

ALEIDA AZAMAR ALONSO

# El multicolor de la energía

Desafíos y oportunidades para la transición energética



## ALEIDA AZAMAR ALONSO



Doctora en Economía Internacional y Desarrollo por la Universidad Complutense de Madrid. Profesora Investigadora de la Universidad Autónoma Metropolitana (UAM). Coordinadora de la Maestría en Sociedades Sustentables de la misma institución. Integrante del Sistema Nacional de Investigadores Nivel II. Ha obtenido diversas distinciones, como el Premio de publicación Miradas Latinoamericanas. Un estado al debate por el Consejo Latinoamericano de Ciencias Sociales (CLACSO) y Siglo XXI (2020). Ha recibido el Premio por investigación de área en tres ocasiones: 2017, 2019 y 2021, y el Premio a la docencia en 2021, todos por la UAM.



Corrección de estilo y cuidado de la edición: Martha Elena Lucero  
Diseño de portada e interiores: Sandra Mejía De la Hoz  
Imagen de la portada: Studioworkstock en Freepik  
Fotos de interiores: Freepik y Flickr (fueron modificados algunos encuadres y tonos)  
Licencia de las imágenes de Flickr en <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/2.0/>

ISBN (publicación electrónica) 978-607-28-3093-6  
ISBN (publicación impresa) 978-607-28-3092-9  
Primera edición, 2024

D.R. © Universidad Autónoma Metropolitana  
Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Xochimilco  
Calzada del Hueso 1100, Colonia Villa Quietud,  
Alcaldía Coyoacán, Ciudad de México. C.P. 04960  
Sección de Publicaciones de la División de Ciencias Sociales y Humanidades.  
Edificio A, 3er piso. Teléfono 55 54 83 70 60  
[pubcsh@gmail.com](mailto:pubcsh@gmail.com) / [pubcsh@correo.xoc.uam.mx](mailto:pubcsh@correo.xoc.uam.mx)  
<http://dcsh.xoc.uam.mx/repdig>  
<http://www.casadelibrosabiertos.uam.mx/index.php/libroelectronico>

Esta publicación es financiada por la Rosa Luxemburg Stiftung (RLS). Oficina regional para México, Centroamérica y Cuba. Las opiniones expresadas en ella no reflejan necesariamente los puntos de vista de la RLS.  
Dirección: Calzada General Anaya 65, Colonia San Diego Churubusco, Alcaldía Coyoacán, C.P. 04120, Ciudad de México, México. Página web: [www.rosalux.org.mx](http://www.rosalux.org.mx)

Esta coedición de la División de Ciencias Sociales y Humanidades de la Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Xochimilco y la Fundación Rosa Luxemburg fue dictaminada a doble ciego por pares académicos expertos en el tema y externos a nuestra Universidad.

Impreso en México / Printed in Mexico



# El multicolor de la energía

Desafíos y oportunidades para la transición energética

*Aleida Azamar Alonso*



Casa abierta al tiempo

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA**  
Unidad Xochimilco

División de Ciencias Sociales y Humanidades

**ROSA  
LUXEMBURG  
STIFTUNG**



### **Universidad Autónoma Metropolitana**

Rector general, José Antonio de los Reyes Heredia

Secretaria general, Norma Rondero López

### **Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Xochimilco**

Rector de Unidad, Francisco Javier Soria López

Secretaria de Unidad, María Angélica Buendía Espinosa

### **División de Ciencias Sociales y Humanidades**

Directora, Esthela Irene Sotelo Núñez

Secretaria académica, María del Pilar Berrios Navarro

Jefe de la Sección de Publicaciones, Miguel Ángel Hinojosa Carranza

### **Comité Editorial**

Araceli Soní Soto (presidenta)

Aleida Azamar Alonso

Dulce Asela Martínez Noriega

Armando Ortiz Tepale

Ruth Ríos Estrada

Héctor Manuel Villarreal Beltrán

Asistente editorial: Varinia Cortés Rodríguez

***A mis padres***

*Por los conocimientos, la comprensión,  
la confianza, la paciencia,  
pero sobre todo por tanto amor.*





Tú no puedes comprar el viento  
Tú no puedes comprar el sol  
Tú no puedes comprar la lluvia  
Tú no puedes comprar el calor...

No puedes comprar mi vida  
(vamos caminando)  
La tierra no se vende

*Latinoamérica*  
Grupo Calle 13



## Índice

Introducción . . . . .	11
Contexto mundial de la energía . . . . .	21
Transiciones energéticas de la humanidad . . . . .	57
La transición energética desde otra mirada . . . . .	77
Minerales esenciales para la transición energética . . . . .	99
Tablero geopolítico por los recursos naturales estratégicos . . . . .	127
El otro costo de las tecnologías para la transición energética . . . . .	163
Bibliografía . . . . .	189
Siglas y abreviaturas. Índice de gráficos, figuras y cuadros . . . . .	209

Jhoan Sebastian Duque Ramirez  
<https://www.flickr.com/photos/128348181@N02/15615006903/>



A low-angle, silhouette photograph of an electrical transformer mounted on a utility pole. The transformer is the central focus, with its cylindrical body and top-mounted insulators clearly visible against a bright, cloudy sky. The utility pole and its various cross-arms, wires, and insulators create a complex network of dark lines that crisscross the frame. The lighting is dramatic, with the sky providing a strong backlight that makes the dark structures stand out. The overall mood is industrial and technical.

