$  que requieren otras especies.

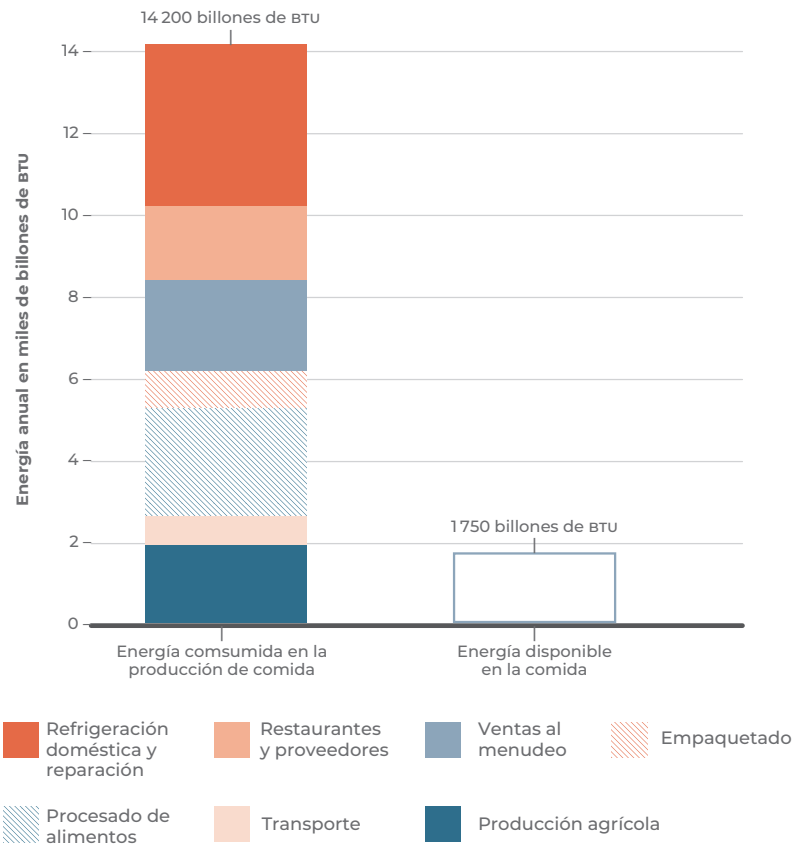
El otro componente de la agricultura industrial, producto de la Revolución Verde que depende de los hidrocarburos, son los pesticidas o plaguicidas. Éstos son una extensa lista de sustancias, producto de la petroquímica, diseñadas para eliminar todo tipo de plantas e insectos diferentes al cultivo principal que se quiere desarrollar. En la práctica se trata de venenos que, si bien se pretende que maten sólo a ciertas especies, tienen cada vez más impacto sobre los ecosistemas.

De acuerdo con un estudio reciente (Tang et al., 2021) existe un riesgo de contaminación ambiental causado por 92 ingredientes activos en 168 países. El 64% de la tierra agrícola mundial (aproximadamente 24.5 millones de  $km^2$ ) está en riesgo de contaminación por pesticidas con más de un ingrediente activo, y el 31% está en nivel de riesgo alto. Aunado a la dependencia de los hidrocarburos, éstas son razones adicionales para emprender el abandono de los pesticidas en el sector agrícola.

Finalmente, en la producción de comida, los CF no sólo son fundamentales para la producción de los fertilizantes y los pesticidas, sino que también entran en todas las demás etapas de la agricultura industrial. La maquinaria agrícola, las bombas de extracción de agua para la irrigación, el procesado, el almacenamiento, la refrigeración, así como para el transporte y distribución de comida dependen críticamente de los derivados del petróleo. Esta dependencia llega al punto que, en el caso de los Estados Unidos, para obtener una sola caloría de comida se deben de ingresar en todo el proceso ocho calorías procedentes de combustibles fósiles (figura 18). El promedio mundial está en cinco calorías.

Este sistema agroindustrial, con cultivos intensivos a gran escala y globalización, ha provocado la pérdida de la variedad en las comidas. Los alimentos nacionales se han vuelto cada vez más similares en composición, basados en plantas de cultivos globales. El crecimiento de la dependencia de estos cultivos en todo el mundo aumenta la interdependencia entre los países en cuanto a sus suministros de alimentos, recursos fitogenéticos y prioridades nutricionales, lo que ha generado menor resiliencia, y provocado que el sistema se vuelva frágil (Khoury et al., 2014).

**FIGURA 18. CÁLCULO DEL CONTENIDO ENERGÉTICO INCLUIDO EN LA COMIDA PARA LOS ESTADOS UNIDOS**



**Fuente:** Center for Sustainable Systems, UMICH (2023).

## 10.5 CRÍTICA A LA NARRATIVA OFICIAL

Uno de los argumentos recurrentes en defensa del sistema agroindustrial producto de la Revolución Verde es que sin él no sería posible la producción de comida para una población mundial que ha llegado a rebasar los 8 000 millones de habitantes. En las siguientes cápsulas se presenta una visión crítica acerca de esta aseveración.

### Argumentación 1. Agroindustria versus agricultura tradicional campesina y agroecológica

El sistema alimentario global se estableció originalmente bajo el colonialismo, cuando se reconfiguraron los patrones de agricultura y propiedad de la tierra de gran parte del mundo tropical para procurar ciertos alimentos requeridos por el mercado

occidental. Sin embargo, lejos de terminar con el colonialismo, este sistema de extracción de alimentos ha continuado debido a las condiciones de los préstamos de instituciones financieras internacionales como el Banco Mundial y el Fondo Monetario Internacional (Patel, 2021).

La aseveración de que no hay alternativa al sistema alimentario agroindustrial es una falacia alimentada por la industria alimentaria multinacional del norte global. En realidad, los datos indican que este sistema únicamente alimenta a un 30% de la población global, pero utilizan el 76% de la tierra arable, el 70% del agua, el 80% de los combustibles fósiles dedicados al sector agrícola y, además, se benefician del 86% del crédito (ETC Group, 2022).

## **Argumentación 2. Los problemas vinculados a la industrialización de la comida**

Uno de los puntos más cuestionables del sector agroindustrial es la extrema concentración de las empresas productoras de agroquímicos, semillas, fertilizantes sintéticos, transgénicos y maquinaria agrícola (Shand et al., 2022). En informe de ETC Group (Shand et al., 2022) se indica que, hace 25 años, diez compañías controlaban el 40% del mercado de semillas, pero para el 2022 tan sólo dos compañías (Bayer-Monsanto y Syngenta) gestionaban este porcentaje, y cuatro firmas el 62% de los plaguicidas.

La corporación Bayer-Monsanto controla por sí sola el 31% del frijol, el 38% de pepino, el 34% de pimiento, el 29% de pimiento dulce, el 23% de las semillas de tomate y el 25% de las semillas de cebolla. Las variedades transgénicas que esta empresa produce requieren del glifosato, que es el producto que se encarga de permitir crecer, exclusivamente, la semilla para la que está diseñada. Este producto altamente cancerígeno está prohibido en varios países desarrollados y, recientemente, también en México, a pesar de grandes presiones por parte de la compañía.

En el caso de la maquinaria agrícola y de los fertilizantes, la mitad del mercado es controlada, exclusivamente, por seis y diez empresas, respectivamente. Esta concentración oligopólica no sólo es dañina por el control que las grandes empresas ejercen sobre el precio de los alimentos básicos, sino que es también un factor de fragilidad del sistema alimenticio en caso de interrupción del comercio internacional, como se ha demostrado con la pandemia del covid-19 y la guerra en Ucrania.





# 11. Crisis multidimensional

---

Después de haber examinado todos los aspectos relacionados con el tema de la energía, en este capítulo mostramos cómo nos encontramos sumergidos en una crisis multidimensional, cuyos impactos ecológicos, económicos y sociales están haciendo tambalear a la actual sociedad globalizada e industrializada, basada en un consumo desmesurado.

## 11.1 ACELERACIÓN Y ANTROPOCENO

### Indagación previa

Revisa en los distintos medios de información acerca del siguiente tema:

- El colapso de las civilizaciones y sus causas.

### Sugerencias:

Autores como Joseph A. Tainter, Luke Kemp y Jared Diamond han investigado el tema.

- Los conceptos propuestos por William R. Catton del *homo colossus* y de *civilización antifuturo*.
- El concepto de sustentabilidad genuina (*true sustainability*, de Michael Dowd).

Compártelo en tu clase, en un círculo de estudio o círculo reflexivo.

Explica qué piensas de sus argumentaciones y cuáles son sus fuentes.

## La gran aceleración y el Antropoceno

El proceso de industrialización, que empezó hace alrededor de 270 años, fue el detonante de un crecimiento acelerado que se intensificó con el descubrimiento y uso de los combustibles fósiles. No obstante, la verdadera aceleración tuvo lugar a partir de 1950, con un patrón de crecimiento exponencial que exacerbó la sobreexplotación del planeta (ver figura 10, parte 1).

Este periodo ha sido definido por Steffen et al. (2015) como “La Gran Aceleración en la era del Antropoceno”, donde hubo un aumento dramático, continuo y simultáneo de la actividad humana con un impacto sobre la geología de la Tierra y sus ecosistemas. La Gran Aceleración ha provocado una progresiva pérdida de estabilidad del sistema Tierra, lo que ha llevado a algunos autores a considerar que estamos encaminándonos hacia un nuevo colapso (Catton, 2009; Diamond, 2011; Dowd, 2020).

Por un lado, hemos llegado al límite de la extracción de los recursos energéticos y materiales no renovables y, por el otro, hemos superado la capacidad de carga que puede soportar el planeta en procesar los desechos de nuestra actividad (Wessels, 2013). Esto no sólo por el incremento acelerado de la población, sino por el consumo desmesurado de una parte de ésta, lo que ha llevado al rebasamiento de la capacidad de asimilación y reciclaje de residuos de la biósfera (Seibert y Rees, 2021). Los indicadores muestran que, en tan sólo unas décadas, los seres humanos estamos acabando con el capital natural acumulado durante cientos de miles de años por el planeta.

## 11.2 LÍMITES BIOFÍSICOS

### Indagación previa

Revisa en distintos medios de comunicación las noticias sobre estos temas:

- El cambio climático y su componente antropogénica y no antropogénica.
- El Holoceno versus el Antropoceno.
- Las emisiones de GEI en tu país.
- La relación entre el aumento de la población mundial y la extinción de las especies.

Compártelo en tu clase, en un círculo de estudio o círculo reflexivo.

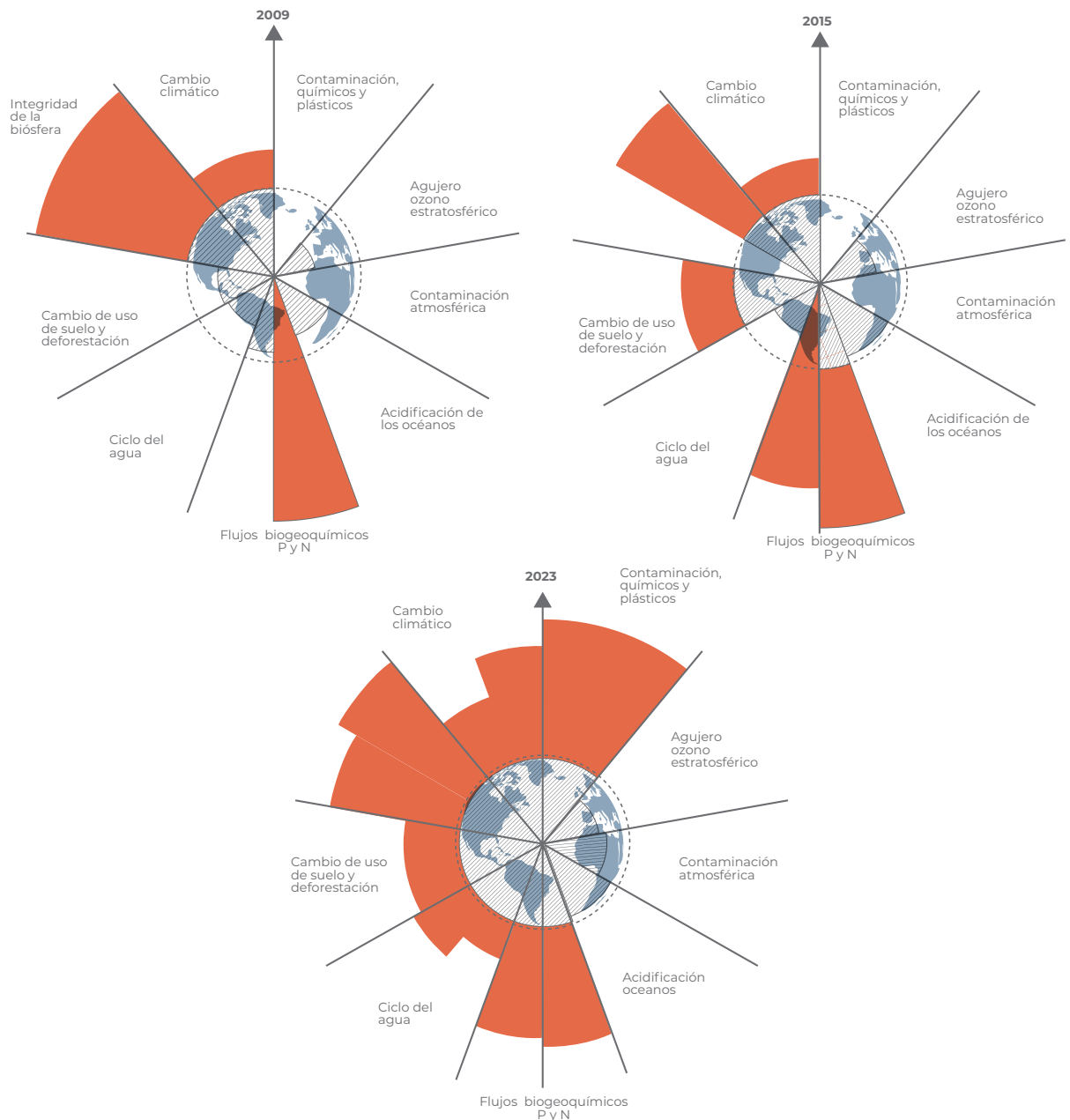
Si encuentra conceptos erróneos explica en qué basan sus argumentaciones y cuáles son sus fuentes.

## Límites planetarios

El crecimiento acelerado de la economía de los últimos dos siglos, que se tradujo en una progresiva demanda de recursos energéticos y materiales, está sumergiendo al planeta Tierra a una presión desmedida. Para cuantificar el riesgo al que nos enfrentamos, en 2009 se propuso el concepto de “límites planetarios” (en inglés: *planetary boundaries*) por un grupo de 28 científicos liderados por Johan Rockström, del Stockholm Resilience Centre (SRC) y Will Steffen, de la Australian National University (Rockström et al., 2009). Los límites planetarios son un marco conceptual que evalúa el estado de nueve procesos fundamentales para la estabilidad del sistema Tierra sugiriendo una serie de umbrales que, en caso de ser superados, pueden poner en peligro la habitabilidad del planeta (figura 19). Estos límites son:

- *El cambio climático*, inducido por las emisiones de GEI como CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O.
- *La integridad de la biósfera*, que se refleja en la pérdida de biodiversidad de plantas y animales como consecuencia de la destrucción de su hábitat, contaminación por pesticidas, fertilizantes y otros químicos industriales, así como la aparición de especies invasivas que transporta el ser humano en sus viajes.
- *El cambio de uso del suelo*, que tiene lugar cuando el suelo es afectado por la deforestación para satisfacer la demanda de la civilización humana.
- *Los cambios en el uso de agua* que conlleva la sobreexplotación de acuíferos subterráneos, ríos y lagos con un creciente estrés hídrico debido al consumo en los procesos agrícolas, de generación de energía, manufactura, construcción y sanidad.
- *La perturbación de los flujos biogeoquímicos* del N y el P, cuyo incremento de concentración provoca impactos dañinos sobre los ecosistemas acuáticos, particularmente los marinos.
- *La acidificación de los océanos* y la consecuente destrucción de la biodiversidad marina, especialmente plancton y corales.
- *La contaminación de partículas* en la atmósfera, los llamados aerosoles, que provocan daños a la salud.
- *El debilitamiento de la capa de ozono*, que reduce la capacidad de la troposfera de protegernos de los rayos ultravioletas de la radiación solar.
- *La contaminación* de todo tipo de químicos en el ambiente, incluidos los micro plásticos.

**FIGURA 19. EVOLUCIÓN DE LAS VARIABLES QUE CONTROLAN LOS LÍMITES PLANETARIOS ENTRE 2009 Y 2023**



**Nota:** el círculo punteado es el límite del “espacio seguro” rebasando el cual se pone en peligro la habitabilidad del planeta.

**Fuente:** Richardson et al. (2023).

En tan sólo 15 años, desde su propuesta inicial en el 2009, hemos pasado de tres a seis límites planetarios transgredidos (figura 9, Richardson et al., 2023): cambio

climático, integridad de la biósfera, deforestación, ciclo del agua, flujos de N y P y contaminación por químicos. Esta tendencia nos muestra que vivimos en un sistema depredador que está llegando a su fin. Ya no podemos confiar en que la naturaleza siempre proveerá sin límite alguno y que tendrá la capacidad de reabsorber los impactos generados. Hemos olvidado que somos parte de una gran red de conexiones, y que la destrucción de los ecosistemas y el cambio climático que estamos provocando está también perjudicando la posibilidad de continuación de nuestra civilización.

## Cambio climático

De todos los límites planetarios, el cambio climático es, por mucho, el que está más presente en los medios de comunicación. La importancia que se le da es justificada por sus consecuencias globales y catastróficas, pero, como vimos, es tan sólo uno de los nueve procesos que pueden perjudicar la habitabilidad del planeta. En este apartado, revisaremos algunos de los aspectos menos presentes en la narrativa oficial sobre el cambio climático.

Se tiende a pensar que el cambio que estamos experimentando es una anomalía con respecto al clima del pasado. Sin embargo, cuando se estudia de manera directa o por medio de proxy, se observa que la temperatura del planeta ha cambiado drásticamente a lo largo de la historia geológica.<sup>1</sup> Se puede decir que el cambio climático es una constante, aunque nunca en la historia geológica ocurrió con la rapidez que estamos experimentando en estos momentos.

Por ejemplo, en el Máximo Térmico de Paleoceno-Eoceno (hace 56 millones de años) la Tierra llegó a una temperatura 14 °C mayor que la actual (McInemey y Wing, 2011) para posteriormente enfriarse paulatinamente hasta alcanzar un mínimo a finales del Pleistoceno (hace 40 000 años). A partir de entonces, la temperatura fue incrementando, hasta el llamado Óptimo Climático del Holoceno, un período cálido que ocurrió aproximadamente entre 9500 y 5500 años a.C., lo que fue un factor determinante para el desarrollo de la civilización humana. Entre las causas naturales que provocan las variaciones de la temperatura en el sistema Tierra se encuentran:

- *Los ciclos solares.* La radiación solar no es constante y cambia de manera cíclica con un periodo de aproximadamente once años que se puede monitorear de manera indirecta por medio del número de manchas solares.