# Introducción



En el corazón de nuestra existencia y progreso como civilización, la energía juega un papel central al ser el eje sobre el cual giran nuestras economías, nuestras ciudades y nuestra vida diaria. Sin embargo, a medida que avanzamos hacia el tercer decenio del siglo XXI, nos enfrentamos a una encrucijada: los paradigmas de la energía del pasado ya no parecen sostener el futuro, que está amenazado por el cambio climático y la degradación ambiental. La crisis energética global que enfrentamos hoy no es sólo una cuestión de suministro y demanda, sino también toca las profundidades de la sostenibilidad y la equidad.

El agotamiento de los recursos energéticos no renovables (como los combustibles fósiles) y las crecientes preocupaciones sobre el cambio climático han impulsado la necesidad de una transición hacia fuentes de energía más limpias y sostenibles. Esta transición energética (TE) se ha convertido en una prioridad global para mitigar los impactos ambientales negativos, así como para garantizar un suministro de energía confiable y asequible para las generaciones futuras.

En este sentido, se ha producido un aumento significativo en la inversión y el desarrollo de tecnologías de energía renovable, como la solar, eólica, geotérmica, hidroeléctrica y de biomasa. Estas fuentes energéticas son consideradas más sostenibles, ya que generan menos emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), aunque vale la pena señalar que también mantienen una elevada dependencia en el uso de recursos calificados como contaminantes; por ejemplo, hidrocarburos, minerales escasos y distintos tipos de químicos. A medida que estas tecnologías se vuelven

más eficientes y económicamente viables, su adopción se ha acelerado en muchos países; además, se ha convertido en una parte integral de las estrategias energéticas en los ámbitos nacional y regional.

Sin embargo, la TE también plantea desafíos significativos. La generación intermitente de energía renovable presenta problemas de almacenamiento y gestión de la red eléctrica. Además, la infraestructura existente y los sistemas de distribución están diseñados principalmente para fuentes de energía convencionales, lo que requiere inversiones y actualizaciones importantes para integrar de forma eficaz las energías renovables en la red. Asimismo, la dependencia de minerales decisivos para la fabricación de tecnologías de energía renovable también ha generado preocupaciones sobre la seguridad de suministro y los impactos socioambientales asociados con su extracción.

En términos de geopolítica, la TE ha reconfigurado el tablero global. Los países ricos en recursos energéticos tradicionales se enfrentan al desafío de diversificar sus economías y reducir su dependencia de los ingresos provenientes de estos recursos. Al mismo tiempo, las naciones que tienen un potencial significativo para la generación de energía renovable están ganando importancia y poder de influencia en el ámbito energético. La competencia por el acceso y control de este tipo de recursos estratégicos ha llevado a tensiones y disputas geopolíticas en diferentes regiones del mundo.

Por lo anterior, el presente libro se sitúa en medio de estos cambios significativos y busca proporcionar una comprensión más profunda de los conceptos clave, el contexto mundial de la energía, los recursos minerales esenciales, el tablero geopolítico, además de los desafíos y las oportunidades relacionadas con la TE global hacia un futuro sostenible e inclusivo.

### **Perspectivas de la transición energética**

A lo largo de la historia, la humanidad ha confiado en diferentes fuentes de energía para su supervivencia y desarrollo, desde la madera y los animales de tiro en la antigüedad, hasta el carbón durante la Revolución Industrial y el petróleo o el gas en los tiempos modernos, pero es importante mencionar que cada etapa de nuestra evolución ha estado marcada por un cambio en la forma de obtener y usar energía. Sin embargo, los métodos que alguna vez nos sirvieron adecuadamente, en la actualidad



ya no son viables ni deseables, sobre todo ante la creciente amenaza de la crisis climática y la conciencia de la necesidad de una transición hacia una economía baja en emisiones de carbono.

Alimentar las crecientes necesidades energéticas de un mundo en desarrollo —al tiempo que se limitan las emisiones de GEI y se protege la biodiversidad— es uno de los mayores desafíos que enfrenta nuestra generación. Es un reto que exige no sólo avances tecnológicos sino también cambios profundos en la forma de producir y consumir energía, pues la TE no nada más es técnica, también es política y económica, ya que se debe enfocar en cómo se estructuran nuestros sistemas energéticos y cómo se distribuyen los beneficios y los costos. La energía es un recurso que puede ser fuente de cooperación, pero también de conflictos; por ello, la forma en que sea gestionada tendrá un impacto duradero en el futuro.

Por lo tanto, este libro no se limita a explorar la tecnología y la economía de la energía. Si bien primero se centra en la conceptualización de este tema, así como en la comprensión y discusión de la extracción, los materiales y sus fines, la obra se adentra igualmente en la geopolítica y la (in)justicia social, al analizar los procesos estratégicos en los que impacta la TE y cómo —a través de ésta— se monopolizan ciertos recursos con fines ajenos al uso más efectivo y menos contaminante de la energía.

Al enfrentarnos a la crisis energética global, debemos recordar que la energía es más que un simple producto para ser consumido. Es una fuerza que impulsa nuestras sociedades y economías; por ello, la forma en que la manejamos tiene un impacto directo en nuestra calidad de vida, nuestra salud, nuestro medio ambiente y nuestra seguridad. Por lo tanto, la TE no es sólo un desafío técnico o económico, sino su estudio también requiere un enfoque holístico y multidisciplinario.

Este libro ofrece una visión completa y profunda de la crisis energética global, así como de la TE. Asimismo, se exploran no solamente las implicaciones positivas de este proceso, también sus impactos negativos y los riesgos que se deben asumir para alcanzarla. Pero, sobre todo, esta obra es una llamada a la acción, porque la TE no sucederá por sí misma, ya que requiere de la voluntad y el esfuerzo de todos.