---

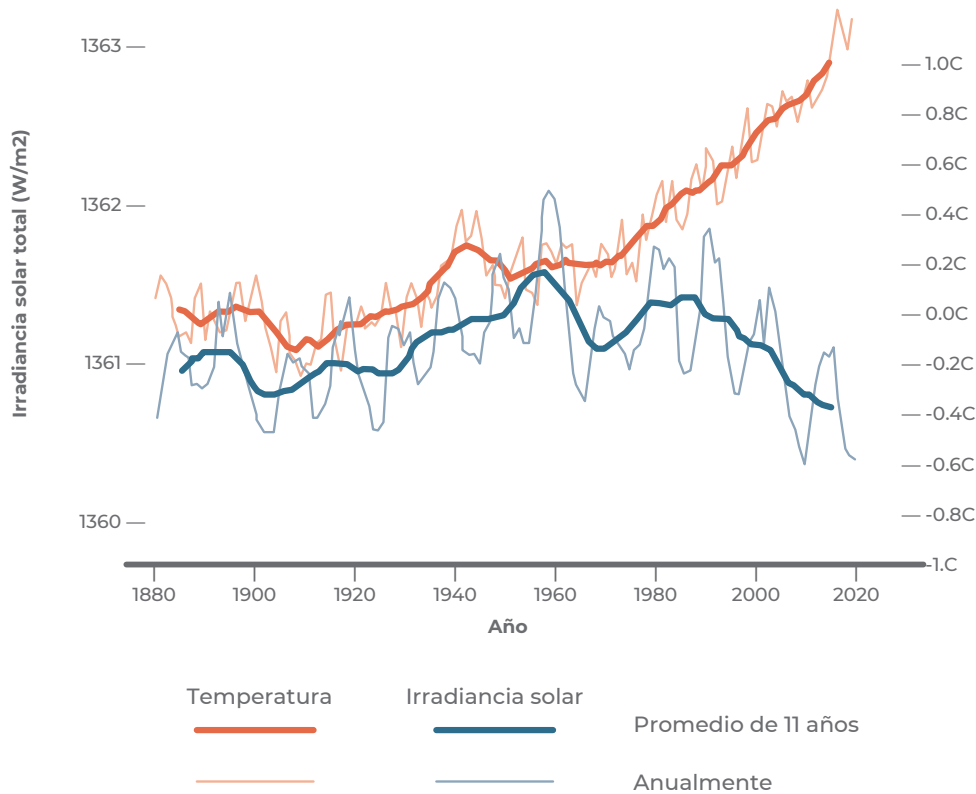
<sup>1</sup> *Temperature of Planet Earth.* [https://en.wikipedia.org/wiki/File:All\\_palaeotemps.png](https://en.wikipedia.org/wiki/File:All_palaeotemps.png)

- *Las variaciones orbitales.* La precesión de los equinoccios (ciclos de 26 000 años), la excentricidad orbital (ciclos de Milankovitch, dos ciclos superpuestos, uno cada 100 000 años y otro cada 412 000) y la inclinación del eje terrestre (ciclos de 41 000 años) hacen que la cantidad media de radiación que recibe cada hemisferio fluctúe a lo largo del tiempo. Estas variaciones provocan las pulsaciones glaciares de largo período.
- *El movimiento de las placas tectónicas.* El cambio de la posición de los continentes y la formación de barreras topográficas, como altas cadenas montañosas, provoca cambios regionales inducidos por la perturbación de las corrientes marinas y la circulación atmosférica.
- *Los impactos de meteoritos.* Estos eventos catastróficos globales pueden provocar la disminución de la temperatura por periodos cortos desde un punto de vista geológico.
- *La actividad volcánica.* La ocurrencia de erupciones explosivas gigantes puede tener un doble efecto; por un lado, un incremento puntual de los GEI y, por otro lado, un mayor albedo por la presencia de partículas en la atmósfera. Sin embargo, el efecto más duradero sobre el clima es producido por la caída de ceniza volcánica en las partes de los océanos más lejana de los continentes, ya que representan un nutriente excelente para las algas y el fitoplancton que, al desarrollarse, absorben el CO<sub>2</sub> de la atmósfera por medio de la fotosíntesis.

Las primeras dos causas tienden a ser cíclicas y algo predecibles, la tercera provoca cambios extremadamente lentos, y las dos últimas son irregulares y, en su mayoría, provocan cambios de corta duración con respecto a los tiempos geológicos. A estas causas naturales se agrega ahora la fuente antropogénica que induce cambios rápidos al incrementar el efecto invernadero. Esto se debe al aumento en la atmósfera de los GEI: el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), el metano (CH<sub>4</sub>) y el óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), que retienen parte de la radiación infrarroja que emite la Tierra tras ser calentada por el Sol (ver figura 44, parte 2).

Este proceso es el que mejor explica el incremento tan rápido de la temperatura con respecto a la era preindustrial, independientemente de las causas naturales. En la figura 20, se muestran los cambios de temperatura de la superficie global del planeta desde 1880 hasta el 2020. Se puede observar que el crecimiento sostenido empieza a partir de los años 70. En la gráfica se muestra también la variación cíclica de la radiación solar. Como se puede observar, desde hace unos 40 años la radiación solar y la temperatura se han desacoplado, por lo que no se puede sostener que el cambio climático se deba a razones orbitales.

**FIGURA 20. CAMBIOS EN LA TEMPERATURA DE LA SUPERFICIE TERRESTRE Y LA ENERGÍA DEL SOL QUE RECIBE LA TIERRA EN VATIOS POR METRO CUADRADO DESDE 1880**



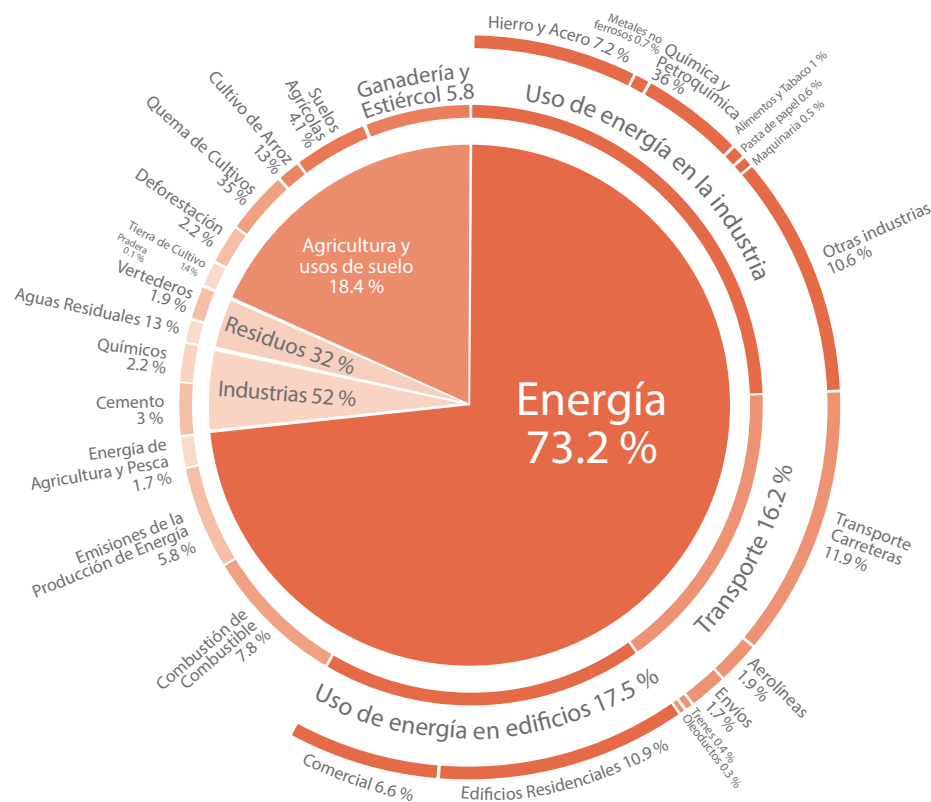
**Fuente:** NASA (2020).

El desfase entre la subida constante de la temperatura desde los años 70 y el inicio del uso masivo de los combustibles fósiles, que ocurrió varias décadas antes, se explica por la enorme capacidad de acumulación de la energía calorífica de los océanos cuya inercia ha pospuesto el calentamiento por unas décadas. La gran mayoría de los científicos del clima coincide en que el calentamiento tiene causas antropogénicas, no obstante, a pesar de que estamos experimentando fenómenos atmosféricos extremos cada vez con mayor frecuencia, hay sectores de la sociedad y algunos científicos que niegan el rol dominante de las actividades humanas en el cambio climático. Hay una gran cantidad de evidencias científicas que desmiente los argumentos más recurrentes en contra del cambio climático antropogénico, misma que es resumida en el artículo “Manual para el negacionismo climático en la época axial” (Bordera et al., 2023).

Entre las emisiones GEI, el CO<sub>2</sub> es el responsable de un 77% del total, el CH<sub>4</sub> del 10%, el N<sub>2</sub>O de un 7%, y el remanente es atribuido a gases fluorados. El CH<sub>4</sub> y el N<sub>2</sub>O tienen mucho mayor poder que el CO<sub>2</sub> (25 y 300 veces más, respectivamente), pero tienen un tiempo de residencia mucho menor en la atmósfera. Se

tiende a pensar que la causa principal de las emisiones de GEI es el uso de los combustibles fósiles en el transporte; sin embargo, el balance global de las emisiones (figura 21) muestra un panorama diferente.

**FIGURA 21. EMISIONES GLOBALES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO POR SECTOR**

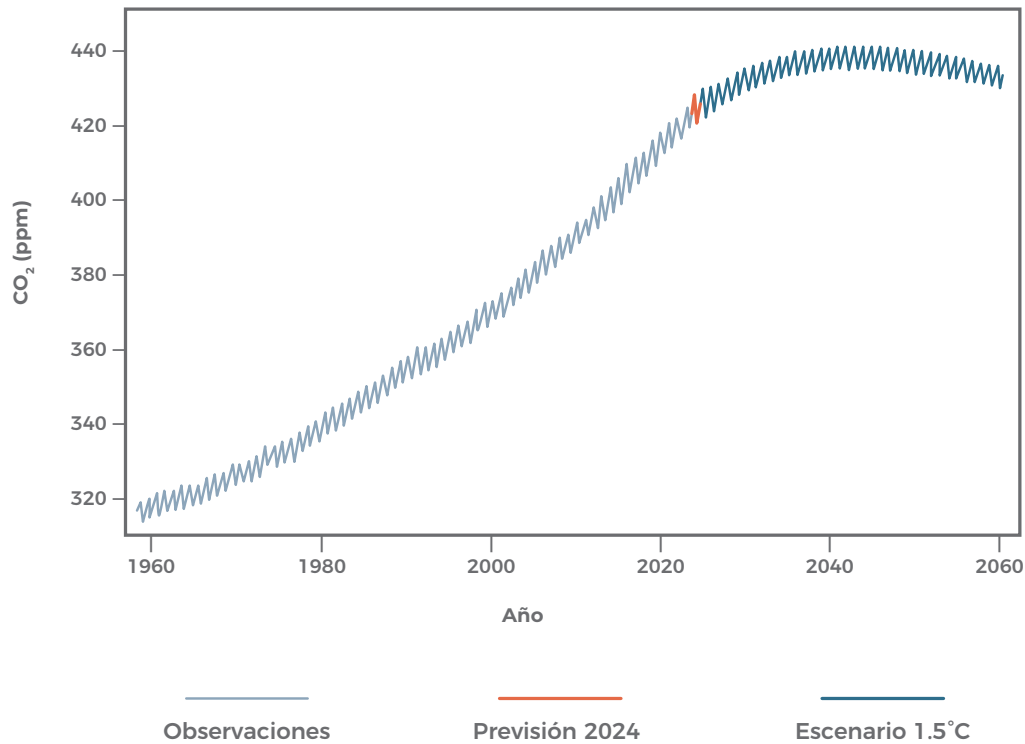


**Fuente:** Our World in Data (2020).

Como se puede observar, si bien el 73.2% de las emisiones procede del sector energético, donde los combustibles fósiles son, por mucho, las fuentes dominantes, en este rubro el transporte ocupa el tercer lugar con un 16.2%, detrás de la industria (24.2 %) y el uso de energía en edificios (17.5%). En particular, las emisiones asociadas al transporte por carretera son del 11.9% y las asociadas a los coches un 7%. También es notable que el segundo sector que más emite, después de la industria, es la agricultura y el uso de suelo (18.4%), y particularmente la ganadería (5.8%). Con base en lo que vimos en el apartado sobre la electrificación del transporte, queda claro que podríamos hacer mucho más para mitigar las emisiones de GEI si dejamos de comer carne que comprando un coche eléctrico, por ejemplo.

A pesar de largas discusiones y acuerdos en las Conferencias de las Partes (COPs) desde hace más de tres décadas, la medición directa de la concentración de CO<sub>2</sub> del observatorio Mauna Loa de Hawaii (figura 22) muestra un crecimiento constante, casi lineal (dentro de las variaciones estacionales).

**FIGURA 22. CONCENTRACIÓN DE CO<sub>2</sub> EN LA ATMÓSFERA DESDE 1960**



**Nota:** medidas en el observatorio de Mauna Loa, Hawaii, y previsiones del escenario 1.5°C del IPCC.

**Fuente:** Bets et al. (2024).

Incluso en el escenario de mitigación para permanecer en un máximo de 1.5 °C por encima de los valores preindustriales, propuesto por el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC), la concentración en el 2060 sería todavía más alta que la estimada para el 2024. Como se puede apreciar, el cambio climático es un fenómeno complejo que no se puede analizar de manera simplista asumiendo un modelo lineal. Por otro lado, la inercia del clima es tal, que los efectos que podrían obtenerse de una disminución, aunque rápida, de las emisiones, se observarían muchas décadas después, posiblemente hasta final de este siglo por la tan consabida inercia de la Tierra.

Esto no significa que podemos evitar atender a las causas del cambio climático; más bien, como hemos visto en este capítulo, el cambio climático es sólo una componente del rebasamiento de los límites planetarios que tenemos que atender de una forma integral si queremos heredar un planeta habitable a las generaciones futuras.

## 11.3 CRECIMIENTO ECONÓMICO Y LÍMITES PLANETARIOS

### Indagación previa

¿Qué opinas acerca de...?

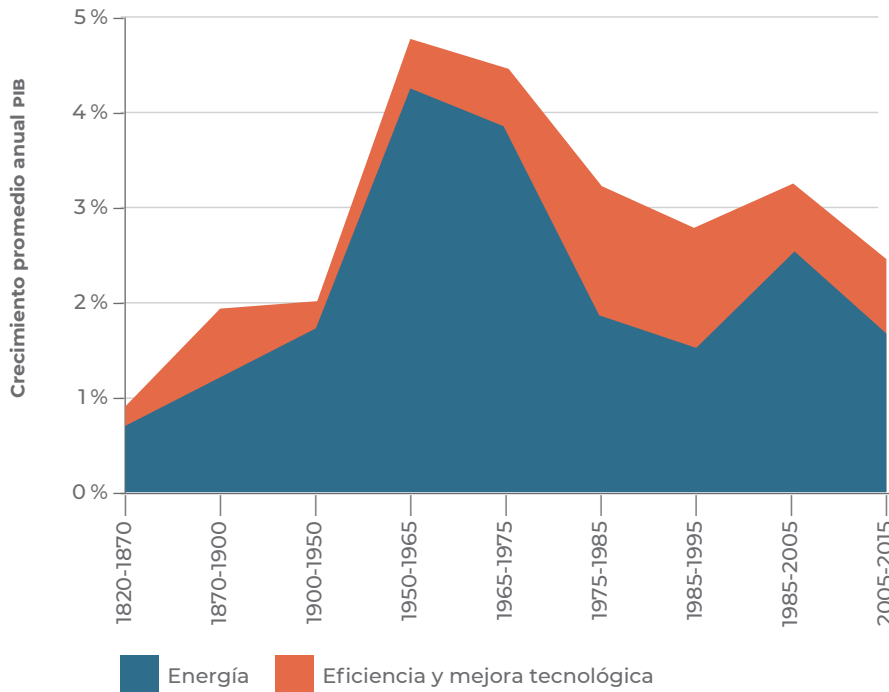
- El crecimiento económico en una sociedad sin energía fósil.
- La posibilidad de una transición verde y de un mundo alimentado 100 % por fuentes renovables.
- El sobrepaso ecológico en una sociedad basada en fuentes renovables.

Compártelo en tu clase, en un círculo de estudio o círculo reflexivo. Explica las conclusiones a las que llegaste y cuáles son tus fuentes.

### Pico de la energía y fin del crecimiento económico

Como lo vimos en la primera parte de libro, existe una correlación directa entre el consumo de la energía y el crecimiento económico (ver figura 7, parte 1). Si se revisa la evolución del Producto Interno Bruto (PIB) mundial en el periodo comprendido entre 1820 y 2015 (figura 23) se descubre que, al principio de la Revolución industrial, entre 1820 y hasta 1870, el crecimiento de la economía mundial fue lento (< 1% anual); luego, entre 1870 y 1950, la tasa de crecimiento se duplicó, pero entre 1950 y 1975 ocurrió un aumento sin precedente. En este periodo la tasa de crecimiento llegó casi al 5% anual, máximo que no se ha vuelto a alcanzar nunca más.

**FIGURA 23. EVOLUCIÓN DEL CRECIMIENTO DEL PIB GLOBAL Y ROL RELATIVO DE LA EFICIENCIA/MEJORA TECNOLÓGICA VERSUS EL CONSUMO DE ENERGÍA**



**Fuente:** Tverberg (2015).

La figura muestra también el rol relativo del consumo de energía y de las mejoras tecnológicas y de eficiencia en el crecimiento del PIB. Como podemos observar, el periodo de aumento acelerado de la economía mundial en la década de los 50 y los 60 fue posible, principalmente, por un incremento del consumo de energía. Si revisamos el precio del petróleo (figura 6), así como la producción global en este periodo (ver figura 14, parte 1), podemos ver que el crecimiento se dio gracias a una energía abundante y barata. Esto se vio opacado a partir de las crisis petroleras de los años 70 (ver capítulo 1, parte 3), cuando el barril de petróleo incrementó su costo notablemente, lo que trajo consigo una serie de recesiones económicas.

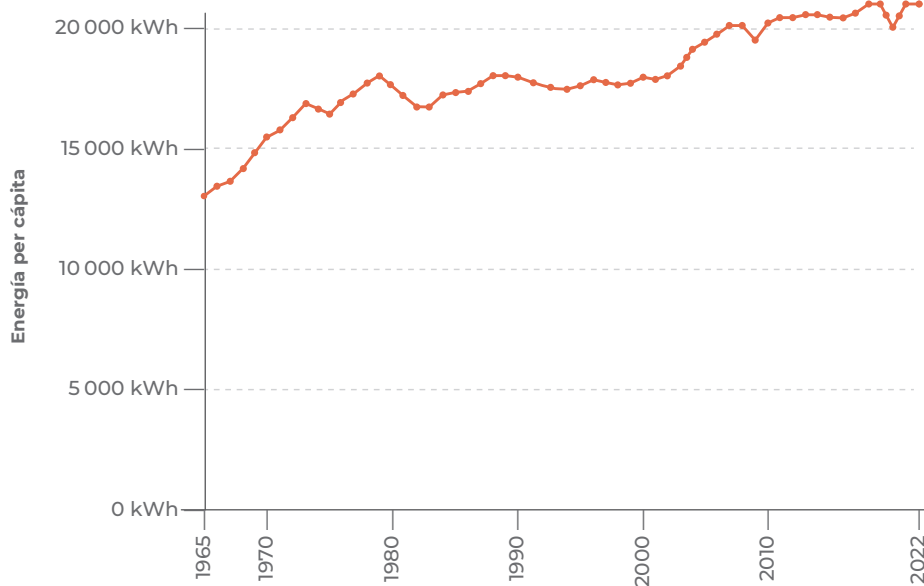
Como hemos visto en el capítulo 3 de la parte 1, la producción de petróleo convencional llegó a su máximo en el 2005, y la producción total de petróleo, incluido el no convencional, llegó a un máximo a finales del 2018, lo que podría establecerse como el pico global (Ferrari, 2020). Los únicos países que en el 2023 se consideraba que tenían capacidad inutilizada de producción de petróleo convencional –esto es, cantidad adicional de petróleo potencialmente extraíble en un lapso de tres meses– eran Arabia Saudita y Rusia. Sin embargo, ambos están produciendo por debajo de la cuota

acordada, lo cual sugiere que hay dificultades crecientes para incrementar la disponibilidad de petróleo.

En cuanto al petróleo no convencional de los Estados Unidos, la productividad por pozo del último gran *play* (la cuenca Permian) está bajando desde el 2022 (Berman, 2024), lo que indica que estamos alcanzando el máximo de la producción. Si bien la Agencia de Información Energética de los Estados Unidos prevé que la producción pueda estar en una meseta hasta el 2040, los sitios más productivos ya se están agotando, y sabemos que la producción de un pozo de petróleo de lutitas desciende un 80% en tres años.

A todo lo anterior se le debe añadir el efecto de la tasa de retorno energético (EROI) decreciente (ver primera parte), que nos indica que cada vez cuesta más energía producir el mismo volumen de petróleo y, por ende, un costo económico mayor. Por lo tanto, aun cuando en el futuro inmediato pueda haber un ligero incremento en término de volumen, una vez descontada la energía necesaria para producir el petróleo ya habríamos pasado el pico de la energía neta asociada con el petróleo (Delannoy et al., 2021). Si consideramos toda la energía que se consume y la dividimos entre la población mundial –es decir, la energía per cápita–, podemos observar que ha llegado también a un máximo desde final de la década pasada (figura 24).

**FIGURA 24. ENERGÍA PER CÁPITA A NIVEL MUNDIAL DE 1965 A 2022**



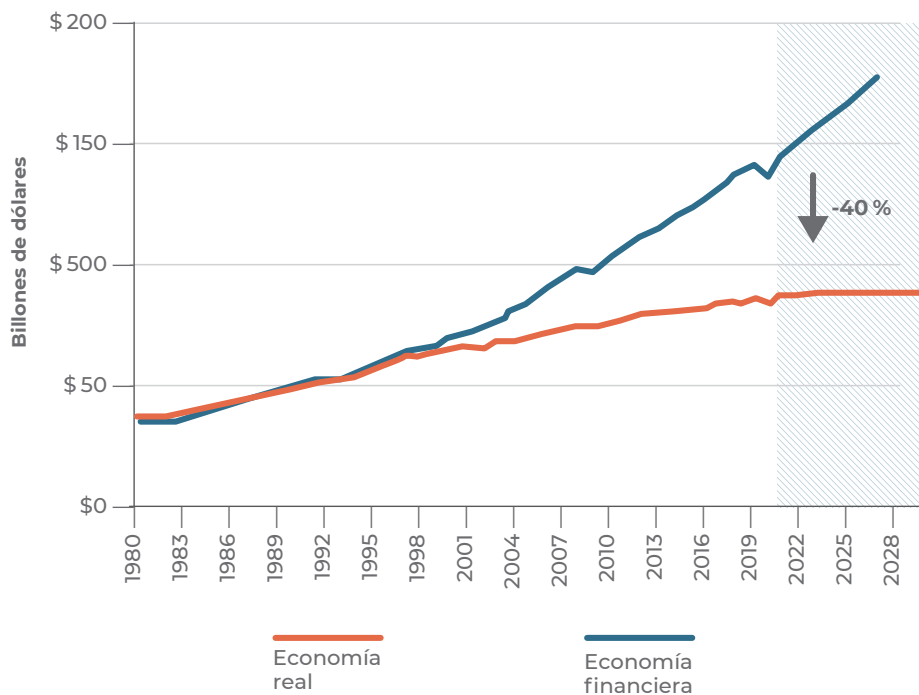
**Fuente:** adaptado del sitio Our World in Data.<sup>2</sup>

<sup>2</sup> Our World in Data. [https://ourworldindata.org/grapher/per-capita-energy-use?tab=-chart&time=earliest..2022&country=~OWID\\_WRL](https://ourworldindata.org/grapher/per-capita-energy-use?tab=-chart&time=earliest..2022&country=~OWID_WRL)

## La financiarización de la economía

Dada la relación directa entre crecimiento económico y consumo de energía (ver figura 7, parte 1) un estancamiento y disminución de la energía neta se traduce en un límite al crecimiento económico. En esta situación, una vez que el petróleo barato y abundante empezó a escasear, las élites económico-financieras mundiales empezaron a invertir, preferentemente, en los activos financieros en lugar de en la producción de bienes tangibles, ya que los primeros dan mejores ganancias para sus inversiones. Este proceso, que se define como financiarización de la economía, comenzó a finales del siglo xx, cuando se empezó a observar un desacoplamiento entre economía real y sector financiero, el cual crece mucho más rápido (figura 25). Como se observa, para el 2022 el valor de los activos financieros ya eran 40 % mayor que el valor de la economía real.

**FIGURA 25. CRECIMIENTO DEL VALOR DE LA ECONOMÍA REAL Y DE LOS ACTIVOS FINANCIEROS EN DÓLARES DE 2022**



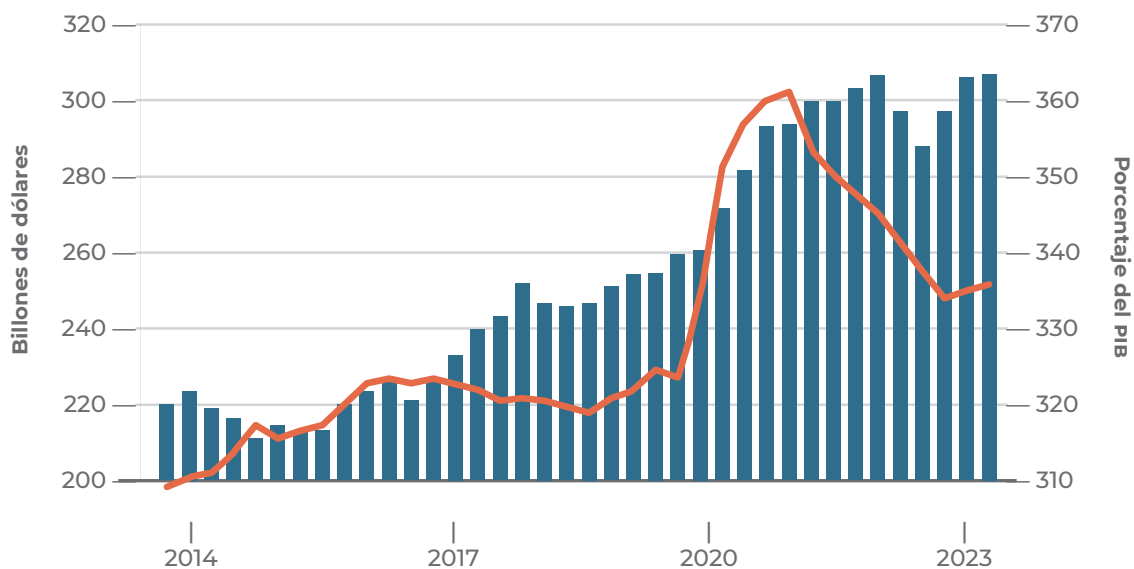
Fuente: Morgan (2022).

El crecimiento del sector financiero se aceleró con la crisis del 2008 a raíz de la cual los bancos centrales empezaron a inyectar dinero “creado de la nada”, es decir, no vinculado a bienes tangibles, con la justificación de “reactivar la economía”. Este proceso, llamado “facilitación cuantitativa” (*quantitative easing*), en la práctica

provocó una sobrevaluación de los activos financieros y una especulación bursátil, donde la minoría de los que tienen acceso a las ganancias del sistema financiero se han ido enriqueciendo, mientras que el grueso de la población se queda atrás, hasta el punto en que, para el 2021, el 1.1% de la población mundial detenta el 45.8% de la riqueza mundial (Deshmukh, 2021).

Asimismo, este proceso ha llevado al incremento de la deuda global. Como se puede observar en la gráfica de la figura 26, ésta incluye pasivos de los gobiernos, del sector privado y hogares y ha crecido notablemente en los últimos diez años. Para 2023 la deuda corresponde a 307 billones de dólares, lo que equivale al 335% del PIB mundial. En otras palabras, la deuda corresponde a tres veces y media el valor de todas las transacciones económicas del mundo en un año.

**FIGURA 26. CRECIMIENTO DE LA DEUDA GLOBAL EN DÓLARES (BARRAS EN AZUL) Y COMO PORCENTAJE DEL PIB (LÍNEA NARANJA)**



**Fuente:** elaboración propia con datos del Institute of International Finance.<sup>3</sup>

En la tabla 8 se muestran los doce países con mayor deuda soberana (deuda de cada Estado nación) en términos absolutos y como porcentaje del PIB.

<sup>3</sup> Institute of International Finance. <https://www.iif.com/>

**TABLA 8. PAÍSES CON MAYOR DEUDA SOBERANA**

PAÍS	DEUDA SOBERANA (DÓLARES)	% DEL TOTAL MUNDIAL	RELACIÓN DEUDA/PIB
Estados Unidos	\$33 228.90	34.20%	123.30%
China	\$14 691.70	15.10%	83.00%
Japón	\$10 797.20	11.10%	255.20%
Reino Unido	\$3 468.70	3.60%	104.10%
Francia	\$3 353.90	3.50%	110.00%
Italia	\$3 141.40	3.20%	143.70%
India	\$3 056.70	3.10%	81.90%
Alemania	\$2 919.30	3.00%	65.90%
Canadá	\$2 253.30	2.30%	106.40%
Brasil	\$1 873.70	1.90%	88.10%
España	\$1 697.50	1.70%	107.30%
México	\$954.60	1.00%	52.70%

**Fuente:** Conte (2023).

Como se observa, los países con mayor exposición, los que tienen una deuda superior al 100% de su PIB anual, son los Estados Unidos, algunos de sus aliados europeos y Japón.

### Fin del crecimiento en un mundo multipolar

Llegados a este punto, surge la pregunta de por qué este endeudamiento descomunal no ha llevado a una hiperinflación. Esto se explica por el hecho que estos países usan las monedas que dominan en las transacciones a nivel mundial, que son también las divisas en la que los bancos centrales tienen sus reservas: dólares estadounidenses (59% del total), euro (21%), yen (6%) y libra esterlina (5%). Debido al privilegio de ser el medio de intercambio internacional, siempre existe demanda de estas monedas a pesar de la gran cantidad en circulación, lo que permite que estos países no deban pagar altas tasas de interés para el financiamiento de su deuda.

Sin embargo, como vimos en el capítulo 1, esta situación está empezando a cambiar a raíz de la alianza creciente de los países del grupo BRICS alargado (BRICS+), quienes están estableciendo acuerdos para comerciar directamente entre sus monedas sin pasar por el dólar o el euro. Los países del grupo del grupo BRICS+, además, cuentan con la mayoría de los recursos energéticos y materiales que quedan en el planeta por lo que están en una condición más favorable para continuar, por lo menos temporalmente, con cierto crecimiento económico.

La conclusión es que, si bien existen límites biofísicos planetarios que están marcando el fin del crecimiento a nivel mundial, la situación en el corto y mediano plazo puede evolucionar de manera distinta en las diferentes regiones y bloques geopolíticos en que se está dividiendo el mundo en el marco de una tendencia hacia la desglobalización.

## 11.4 CRÍTICAS A LA NARRATIVA OFICIAL

### Argumentación 1. Las falsas soluciones tecnológicas al cambio climático

Una de las soluciones tecnológicas propuesta para mitigar los efectos del cambio climático es la captura directa del CO<sub>2</sub> y su inyección en el subsuelo. Estudios recientes (Sekera y Lichtenberger, 2020) demuestran que se trata de soluciones inviables puesto que para poder compensar las emisiones globales de CO<sub>2</sub> en la atmósfera (36 Gton/a), se necesitarían:

- Más de 30 000 plantas a gran escala, más de tres por cada central eléctrica de carbón que opera en el mundo en la actualidad. La construcción de cada planta costaría hasta 500 millones de dólares para un total de 15 billones de dólares.
- Para almacenar 10 Gton de CO<sub>2</sub> al año se necesitarían 4 millones de ton de hidróxido de potasio, 1.5 veces más que el suministro mundial y 100 EJ para funcionar, un 17% de toda la energía global para elevar la temperatura del calcinador a alrededor de 1500°F (800°C), por lo que cada planta necesitaría un horno de gas y un suministro dedicado para este fin porque no sería posible hacerlo con electricidad (Swain, 2021).
- Como Vaclav Smil, uno de los mayores expertos en temas de energía, ya preveía en 2005:

“Secuestrar tan sólo una décima parte de las emisiones globales actuales de CO<sub>2</sub> (menos de 3 Gt de CO<sub>2</sub>) requeriría la creación de una industria que tendría que forzar cada año bajo tierra un volumen de gas comprimido mayor o igual al volumen de petróleo crudo extraído globalmente por la industria petrolera, cuyas infraestructuras y capacidades se han establecido durante un siglo de desarrollo. No hace falta decir que semejante hazaña técnica no podría lograrse en una sola generación.”

Además de que no resultan viables, se desconocen los efectos secundarios que estas tecnologías provocarán en la dinámica terrestre. Pero el impacto está garantizado, ya que todo está interconectado.

## Argumentación 2. La falacia de la transición verde basada en un cambio tecnológico

La narrativa dominante sobre la transición energética nos dice que es necesario dejar de usar los combustibles fósiles por sus efectos dañinos sobre el clima, y que esto se puede hacer sustituyendo petróleo, gas y carbón con fuentes renovables. Este discurso, impulsado hasta por empresas que antes hacían negocios con el petróleo, es aparentemente seductor: con un cambio tecnológico podemos dejar fuentes no renovables, que se van agotando y son contaminantes, por fuentes infinitas y limpias. En realidad, como se ha venido demostrando a lo largo del libro, el tema de dejar a un lado los combustibles fósiles no es tarea sencilla, y esta afirmación se torna muy poco realista una vez que se empiezan a cuantificar las implicaciones y los retos físicos y tecnológicos.

La narrativa de la transición energética de corte tecnológico promueve entonces el llamado “crecimiento verde”, que supone que es posible que la economía siga creciendo desacoplada del uso de recursos materiales y de las emisiones de GEI. En realidad, dejar en el subsuelo los combustibles fósiles para alimentar el sistema con generación eólica y solar implica pasar de la extracción de petróleo y gas a la extracción acelerada de otras materias primas no renovables para esta nueva industria *renovable*. Porque *renovable* es la fuente de origen, mas no su infraestructura, a la que quizás sería más correcto llamar, como algunos autores han sugerido, “reconstruible”.

Esta transición, además, está ocurriendo en un momento en el que, como con los hidrocarburos, la industria minera está llegando al pico de la producción de muchos minerales críticos. El costo de la minería está aumentando desde hace más de una década, ya que a medida que se explotan los yacimientos de mayor calidad, disminuye la ley mineral, es decir, la cantidad de mineral contenida en un cierto volumen de roca. Esto hace más cara la operación de la maquinaria de excavación, la flota de camiones de carga y las plantas de beneficio, ya que hay que remover, transportar y procesar mucho más volumen de roca por unidad de metal. Esto resulta en un aumento en el consumo de energía, que procede, de nuevo, de derivados del petróleo (diésel) y del gas, pero también de agua, elemento indispensable que entra en todos estos procesos.

Además de la demanda de minerales y la dependencia de energía fósil se debe de tener en cuenta que estos dispositivos tienen un tiempo de vida que va de los siete u ocho años para las baterías, a 20 y 25 años para aerogeneradores y paneles solares,

lo que implicará por un lado la disposición de desechos y, eventualmente, reciclaje; mientras que, por el otro lado, se deben construir nuevos, con su correspondiente demanda energética y material de la primera generación.

En su libro *Los límites materiales de la transición energética*, Valero y colaboradores (2021) muestran claramente los límites de la extracción de recursos minerales y resumen así el problema a que se enfrenta la transición energética tecnológica:

“El sol renueva la energía de nuestro planeta todos los días, pero no repara la degradación y dispersión de los materiales terrestres. Esa dispersión ahora ha sido exponencialmente acelerada por la acción humana, por lo que la Tierra tiende ahora rápidamente a convertirse en un planeta degradado, al que llamamos Thanatia, una fatalidad que implicaría el colapso de nuestra civilización.

Los economistas de mercado olvidaron este simple mensaje de la física: cada beneficio económico tiene un costo natural asociado que se ignora sistemáticamente. Hemos hecho de la codicia una virtud, simplificando y fragmentando la naturaleza como fuente de recursos que se pueden cambiar por dinero. El valor del planeta para la humanidad se está depreciando, pero su amortización se ignora en las cuentas de nuestros economistas.”

### Argumentación 3. Los límites de la economía circular

Uno de los conceptos más invocados para desacoplar el consumo de energía y materiales de las emisiones de GEI y otros desechos, es el de *Economía circular*, una idea avanzada desde varias décadas que postula la obtención de energía de los desechos y el reciclaje de todos los materiales. Es incluso una respuesta que se suele dar para defender el desarrollo masivo de la infraestructura de aprovechamiento de las fuentes renovables y la demanda de minerales asociada. La idea ha sido adoptada por muchos políticos porque sugiere que se puede hacer negocios “verdes” y seguir con el crecimiento económico, pero la ciencia nos dice que esto no es posible.

Las limitaciones de la economía circular son expuestas de manera exhaustiva en una colección reciente de artículos científicos reunidos bajo el título *The Impossibilities of the Circular Economy: Separating Aspirations from Reality* (Lehmann et al., 2023). En síntesis, los principales argumentos son:

- Se necesita mucha energía y materiales para reciclar. Los metales son usados principalmente en formas de mezclas y aleaciones que son muy

- difícil separar como materias primas nuevamente utilizables. Es cuanto a las fibras y polímeros es imposible reciclarla con una calidad constante.
- La miniaturización de los productos, resultado del marketing y el consumismo, hace muy difícil y caro el reciclaje, por esto se hace muy poco. En el caso de las baterías, por ejemplo, la tasa de reciclaje es inferior al 5%.
  - El uso de energía genera siempre emisiones. Aunque en futuro se espera que la energía del reciclaje venga principalmente de fuentes renovables, como hemos visto, se necesita una cantidad de minerales enorme sólo para construir la primera generación de renovables.
  - Finalmente, una economía basada en el máximo reciclaje supone una colaboración virtuosa entre instituciones y empresas, lo que normalmente no ocurre en un libre mercado. Tendría que ser implementada por un Estado que ejerce un firme control sobre las empresas y los particulares.

De manera general, la termodinámica nos dice que no es posible reciclar al 100%, ya que en cada ciclo se pierde algo. El reciclaje entonces sólo puede funcionar en un sistema orientado al decrecimiento, donde en cada ciclo se consume menos. Para ello deberíamos cambiar radicalmente el sistema productivo, prohibir la obsolescencia programada y diseñar productos que puedan durar lo más posible, poderse reparar y, finalmente, reciclar por lo menos en parte.

#### **Argumentación 4. ¿Qué hay de aquello que no se puede sustituir con fuentes renovables?**

En el tema de la transición a fuentes renovables hay una serie de procesos en los cuales, en la actualidad, no hay opción de sustitución de combustibles fósiles. Un tema común a toda la industria manufacturera son los procesos que requieren calor, que se pueden agrupar de acuerdo con su temperatura (Agencia de Protección ambiental de EE. UU., 2021):

- $T < 100^\circ\text{C}$  es del 30%.
- $T$  en el rango  $(100 - 400)^\circ\text{C}$  es del 27%.
- $T > 400^\circ\text{C}$  es del 43%.

Para temperaturas hasta  $350^\circ\text{C}$  es posible usar biomasa y radiación solar concentrada, aunque esto requiere cierta adaptación y, de todas formas, sólo resuelve la mitad de las aplicaciones. Lo más complejo es el caso del acero y el concreto (básicos para los aerogeneradores), donde la  $T$  oscila entre los  $980^\circ\text{C}$  y los  $1700^\circ\text{C}$ .

El acero puede reciclarse de la chatarra por medio de horno de arco eléctricos, pero éstos no pueden servir para la producción inicial a partir de mineral de hierro, ya que implica una reacción química en un alto horno en presencia de carbono que proporciona el carbón mineral. Una posibilidad sería sustituir el carbón mineral por el vegetal, procedente de la biomasa leñosa, sin embargo, ésta presenta dos problemas (Seibert y Rees, 2021):

- Las reservas remanentes no son suficientes para las demandas requeridas.
- Se necesita rediseñar los altos hornos para que puedan funcionar para este carbón con menor capacidad térmica.

Una opción para la producción de concreto es usar biometano, pero aquí el problema es su depuración, la cual implica disolventes tóxicos muy costosos y complicados de manejar y cuya producción requiere, una vez más, de combustibles fósiles (Seibert y Rees, 2021).

En el caso de los paneles solares la producción de sílice ultrapura necesita una reacción carbotérmica de un silicato como el cuarzo ( $\text{SiO}_2$ ) para separar la sílice del oxígeno. Para que esto ocurra se necesita calentarlo a alta temperatura (entre  $1480^\circ\text{C}$  y  $2200^\circ\text{C}$ ) en presencia de carbono a formar  $\text{CO}_2$ , algo que, nuevamente, se hace con coque de carbón o petróleo, carbón vegetal y fragmentos de leña (Troszak, 2021). Para producir 110 000 toneladas/año (t/a) de silicio de grado metalúrgico (ultrapuro) se necesitan 310 000 t/a de cuarzo, 195 000 t/a de coque de carbón y 185 000 t/a de fragmentos de leña.

En lo relativo a la maquinaria pesada de la minería—camiones, excavadoras, tractores con una demanda energética del 3% (REN21, 2022)—la única alternativa es el hidrógeno—. Sin embargo, como hemos visto, la producción de hidrogeno verde tiene altos costos, hay serios problemas para transportarlo y almacenarlo, y la eficiencia para vehículos con celdas de hidrógeno es muy baja.

### Argumentación 5. “Sostenible” versus realmente necesario

A esta altura queda claro que lo que se suele definir como “sostenible” no necesariamente lo es, y que más bien deberíamos contraponerlo a aquello que es verdaderamente necesario. Un ejemplo claro es la idea de sustituir el plástico con bioplásticos, que pudiera lucir como una propuesta sostenible, pero en esencia no lo es, ya que se tiene que recurrir nuevamente a materiales, aunque producidos por la naturaleza. Aquí se podrían aplicar, adaptándolas, las preguntas de Sócrates:

1. ¿Es verdaderamente necesario el uso del plástico o bioplástico?
2. ¿Es un producto que aporta algún valor a lo que contiene?
3. ¿Es un producto que nos va a otorgar algún beneficio?

La conclusión es que, si bien existen algunas soluciones técnicas, éstas pueden funcionar a una escala muy menor que en la actual. Si queremos desarrollarlas para que puedan producir el mismo resultado que en la actualidad las necesidades energéticas y materiales se vuelven imposibles (Michaux S. P., 2023).