La crisis energética global es, quizá, uno de los desafíos más grandes que enfrentamos como civilización, a la vez que se trata de una de las mayores oportunidades para remodelar nuestras sociedades y economías de manera que sean sostenibles, equitativas y resilientes. Asimismo, nos permite construir un futuro en el que todos tengamos acceso a energía

asequible, segura y limpia, a la vez que plantea riesgos de posibles conflictos por el uso de los recursos necesarios para que dicha transición se complete.

Así, pues, el objetivo principal de este trabajo es proporcionar una visión integral y actualizada de las diversas facetas de las transiciones energéticas en la historia de la humanidad. A través de un enfoque multidisciplinario, se exploran los aspectos técnicos, económicos, ambientales, culturales y sociales relacionados con la transformación de los sistemas energéticos en el mundo.

### **El multicolor de la energía**

La TE se ha convertido en una promesa de un futuro más verde, más sostenible y, por ende, más humano; a menudo es percibida bajo el espectro del color “verde”, que comúnmente representa vida y esperanza. Las imágenes de campos llenos de turbinas eólicas que giran en sincronía con el viento o de grandes extensiones de paneles solares que capturan la energía del sol se han vuelto sinónimos de progreso y equilibrio con la naturaleza, como si ver estos tipos de megainfraestructuras en medio del bosque, de la selva, los desiertos, etcétera, fuera la cosa más normal del mundo. Y es que detrás de este telón optimista, se ocultan numerosas tonalidades que son más oscuras y que conforman el verdadero “multicolor de la energía”.

Estos matices del verde se pueden observar desde la misma conceptualización de la TE como actualmente se interpreta y ejecuta en el mundo, pues el surgimiento de este tema en la arena internacional deriva del interés económico y político de unos pocos que han homogeneizado la perspectiva de una transición generalizada, sin interés en considerar las realidades particulares ni los riesgos que implica realizar tales acciones.

Asimismo, se trata el tema de la extracción intensiva de los recursos para fabricar estas tecnologías verdes, las cuales no son por sí mismas una práctica sostenible: todo lo contrario. Por ejemplo, los minerales raros necesarios para éstas se encuentran hiperconcentrados en espacios que pueden tener equilibrios ecológicos muy delicados; tan sólo el litio, que se utiliza para las baterías, así como otros elementos, son extraídos de la tierra en procesos que con frecuencia devastan paisajes, ecosistemas y comunidades enteras. Este aspecto de la ecuación energética pocas veces

se menciona, pues se ve eclipsado por la urgencia de alejarnos de los combustibles fósiles. Pero el costo ambiental y humano del extractivismo<sup>1</sup> plantea interrogantes éticas que no pueden, ni deben, ser ignoradas.

Además, como cualquier tecnología disruptiva, la energía renovable está sujeta a monopolización debido a lo costoso que puede ser la innovación en este tema. Por ello, gigantes corporativos han tomado el timón y dirigen el curso de esta transición de acuerdo con parámetros que maximizan sus ganancias, pero que no necesariamente se alinean con el bien común. Esta concentración de poder amenaza con replicar las injusticias del antiguo régimen energético, pero en esta ocasión hay detrás una fachada de “falso verde”.

Aparte, la lucha geopolítica por los recursos necesarios para alimentar esta revolución energética puede provocar nuevas tensiones internacionales. ¿Qué sucede cuando países con grandes reservas naturales de recursos estratégicos se convierten en el epicentro del interés internacional por su relevancia en nuevos productos o servicios, como las tecnologías verdes? Los desafíos éticos y políticos asociados con la distribución y el control de estos recursos son sin lugar a duda un tinte más en el espectro multicolor de la transición energética.

De la misma manera, se debe considerar el aspecto de la equidad global, la capacidad de que todos tengamos acceso a este tipo de beneficios sin importar nuestra posición económica, política, social o geográfica. La energía renovable, en su estado actual, es una solución costosa que pocos pueden permitirse y que se orienta principalmente a beneficiar a los actores con mayores ingresos económicos. Esto abre una brecha entre quienes cuentan con posibilidades de financiar un futuro sostenible y quienes se quedan atrás en el uso de tecnologías aún más nocivas para la salud y la naturaleza. La transición energética, si no es inclusiva, es entonces un privilegio.

---

<sup>1</sup> Al ser materias primas que se obtienen de la naturaleza, lo que llaman Valero, Valero, Calvo y Ortego (2018) producción minera, aquí se sostiene que se trata de “extractivismo” y, para ello, se utiliza la siguiente definición: “[...] se considera que el extractivismo se refiere a aquellas actividades que emplean un volumen de materias primas superiores a las que son necesarias para cubrir la demanda local; que además, durante el proceso de extracción contaminan de forma irreversible el área donde se lleva a cabo; debilita de manera estructural a la Nación, al fomentar el vínculo de dependencia externo, puesto que está enfocado al comercio internacional; depende de un marco normativo local que respalda el despojo territorial (entendido como la práctica de apropiación, legal o ilegal, de espacios ocupados en los que se encuentre una gran cantidad de recursos aprovechables para fines privados) y, también, resulta fundamental para evitar la caída de la tasa de beneficio del capital” (Azamar, 2019, p. 82).

Al explorar estas complejidades, el presente libro busca desentrañar el auténtico multicolor de la energía, yendo más allá del verde que predomina en la narrativa popular, al tratar de discutir las limitaciones, los riesgos y los costos de la TE. Para lograr una genuina transición sostenible y equitativa, es fundamental examinar y abordar los tonos más oscuros. Sólo así será posible pintar un futuro que sea verde, pero también justo, inclusivo y verdaderamente sostenible para todos.