Por lo tanto, un futuro libre de combustibles fósiles implica un uso mucho más parsimonioso de los recursos, los cuales deben dirigirse hacia las necesidades más básicas para el bienestar de la población. Hay cosas que son genuinamente necesarias, como bien explica la pirámide de Maslow, como la alimentación, la salud, la educación, la seguridad, pero que hay otras que no lo son. Es tiempo de replantear el paradigma del crecimiento perpetuo que surgió a raíz del acceso a la herencia geológica de los combustibles fósiles con su alta densidad energética. La contrapropuesta, por ende, debe de estar centrada en un decrecimiento de consumos que, además, implique una menor devastación del planeta.

### **Reflexión final: progreso insano versus progreso sano**

Hay un problema básico con nuestra definición del concepto de “progreso” que se centra en el bienestar de las élites y una parte minoritaria de la población en lugar de considerar no sólo a toda la población sino también las demás especies presentes en la Tierra (Dowd, 2020).

Frecuentemente se afirma que “nunca habíamos estado mejor” por el enorme desarrollo tecnológico y económico que experimenta una parte de la población, pero se tiende a olvidar que este progreso también está provocando el colapso de todo aquello que verdaderamente necesitamos para vivir.

Esta narrativa de progreso se ha centrado en la idea del “ser humano como conquistador de la naturaleza”, una dualidad que tiene como consecuencia la exaltación del sentimiento egocentrista. Sin embargo, el progreso debería de estar centrado en una coherencia social y una integridad ecológica.

La energía del pasado, concentrada en los combustibles fósiles, le dio al ser humano un poder temporal que le ha permitido imaginarse como un dios por encima de la naturaleza, cuando realmente es parte de ella. De continuar con este pensamiento antropocentrista occidental el colapso está garantizado. En cambio, se necesita una actitud más humilde que nos haga regresar a vivir dentro de los límites biofísicos de este pequeño planeta azul que nos ha dado la vida.

## 11.5 REFLEXIÓN FINAL: PRINCIPIOS A TENER EN CUENTA EN LO VENIDERO

En un artículo titulado “Modernity is incompatible with planetary limits: Developing a PLAN for the future”, Thomas Murphy y colaboradores (2021) plantean una Red Académica de Límites Planetarios (PLAN por su sigla en inglés) que reúne a quienes “aprecian la naturaleza compleja de los límites planetarios y están abiertos a colaborar en investigaciones viables que aborden la situación existencial que enfrenta nuestra civilización”. Los principios que proponen para esto son:

1. Los seres humanos formamos parte de la naturaleza y no somos algo aparte. Este concepto es propio de la cosmovisión de la mayoría de los pueblos de Abya Yala.
2. No es posible consumir materiales no renovables de manera indefinida en un planeta finito.
3. La capacidad de los ecosistemas de la Madre Tierra para asimilar la contaminación sin consecuencias es finita.
4. La energía es fundamental para todas las actividades humanas, incluida la economía.
5. La tecnología es una herramienta para generar energía y no para crearla.
6. La quema de combustibles fósiles es la causa principal del actual cambio climático.
7. El crecimiento exponencial, ya sea físico o económico, debe cesar.
8. Las decisiones de la actualidad pueden crear problemas a las generaciones futuras e incluso privarlas de recursos básicos y necesarios.
9. El comportamiento humano está consciente e inconscientemente moldeado por modelos mentales culturales que, aunque mutables, imponen barreras al cambio.
10. El éxito aparente, por unas pocas generaciones durante una reducción masiva de recursos finitos, no garantiza las posibilidades de éxito a largo plazo.





# 12. Desigualdades inter- e intranacionales en el uso de la energía y en las emisiones

---

## 12.1 INDAGACIÓN PREVIA

### Investiga lo siguiente

1. En qué lugar está tu país en relación con:
  - Su consumo de energía nacional y per cápita.
  - Sus emisiones de GEI nacionales y per cápita.
  - La huella ecológica nacional y per cápita.
  - La desigualdad socioeconómica (índice GINI) entre los países de la OECD.
2. Identifica conflictos que se estén dando en tu país por cuestiones relacionadas con la invasión de territorios para la explotación de recursos energéticos y materiales.

Compártelo en tu clase, en un círculo de estudio o círculo reflexivo.

Explica de qué manera los promedios no muestran con claridad las desigualdades internas y externas del país.

## 12.2 DESIGUALDAD EN EL USO DE LA ENERGÍA LAS EMISIONES

Un tema que no podemos dejar a un lado cuando hablamos de cambios sistémicos es el de la desigualdad. El uso de energía y materias primas a lo largo de la historia reciente ha sido extremadamente desigual, tanto entre países como al interior de

cada país. Esto evidentemente tiene su reflejo en las emisiones de GEI, donde no todos los países tienen la misma responsabilidad.

Históricamente, a partir de 1750, el Reino Unido y los Estados Unidos han emitido mucho más que todo el resto del mundo e incluso en la actualidad los EE. UU. y Europa son responsables de más de la mitad de las emisiones globales (Richie et al., 2023). A eso hay que agregar que las emisiones de algunos países exportadores (China, India entre otros) se deben a la producción de bienes que luego son consumidos en otros países, por lo que deberían descontarse de las emisiones territoriales.

En el *ranking* de los países con las mayores emisiones totales México queda en 14° lugar, y sus emisiones per cápita representan tan sólo el 26% de las de los Estados Unidos. Sin embargo, los promedios pueden ser engañosos, ya que la desigualdad está presente en cada país. Si consideramos la distribución del ingreso a nivel global, el 10% de la población más rica del planeta es responsable de casi el 50% de las emisiones, mientras que el 50% más pobre apenas emite el 10% (ver figura 11, parte 1). Incluso, Cozzi et al. (2023) estiman que el 1% más rico del planeta emite 2000 veces más que el 1% más pobre, principalmente por el consumo energético derivado de los automóviles privados y el transporte aéreo.

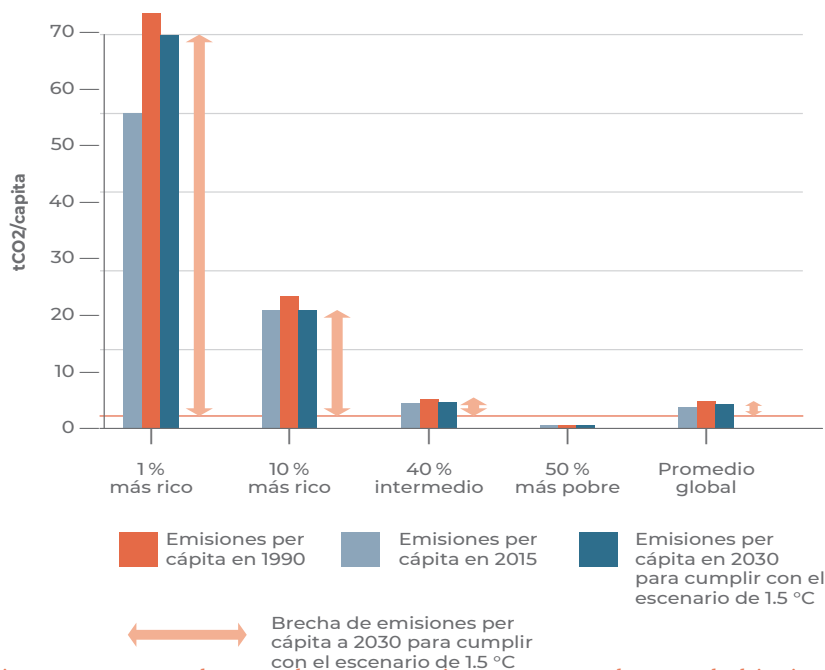
La figura 27 muestra las emisiones de diferentes grupos de ingreso estimadas por la Oxfam para 1990 (Gore, 2021) y su previsión a 2030. Como se puede observar, el 1% más rico del planeta ha incrementado sus emisiones a 2015, y se prevé que en 2030 emitirá 67.7 toneladas de CO<sub>2</sub> per cápita, lo que es 30 veces más de las 2.2 t de CO<sub>2</sub> per cápita que se debería de emitir, en promedio, para cumplir con el Acuerdo de París para mantener el planeta por debajo de 1.5°C de incremento de la temperatura con respecto a los valores preindustriales.

Ese 1% de la población debería de reducir su emisión per cápita un 97% con respecto a 2015, pero se prevé que sólo lo hará en un exiguo 5%. En el caso del 10% más rico, deberían de reducir sus emisiones en un 90%, frente al 11% que está previsto. Y para el 40% de la población de ingreso medio, requerirían disminuir un 57%, en lugar del 9% que se está previendo. En contraste, el 50% más pobre podría subir sus consumos a más del doble y estaría todavía dentro del límite.

Para el caso de los Estados Unidos incluso el 50% de la población con menores ingresos está por encima de los valores del Acuerdo de París (Gore, 2021). En su informe más reciente Oxfam (Khalfan et al., 2023) afirma que las personas, las corporaciones y los países más ricos están destruyendo el mundo con sus enormes emisiones de carbono. Mientras tanto, las personas que viven en pobreza, las que sufren marginación y los países del sur global son los más afectados. Las mujeres y las niñas, los pueblos indígenas, las personas que viven en la pobreza y otros grupos que sufren discriminación se encuentran en particular desventaja.

**FIGURA 27. COMPARACIÓN DE EMISIONES PER CÁPITA DE DISTINTOS**

## GRUPOS DE INGRESO EN 1990, 2015 Y 2030



**Nota:** emisiones comparadas con las necesarias para no rebasar el objetivo de calentamiento de 1.5°C para el 2030.

**Fuente:** Gore (2021).

Este informe estima que las emisiones de CO<sub>2</sub> del 1% de la población mundial más rica cancela los beneficios proporcionados por un millón de turbinas eólicas, lo que muestra cómo una transición que sólo se centra en un cambio tecnológico, sin tomar en cuenta el tema social, no tiene la menor posibilidad de solucionar los problemas ambientales.

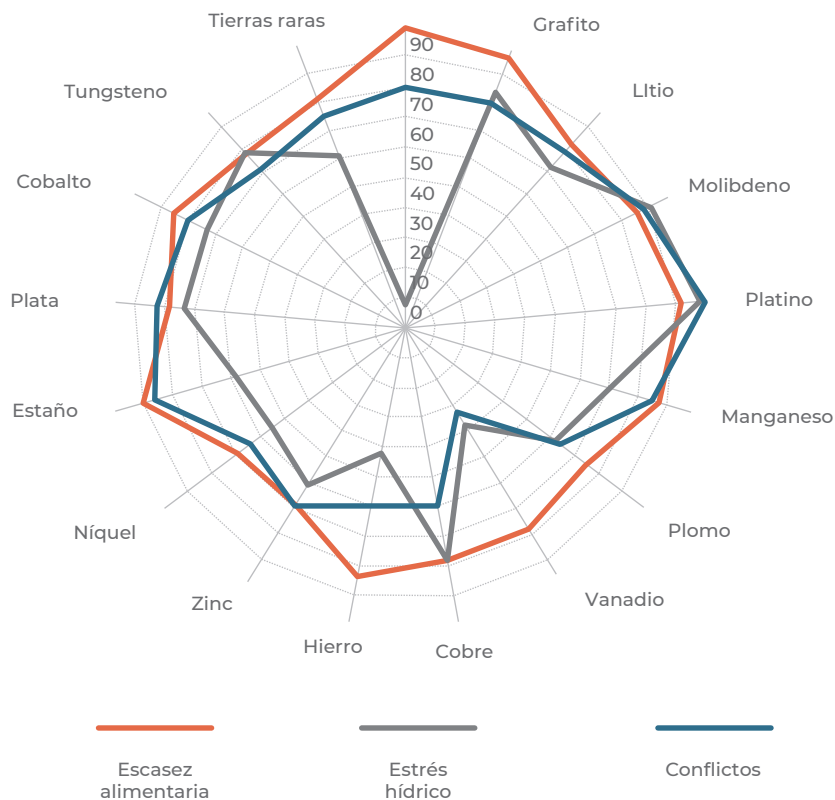
México es, junto con Chile, el país más desigual dentro de la OECD y uno de los más desiguales del mundo. En México se estima que el 36.7% de los hogares vive en “pobreza energética”, es decir, carece de las condiciones mínimas de abasto de servicios energéticos asequibles, seguros y no contaminantes (García-Ochoa y Graizbord, 2016). Aunque no se cuenta con información sobre el consumo energético, una medida de la desigualdad es que los hogares del decil más alto gastan en promedio 19 veces más que los del decil más bajo en gasolina y casi cuatro veces más en electricidad (García-Ochoa, 2023).

Las desigualdades en el uso de la energía se han dado típicamente entre los habitantes con alto poder adquisitivo de las grandes ciudades que gozan de todo tipo de comodidades a cuenta de energía y minerales extraídos en territorios de comunidades que se encuentran en la periferia. El contraste puede no ser geográficamente tan separado: en la zona serrana de Chihuahua hay viviendas sin electricidad a pocos kilómetros

de minas operando con consumos de energía elevados; en el Istmo de Tehuantepec (Oaxaca) los grandes aerogeneradores de los mega parques eólicos están casi encima de viviendas en pobreza energética.

La disparidad no sólo se da en términos de una distribución dispareja en el acceso a la energía, sino también en los perjuicios ecológicos asociados a la extracción de recursos. Las áreas de explotación que han sido definidas como “zonas de sacrificio” (Scott y Smith, 2017) para el desarrollo, incluso definido como “verde”, se encuentran frecuentemente en regiones caracterizadas por pobreza. De acuerdo con investigaciones recientes, el 54% de los minerales que se requieren para la “transición energética” se localizan en o cerca de las tierras de pueblos indígenas y campesinos (Owen et al., 2023).

**FIGURA 28. PORCENTAJE DE PROYECTOS DE DIFERENTES MINERALES PARA LA INDUSTRIA RENOVABLE LOCALIZADOS EN TERRITORIOS EXPUESTOS A ESTRÉS HÍDRICO, ESCASEZ ALIMENTARIA Y CONFLICTOS**



Fuente: Owen et al. (2023).

Como se puede apreciar en la figura 28, una gran parte de los proyectos vinculados con la extracción de estos minerales se ubica, además, en zonas con reducida disponibilidad de agua, con escasez de alimentos o con conflictos de inseguridad

severos. Los colonos de estas regiones se ven invadidos por compañías explotadoras de recursos e inversionistas privados apoyados por partidos políticos que persiguen la explotación de estos recursos, sin considerar que estos territorios son lo único que muchas comunidades tienen para vivir, y para las cuales representan una herencia cultural de suma importancia. Si bien las declaraciones de las Naciones Unidas garantizan a los pobladores *el derecho a la consulta y al consentimiento libre, previo e informado*, esto frecuentemente no se aplica, lo que en muchas ocasiones hace que los conflictos escalen a acciones más radicales.

### 12.3 NEOCOLONIALISMO E INTERCAMBIO DESIGUAL: TRANSFERENCIA DE ENERGÍA Y RECURSOS ENTRE EL HEMISFERIO SUR Y EL NORTE GLOBAL

#### Indagación previa

Investiga sobre lo siguientes temas:

- De dónde vienen las materias primas de los productos más usados, dónde se producen y dónde se consumen más.
- ¿Qué te sugiere la siguiente declaración de José Saramago?:

“Vivimos en una democracia secuestrada, condicionada y amputada porque el poder de los ciudadanos está limitado por las grandes organizaciones financieras elegidas democráticamente por el pueblo”.

Compártela en tu clase, en un círculo de estudio o círculo reflexivo.

#### Transferencia de los recursos energéticos y materiales entre países

La historia nos muestra que el ascenso de Europa occidental se dio en gran medida gracias a los recursos naturales y la mano de obra del sur global apropiados por la fuerza durante el período colonial. Por ejemplo, España aprovechó oro y plata de México y de los Andes; Portugal, azúcar de Brasil; Francia extrajo combustibles fósiles, minerales y productos agrícolas de África occidental, y Gran Bretaña obtuvo algodón, opio, cereales, madera, té y muchos otros productos de sus colonias en todo el mundo, incluso, mediante la esclavitud masiva (Hickel et al., 2022).

En la actualidad, el crecimiento económico en las “economías avanzadas” del norte global depende, en buena medida, de una apropiación neta de recursos y mano de

obra del sur global, extraídos a través de diferenciales de precios en el comercio internacional. De acuerdo con el estudio de Hickel y colaboradores (2022) los países del norte global han continuado extrayendo recursos materiales, energéticos y económicos del sur global por un valor de 10.8 billones de dólares en 2015 y de 242 billones en el periodo 1990-2015, equivalente a una cuarta parte del PIB del norte global.

Dentro de este proceso neocolonial se inserta también el denominado *offshoring*, por medio del cual, desde los años 90, se trasladaron las industrias pesadas del norte a aquellos países con mano de obra barata, menores derechos laborales y leyes ambientales menos estrictas, es decir, donde el costo de la producción era menor, al tomar en cuenta también que el costo del transporte no era tan caro. Un ejemplo –aplicado al caso de la maquila– sería México con la firma del Tratado de Libre Comercio con los Estados Unidos y Canadá (TLC) en 1994, y China, que es admitida en la Organización Mundial del Comercio (OMC) en 2001.

Estos eventos dieron pie a la última etapa de la globalización que permitió a las compañías transnacionales mantener sus ganancias a pesar de los rendimientos decrecientes de la economía real.

Como un intento de tener una mejor representación de todas las partes involucradas surge la idea del “multistakeholderismo” (*multistakeholderism*), con el propósito de incorporar en la visión de la OMC una gobernanza multipartes, es decir, la debida participación de todos basada en el consenso. En este contexto, se está incorporando un Marco de Responsabilidad Corporativa que involucra a toda la ONU con propuestas jurídicas que permitan la diligencia debida en materia de los derechos humanos y medioambientales, y otorguen mecanismos para la justicia que reparen los daños generados en el sur global mediante un sistema multilateral justo. Sin embargo, estos esfuerzos tienden a dejar el poder a las empresas del norte global con grandes economías como las promotoras de la gestión responsable de los recursos localizados en el sur global (Lang et al., 2023).

Esto no abona al reto de la mitigación del cambio climático, donde las altas tasas de consumo de los países ricos exceden con creces lo que se requiere para satisfacer las necesidades humanas, mientras más de 3000 millones de personas en los países más pobres viven en pobreza energética. En promedio, los escenarios propuestos por el IPCC mantienen el privilegio energético del norte global en un nivel per cápita dos a tres veces mayor que en el sur global.

Para conciliar el alto uso de energía del norte global con los objetivos del Acuerdo de París, la mayoría de los escenarios dependen en gran medida de tecnologías de emisiones negativas basadas en bioenergía (Hickel y Slamersak, 2022). Como hemos visto, esto es inviable pero también injusto, ya que estas propuestas tienden a apropiarse de tierras en el sur global para mantener el privilegio energético del norte global. En cambio, es necesario dismantelar los rastros del colonialismo,

resguardar el bienestar de la humanidad eliminando las relaciones comerciales internacionales explotadoras y quitando poder a la hegemonía occidental preponderante (Lang et al., 2023).

## 12.4 CRÍTICAS A LA NARRATIVA OFICIAL

### Argumentación 1. Desigualdades descomunales

Como hemos visto, hay grandes desigualdades en el consumo de energía, materiales y afectaciones a la naturaleza.

- Los países que mayores emisiones de GEI producen son China, los Estados Unidos, India, Rusia y Japón. Pero en cuanto a emisiones per cápita EE. UU. emite 1.3 veces lo que Rusia, 1.9 veces lo que China, 2.2 veces lo que la Unión Europea y 3.2 veces lo que México.
- Históricamente, los Estados Unidos, Inglaterra y algunos de los países más ricos de Europa han emitido más que todo el resto del mundo.
- El decil de la población con más recursos económicos gasta más energía que el 50% con menos recursos económicos y es responsable de casi el 50% de las emisiones.
- En América Latina el 10% más rico emite siete veces más que el más pobre.

Ante este escenario queda claro que no todos tienen las mismas responsabilidades y se deberían de implementar políticas que exigieran más a quienes más emiten. El gran problema radica en que los que establecen las reglas son un conjunto de grupos de poder fáctico que, en la mayoría de las ocasiones, se encuentra desconectado de la complejidad asociada al sistema Tierra-Humanidad y su extraordinario entramado interdependiente.

### Argumentación 2. El comercio “verde”

El comercio “verde” es otra forma de preservar el colonialismo bajo un nombre más *ad-hoc* con la época. Para garantizar la cadena de suministros mundial de minerales estratégicos, los países más ricos (G7) establecen acuerdos de libre comercio para asegurar los recursos necesarios que requiere la transición, en detrimento de los países productores que resultan ser, paradójicamente, los menos poderosos (Lang et al., 2023). A partir de los mecanismos legales establecidos por las empresas

multinacionales inversoras se despoja a los países anfitriones de su poder y se convierten en rehenes de los intereses de los corporativos.