## Contenido

En el primer capítulo, denominado “Contexto mundial de la energía”, se revisa con detalle la situación actual de la energía en el nivel global. Además, se analizan las tendencias y los desafíos que enfrenta la comunidad internacional en términos de suministro energético, seguridad, demanda creciente y preocupaciones ambientales. También, se exploran las políticas y estrategias implantadas en los diferentes países y regiones para abordar estos problemas.

En el segundo capítulo, “Transiciones energéticas de la humanidad”, se analiza la evolución histórica de la energía en términos prácticos y académicos; asimismo, se revisa cómo ésta ha impactado en el desarrollo de las civilizaciones para después abordar los procesos de TE que han venido acompañado este tema y cómo se ha desarrollado su conceptualización moderna de la mano de intereses económicos y políticos ajenos a la naturaleza de este proceso.

En el tercer capítulo, “La transición energética desde otra mirada”, se aborda la TE desde una visión holística y multidimensional, inspirada tanto en la obra de Nicholas Georgescu-Roegen como en las ideas complementarias de Gilbert Simondon. En lugar de un enfoque puramente técnico y económico, se consideran las interacciones entre economía, ecología y sociedad. Simondon aporta una perspectiva dinámica, en que la tecnología sería un proceso de “individuación” que reconfigura nuestras relaciones con el entorno. El análisis se centra en la noción de “entropía” como un concepto negociable y dinámico, desafiante de la visión tradicional de la TE. Asimismo, se subraya la importancia de las “sinergias funcionales” y un compromiso ético con la sostenibilidad, al reevaluar la medición del crecimiento y el bienestar.

El cuarto capítulo, “Minerales esenciales para la transición energética”, se centra en los minerales necesarios para impulsar la transición

hacia fuentes de energía más limpias y renovables. Se identifican los minerales clave utilizados en la fabricación de baterías, paneles solares y otras tecnologías relacionadas con la TE. También, se discuten los desafíos asociados con la extracción, el suministro y la gestión sostenible de estos elementos.

En el quinto capítulo, “Tablero geopolítico por recursos naturales estratégicos”, se explora la intersección entre la energía y la geopolítica; además, se analizan las implicaciones estratégicas y las dinámicas internacionales relacionadas con la posesión y el control de los recursos energéticos clave en diferentes regiones del mundo. Se examinan los riesgos, así como las oportunidades que surgen de esta relación, su impacto en la estabilidad y las relaciones internacionales.

En el sexto capítulo, “El otro costo de las tecnologías para la transición energética global”, se ofrece un análisis exhaustivo de los desafíos y costos asociados con la transición hacia la generación eléctrica renovable. Se aborda la complejidad de la cadena de suministro de minerales necesarios para la fabricación de tecnologías renovables y se destaca su importancia, así como los costos inherentes en términos de extracción, distribución y almacenaje. Igualmente, se examina el impacto de la privatización de los recursos energéticos en las sociedades y el medio ambiente, incluidos algunos casos donde las comunidades han experimentado daños significativos debido a estas prácticas. El análisis concluye con una llamada a considerar tanto los costos económicos como los socioambientales en el proceso de transición energética, al sugerir una visión más completa y matizada de los desafíos y las oportunidades que presenta la generación de electricidad por medio de fuentes renovables.

Cada capítulo de este libro profundiza en la complejidad del desafío que enfrentamos como sociedad, al proporcionar una visión integral y multifacética de la TE global. Se ha abordado el análisis desde las primeras etapas de la energía en la historia de la humanidad hasta la encrucijada que se presenta hoy en día, a la vez que se escudriñan las estrategias de las naciones para realizar la TE o para utilizar este concepto como un mecanismo de beneficio económico y político, y al examinar los materiales decisivos que impulsarán nuestro futuro; además, se han considerado las perspectivas geopolíticas que se entrelazan con nuestros recursos naturales y mirado más allá del brillo de las tecnologías sostenibles para comprender cuáles son sus verdaderos costos.





# Contexto mundial de la energía





## Introducción

La situación energética mundial es cada vez más compleja, con una creciente demanda global de energía y una necesidad urgente de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). La mayor parte de la energía producida en el planeta proviene de combustibles fósiles, como el petróleo, el carbón y el gas natural, que son responsables de la mayoría de las emisiones de GEI. Sin embargo, estos combustibles son finitos y su extracción y uso tienen un impacto significativo en el medio ambiente y la salud humana.

A su vez, la energía renovable, como la solar, eólica, geotérmica, hidroeléctrica y de biomasa están ganando importancia en la matriz energética mundial, pero aún representa una pequeña porción de la producción energética total. A pesar de los avances tecnológicos y del aumento de la inversión en energías renovables, todavía hay desafíos significativos para su adopción a escala mundial, como la ausencia de infraestructura y la falta de políticas que regulen este tema.

La situación energética moderna es compleja y se requiere un enfoque integral para abordar las problemáticas ambientales y de seguridad en este aspecto. Es cierto que se están tomando medidas para disminuir la dependencia de fuentes no renovables y contaminantes, pero falta mucho por hacer para lograr una TE completa, pero sobre todo justa; por ello, es necesario seguir invirtiendo en tecnologías limpias e infraestructura para alcanzar un futuro energético más seguro y sostenible para todos.

Adicionalmente, en 2022 se demostró que la energía renovable no es suficiente para sostener la vida, pues tan sólo las condiciones climáticas

en Europa expusieron que, aun cuando es mayor la inversión o el incremento en la capacidad generadora de energía renovable, las poblaciones continúan dependiendo de los combustibles fósiles.

A partir de este contexto, en este capítulo se revisa la importancia de la energía renovable en el mundo. En la primera sección, se aborda la conceptualización de la energía en el aspecto histórico y práctico. En la segunda parte, se describen los tipos de energía que se dividen como primaria y secundaria; posteriormente, se expone el consumo mundial de este tipo de energías y se muestra su empleo desigual en diferentes regiones del planeta. En el tercer apartado se ofrece una explicación sobre la denominada energía renovable y el crecimiento de la demanda energética durante la última década. La cuarta sección exhibe la distribución desigual del uso energético en distintos países y regiones, mediante algunos ejemplos actuales en los que ésta se visibiliza, pero también se muestran pequeños logros en una distribución más justa. Por último, se presentan las conclusiones.

### ¿Qué es la energía?

La energía es un concepto fundamental en física, que implica la capacidad de un sistema para realizar un trabajo. El término “energía” proviene del griego *energeia*, que significa “operación” o “actividad”. En su forma más básica, la energía se manifiesta a través del movimiento o la transformación y es un componente esencial de todo lo que nos rodea, desde los átomos hasta las galaxias.

Históricamente, los antiguos filósofos griegos ya tenían una noción de la energía; aunque su comprensión era limitada, para Aristóteles, por ejemplo, existían diferentes formas de “movimiento” (a las cuales llamaba *kinesis*) y cada una tenía una causa a la que denominaba “motor”. Los motores podían ser internos (como el deseo en los seres vivos) o externos (como un empujón o un tirón), y eran considerados la causa de la *kinesis* o el cambio. En este sentido, se podría decir que Aristóteles entendía la energía como una fuerza que causa movimiento o cambio, aun sin expresarlo en esos términos.

Durante la Edad Media, estudiosos islámicos contribuyeron al desarrollo de las leyes de la energía, principalmente en el ámbito de la óptica, ya que establecieron las primeras nociones de que la luz emitida por

los objetos a través de la refracción era la que permitía la visión humana. De esta manera se plantearon las primeras bases para la comprensión moderna de la energía lumínica.

Más adelante, durante los siglos XVII y XVIII, la física clásica estableció una serie de principios y leyes que describen y cuantifican el concepto de energía, el cual comenzó a ser entendido en términos más precisos y matemáticos. Por ejemplo, la mecánica newtoniana y el fundamento de la física clásica introdujeron las leyes del movimiento, las cuales son esenciales para el estudio de la energía. Según Newton, un objeto en movimiento o en reposo permanecerá en ese estado a menos que se aplique una fuerza externa, un principio que implica la conservación de la energía.

La noción moderna de la energía como la capacidad para realizar un trabajo se consolidó en el siglo XIX. Con la formulación de la ley de conservación de la energía, se aceptó que ésta no puede ser creada ni destruida, sólo transformarse de una forma a otra. Dicha ley es un pilar fundamental de la física clásica y sigue siendo válida en la mayoría de los contextos, con excepciones notables en física de partículas y física cuántica (Ball, 2004).

Asimismo, la obra de James Prescott Joule demostró que el calor y la energía mecánica son formas intercambiables de la misma entidad, lo que condujo a la formulación de la primera ley de la termodinámica (Cardwell, 1971). Si consideramos lo comentado previamente, es posible señalar que, en términos conceptuales, existen diversas formas de energía: cinética, potencial, térmica, química, nuclear, eléctrica, magnética, elástica, etcétera, las cuales son funcionales y útiles para la existencia.

Dado que la energía es esencial para toda la materia existente en el universo, puede describirse como la medida de capacidad de un sistema para proporcionar trabajo por medios de movimiento, luz, calor y/o no mecánicos.

La energía se clasifica generalmente en dos categorías principales: potencial y cinética. Por un lado, la primera es la energía que se almacena en un objeto debido a su posición en un campo de fuerzas, como la gravedad o su configuración. Por ejemplo, un objeto ubicado en lo alto de una colina tiene energía potencial debido a su posición relativa al suelo. La energía cinética, por otro lado, es la que un cuerpo posee gracias a su movimiento. Un objeto en movimiento, como un coche o una pelota que rueda, posee energía cinética (García-Carmona y Criado, 2013).

Además de éstas, existen múltiples formas de energía; por ejemplo, la térmica se refiere a la energía total de todas las partículas en un objeto y está relacionada con la temperatura; la química es la almacenada en los enlaces químicos de las moléculas, la cual se libera durante las reacciones químicas; la nuclear está contenida en el núcleo de los átomos y se libera durante las reacciones nucleares, entre otras.

Las fuentes de energía pueden clasificarse en renovables y no renovables. Las primeras se regeneran naturalmente en un corto periodo de tiempo e incluyen la solar, eólica, hidroeléctrica, geotérmica y biomasa. Estas fuentes son sustentables, ya que no se agotan y tienen un impacto medioambiental menor en comparación con las fuentes no renovables.

A su vez, las fuentes no renovables son aquellas que existen en cantidades limitadas en la Tierra. Entre éstas se encuentran el carbón, el petróleo y el gas natural, cuyo uso es más común en nuestras sociedades; también se hallan los minerales radiactivos, como el uranio y el torio, que se utilizan en las centrales nucleares. Estas fuentes, aunque proporcionan una gran cantidad de energía, son finitas y su extracción y empleo tienen un impacto medioambiental significativo (Twidell & Weir, 2015).

La energía en todas sus formas y fuentes es fundamental para nuestra existencia y el funcionamiento del universo. A medida que nuestra comprensión del tema evoluciona, se supone que también se desarrollan nuestras estrategias para una utilización más eficiente y sostenible.