En esta situación los países productores de materias primas son presionados con demandas legales que los ponen en jaque en pro de los países inversores. Es importante remarcar que todo lo anterior está legitimado por la clase política en el poder en muchos de estos países de origen que se benefician económicamente de la venta de estos *commodities*.

Este tipo de comercio debe cesar para dar paso a una transición justa que promueva un cambio sistémico en el que se utilicen medios democráticos. Una transición que se aparte de la sobreexplotación de los recursos y los países productores para aproximarse a sistemas de generación que pongan en el centro el bienestar humano y la regeneración de la biósfera.

## 12.5 REFLEXIÓN FINAL: ¿DE DÓNDE DEBERÍA VENIR EL CAMBIO?

### El poder de la organización social

Las monumentales desigualdades señaladas, difícilmente serán corregidas por las clases más acomodadas que, en su mayoría, utilizan su poder y recursos económicos para mantener sus privilegios. En la mayoría de los casos, el cambio está llegando desde abajo, desde grupos y comunidades que se resisten a la expansión de proyectos extractivistas y de explotación de los recursos naturales de los que dependen para su supervivencia. Algunos grupos van más allá y proponen nuevos modos de producir, de vivir y de representar al mundo, creando *ecoaldeas* donde existe un mayor nivel de conciencia colectiva.

Los movimientos sociales necesariamente deberían de llevar el estandarte de promover el más alto bien de todas las especies mediante el establecimiento de propuestas que, por un lado, promovieran una mayor participación de la población y, por otro, tuviesen en cuenta los límites biofísicos planetarios.

Esta narrativa debería de permear en los grupos políticos para que desde allí se definan las nuevas formas de vivir que requerimos como humanidad ante un escenario de decrecimiento inevitable, a partir de leyes que busquen el establecimiento de una sociedad más armónica, orgánica y con tendencia a neutralizar las desigualdades sociales, como bien proponía el sociólogo Émile Durkheim. El debate queda abierto en este punto: ¿cómo es posible establecer leyes que busquen este objetivo, cuando, parafraseando a Michel Foucault (2001), “la ley no nacía de la naturaleza, sino de batallas reales ocurridas en nuestro sistema humanidad”?

Todo lo anterior, requeriría de una ciudadanía más informada, activa y empoderada que convirtiese, progresivamente, a cada ciudadano en un político en potencia. Lo que nos va a salvar no es la tecnología, sino la comprensión y en entendimiento colectivos.







## 13. Alternativas al colapso de la civilización industrial (visiones de futuro)

En este último capítulo revisaremos brevemente las posturas acerca del predicamento energético, ecológico y social en que nos encontramos y que hemos desglosado en los capítulos anteriores. Estas posturas dependen de los recursos energético-materiales en el que se encuentre cada país, pero también en el grado de conciencia de su sociedad:

- Los que todavía cuentan con energía fósil y minerales suficientes planean explotarlos hasta donde sea posible sin un cambio mayor en el sistema, aunque en algunos casos a través del mejoramiento de las condiciones materiales de una parte mayoritaria de la población. Esta es la visión de las grandes potencias como China y Rusia, que anteponen el desarrollo industrial a los impactos ambientales que necesariamente van a incrementar y que pueden perjudicar sus políticas.
- Los países ricos del mundo occidental, históricamente responsables de la extracción y uso de grandes cantidades de energía y materiales (y las emisiones asociadas), se están enfrentando a una escasez creciente de estos recursos. En estos países las élites dominantes están impulsando ahora escenarios de “emisiones cero neto” (*net zero*) y “crecimiento verde” (*green growth*). Como lo hemos comentado anteriormente, estos proyectos no atacan el fondo del problema, que es la imposibilidad del crecimiento infinito en un planeta finito.
- En estos países, sin embargo, también se ha venido construyendo un pensamiento crítico que aboga por el decrecimiento, una corriente política, económica y social favorable a la disminución regular y controlada de la producción económica, con el objetivo de establecer una nueva relación de equilibrio entre el ser humano y la naturaleza, pero también entre los propios seres humanos.

- Antes y durante este desarrollo en el mundo occidental, en los países del sur global, particularmente en América Latina, se ha venido construyendo el concepto de *buen vivir*, que se basa principalmente en los conocimientos y las tradiciones reprimidas de los pueblos originarios y que ha sido recuperado por muchos movimientos sociales del Cono Sur.

En los apartados que siguen analizaremos brevemente algunos de estos conceptos.

## 13.1 NET ZERO Y GREEN GROWTH

### Indagación previa

#### Preguntas sugeridas:

Indaga sobre los siguientes conceptos:

- *Net zero* y cómo se propone alcanzarlo.
- Viabilidad de los escenarios futuros planteados por los planes de “crecimiento verde”.

Compártelo en tu clase, en un círculo de estudio o círculo reflexivo.

Comprueba si hay alguna propuesta que no hayas considerado y que te parezca acertada.

### Emisiones cero neto y crecimiento verde

El concepto de “crecimiento verde” se desarrolla a partir de la conferencia de las Naciones Unidas de Río de Janeiro en 2012, donde se establecen los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). Desde entonces, el crecimiento verde ha sido promovido por organizaciones internacionales y gobiernos occidentales como la respuesta a la crisis climática y, al mismo tiempo, la vía para alcanzar los ODS.

La idea subyacente es que el incremento del Producto Interno Bruto (PIB) puede ser compatible con la ecología del planeta. En la práctica, el crecimiento verde supone que es posible un desacoplamiento absoluto entre el PIB y las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), así como el uso de recursos materiales y que, además, esto puede ocurrir a un ritmo lo suficientemente rápido como para prevenir un cambio climático desastroso y otras catástrofes ecológicas (Ferrari, 2023).

De acuerdo con la definición de las Naciones Unidas, el escenario “cero neto” significa recortar las emisiones de GEI hasta dejarlas lo más bajas posible, con emisiones residuales que sean reabsorbidas en la atmósfera, por el océano y los bosques. Los mecanismos que se proponen para alcanzar esas metas son los mismos: mejoras e innovaciones tecnológicas para incrementar la eficiencia, sustitución de combustibles fósiles por fuentes renovables e hidrógeno, así como diferentes tecnologías de emisiones negativas, junto con un sistema de regulaciones e incentivos para acelerar todo lo anterior. En realidad, no se estarían dejando de emitir, sino que las emisiones se balancearían por medios alternativos, como la captura del CO<sub>2</sub> y la reforestación.

La popularidad del crecimiento verde en buena parte del espectro político e incluso en empresas y corporaciones se debe a que no requiere revisar el paradigma económico dominante. Sin embargo, como lo hemos visto a lo largo del libro, las suposiciones en las que se basa no resisten un examen empírico ni un análisis físico de la estructura de la civilización industrial. En realidad, la búsqueda de soluciones tecnológicas se relaciona con la esperanza de que éstas permitan continuar con el estilo de vida consumista de una parte de la población, pero sin cargar con el remordimiento de la devastación del planeta y el cambio climático. Sin embargo, en la medida en que el crecimiento verde se proponga continuar con el sistema extractivista, estas amenazas seguirán creciendo, sin atender la grave desigualdad existente.

Todo lo anterior sólo puede llevarnos a profundizar la crisis ecológica y traer conflictos violentos, incluso, sostienen algunos, un colapso de la civilización moderna. Por ello, una de las primeras cuestiones que hay que poner sobre la mesa es la siguiente “¿de qué manera se puede superar el crecimiento sin el colapso?” o, como dice Samuel Alexander (2020), “llegar al postcapitalismo por diseño y no por el colapso”.

## 13.2 DECRECIMIENTO

### Indagación previa

#### Preguntas sugeridas:

- Realiza una reflexión crítica acerca de cuán posible es que comiences a decrecer lo que consumes.
- ¿Cuáles serían tus propuestas de decrecimiento en tu día a día?
- ¿Conoces algún grupo en tu comunidad que esté promoviendo este nuevo paradigma? En caso afirmativo, promuévelo en tu grupo.

Compártelo en tu clase, en un círculo de estudio o círculo reflexivo.

Comprueba si hay alguna propuesta que no hayas considerado y que te parezca acertada.

### Decrecimiento sostenible

La propuesta del decrecimiento se inscribe en el aliento ecologista que nació en el seno de la revolución cultural de los años 60 del siglo xx. Es también heredera de una corriente ecologista muy vigorosa, que en los años 70 brotó, sobre todo, en algunos países industrializados. Fue un desafío abierto al régimen dominante y una crítica radical a la sociedad económica, capitalista o socialista, y al modo industrial de producción (D'Alisa y DeMaria, 2015).

El año 1972 puede ser visto como punto de inflexión del ecologismo, cuando tuvo lugar la Conferencia de Estocolmo sobre el Medio Ambiente Humano, en la cual se empleó por primera vez el término de *sustentabilidad*. En ese mismo año, el Club de Roma presentó un informe que exigía considerar seriamente los límites biofísicos del crecimiento. También en 1973, cuando estalló el primer choque petrolero y la Comisión Trilateral concibió la estrategia neoliberal, el filósofo André Gorz formuló la idea del decrecimiento como condición de un proyecto de transformación social basado en la equidad y el realismo ecológico, precursor de la ecología política que tomó forma en la siguiente década (ver revisión en Gorz, 2007).

En los años 80 los movimientos ecologistas cobraron ímpetu y llegaron a los congresos de varios países. Se hizo evidente el carácter ilusorio de las promesas del pensamiento dominante y la destrucción natural y social asociada con la empresa del desarrollo. A finales de la década, Iván Illich invitó a algunos de sus amigos a preguntarse esto: “Después del desarrollo, ¿qué?”

Las propuestas de “crecimiento cero” se contraponen a la que ofreció el matemático y economista Nicholas Georgescu-Roegen a partir de una crítica a la epistemología mecanicista imperante bajo el sustento de la Segunda Ley de la Termodinámica, que afirma que “en un sistema aislado, la materia y la energía parten de un estado de baja entropía para llegar, a través de un proceso de degradación y desorden, a un estado de alta entropía, en el que la disponibilidad de ambas ya no es posible”. Dicha proposición se expuso a través del Programa Bioeconómico Mínimo, el cual postula las propuestas del siguiente apartado (Dos Santos, 2013).

#### Propuesta de Georgescu-Roegen (1975):

- Prohibición de la industria armamentista.
- Reducción de la población hasta alcanzar niveles que permitan depender, exclusivamente, de una agricultura orgánica.

- Renuncia al consumo extravagante de *gadgets* y a la moda.
- Fin de la obsolescencia programada.

El decrecimiento sostenible como tal, fue propuesto en Francia por el filósofo y economista Serge Latouche como una crítica a la “sociedad del desperdicio”, misma que destruye la naturaleza y promueve la desigualdad social:

### Propuestas de Serge Latouche (2007):

- La obsesión por el trabajo debería de ser sustituida por el placer del ocio.
- El consumo desenfrenado debería de ser desplazado por una vida social plena.
- El egoísmo debería de ser suplantado por un altruismo.

Para Latouche, el desarrollo sostenible era un oxímoron que intentaba sostener el desarrollo, no la naturaleza o la cultura. Bajo este esquema propuesto por Latouche, se busca una sociedad con una progresiva actividad política con la que se reafirmen los valores sociales y ecológicos de un pasado pretérito. En el apartado siguiente se resumen los ocho cambios expuestos por Latouche para lograr lo que define como *decrecimiento sereno*, en el que el decrecimiento no es un fin, sino un medio para alcanzar una situación más estable.

### Decrecimiento sereno de Serge Latouche (2009):

- Repensar los valores en la sociedad.
- Redefinir conceptos tales como pobreza, riqueza, escasez y abundancia.
- Reformar el aparato de producción y las relaciones sociales con base en los valores reconsiderados.
- Redistribuir las riquezas y el acceso al patrimonio natural entre el norte y el sur, así como dentro de las comunidades.
- Relocalizar la producción de bienes esenciales.
- Reducir la producción y el consumo para reducir también su impacto en la biósfera.
- Reutilizar y reciclar, mediante la disminución del dispendio y la revocación de la obsolescencia programada.

El estado de crecimiento cero, o economía estable (Steady-State Economics, SSE), fue definido por Herman Daly como “una economía con una cantidad fija de bienes de

capital y población” en la que se priorizaba la minimización del flujo de materiales y energía durante todo su ciclo de vida (Daly, 1974). Otra propuesta es la del “decrecimiento sostenible desde una economía ecológica”, que propone un equilibrio dinámico, mas no estático, de acuerdo con el estado entrópico de cada uno de los sistemas involucrados, en el que los límites establecidos se vuelven más estrictos en aquellos casos en los que se manifieste un incremento en la entropía (Kerschner, 2010).

Como se puede observar en el apartado informativo anterior, el decrecimiento involucra una transformación mucho más dolorosa, sobre todo para las élites de la economía mundial, puesto que entraña la destrucción de la ecuación en la que el crecimiento económico es sinónimo de bienestar social pero, además, implica reorientar las relaciones económicas hacia estructuras conceptualmente distintas y basadas en principios verdaderos de lo que es el bienestar, centrados en las necesidades y aprovisionamiento equitativo y no acumulativo (Kallis et al., 2012). Esta reestructuración implica, asimismo, garantizar un sustento y un acceso equitativos a los bienes y servicios básicos para todos los seres humanos como bien definidos en la pirámide de Maslow.

A las propuestas de Georgescu-Roegen se suman, en tiempos más recientes, otras alternativas que hay que tener en cuenta (Alexander, 2020):

1. *Limitar la extracción de recursos teniendo en cuenta los límites biofísicos del planeta.* Se debe comenzar por los países ricos y las minorías ricas de cada país, quienes, si se toman en serio la crisis ambiental, deben de reconocer que están consumiendo en exceso energía y materiales y comenzar a poner remedio.
2. *Alternativas al PIB.* Se debe trascender el fetiche del PIB que no es más que la cantidad de dinero que circula, y establecer mejores formas de medir el progreso social como, por ejemplo, el Índice de Progreso genuino (Kubiszewski et al, 2013).
3. *Repensar el gasto público.* Los gobiernos gastan gran parte de su dinero para promover el crecimiento económico. Bajo un paradigma de decrecimiento, esto debería reconsiderarse (p. ej. menos aeropuertos, carreteras y equipo militar; más transporte público, carriles para ciclistas, mayor inversión en salud y educación, etc.).
4. *Horario de trabajo reducidos en la economía formal.* Una implicación obvia de la disminución de los límites de recursos es que en una economía de decrecimiento se daría una producción y un consumo mucho menos intensivos en recursos y una reducción del PIB. Esto implicaría un mayor desempleo, que se podría combatir con horarios de trabajo reducidos en el que cada sistema familiar ganara menos, para que todos pudieran disponer de recursos para sus necesidades básicas, pero que

permitieran más tiempo libre para las cuestiones que tuvieran mayor relación con los valores humanos.

Lo anterior implica también la desmercantilización del trabajo: no tener que comprar todos los bienes y servicios que necesitamos, sino poder satisfacer estas necesidades, por lo menos parcialmente, con nuestro trabajo y mediante el intercambio en la comunidad donde vivimos.

5. *Banca y finanzas.* El sistema bancario de reserva fraccionaria tiene el imperativo de crecimiento integrado en su estructura. Cualquier sociedad que busque el equilibrio tendría que crear sistemas que no requiriesen crecimiento para la estabilidad y empezar con la condonación de la deuda, especialmente de las naciones más pobres.

En este escenario habría sectores productivos que se verían radicalmente reducidos, como serían los casos del transporte de larga distancia de bienes y personas, el turismo internacional, las finanzas, la industria enfocada a la exportación y a bienes suntuarios o no prioritarios, así como las TIC (Lang et al., 2023).

Pero, ¿qué implica un decrecimiento consciente? Por razones obvias, un descenso controlado y consciente involucra un cambio en nuestra forma de vida en el que pasemos de un paradigma antropocentrista, con una visión instrumental de los ecosistemas, a un enfoque más holístico y local. Para ello se deberá de superar la dependencia del capitalismo a todo lo material (Seibert y Rees, 2021). Lo anterior suscita la siguiente pregunta, que dejamos en el tintero: ¿estamos realmente preparados para ello?

### 13.3 BUEN VIVIR Y RELOCALIZACIÓN

#### Indagación previa

#### Preguntas sugeridas:

- Realiza una reflexión crítica acerca de qué es para ti el buen vivir.
- Teniendo en cuenta esta nueva percepción, ¿qué valores necesitarías reconsiderar en tu vida?
- ¿Qué creencias son las que más te limitan a la hora de realizar estos cambios en tus valores?

Compártelo en tu clase, en un círculo de estudio o círculo reflexivo.

Compara las distintas propuestas de valores y creencias de cada integrante del grupo.

## Buen vivir

En un sentido general, este concepto refleja una forma de percibir, sentir y proyectar el mundo dentro de un paradigma distinto del crecimiento extractivista y de explotación de la naturaleza típico del colonialismo occidental. Propone una manera de vivir en armonía con la naturaleza de la cual somos parte en una dimensión mucho más local. Bajo este nuevo paradigma se requiere hacer un desplazamiento desde cada una de las siguientes ópticas:

Globalización	⇒	Localización
Urbanización	⇒	Ruralización
Industrialización	⇒	“Artesanalización”
(High Tech)		(Low Tech)
Crecimiento	⇒	Decrecimiento
Centralización	⇒	Descentralización
(estados)		(autonomías)

En este escenario, algunos cambios sistémicos que necesitamos implementar para un descenso próspero serían:

1. *Desglobalización hacia economías regionales*: producir y consumir localmente.
2. *Agricultura no dependiente de combustibles fósiles*: transición agroecológica, permacultura, sin uso de fertilizantes ni pesticidas derivados del petróleo, dieta más vegetariana y ecotecnologías.
3. *Bienes duraderos, reciclaje y reúso*: fin de la obsolescencia programada y el consumismo.
4. *Justicia social y ambiental*: limitar el consumo de la parte más rica de la población y buscar una mayor equidad en la distribución de los recursos.
5. *Estilos de vida más simples y menos materialistas*: mucha menos producción y consumo, mucha menos preocupación por el lujo, la opulencia y las posesiones materiales y prestar más atención a las fuentes no materiales de satisfacción en la vida.

En cuanto a la transición hacia la agroecología y la permacultura implica los siguientes cambios de paradigmas:

Seguridad alimentaria ⇒ Economía solidaria  
 Soberanía alimentaria ⇒ Economía local  
 Resiliencia ⇒ Adaptación  
 Conservación ⇒ Regeneración

## 13.4 CRÍTICA A LA NARRATIVA OFICIAL

### Argumentación 1. Necesitamos un nuevo plan

#### Lista de problemas a resolver en lo venidero

Murphy y colaboradores (2021) plantean una serie de problemas a la que nos enfrentamos como especie y que tenemos que enfrentar:

- El auge de la producción.
- El consumo desmesurado de los recursos naturales.
- El crecimiento poblacional sin precedentes.
- El aumento de la demanda humana promedio de recursos naturales.
- El incremento de los productos manufacturados con largas cadenas de consumo.
- El crecimiento de los productos de un solo uso; tanto de papel como de plástico, que se convertirán en deshechos.
- El aumento de la contaminación.
- Los fertilizantes aplicados al cultivo intensivo y que dependen del gas natural siendo éste de suministro finito.
- El aumento de la pérdida de biodiversidad por la invasión de sus hábitats naturales de formas diversas.
- La sobreexplotación y contaminación de los acuíferos.
- Las consecuencias vinculadas al calentamiento global; esto es, incendios, tormentas, inundaciones, desertificación, aumento del nivel del mar, la acidificación de los océanos, etc.
- La tala desmesurada de árboles.
- El maltrato animal.

## Reflexión final

### Incompatibilidad del sistema actual con los límites biofísicos

Después de lo analizado en el transcurso de este libro es evidente que, a pesar del discurso de la teoría económica dominante, el sistema actual es insostenible y ha rebasado ya los límites biofísicos del planeta que nos permite la vida. Por mucho que nos empeñemos en querer seguir con este ritmo de vida, la propia Tierra nos está informando que los cambios se deben dar desde ahora o, de lo contrario, la catástrofe está garantizada.

No se trata del cambio de un capitalismo “negro” a uno “verde”, puesto que, se pinte del color que se pinte, sigue implicando un consumo de materiales y energía cada vez más escasos, así como la producción de una cantidad de desechos creciente que no puede ser procesada y reciclada. La única opción factible es aceptar el inevitable decrecimiento, comenzar por aquellos grupos que sean más conscientes para así poder dar el ejemplo a otros, para evitar la confrontación, porque no se trata de derrotarlos, sino de hacerles entender que el tiempo es ahora, para así acompañarlos en su transformación. Esto provocará un aumento de la masa crítica hasta que, de manera progresiva, la balanza se invierta y evite el colapso.

Este cambio difícilmente vendrá por parte del Estado, puesto que se trata de una estructura demasiado compleja, sino desde el individuo y su trabajo de conciencia personal, para pasar luego a construir comunidades que promuevan las políticas públicas a través de movimientos sociales organizados y democráticos. En este proceso habrá empleos que desaparecerán, para dar paso a otros formatos de trabajo que impliquen menos gasto energético y un sector alimentario que deberá adoptar el paradigma agroecológico con un proceder más local.

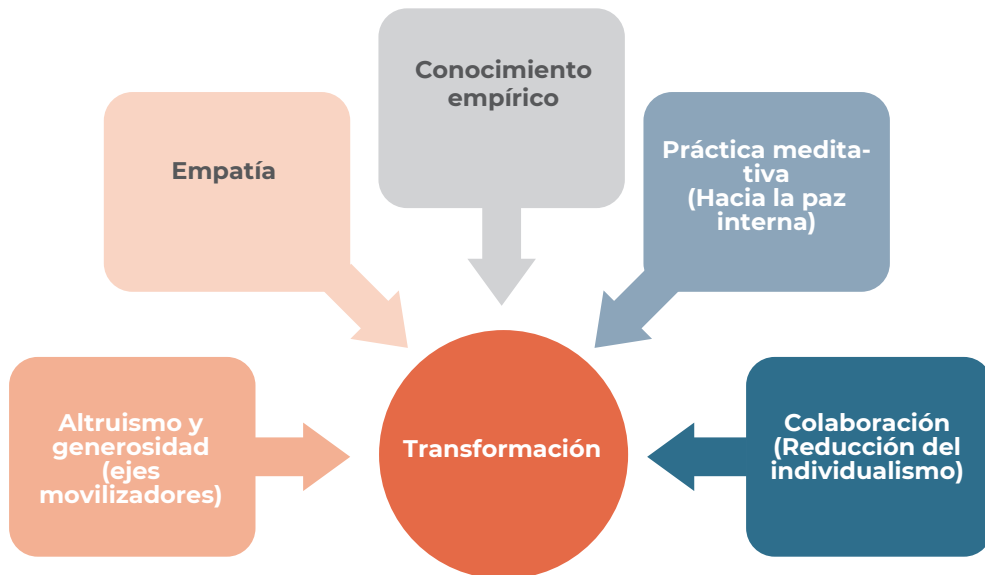
### Decrecimiento/desescalamiento/buen vivir

Vivir con lo básico, sin la necesidad del crecimiento infinito ni el consumismo irresponsable es posible, puesto que está comprobado que es así como la humanidad vivió antes del descubrimiento y aprovechamiento de los combustibles fósiles. Esa ha sido, también, la forma de vida de algunas comunidades y pueblos originarios de América. El problema es que nos hemos acostumbrado a los excesos y asimilamos que esa es la mejor forma de existencia. Pero, para poder vivir en armonía con la naturaleza sin exceder sus límites, debemos de hacernos a la idea de que son necesarios cambios radicales y que todos tenemos que contribuir desde nuestras prácticas cotidianas; aunque el mayor cambio debe venir por parte de la población que más consume.

Como humanidad hemos heredado un planeta lleno de riquezas, pero nos hemos equivocado al pensar que la naturaleza estaba a nuestra merced. Lo que nunca asimilamos fue que esta herencia implicaba también una gran responsabilidad por nuestra parte, la cual debe de pasar, forzosamente, por el análisis de nuestros hábitos de consumo. No transfiramos responsabilidades a nadie y no nos saquemos de la ecuación cuando hablemos de extractivismo porque todos, en mayor o menor medida, tenemos responsabilidad en este fenómeno perverso.

Si bien hay que actuar en nuestro entorno, para que se dé el cambio colectivo debemos también emprender una transformación personal que nos permita identificar qué es lo que debemos de sanar como seres humanos (figura 29).

**FIGURA 29. ELEMENTOS DE LA TRANSFORMACIÓN INDIVIDUAL PARA ALCANZAR UNA TRANSFORMACIÓN GLOBAL**



**Fuente:** elaboración propia.

A través de una práctica meditativa que nos aleje, momentáneamente, del ruido ensordecedor del caos externo, podemos acercarnos a nuestra esencia más profunda para permitir que el altruismo y la generosidad florezcan nuevamente. Recordemos siempre que no estamos solos, sino que nos sanamos como especie por medio de una colaboración genuina entre todas las especies de nuestra madre tierra.



## REFERENCIAS

- Agencia de Protección Ambiental de EE.UU. (United States Environmental Protection Agency–EPA) (2021). *Renewable Industrial Process Heat*. [https://19january2021snapshot.epa.gov/rhc/renewable-industrial-process-heat\\_.html](https://19january2021snapshot.epa.gov/rhc/renewable-industrial-process-heat_.html)
- Afkhami, G. R. (2009). *The Life and Times of the Shah*. University of California Press.
- Alexander, S. (2020). Post-capitalism by Design Not Disaster. *The Ecological Citizen*, 3(Suppl B), 13-21.
- Amoros, R. (2019). *Mapping Crude Oil Reserves Around the World*. How Much. <https://howmuch.net/articles/worlds-biggest-crude-oil-reserves-by-country>
- Barrero, A. (2023). *Este es el mapamundi de los minerales críticos*. Energías renovables. <https://www.energias-renovables.com/panorama/este-es-el-mapamundi-de-los-minerales-20230712>
- Berman, A. (2024). *Eagle Ford Shale–A Preview of Permian Decline*. <https://www.artberman.com/blog/eagle-ford-shale-a-preview-of-permian-decline/>
- Bohutada, G. (2022). *The Key Minerals in an EV Battery*. Visual Capitalist–Elements. <https://elements.visualcapitalist.com/the-key-minerals-in-an-ev-battery/>
- Bouthada G. (2023). *Visualizing China’s Dominance in Battery Manufacturing (2022–2027P)*. Visual Capitalist–Elements. <https://elements.visualcapitalist.com/chinas-dominance-in-battery-manufacturing/>
- Bordera, J., Valladares, F. y Turiel A. (2023). Manual contra el negacionismo climático en la década axial. *CTXT. Contexto y acción*, 298. <https://ctxt.es/es/20230701/Firmas/43502/Juan-Bordera-Fernando-Valladares-Antonio-Turiel-cambio-climatico-negacionismo-crisis-ecologica.htm>
- Bortnikov, N. S., Volkov, A. V., Galyamov, A. L., Vykentieiev, I. V., Lalomov, A. V. y Murashov, K. Y. (2022). Fundamental Problems of Development of the Mineral-resource Base of High-tech Industry and Energy of Russia. *Geology of Ore Deposits*, 64(6), 313-328.

- Bouwman, A. F., Beusen, A. H., y Billen, G. (2009). Human Alteration of the Global Nitrogen and Phosphorus Soil Balances for the Period 1970–2050. *Global Biogeochemical Cycles*, 23(4).
- Bowen, J. (2013). *Six Days: How the 1967 War Shaped the Middle East*. Macmillan.
- Calvo, G. y Valero, A. (2016). Strategic Mineral Resources: Availability and Future Estimations for the Renewable Energy Sector. *Environmental Development*, 41.
- Catton Jr, W. R. (2009). *Bottleneck: Humanity's Impending Impasse*. Xlibris Corporation.
- Center for Sustainable Systems (2023). *U.S. Food System Factsheet*. University of Michigan. <https://css.umich.edu/publications/factsheets/food/us-food-system-factsheet>
- Conte, N. (19 de diciembre de 2023). Visualizing \$97 Trillion of Global Debt in 2023. *Ahead of the Herd*. <https://aheadoftheherd.com/visualizing-97-trillion-of-global-debt-in-2023/>
- Cordell, D., Drangert, J.-O. y White, S. (2009). The Story of Phosphorus: Global Food Security and Food for Thought. *Global Environmental Change*, 19(2), 292-305.
- Covatiaru, A. (2022). Ukraine's Critical Minerals and Europe's Energy Transition: A Motivation for Russian Aggression? *Middle East Institute*. <https://www.mei.edu/publications/ukraines-critical-minerals-and-europes-energy-transition-motivation-russian-aggression>
- Cozzi, L., Chen, O. y Hyeji, K. (2023). The World's Top 1% of Emitters Produce Over 1000 Times More CO<sub>2</sub> than the Bottom 1%. *International Energy Agency – IEA*. <https://www.iea.org/commentaries/the-world-s-top-1-of-emitters-produce-over-1000-times-more-co2-than-the-bottom-1s>
- Cramer, J. K. y Thrall, A. T. (eds.) (2012). *Why Did the United States Invade Iraq?* Routledge.
- D'Alisa, G. y DeMaria, F. y. (2015). *Decrecimiento: un vocabulario para una nueva era*. Icaria.
- Daly, H. E. (1974). The Economics of the Steady State. *The American Economic Review*, 64(2), 15-21.

- Dehmuckh, A. (2021). This Simple Chart Reveals the Distribution of Global Wealth. *Visual Capitalist*. <https://www.visualcapitalist.com/distribution-of-global-wealth-chart/>
- Delannoy, L., Longaretti, P. Y., Murphy, D. J. y Prados, E. (2021). Peak Oil and the Low-carbon Energy Transition: A Net-energy Perspective. *Applied Energy*, 304, 117843.
- Desjardins, J. (2019). \$69 Trillion of World Debt in One Infographic. *Visual Capitalist*. <https://www.visualcapitalist.com/69-trillion-of-world-debt-in-one-infographic/>
- Diamond, J. (2011). *Collapse: How Societies Choose to Fail or Succeed: Revised Edition*. Penguin.
- Domonoske, C. (2022). *High demand and Prices for Lithium Send Mines into Overdrive*. NPR organization. <https://www.npr.org/2022/11/23/1135952359/lithium-mines-batteries-electric-vehicles-climate-change-carbon%20%22%22>
- Dos Santos, F. (2013). *Decrecimiento: un camino para superar el desarrollismo y repensar formas de vida*. Flacso Andes. <https://www.flacsoandes.edu.ec/agora/62875-decrecimiento-un-camino-para-superar-el-desarrollismo-y-repensar-formas-de-vida>
- Dowd, M. [Watch] (2020). *Irreversible Collapse: Accepting Reality, Avoiding Evil*. [Video]. YouTube. [https://www.youtube.com/\\_watch?v=iQeK04WOGaA](https://www.youtube.com/_watch?v=iQeK04WOGaA)
- ETC Group (31 de enero de 2022). El campesinado y la agricultura en pequeña escala son quienes siguen alimentado al mundo. *etc Group*. <https://etcgroup.org/es/content/el-campesinado-y-la-agricultura-en-pequena-escala-son-quienes-siguen-alimentando-al-mundo>
- Faiola A. y Bennett, D. (10 de agosto de 2022). In the Ukraine War, a Battle for the Nation's Mineral and Energy Wealth. *The Washington Post*. <https://www.washingtonpost.com/world/2022/08/10/ukraine-russia-energy-mineral-wealth/>
- Ferrari, L., (2020). Pico del petróleo y fin del crecimiento: Una mirada retrospectiva. *América Latina en Movimiento*, 54(550), 15-18.
- Ferrari, L. (2023). La falacia del crecimiento verde. En C. Tornel y P. Montaña (eds.), *Navegar el colapso. Una guía para enfrentar la crisis civilizatoria y las falsas soluciones al cambio climático*. Bajo Tierra Ediciones.

- Foucault, M. (2000). *Defender la sociedad*. Fondo de Cultura Económica.
- García-Ochoa, R., y Graizbord, B. (2016). Caracterización espacial de la pobreza energética en México. Un análisis a escala subnacional. *Economía, sociedad y territorio*, 16(51), 289-337.
- García-Ochoa, R. (2023). Pobreza energética. *Ciencias y Humanidades*, 7, 34-47.
- Gaspar, V., Poplawski-Ribeiro, M. y Yoo, J. (2023). Global Debt is Returning to its Rising Trend. *IMF Blog*. <https://www.imf.org/en/Blogs/Articles/2023/09/13/global-debt-is-returning-to-its-rising-trend>
- Gil, A. (21 de abril de 2018). La descomposición de la Unión Soviética. *El orden mundial*. <https://elordenmundial.com/mapas-y-graficos/la-descomposicion-de-la-urss/>
- Gil, A. (24 de octubre de 2021). El mapa de los gasoductos de Europa. *El orden mundial*. <https://elordenmundial.com/mapas-y-graficos/dependencia-energetica-europa/>
- González, L. y Almazán, A. (2023). *Decrecimiento: del qué al cómo*. Icaria.
- Gore, T. (2021). *Carbon Inequality in 2030 Per Capita Consumption Emissions and the 1.5°C Goal*. Institute for European Environmental Policy, Oxfam. <https://policy-practice.oxfam.org/resources/carbon-inequality-in-2030-per-capita-consumption-emissions-and-the-15c-goal-621305/>
- Gorz, A. (2007). Crise mondiale, décroissance et sortie du capitalisme. *Entropia*, 2, 51-59. <http://www.entropia-la-revue.org/spip.php?article157>
- Hassan, H. (1999). *The Iraqi Invasion of Kuwait: Religion, Identity and Otherness in the Analysis of War and Conflict*. Pluto Press.
- Heinberg, R. (2017). *Why Climate Change Isn't Our Biggest Environmental Problem, and Why Technology Won't Save Us*. Post Carbon Institute. <http://www.postcarbon.org/why-climate-change-isnt-our-biggest-environmental-problem-and-why-technology-wont-save-us/>

- Hersh, S. (2023). Un año de mentiras sobre el Nord Stream. *CTXT – Contexto y acción*. <https://ctxt.es/es/20230901/Politica/44171/Seymour-Hersh-Biden-Putin-Nord-Stream-atentado-guerra-gasoducto-oleoducto.htm>
- Hickel, J., Dorninger, C., Wieland, H. y Suwandi, I. (2022). Imperialist Appropriation in the World Economy: Drain from the Global South Through Unequal Exchange, 1990–2015. *Global Environmental Change*, 73, 102467.
- Howard, P. (2018). Seed Industry Structure. *The Cornucopia Institute*. <https://www.cornucopia.org/seed-industry-structure-dr-phil-howard/>
- International Energy Agency (IEA) (2021). *The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions*. <https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions>
- International Energy Agency (IEA) (2023). *Energy Statistics Data Browser*. <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/energy-statistics-data-browser?>
- International Renewable Energy Agency (IRENA), (2022). *World Energy Transitions Outlook 2022*. <https://www.irena.org/Digital-Report/World-Energy-Transitions-Outlook-2022>
- Kallis, G., Kerschner, C., y Martínez-Alier, J. (2012). The Economics of Degrowth. *Ecological Economics*, 84, 172-180.
- Kerschner, C. (2010). Economic De-growth vs. Steady-state Economy. *Journal of Cleaner Production*, 18(6), 544-551.
- Khalfan, A., Nilsson Lewis, A., Aguilar, C., Lawson, M., Jayoussi, S., Persson, J., Dabi, N. y Acharya, S. (20 de noviembre de 2023). Climate Equality: A Planet for the 99%. *Oxfam International*. <https://policy-practice.oxfam.org/resources/climate-equality-a-planet-for-the-99-621551/>
- Khoury, C. K., Bjorkman, A. D., Dempewolf, H., Ramirez-Villegas, J., Guarino, L., Jarvis, A. y Struik, P. C. (2014). Increasing Homogeneity in Global Food Supplies and the Implications for Food Security. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(11), 4001-4006. 10.1073/pnas.1313490111

- Kinzer, S. (2008). *All the Shah's Men: An American Coup and the Roots of Middle East Terror*. John Wiley & Sons.
- Kubiszewski, I., Costanza, R., Franco, C., Lawn, P., Talberth, J., Jackson, T. y Aylmer, C. (2013). Beyond GDP: Measuring and Achieving Global Genuine Progress. *Ecological Economics*, 93, 57-68.
- Lang, M., Bringel, B. y Manahan, M. A. (2023). *Más allá del colonialismo verde: justicia global y geopolítica de las transiciones ecosociales*. CLACSO.
- Latouche, S. (2007). De-growth: An Electoral Stake. *The International Journal of Inclusive Democracy*, 3(1), 14-18.
- Latouche, S. (2009). *Farewell to Growth*. Policy Press.
- Lehmann, H., Hinske, C., de Margerie, V. y Slaveikova Nikolova, A. (2023). *The Impossibilities of the Circular Economy: Separating Aspirations from Reality*. Taylor & Francis.
- Marin, D., Dunlap, A. y Roels, R. (2023). Sacrifice Zone for the Sustainability? *European Environmental Bureau*. <https://eeb.org/wp-content/uploads/2023/11/Sacrifice-Zones-final-layout.pdf>
- McInerney, F. A. y Wing, S. L. (2011). The Paleocene-Eocene Thermal Maximum: A Perturbation of Carbon Cycle, Climate, and Biosphere with Implications for the Future. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 39(1), 489-516.
- Mearsheimer, J. J. (2014). Why the Ukraine Crisis is the West's Fault: The Liberal Delusions that Provoked Putin. *Foreign Affairs*, 93(5), 77-89.
- Merino, A. (27 de octubre de 2021). El mapa del petróleo y el gas en el golfo Pérsico. *El orden mundial-eom*. <https://elordenmundial.com/mapas-y-graficos/mapa-petroleo-gas-golfo-persico/>
- Michaux, S. P. (2021): Assessment of the Extra Capacity Required of Alternative Energy Electrical Power Systems to Completely Replace Fossil Fuels. *GTK Reports – Report Serial*, 42. [https://tupa.gtk.fi/raportti/arkisto/42\\_2021.pdf](https://tupa.gtk.fi/raportti/arkisto/42_2021.pdf)
- Michaux, S. P. (2023). The Resource Balanced Economy to Meet the Twin Challenges of Phasing Out Fossil Fuel Energy and Self-sufficient Supply of Raw Materials.

*BSR Policy Brief Series, Centrum Balticum*. [https://www.centrumbalticum.org/files/5598/BSR\\_Policy\\_Briefing\\_2\\_2023.pdf](https://www.centrumbalticum.org/files/5598/BSR_Policy_Briefing_2_2023.pdf)

Morgan, T. (2022). Understanding Inflation. *Surplus Energy Economics*. <https://surpluse-nergyeconomics.wordpress.com/2022/06/24/233-understanding-inflation/>

Morris, B. (2008). *1948: A History of the First Arab-Israeli War*. Yale University Press.

Murphy Jr., T. W. (2021). *Energy and Human Ambitions on a Finite Planet*. [https://escholarship.org/uc/energy\\_ambitions](https://escholarship.org/uc/energy_ambitions)

Murphy Jr, T. W., Murphy, D. J., Love, T. F., LeHew, M. L. y McCall, B. J. (2021). Modernity is Incompatible with Planetary Limits: Developing a PLAN for the Future. *Energy Research & Social Science*, 81, 102239.

Murray, W. y Woods, K. M. (2014). *The Iran-Iraq War: A Military and Strategic History*. Cambridge University Press.