Las fuentes de energía son recursos que proceden de principios tales como el movimiento, la posición, el calor, la radiación y otras manifestaciones naturales, químicas e industriales que soportan toda actividad humana desde su crecimiento, transporte, transformación y reproducción, hasta la sobrevivencia y recreación, pese a tener ciertos límites en el planeta. Para ello, estas manifestaciones se obtienen a partir de depósitos naturales conocidos como fuentes primarias o son el resultado de la transformación industrial de dichas fuentes, lo cual tiene como consecuencia un estado secundario; además, es posible seccionarlas en renovables o no renovables<sup>2</sup>, pero al final el objetivo de ser utilizadas será dar continuidad a la existencia de las sociedades humanas.

---

<sup>2</sup> Las fuentes renovables parten de procesos de hidroenergía, geoenergía, energía eólica, solar y biomasa en un flujo continuo con ciclos naturales de generación de energía que parece inagotable. Las no renovables se extraen de depósitos geológicos que tardaron millones de años en formarse, como el carbón, gas y petróleo, situación que las hace difícil de reemplazar en el corto plazo y, por lo tanto, son finitas.

Al respecto, existe la posibilidad de hacer un análisis amplio y diferenciado sobre los diversos aspectos asociados al uso y aplicación de ese conjunto de fuentes de energía, las emisiones de GEI, la posesión o distribución de algún bien energético, los costos de producción, extracción o consumo, entre muchas otras condiciones. En este capítulo se parte de la disgregación de fuentes primarias y secundarias, en virtud de que son cuestiones fundamentales para la actual discusión y preocupación acerca del cambio climático atribuido a la actividad humana por el uso y suministro energético en el mundo

### *Fuentes de energía primaria y secundaria*

Las fuentes primarias son aquellas que están disponibles de forma directa en la naturaleza, de manera que sólo es necesaria la extracción o captación de éstas para ser utilizadas; además, por medio de procesos químicos, físicos, mecánicos, nucleares, térmicos, etcétera, pueden ser transformadas en energía secundaria.

Dentro de los recursos primarios más importantes encontramos: carbón mineral, petróleo crudo, condensados, gas natural o la energía generada a través de fundamentos nucleares, geotérmicos, hídricos, eólicos y solares (véase cuadro 1); también es común que en algunos países se utilice bagazo de caña de azúcar o leña como suministro energético primario (Sistema de Información Geográfica de Fuentes Renovables de Energía para la Planeación del Desarrollo Regional Sustentable, 2022).

En este marco de cambio hacia una mayor sostenibilidad, es esencial considerar el equilibrio entre la explotación de los recursos energéticos y la protección del medio ambiente. En el camino hacia una TE, el objetivo es replantear nuestro modelo de consumo energético en busca de opciones que nos permitan alcanzar la eficiencia y la sostenibilidad. Diversificar la matriz energética, impulsar las energías renovables y mejorar la eficiencia energética son estrategias cruciales en este proceso. Así, se pretende reducir la dependencia de los combustibles fósiles, cuyo uso intensivo ha tenido graves repercusiones en el medio ambiente, especialmente en la generación de GEI. Sin embargo, este camino también presenta desafíos

---

En general, todos las formas o materiales son utilizados para la generación de electricidad, iluminación, calentamiento de agua o bombeo (Oviedo, Badii, Guillen y Lugo, 2015; Secretaría de Energía, 2010).

CUADRO 1  
Fuentes energéticas primarias

Fuente	Características
Carbón mineral	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Es un combustible sólido derivado de la degradación de organismos vegetales, generalmente de color negro.</li> <li>• Se clasifica en antracita, hulla, lignito y turba, según su pureza.</li> <li>• Su utilidad es como combustible para la industria, centrales térmicas y calefactores domésticos.</li> </ul>
Petróleo crudo	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Es una sustancia líquida, aceitosa y de color café oscuro.</li> <li>• Se puede encontrar almacenado en depósitos subterráneos en tierra firme, bajo el lecho del mar, arenas bituminosas, esquistos y otras formas no convencionales.</li> <li>• Hay varias formas de clasificarlo, pero destaca la del American Petroleum Institute, que lo caracteriza como ligero, medio y pesado, según su densidad con el agua.</li> <li>• Se emplea en centrales térmicas como combustible, en el transporte y en usos domésticos.</li> <li>• Algunos de sus derivados son: gasolinas, gasóleo, abonos, plásticos, explosivos, medicamentos, colorantes, fibras sintéticas, etcétera.</li> </ul>
Condensados	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Los condensados son hidrocarburos líquidos obtenidos del gas natural en instalaciones de procesamiento o durante la producción en el campo. Son similares al petróleo crudo ligero, con alta gravedad API y bajo contenido de azufre.</li> <li>• No tienen una clasificación específica como el petróleo, pero su calidad y valor varían de acuerdo con los compuestos particulares que presenten, incluidos los hidrocarburos más ligeros, como el etano y el propano.</li> </ul>
Gas natural	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Es una mezcla de hidrocarburos ligeros cuyo principal componente es el metano.</li> <li>• Se puede encontrar asociado al petróleo crudo o de forma independiente (gas seco).</li> <li>• Es menos contaminante que otros combustibles fósiles al generar energía eléctrica.</li> </ul>
Nucleoenergía	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Está contenida en el mineral de uranio; sin embargo, para utilizarse debe llevarse a cabo un proceso de purificación y enriquecimiento.</li> <li>• El uranio se usa como combustible en los reactores nucleares.</li> <li>• Las reservas de materiales nucleares son abundantes.</li> <li>• Las centrales nucleares generan residuos de difícil eliminación, exigen la adopción de medidas estrictas de seguridad y control que resultan muy costosas.</li> </ul>
Geoenergía	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Es un tipo de energía almacenada bajo la superficie en forma de calor, la cual emerge a la superficie en forma de vapor.</li> </ul>
Hidroenergía	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Utiliza el almacenamiento del agua y la energía potencial del caudal hidráulico.</li> <li>• Este tipo de energía no genera residuos, pero es costosa. Ocasiona la pérdida de suelo productivo y fauna, además de la migración de poblaciones humanas debido a la inundación de los terrenos.</li> </ul>
Energía eólica	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se obtiene a partir del movimiento que genera el viento sobre las turbinas (aerogeneradores) que la transforman en energía eléctrica.</li> <li>• No contamina al obtenerse, pero los aerogeneradores son grandes y costosos.</li> <li>• Un problema inherente es que, al depender del viento, es una fuente de energía intermitente.</li> </ul>
Energía solar	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Es la energía producida por la radiación solar. Puede servir para generar electricidad mediante el uso de paneles fotovoltaicos.</li> <li>• La conversión térmica es utilizada para calentar algún fluido mediante un sistema fototérmico; a su vez, la conversión fotovoltaica genera energía eléctrica por medio del sistema fotovoltaico.</li> <li>• La generación de energía no produce residuos.</li> </ul>