National Aeronautics and Space Administration (NASA) (2020). *Temperatura vs actividad solar*. [https://climate.nasa.gov/climate\\_resources/277/temperatura-vs-actividad-solar/](https://climate.nasa.gov/climate_resources/277/temperatura-vs-actividad-solar/)

National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) (2022). *National Centers for Environmental Information*. <https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/monthly-report/global/202213>

Naydenov, V. y Maslov, A. (2014). Sobre la perspectiva del estado ucraniano. *Revista Sputnik*. <https://sputnik87.wordpress.com/2014/03/01/sobre-las-perspectivas-del-estado-ucraniano/>

Our World in Data (2023). *Fertilizer Use by Nutrient, World, 1961 to 2021*. <https://ourworldindata.org/grapher/fertilizer-use-nutrient>

Oweiss, I. M. (1984). Petrodollar Surpluses: Trends and Economic Impact. *The Journal of Energy and Development*, 9(2), 177-202. <https://www.jstor.org/stable/24807042>

Owen, J. R., Kemp, D., Lechner, A. M., Harris, J., Zhang, R. y Lèbre, É. (2023). Energy Transition Minerals and their Intersection with Land-connected Peoples. *Nature Sustainability*, 6(2), 203-211. <https://doi.org/10.1038/s41893-022-00994-6>

- Patel, R. (2021). Agroecology is the Solution to World Hunger. *Scientific American*, 22. <https://www.scientificamerican.com/article/agroecology-is-the-solution-to-world-hunger/>
- Platonova, D. (2021). *The Donbas Conflict in Ukraine: Elites, Protest, and Partition*. Routledge.
- Rana, P. B. y Ji, X. (2020). *China's Belt and Road Initiative*. Palgrave Macmillan.
- REN21 (2022). *Renewables 2022 Global Status Report*. [https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR2022\\_Full\\_Report.pdf](https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR2022_Full_Report.pdf)
- Richardson, K., Steffen, W., Lucht, W., Bendtsen, J., Cornell, S. E., Donges, J. F., Drüke, M., Fetzer, I., Bala, G., von Bloh, W., Feulner, G., Fiedler, S., Gerten, D., Gleeson, T., Hoffmann, M., Huiskamp, W., Kummu, M., Mohan, C., Nogués-Bravo, D., Petri, S., Porkka, M., Rahmstorf, S., Schaphoff, S., Thonicke, K., Tobian, A., Virkki, V., Wang-Erlandsson, L., Weber, L. y Rockström, J. (2023). Earth Beyond Six of Nine Planetary Boundaries. *Science Advances*, 9(37). <https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.adh2458>
- Ritchie H., Rosado P., Roser M. (2023). CO<sub>2</sub> and Greenhouse Gas Emissions. *Our World in Data*. <https://ourworldindata.org/co2-and-greenhouse-gas-emissions>
- Roberts, G. (2022). 'Now or Never': The Immediate Origins of Putin's Preventative War on Ukraine. *Journal of Military and Strategic Studies*, 22(2). <https://jmss.org/article/view/76584>
- Rockström, J., Steffen, W., Noone, K., Persson, Å., Chapin III, F. S., Lambin, E. y Foley, J. (2009). Planetary Boundaries: Exploring the Safe Operating Space for Humanity. *Ecology and Society*, 14(2). <http://www.ecologyandsociety.org/vol14/iss2/art32/>
- Ryszko, U., Rusek, P., y Kołodyńska, D. (2023). Quality of Phosphate Rocks from Various Deposits Used in Wet Phosphoric Acid and P-fertilizer Production. *Materials*, 16(2), 793.
- S/a (2024). How Many Cars Are There In The World in 2024? *Hedges Company*. <https://hedgescompany.com/blog/2021/06/how-many-cars-are-there-in-the-world/>

- Scott, D. N. y Smith, A. A. (2017). "Sacrifice Zones" in the Green Energy Economy: Toward an Environmental Justice Framework. *McGill Law Journal*, 62(3), 861-898.
- Seibert, M. K. y Rees, W. E. (2021). Through the Eye of a Needle: An Eco-heterodox Perspective on the Renewable Energy Transition. *Energies*, 14(15), 4508.
- Sekera, J. y Lichtenberger, A. (2020). Assessing Carbon Capture: Public Policy, Science, and Societal Need. *Biophysical Economics and Sustainability*, 5(14), <https://doi.org/10.1007/s41247-020-00080-5>
- Serkan, A. y Simpson-Bell, Ch. (2021). us Dollar Share of Global Foreign Exchange Reserves Drops to 25-Year Low. *IMF*. <https://www.imf.org/en/Blogs/Articles/2021/05/05/blog-us-dollar-share-of-global-foreign-exchange-reserves-drops-to-25-year-low>
- Sieren, F. (21 de septiembre de 2019). La Nueva Vía de la Seda china: ¿oportunidad o amenaza? *Deutsche Welle*. <https://www.dw.com/es/la-nueva-ruta-de-la-seda-china-oportunidad-o-amenaza/a-50527079>
- Shaikh, A. (16 de junio de 2017). The Bad News? The World Will Begin Running Out of Water By 2050. The Good News? It's Not 2050 Yet. *Un Dispatch*. <https://undispatch.com/bad-news-world-will-begin-running-water-2050-good-news-not-2050-yet/>
- Shand H., Wetter K. J., Chowdry K. y ETC Group (14 de diciembre de 2022). Barones de la Alimentación 2022 – Lucro con las crisis, digitalización y nuevo poder corporativo. *etc Group*. <https://www.etcgroup.org/es/content/food-barons-2022-es>
- Smil, V. (2005). *Energy at the Crossroads: Global Perspectives and Uncertainties*. The MIT Press.
- Smith, S. C. (2016). *Reassessing Suez 1956: New Perspectives on the Crisis and its Aftermath*. Routledge.
- Steffen, W., Broadgate, W., Deutsch, L., Gaffney, O., & Ludwig, C. (2015). The Trajectory of the Anthropocene: The Great Acceleration. *The Anthropocene Review*, 2(1), 81-98.

- Stuenkel, O. (2020). *The BRICS and the Future of Global Order*. Rowman & Littlefield.
- Swain, F. (11 de marzo de 2021). The Device that Reverses CO<sub>2</sub> Emissions. *BBC*. <https://www.bbc.com/future/article/20210310-the-trillion-dollar-plan-to-capture-co2>
- Tainter, J. (1988). *The Collapse of Complex Societies*. Cambridge University Press.
- Tainter, J. A. Y Patzek T. W. (2012). *Drilling Down: The Gulf Oil Debacle and Our Energy Dilemma*. Springer.
- Tang, F. H., Lenzen, M., McBratney, A. y Maggi, F. (2021). Risk of Pesticide Pollution at the Global Scale. *Nature Geoscience*, 14(4), 206-210.
- Tareq, Y. I. (1976). *The Arab Left*. Syracuse University Press.
- Troszak, T. A. (2021). The Hidden Costs of Solar Photovoltaic Power. *Energy Highlights*, 16, [https://www.researchgate.net/publication/351009739\\_The\\_hidden\\_costs\\_of\\_solar\\_photovoltaic\\_power](https://www.researchgate.net/publication/351009739_The_hidden_costs_of_solar_photovoltaic_power)
- Tverberg, G. (2015). *How Our Energy Problem Leads to a Debt Collapse Problema. Our Finite World*. <https://ourfiniteworld.com/2015/09/14/how-our-energy-problem-leads-to-a-debt-collapse-problem/>
- Tverberg, G. (2022). *Is the Debt Bubble Supporting the World Economy in Danger of Collapsing? Our Finite World*. <https://ourfiniteworld.com/2022/05/17/is-the-debt-bubble-supporting-the-world-economy-in-danger-of-collapsing/>
- United Nations (2022). *Conflict-related Civilian Casualties in Ukraine*. Oficina del Alto Comisionado de Naciones Unidas para los Derechos Humanos. <https://ukraine.un.org/en/168060-conflict-related-civilian-casualties-ukraine>
- U.S. Energy Information Agency (EIA) (2013). *World Energy Outlook 2013*, <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2013>
- U.S. Energy Information Agency (EIA) (2021). *Monthly Energy Review*. <https://www.eia.gov/totalenergy/data/monthly/>
- U.S. Energy Information Agency (EIA) (2022). *World Energy Outlook 2022*. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022>

Valero, A., Valero, A. y Calvo, G. (2021). *Material Limits of the Energy Transition: Thanatia*. Springer.

Velasco-Fernández, R., y Pérez, A. (2023). *Minerales críticos en conflicto y alternativas para la justicia global: el caso del vehículo eléctrico*. *Medicus Mundi Mediterranea*. <https://medicusmundi.es/es/actualidad/publicaciones/publicaciones/503>

Wessels, T. (2013). *The Myth of Progress: Toward a Sustainable Future*. University Press of New England. <https://doi.org/10.2307/j.ctv1xx9mnj>

World Resource Institute (2005). *Climate Analysis Indicators Tool (CAIT)*. [https://www.climatewatchdata.org/?utm\\_source=cait.wri.org&utm\\_medium=redirect](https://www.climatewatchdata.org/?utm_source=cait.wri.org&utm_medium=redirect)







# Sobre el autor y la autora

---

## LUCA FERRARI

Doctor en Ciencias de la Tierra por la Universidad de Milán, es también investigador titular C en el Instituto de Geociencias de la UNAM, investigador del Sistema Nacional de Investigadores nivel III, miembro de la Academia Mexicana de Ciencias y *fellow* de la Geological Society of America. Ha sido presidente de la Unión Geofísica Mexicana y en 2015 fue galardonado con el Premio Universidad Nacional. Entre 2021 y 2024 fue cocordinador del Programa Nacional Estratégico de Energía y Cambio Climático, del Conahcyt.

Su tema de investigación es la geología de México, con aplicaciones para la exploración de recursos geotérmicos y minerales. Desde 2005 se ha dedicado también al análisis del sistema energético nacional y global, y sus implicaciones para el futuro y la sustentabilidad. Ha impartido más de 150 conferencias por invitación en universidades y centros de investigación públicos y privados en todo el país. Ha impartido cursos sobre geología y energía en licenciaturas y posgrados de la UNAM, y ha publicado un centenar de artículos de divulgación científica.

## HIPÓLITA RAMAJO GARCÍA

Cuenta con maestría en Física, por la Universidad de Barcelona, y en Hidrología Subterránea, por la Universidad Politécnica de Cataluña. Tiene estudios de doctorado en Educación y una trayectoria de 21 años como maestra y tutora en distintas universidades mexicanas como UNLA, UMSNH y la UNAM. Entre sus intereses de investigación se encuentran, por un lado, la geoestadística, la modelación numérica, el flujo multifásico, la computación y programación aplicada y, por el otro, la educación interdisciplinar y compleja, la práctica docente y las tutorías.

Ha publicado artículos en diversas revistas internacionales, así como la traducción del libro *Environmental Isotopes in the Hydrological Cycle: Principles and Applications*. Sus trabajos de investigación se han presentado en diversos foros en España, Francia, Suiza, Australia y México.







# Índice de figuras y tablas

---

## Primera parte: Conceptos generales

### Capítulo 1. Energía y civilización

<b>Figura 1.</b>	Evolución del consumo energético en la civilización	19
<b>Figura 2.</b>	Evolución de la matriz energética de Inglaterra en el periodo 1561-1859 y comparación con Italia para 1861-1870	19
<b>Figura 3.</b>	Evolución del consumo global de energía primaria absoluta por fuente	20
<b>Figura 4.</b>	Consumo absoluto de energía por fuente entre 1965 y 2022	21
<b>Figura 5.</b>	Inversión en nueva infraestructura de energía por fuente entre 2019-2021 en miles de millones de dólares de 2019	22
<b>Figura 6.</b>	Crecimiento poblacional del año 1000 a 2010 (en escala logarítmica) mostrando las tasas de crecimiento anual por periodos seleccionados	23
<b>Figura 7.</b>	A) Comparativa entre el consumo mundial de energía y el PIB para el período de 1990 a 2020 B) Relación entre el crecimiento del consumo de materias primas (huella material) y el crecimiento del pib para el periodo 1990-2013	24 20
<b>Figura 8.</b>	A) Variación porcentual anual de las emisiones de CO <sub>2</sub> y de la economía global (PIB) en el periodo 1961 a 2021	25

	B) Variaciones de las emisiones y eventos económicos y geopolíticos	25
<b>Figura 9.</b>	Crecimiento económico diferencial de los países del centro (Estados Unidos, Canadá, Europa Occidental, Australia, Nueva Zelandia y Japón) versus la periferia (resto del mundo)	27
<b>Figura 10.</b>	Consumo de energía per cápita en 2022	28
<b>Figura 11.</b>	Inequidad en las emisiones GEI a nivel mundial	28
<b>Figura 12.</b>	Tres tipos de tasa de crecimiento	30
<b>Figura 13.</b>	La gran aceleración	31
<b>Figura 14.</b>	A) y B) Consumo de energía de los Estados Unidos desde 1650	33
<b>Figura 15.</b>	Uso del aceite de ballena versus producción de petróleo	35

### Capítulo 2. Energía y termodinámica

<b>Figura 16.</b>	Procedencia de la energía en el planeta Tierra	42
<b>Figura 17.</b>	Máquina de vapor	46
<b>Figura 18.</b>	Esquema de una central térmica	46
<b>Figura 19.</b>	Eficiencia energética de distintos tipos de focos	49
<b>Figura 20.</b>	Esquema con las conversiones entre las diferentes formas de energía	50
<b>Figura 21.</b>	Esquema de las transformaciones de energía desde una central hidroeléctrica hasta el uso final de la electricidad	51

### Capítulo 3. Variables relevantes para medir la eficiencia energética de las fuentes y sus límites

<b>Figura 22.</b>	Evolución de las técnicas de extracción de los recursos debido a los retornos decrecientes	58
<b>Figura 23.</b>	Curva elaborada por M. K. Hubbert en 1956	59
<b>Figura 24.</b>	Curva de producción de petróleo de los Estados Unidos donde se muestran los diferentes picos de producción hasta 2019	60
<b>Figura 25.</b>	Volumen (escala a la izquierda) y número (escala de la derecha) de los campos petroleros gigantes descubiertos en cada década desde 1850	61

<b>Figura 26.</b> Previsiones de la producción de petróleo realizadas por la IEA en 2017	62
<b>Figura 27.</b> Volumen de petróleo y gas descubierto entre 2015 y 2021	63
<b>Figura 28.</b> Tasa de crecimiento de la producción mundial de petróleo por periodos	64
<b>Figura 29.</b> Evolución histórica de los precios (escala a la derecha) y producción del petróleo por tipo entre 2000 y 2022	65
<b>Figura 30.</b> Inversiones en exploración y producción de la industria petrolera entre 2010 y 2021	66
<b>Figura 31.</b> Comparación entre los principales productores de petróleo en 2014 en cuanto a número de pozos en operación y longitud de perforación	67
<b>Figura 32.</b> Estimación de la EROEI para el caso de la producción de petróleo en los Estados Unidos	68
<b>Figura 33.</b> Disminución de la ley mineral (concentración del recurso) para cobre, oro, plomo, zinc, uranio, níquel diamantes y plata en Australia desde 1840 a 2010	69
<b>Figura 34.</b> Escenario base del estudio <i>The Limits to Growth</i>	71

#### Capítulo 4. Matriz energética y flujos de energía

<b>Figura 35.</b> Matriz de energía global para los años 1973 y 2019	76
<b>Figura 36.</b> Evolución de la matriz energética del 2000 al 2022	77
<b>Figura 37.</b> Generación de electricidad en 1973 y 2019	78
<b>Figura 38.</b> Consumo de energía final por región	79
<b>Figura 39.</b> Clasificación de los mayores productores de las cinco principales fuentes de energía en 2018	80
<b>Figura 40.</b> Consumo de energía total (CET), población y Producto Interior Bruto (PIB) de los cinco mayores consumidores de energía en 2018	81
<b>Figura 41.</b> Producción mundial 1973 y 2020 de petróleo	82
<b>Figura 42.</b> Producción mundial 1973 y 2020 de gas natural	83
<b>Figura 43.</b> Producción mundial 1973 y 2020 de carbón	84
<b>Figura 44.</b> Generación mundial 1973 y 2020 de energía nuclear	85
<b>Figura 45.</b> Generación mundial 1973 y 2020 de energía hidroeléctrica	86
<b>Figura 46.</b> Generación eléctrica mundial 2005 y 2019 procedente de energía eólica	87

<b>Figura 47.</b>	Generación eléctrica mundial 2005 y 2019 de energía solar fotovoltaica	88
<b>Figura 48.</b>	Capacidad instalada de centrales geotérmicas en 2021 y crecimiento en 2022	89
<b>Figura 49.</b>	Diagrama de Sankey del flujo de energía para los Estados Unidos en 2022	90
<b>Figura 50.</b>	Generación de energía eléctrica de Alemania por fuente en 2022 (en % y en valor absoluto en TWh)	91
<b>Figura 51.</b>	Diagrama de flujo del sistema energético mexicano para 2020	93
<b>Figura 52.</b>	Efectos del covid-19 en el sector de la energía	94

## Segunda parte: Fuentes primarias de energía

### Capítulo 5. Combustibles fósiles

<b>Figura 1.</b>	Fases del proceso de formación de los hidrocarburos	103
<b>Figura 2.</b>	a) Transformación de la materia orgánica en petróleo y gas en función de la profundidad; b) Ampliación mostrando las ventanas de presión y temperatura de formación y estabilidad de petróleo y gas	104
<b>Figura 3.</b>	Tipos de trampas geológicas en las que se pueden acumular los hidrocarburos	107
<b>Figura 4.</b>	Clasificación del petróleo en grados API	108
<b>Figura 5.</b>	Clasificación de los diferentes petróleos a nivel mundial dependiendo del contenido en sulfuros y de los grados API	109
<b>Figura 6.</b>	Volúmenes versus probabilidad de extracción de petróleo	111
<b>Figura 7.</b>	Proceso de exploración y explotación del petróleo	112
<b>Figura 8.</b>	Perfil de producción de petróleo y agua con recuperación secundaria en el campo gigante de Jay en Florida, EE.UU.	114
<b>Figura 9.</b>	Producción diaria de petróleo por clase de yacimientos (en miles de barriles diarios - b/d) y porcentaje relativo	115
<b>Figura 10.</b>	Esquema de la destilación fraccionada (refinación) del petróleo	116

<b>Figura 11.</b>	Procesamiento del gas y sus productos	117
<b>Figura 12.</b>	Mapa esquemático donde se muestran las principales cuencas petroleras del mundo	118
<b>Figura 13.</b>	Áreas prospectivas de petróleo y gas en el Ártico	119
<b>Figura 14.</b>	Principales flujos de petróleo (a) en millones de toneladas y de gas natural (b) en miles de millones de pies cúbicos para 2021	121
<b>Figura 15.</b>	Clasificación del carbón	123
<b>Figura 16.</b>	Principales depósitos y tipo de carbón en el mundo	124
<b>Figura 17.</b>	Reservas de carbón a nivel mundial	126
<b>Figura 18.</b>	Comercio internacional de carbón en megatoneladas	127
<b>Figura 19.</b>	Esquema del uso de carbón en una central de ciclo combinado	128
<b>Figura 20.</b>	Evolución de la extracción de petróleo costa afuera en Brasil	130
<b>Figura 21.</b>	Distribución mundial de diferentes tipos de petróleo no convencional	131
<b>Figura 22.</b>	Cuenca de petróleo ultrapesado de la faja del Orinoco, en Venezuela	132
<b>Figura 23.</b>	Distribución de las arenas bituminosas de Alberta, Canadá	134
<b>Figura 24.</b>	Petróleo y gas convencional y no convencional	135
<b>Figura 25.</b>	Explotación de petróleo y gas de lutitas por <i>fracking</i>	136
<b>Figura 26.</b>	Yacimientos de petróleo y gas de lutitas en los Estados Unidos	138
<b>Figura 27.</b>	Evolución de la producción de petróleo no convencionales en cinco <i>plays</i> de los EE. UU. para pozos perforados entre el 2017 y el 2019	139
<b>Figura 28.</b>	Regiones con potencial de extracción de petróleo de aguas profundas y ultraprofundas	142
<b>Tabla 1.</b>	Diferencias entre el petróleo y gas convencional y no convencional	137

## Capítulo 6. Energía nuclear

<b>Figura 29.</b>	Desintegración alfa	152
<b>Figura 30.</b>	Desintegración beta	153

<b>Figura 31.</b>	Desintegración gamma	154
<b>Figura 32.</b>	Tipos de reacciones nucleares	155
<b>Figura 33.</b>	Esquema general de una central nuclear	161
<b>Figura 34.</b>	Generación de electricidad mundial por medio de energía nuclear	167
<b>Figura 35.</b>	Flujo de efectivo neto por año (escala de la izquierda) y acumulado (escala de la derecha) para compañías de petróleo de lutitas operando en el play Bakken desde enero 2009 a diciembre 2020	173
<b>Figura 36.</b>	Producción y consumo de carbón en los Estados Unidos entre 1950 y 2019	174
<b>Figura 37.</b>	Escala INES (International Nuclear Event Scale) de la Organización Internacional de Energía Atómica	175
<b>Figura 38.</b>	Enriquecimiento de uranio para diferentes usos	176
<b>Tabla 2.</b>	Diferencias entre fisión nuclear y fusión nuclear	156
<b>Tabla 3.</b>	Tiempos de desintegración de los núcleos fisibles	157
<b>Tabla 4.</b>	Producción de uranio a nivel mundial	158
<b>Tabla 5.</b>	Características de los diferentes tipos de reactores nucleares	162

## Capítulo 7. Fuentes renovables

<b>Figura 39.</b>	Molinos de agua tradicionales: A) Barbegal, Francia; B) Tannehill, Alabama	182
<b>Figura 40.</b>	Terrazas de travertino formadas por la precipitación de calcita en Pamukkale, Turquía	184
<b>Figura 41.</b>	Molinos de viento antiguos: A) molinos verticales de la civilización persa (actual Irán); B) molinos de viento tradicionales de China, a principio del siglo xx; C) Molino giratorio de Kinderdijk, Holanda; D) molino de viento mediterráneo en Murcia, España	185
<b>Figura 42.</b>	El <i>Espejo ustorio</i> de Arquímedes	187
<b>Figura 43.</b>	Radiación solar fuera de la atmósfera y a nivel del mar	187
<b>Figura 44.</b>	Balance energético de la Tierra	188
<b>Figura 45.</b>	Principio de una celda fotovoltaica	191
<b>Figura 46.</b>	Tipos de tecnologías termosolares	193
<b>Figura 47.</b>	Esquema de una central termosolar de concentración con torre central	194

<b>Figura 48.</b> Crecimiento de la capacidad solar fotovoltaica instalada por países desde 2012	196
<b>Figura 49.</b> Ciclo hidrológico y generación de electricidad	197
<b>Figura 50.</b> Tipología de turbinas	199
<b>Figura 51.</b> Principales países con capacidad hidroeléctrica instalada en el mundo	200
<b>Figura 52.</b> Funcionamiento de un aerogenerador	201
<b>Figura 53.</b> Evolución del tamaño y capacidad de los aerogeneradores desde el siglo XIX, hasta la actualidad	102
<b>Figura 54.</b> Velocidad promedio del viento a nivel mundial	204
<b>Figura 55.</b> Evolución de la capacidad eólica en los primeros seis países para 2022	205
<b>Figura 56.</b> Generación y transporte del calor al interior de la Tierra	207
<b>Figura 57.</b> Gradiente geotérmico	208
<b>Figura 58.</b> Principales zonas geotérmicas del planeta Tierra (naranja) y principales campos productores de electricidad en operación (círculos)	209
<b>Figura 59.</b> Esquema de un reservorio geotérmico	210
<b>Figura 60.</b> Esquema de una central geotérmica	211
<b>Figura 61.</b> Usos finales de la biomasa y sus procesos involucrados	215
<b>Figura 62.</b> Esquema de un biodigestor estándar	221
<b>Figura 63.</b> Contribución de la biomasa en el consumo de energía final a nivel mundial	222
<b>Figura 64.</b> Evolución de la producción de biocombustibles por regiones	223
<b>Figura 65.</b> Densidad energética de diferentes fuentes de generación eléctrica medidas en watts por m <sup>2</sup>	226
<b>Figura 66.</b> Factor de planta de diferentes fuentes de energía para producción de electricidad	227
<b>Figura 67.</b> Sistema de almacenamiento de energía	228
<b>Figura 68.</b> Materiales requeridos para la construcción de la infraestructura de diferentes tecnologías de generación eléctrica	230
<b>Figura 69.</b> Comparación entre la generación de electricidad en el 2012 y el 2022	233
<b>Figura 70.</b> Penetración de las fuentes renovables en los distintos usos finales a nivel mundial en el 2020	234

<b>Figura 71.</b>	Esquema de producción del hidrógeno verde	236
<b>Figura 72.</b>	Requerimientos de minerales para tecnologías renovables por escenario	241
<b>Tabla 6.</b>	Cálculo de la constancia solar	189

## Capítulo 8. Estudio de caso

<b>Figura 73.</b>	Oferta interna bruta de energía, pérdidas en transformación y balance nacional de energía en México para 2022	252
<b>Figura 74.</b>	Consumo final de energía en México por sector	253
<b>Figura 75.</b>	Generación eléctrica de México por fuente en 2022	254
<b>Figura 76.</b>	Provincias petroleras de México	254
<b>Figura 77.</b>	Evolución de la producción petrolera de México desde 1960 hasta 2023	257
<b>Figura 78.</b>	A) Volumen y número de campos descubiertos de 1900 a 2015; B) Profundidad promedio de los campos descubiertos en México	258
<b>Figura 79.</b>	Evolución de la producción de gas en México	259
<b>Figura 80.</b>	Ubicación del petróleo no convencional y de aguas profundas en México de acuerdo con el plan quinquenal de licitación del sexenio anterior	260
<b>Figura 81.</b>	Ubicación de las zonas con potencial carbonífero de México	263
<b>Figura 82.</b>	Campos geotérmicos y flujo de calor en México	266
<b>Figura 83.</b>	Mapa de México de los parques eólicos en operación antes y a partir de 2016, y del factor de planta de la generación eólica estimado por el <i>Atlas de zonas con alto potencial de energías limpias</i>	268

## Tercera parte: Crisis civilizatoria y alternativa

### Capítulo 9. Geopolítica de la energía

<b>Figura 1.</b>	Expansión del Imperio romano	284
<b>Figura 2.</b>	Mapa de las reservas declaradas de petróleo para 2018	286

<b>Figura 3.</b>	Mapa del acuerdo secreto entre franceses e ingleses para dividirse el Oriente Medio en 1916	287
<b>Figura 4.</b>	Evolución de la producción, consumo e importación de petróleo de los Estados Unidos entre 1950 y 2020	288
<b>Figura 5.</b>	Expansión territorial de Israel desde 1947	291
<b>Figura 6.</b>	Evolución del precio del petróleo nominal y ajustado por la inflación (a noviembre 2023)	293
<b>Figura 7.</b>	Principales campos de petróleo y gas en el golfo Pérsico	294
<b>Figura 8.</b>	Separación de la Unión Soviética	296
<b>Figura 9.</b>	Principales cuencas productoras y ductos de petróleo y gas de Rusia y países de la ex Unión Soviética	297
<b>Figura 10.</b>	Países de la OTAN según su año de ingreso	298
<b>Figura 11.</b>	Territorios anexados a Ucrania en la historia	299
<b>Figura 12.</b>	Preferencias políticas y lengua materna en Ucrania	300
<b>Figura 13.</b>	Procedencia del gas que consumía Europa hasta 2022	302
<b>Figura 14.</b>	Mapa del proyecto de integración euroasiática de China “el nuevo camino de la seda”	304

### Capítulo 10. La civilización industrial frente al declive de las fuentes fósiles

<b>Figura 15.</b>	Fuentes de energía en el transporte	310
<b>Figura 16.</b>	Consumo de fertilizantes y crecimiento de la población mundial suportada por la agricultura basada en fertilizantes nitrogenados	318
<b>Figura 17.</b>	Producción de fósforo a nivel mundial y principales países productores	319
<b>Figura 18.</b>	Cálculo del contenido energético incluido en la comida para los Estados Unidos	321
<b>Tabla 7.</b>	Geografía de los minerales usados para elaborar baterías	316

### Capítulo 11. Crisis multidimensional

<b>Figura 19.</b>	Evolución de las variables que controlan los límites planetarios entre 2009 y 2023	328
-------------------	--	-----

<b>Figura 20.</b>	Cambios en la temperatura de la superficie terrestre y la energía del sol que recibe la Tierra en vatios por metro cuadrado desde 1880	331
<b>Figura 21.</b>	Emisiones globales de gases de efecto invernadero por sector	332
<b>Figura 22.</b>	Concentración de CO <sub>2</sub> en la atmósfera desde 1960	333
<b>Figura 23.</b>	Evolución del crecimiento del PIB global y rol relativo de la eficiencia/mejora tecnológica versus el consumo de energía	335
<b>Figura 24.</b>	Energía per cápita a nivel mundial de 1965 a 2022	336
<b>Figura 25.</b>	Crecimiento del valor de la economía real y de los activos financieros en dólares de 2022	337
<b>Figura 26.</b>	Crecimiento de la deuda global en dólares y como porcentaje del PIB	338
<b>Tabla 8.</b>	Países con mayor deuda soberana	339

## Capítulo 12. Desigualdades inter- e intra- nacionales en el uso de la energía y en las emisiones

<b>Figura 27.</b>	Comparación de emisiones per cápita de distintos grupos de ingreso en 1990, 2015 y 2030	351
<b>Figura 28.</b>	Porcentaje de proyectos de diferentes minerales para la industria renovable localizados en territorios expuestos a estrés hídrico, escasez alimentaria y conflictos	352

## Capítulo 13. Alternativas al colapso de la civilización industrial (visiones de futuro)

<b>Figura 29.</b>	Elementos de la transformación individual para alcanzar una transformación global	371
-------------------	---	-----





# Índice general

---

Presentación	7
Agradecimientos	11

## Primera parte. Conceptos generales

### Capítulo 1. Energía y civilización

1.1 Aprendizajes esperados	15
1.2 Importancia de la energía en la civilización	16
Preguntas e imágenes motivadoras	16
La energía en la historia y el crecimiento exponencial	18
Crisis civilizatoria	26
Resumen	29
1.3 Actividades y estrategias sugeridas	29
Actividad 1. Eras históricas de acuerdo con las fuentes explotadas	29
Actividad 2. Era del petróleo y de las fuentes renovables	30
Actividad 3. Crecimiento exponencial	31
Actividad 4. Crecimiento exponencial	31
Actividad 5. Tres crisis principales	34
1.4 Diario reflexivo	34

### Capítulo 2. Energía y termodinámica

2.1 Aprendizajes esperados	39
Recuperación de conceptos	39

2.2 Termodinámica	41
Variables relacionadas con la termodinámica	41
Leyes de la termodinámica	43
Ley cero de la termodinámica	45
Primera ley de la termodinámica	45
Segunda ley de la termodinámica	47
Tipos de eficiencias	47
2.3 Actividades y estrategias sugeridas	48
Actividad 1. Cálculos previos	48
Actividad 2. Transformaciones de energía	49
Actividad 3. Cálculos de mayor complejidad	53
2.4 Diario reflexivo	54

### Capítulo 3. Variables relevantes para medir la eficiencia energética de las fuentes y sus límites

3.1 Aprendizajes esperados	57
3.2 Límites del crecimiento y retornos decrecientes	58
Preguntas e imágenes motivadoras	58
Límites de crecimiento	59
Tasa de retorno energético	68
Ley decreciente en la minería	69
3.3 Actividades y estrategias sugeridas	70
Actividad 1. Análisis de la producción de petróleo de lutitas de los Estados Unidos	70
3.4 Diario reflexivo	71

### Capítulo 4. Matriz energética y flujos de energía

4.1 Aprendizajes esperados	75
4.2 Matriz energética y flujos de energía	76
Preguntas e imágenes motivadoras	76
Evolución de la matriz energética mundial	77
Petróleo	82
Gas natural	83
Carbón	84
Nuclear	85

Energía hidroeléctrica	86
Energía eólica	87
Energía solar fotovoltaica	88
Geotermia	88
Flujos energéticos	89
4.3 Actividades y estrategias sugeridas	90
Actividad 1. Base de datos de energía ( <i>Energy Institute</i> )	90
Actividad 2. Caso de Alemania	91
Actividad 3. Diagramas de flujo	93
4.4 Diario reflexivo	94
Referencias	95

## Segunda parte. Fuentes primarias de energía

### Capítulo 5. Combustibles fósiles

5.1 Aprendizajes esperados	101
5.2 Petróleo y gas	101
Preguntas e imágenes motivadoras	101
Formación de petróleo y gas convencionales	103
Clasificación del petróleo y de las reservas	108
Exploración, producción y recuperación mejorada de petróleo y gas	111
Refinación de petróleo y gas	115
Ubicación de las reservas de petróleo y gas en el mundo	118
Flujos de petróleo y gas a nivel global	120
5.3 Carbón	122
Preguntas e imágenes motivadoras	122
Generación del carbón	123
Clasificación del carbón y sus usos	124
Explotación de carbón	124
Reservas y flujos de carbón a nivel mundial	125
Usos del carbón	127
5.4 Hidrocarburos no convencionales	129
Preguntas e imágenes motivadoras	129
Crudo pesado, ultrapesado y arenas bituminosas	132
Petróleo y gas de lutitas	135
Petróleo de aguas profundas	141
5.5 Actividades y estrategias sugeridas	143

Actividad 1. Confiabilidad de las reservas de petróleo	143
Actividad 2. Petróleo y gas en México	143
Actividad 3. Carbón y emisiones de gases de efecto invernadero	144
Actividad 4. Comparación de los combustibles fósiles	145

## Capítulo 6. Energía nuclear

6.1 Preguntas e imágenes motivadoras	149
6.2 Antecedentes históricos	150
Evolución de los modelos atómicos	150
Evolución del conocimiento sobre radiación nuclear	151
6.3 Conceptos previos	151
Desintegración alfa	152
Desintegración beta	153
Desintegración gamma	153
Tipos de reacciones nucleares	154
Reacciones nucleares	155
6.4 Uranio: minería y procesamiento	158
6.5 La fuente nuclear para la generación de electricidad	159
Reactores nucleares	160
6.6 Ventajas de la energía nuclear	162
6.7 Problemas de la energía nuclear	163
Disponibilidad del combustible	163
Gestión de residuos	164
Requerimiento de materiales	165
Costos de la fuente nuclear	165
6.8 Panorama mundial de la energía nuclear	166
6.9 Actividades y estrategias sugeridas	168
Actividad 1. Decaimiento radiactivo	168
Actividad 2. Reacción de fisión	170
Actividad 3. Comparación entre la energía liberada por reacciones nucleares y químicas	170
6.10 Reflexiones finales	173
Petróleo no convencional	173
Posible explicación	174
Consumo de carbón en los Estados Unidos	174

## Capítulo 7. Fuentes renovables

7.1 Aprendizajes esperados	181
7.2 Las fuentes renovables antes de la electricidad	181
Energía hidráulica tradicional	182
Energía geotérmica tradicional	183
Energía eólica tradicional	185
Energía solar tradicional	186
7.3 Energía solar	187
Preguntas e imágenes motivadoras	187
Origen de la radiación solar	188
Aprovechamiento de la energía solar para generación eléctrica	190
Situación de la energía solar en el mundo	195
7.4 Energía hidroeléctrica	196
Preguntas e imágenes motivadoras	196
El ciclo hidrológico y su aprovechamiento para la generación eléctrica	197
Clasificación de las centrales hidroeléctricas	198
Los embalses como almacenes de energía	199
La hidroeléctrica en el mundo	199
7.5 Energía eólica	201
Preguntas e imágenes motivadoras	201
Evolución de la energía eolo-eléctrica	201
Limitantes de la energía eólica	203
Situación de la energía eólica mundial	203
7.6 Energía geotérmica	205
Preguntas e imágenes motivadoras	205
Fuente de la energía geotérmica	206
Yacimientos geotérmicos	209
Clasificación de los campos geotérmicos	212
Sistemas hidrotérmicos	212
Sistemas geopresurizados	213
Sistemas roca seca caliente (no convencional)	213
Límites de la geotermia	214
Capacidad instalada y generación eléctrica mundial	214
7.7 Biomasa	215
Preguntas e imágenes motivadoras	215
Clasificación de la biomasa	216

Datos interesantes	216
¿Por qué la eficiencia máxima de la fotosíntesis es de un 5 %?	217
Explotación del recurso biomásico	217
Biocombustibles líquidos	218
Obtención de los biocombustibles líquidos	218
Datos sobre el impacto de los biocombustibles	219
Biocombustibles sólidos	219
Biocombustibles gaseosos	220
Bioelectricidad	222
Contribución de la biomasa en la matriz energética	222
Ventajas y desventajas de la bioenergía	224
7.8 Limitaciones de las fuentes renovables	225
Introducción	225
Densidad energética y factor de planta	225
Límites energéticos y materiales: dependencia de los combustibles fósiles y la minería	229
Límites económicos de las fuentes renovables	232
Las fuentes renovables en los usos finales	233
El hidrógeno como sustituto de las fuentes fósiles y como almacenan de energía: ¿qué tan viable es?	234
7.9 Actividades y estrategias sugeridas	238
Actividad 1. Energía hidroeléctrica	238
Actividad 2. Geotermia	239
Actividad 3. Eólica	240
Actividad 4. Minerales críticos en la tecnología solar y baterías	241
Actividad 5. Biomasa	242
Actividad 6. Comparativa	243
Actividad 7. Generación de electricidad	246
7.10 Reflexiones finales y diario reflexivo	247
Transición energética: ¿una utopía o una realidad?	247

## Capítulo 8: Estudio de caso

8.1 Matriz energética y flujo de energía	251
8.2 Fuentes no renovables	255
Petróleo y gas	255

Hidrocarburos no convencionales	260
Carbón	262
Nuclear	263
8.3 Fuentes renovables	264
Energía hidroeléctrica	264
Energía geotérmica	265
Energía eólica	267
Energía solar	269
8.4 Actividades y estrategias sugeridas	270
Actividad 1. Sistema energético mexicano	270
Actividad 2. Conflictos sociales	271
Referencias	273

### Tercera parte. Crisis civilizatoria y alternativas

#### Capítulo 9. Geopolítica de la energía

9.1 Indagación previa	283
9.2 Conflictos en la era de la biomasa	284
9.3 Conflictos por la energía en la época moderna	286
Los conflictos en el Oriente Medio durante la Guerra Fría (1945 - 1991)	286
El trasfondo de los conflictos de Oriente Medio	289
Las guerras árabe-israelíes de 1948 a 1973	290
El petróleo como arma: los choques petroleros de 1973-1974 y 1979	292
La pugna por el control de los recursos energéticos y materiales de Eurasia después de la caída de la Unión Soviética	295
9.4 Críticas a la narrativa oficial	304
Argumentación 1. El pilar financiero de la geopolítica occidental	304
Argumentación 2. El debilitamiento de la hegemonía americana	305
Reflexión final: conflictos territoriales por conseguir la hegemonía de los recursos energéticos	306

## Capítulo 10. La civilización industrial frente al declive de las fuentes fósiles

10.1 Indagación previa	309
10.2 Sector transporte	309
Distribución de los vehículos en el mundo	311
Flota de barcos mundial	311
10.3 Críticas a la narrativa oficial	312
Argumentación 1. Sustitución de los combustibles fósiles en el transporte	312
Argumentación 2. El coche eléctrico	315
10.4 Impacto del agotamiento de los combustibles fósiles y el sistema agroindustrial	317
Indagación previa	317
Sector agroindustrial	317
10.5 Crítica a la narrativa oficial	321
Argumentación 1. Agroindustria versus agricultura tradicional campesina y agroecología	321
Argumentación 2. Los problemas vinculados a la industrialización de la comida	322

## Capítulo 11. Crisis multidimensional

11.1 Aceleración y Antropoceno	325
Indagación previa	325
La gran aceleración y el Antropoceno	326
11.2 Límites biofísicos	326
Indagación previa	326
Límites planetarios	327
Cambio climático	329
11.3 Crecimiento económico y límites planetarios	334
Indagación previa	334
Pico de la energía y fin del crecimiento económico	334
La financiarización de la economía	337
Fin del crecimiento en un mundo multipolar	339
11.4 Crítica a la narrativa oficial	340
Argumentación 1. Las falsas soluciones tecnológicas al cambio climático	340

Argumentación 2. La falacia de la transición verde basada en un cambio tecnológico	341
Argumentación 3. Los límites de la economía circular	342
Argumentación 4. ¿Qué hay de aquello que no se puede sustituir con fuentes renovables?	343
Argumentación 5. “Sostenible” versus realmente necesario	344
Reflexión final: progreso insano versus progreso sano	345
11.5 Reflexión final: principios a tener en cuenta en lo venidero	346

## Capítulo 12. Desigualdades inter- e intra- nacionales en el uso de la energía y en las emisiones

12.1 Indagación previa	349
12.2 Desigualdad en el uso de la energía y las emisiones	349
12.3 Neocolonialismo e intercambio desigual: transferencia de energía y recursos entre el hemisferio sur y el norte global	353
Indagación previa	353
Transferencia de los recursos energéticos y materiales entre países	353
12.4 Críticas a la narrativa oficial	355
Argumentación 1. Desigualdades descomunales	355
Argumentación 2. El comercio <i>verde</i>	355
12.5 Reflexión final: ¿de dónde debería venir el cambio?	356
El poder de la organización social	356

## Capítulo 13. Alternativas al colapso de la civilización industrial (visiones de futuro)

13.1 Net zero y Green growth	362
Indagación previa	362
Emisiones cero neto y crecimiento verde	362
13.2 Decrecimiento	363
Indagación previa	363
Decrecimiento sostenible	364

13.3 Buen vivir y relocalización	367
Indagación previa	367
Buen vivir	368
13.4 Crítica a la narrativa oficial	369
Argumentación 1. Necesitamos un nuevo plan	369
Reflexión final	370
Referencias	373
Sobre el autor y la autora	387
Índice de figuras y tablas	391



Se terminó de editar en diciembre de 2024  
La edición estuvo al cuidado de la Dirección de Difusión  
Científica del Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y  
Tecnologías. Para su formación se utilizaron las familias  
tipográficas GMX y Montserrat.

El sistema energético global, basado en combustibles fósiles, ha impulsado el desarrollo industrial, pero también nos ha llevado a una crisis ambiental y social sin precedentes. *Energía y sostenibilidad* ofrece una visión interdisciplinaria sobre el uso de la energía, sus implicaciones económicas y políticas, y los desafíos de la transición hacia fuentes renovables. Con un enfoque didáctico y crítico, esta obra está dirigida a docentes, estudiantes y cualquier persona interesada en comprender los retos energéticos del siglo XXI. A través de conceptos clave, actividades y reflexiones, invita a cuestionar la narrativa oficial y construir alternativas sostenibles para el futuro. ¿Es posible un modelo energético justo y viable? Este libro propone herramientas para debatir y construir respuestas.



GOBIERNO DE  
**MÉXICO**



**CONAHCYT**  
CONSEJO NACIONAL DE HUMANIDADES  
Y TECNOLOGÍAS