Fuente: elaboración propia con información de la Secretaría de Energía (2011) y la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo (s.f).

significativos, ya que implica transformaciones profundas en las infraestructuras existentes y demanda una inversión sustancial en investigación y desarrollo.

En la actualidad, se promueve la TE que prioriza la generación de energía a partir de fuentes renovables, como el viento, el sol y el agua, así como el uso del gas natural. Esto se debe a que dichas fuentes y procesos emiten una cantidad menor de residuos contaminantes en comparación con los hidrocarburos tradicionales cuando se convierten en energía eléctrica o térmica. Esta diferencia es particularmente notoria si la comparamos con la alta contaminación por GEI que producen los combustibles fósiles como el carbón y el petróleo, componentes fundamentales del sistema energético actual (García, Cantero, Rull y Bravo, 2003).

Esta nueva estructura, la cual aprovecha la energía primaria baja en emisiones, bosqueja una aparente capacidad de generación y soberanía energética en países sin recursos energéticos propios, tal como sucede en algunos casos europeos (González, 2022), pues aún dependen de recursos fósiles.

Aparte, como se mencionó, todo producto energético obtenido de la transformación de energía primaria se denomina *energía secundaria*; algunos de los más comunes se pueden agrupar en coque de carbón, coque de petróleo, gas licuado de petróleo (gas LP), gasolinas y naftas, queroseno, diésel, combustóleo y electricidad (véase cuadro 2), pero varios de éstos destacan por su uso indispensable en el transporte (humano y de bienes), la producción de mercancías tanto agrícolas como industrializadas o su utilización común en los hogares y espacios públicos. Asimismo, un elemento clave y fundamental es que, en esta forma, es más fácil almacenar y distribuir estas fuentes (Secretaría de Energía, 2009). Por último, después del proceso industrial al que son sometidos los energéticos primarios como el petróleo, también se obtienen productos no energéticos, por ejemplo, lubricantes, grasas o parafinas, entre otros.

No obstante, es importante resaltar que el uso de energía secundaria no está exento de desafíos: un ejemplo son las implicancias medioambientales que conlleva la generación y el consumo de estas energías, en particular, las derivadas de los combustibles fósiles. La quema de gasolina, diésel y coque de petróleo produce emisiones significativas de GEI que contribuyen al cambio climático. Además, la producción, el almacenamiento y la distribución de estas energías a menudo implica riesgos de derrames, contaminación del agua y otros daños ambientales. Por lo

tanto, es esencial considerar las alternativas sostenibles y los métodos de mitigación de estos impactos mientras continuamos dependiendo de estas formas de energía secundaria. Asimismo, se debe incentivar la eficiencia energética en todos los sectores para reducir la demanda y minimizar los efectos negativos asociados.

CUADRO 2  
Fuentes energéticas secundarias

Fuente	Características
Coque de carbón	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Es un combustible sólido que resulta de la destilación del carbón siderúrgico.</li> <li>• Se clasifica en metalúrgico, nuez y fino.</li> <li>• Su utilidad se ubica en la industria.</li> </ul>
Coque de petróleo	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Combustible sólido y poroso que se obtiene en refinerías y es conocido como <i>coque sin calcinar o verde</i>.</li> <li>• Se utiliza en el sector industrial.</li> </ul>
Gas licuado de petróleo (LP)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se obtiene de la destilación de petróleo y del tratamiento del gas natural.</li> <li>• Su utilidad es variada y diversa entre los sectores industrial, del transporte, residencial y agropecuario.</li> </ul>
Gasolinas y naftas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Son en conjunto un combustible líquido y liviano que se obtiene por la destilación del petróleo y el tratamiento del gas natural.</li> <li>• Se utilizan en el sector del transporte.</li> </ul>
Querosenos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Son un combustible líquido, compuesto del destilado de petróleo.</li> <li>• Se clasifica en turbosina y otros querosenos.</li> <li>• Su uso es residencial, agropecuario y para el transporte.</li> </ul>
Diésel	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Combustible líquido obtenido de la destilación del petróleo.</li> <li>• Es utilizado en los sectores industrial, del transporte, residencial y agropecuario.</li> </ul>
Combustóleo	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Combustible residual, es utilizado en plantas de generación eléctrica y motores.</li> <li>• Se utiliza en los sectores industrial y del transporte.</li> </ul>
Gas seco	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hidrocarburo gaseoso que es subproducto del gas natural.</li> <li>• Es utilizado en la industria petroquímica e industrial, además de tener un uso residencial.</li> </ul>
Electricidad	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se produce a partir de diversas fuentes primarias.</li> <li>• Se utiliza en los sectores industrial, residencial, del transporte y agropecuario.</li> </ul>

Fuente: elaboración propia con información de la Secretaría de Energía (2009, 2011).

Entre todas las energías secundarias, la eléctrica es fundamental debido a su flexibilidad en la transmisión para el uso cotidiano, así como para los modelos y procesos industriales, de tal manera que se considera un factor importante en el crecimiento económico mundial (Antolin, 1988). Por ello, países como China, Estados Unidos de América (EUA), India, Rusia, Japón, Canadá, Brasil, Corea del Sur, Alemania y Francia ocupan los primeros lugares en el consumo de energía eléctrica, además de detentar los



puestos iniciales del *ranking* de las naciones con mayor Producto Interno Bruto (PIB) en el mundo; esto genera no una causalidad, pero sí una correspondencia y un paralelismo entre consumo de energía eléctrica y PIB (Enerdata s.f.; Statista, 2021).

Vale la pena mencionar el problema de la accesibilidad a los energéticos secundarios, ya que no todos los países pueden obtenerlos con facilidad; además, producen contaminación, a pesar de ser esenciales para el desarrollo de gran parte de las actividades humanas, lo cual ha llevado a que algunas naciones busquen alternativas o dependan de fuentes primarias, que brindan un mayor suministro y cierta independencia energética. Sin embargo, los yacimientos de energéticos secundarios se encuentran en regiones ajenas cuyas tensiones económicas, políticas y sociales dificultan el flujo continuo de combustibles. Asimismo, el consumo de diferentes tipos de energía ha generado una creciente preocupación debido a las altas emisiones de GEI, lo cual causa problemas climáticos en tierras cultivables y en el suministro hídrico en muchas partes del mundo.

Aparte, es necesario puntualizar que la TE es una tarea compleja que no sólo implica cambiar de fuentes de energía primarias a alternativas más sostenibles, sino también revisar cómo esa energía se convierte en energía útil para el consumidor final. En este sentido, la energía útil se vuelve un concepto central porque representa lo que el usuario realmente necesita y utiliza; por ejemplo, no basta generar electricidad a partir de fuentes renovables si después esa misma se desperdicia en electrodomésticos ineficientes o infraestructuras obsoletas.

Para los analistas y los diseñadores de políticas públicas, entender la importancia de la energía útil significa también enfocar esfuerzos en optimizar los sistemas de entrega y consumo de energía. Esto puede involucrar desde la promoción de electrodomésticos más eficientes hasta infraestructuras de transporte público que minimicen la pérdida de energía. En otras palabras, la sostenibilidad no sólo reside en la fuente de energía sino también en cómo ésta se convierte en servicios y bienes necesarios.

A medida que avanzamos en la transición hacia fuentes de energía más limpias, el enfoque debe ser dual: 1) asegurar que las fuentes de energía secundaria sean lo más sostenibles posible y, 2) optimizar cómo esa energía se convierte en energía útil para el consumidor final. Al centrarnos en ambos aspectos, haremos un uso más eficiente de los recursos y maximizaremos el impacto positivo de la transición energética en la sociedad.

Asimismo, se debe considerar que el consumo de energía está en una dinámica progresiva como consecuencia del crecimiento económico, el cual ha sido estimulado por la suposición de alcanzar mejores niveles de vida y cubrir necesidades humanas que cada vez son más diversificadas. Por ello, continúan y continuarán siendo esenciales los recursos energéticos incluso si son altamente contaminantes o dañinos para la salud y el medio ambiente (Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos [OCDE], 2012).

### *Consumo de energía en el mundo*

El continuo crecimiento de la humanidad de los últimos dos siglos y principios de éste en términos demográficos, tecnológicos y de consumo ha llevado a que las funciones metabólicas bio y fisicoquímicas, además de sociales y económicas, se interrelacionen en procesos evolutivos en torno al uso de todo tipo de recursos naturales que son apropiados y transformados en energía, así como en bienes, en virtud de satisfacer las necesidades alimenticias y de proveer comodidad a cada una de las generaciones presentes. Lo anterior también ha provocado que “se olvide” que a través del flujo de materiales se excretan residuos altamente nocivos para la salud humana y ecosistémica, provocando perturbaciones, desequilibrios ambientales y sociales generados por el actuar de la misma civilización moderna e industrial, lo que pone en riesgo la vida planetaria (Toledo, 2013).

En este contexto, los recursos se transforman en energía: alimentos, calor u otra forma complementaria para que la humanidad realice sus actividades cotidianas; condición que los vuelve motor de los procesos vitales de la biósfera planetaria. Así, dicha disponibilidad de energía también permite que se convierta en trabajo útil para las industrias, en calor o frío, según las necesidades climatológicas de las diversas regiones del mundo gracias al uso de tecnologías (Dirección General de Industria, Energía y Minas, 2002). Por estos motivos, la energía está altamente vinculada a la vida, de ahí que sea un elemento muy demandado en todo el planeta. A pesar de que no se emplea en la misma cantidad en todas las regiones, sufre incrementos sustanciales cada año, ya que el sistema económico y social actual y futuro no podría sostenerse en el tiempo sin energía.

Para explicar este escenario, en el siguiente cuadro se presenta el aumento mundial de los últimos veinte años en el empleo de energía, con

incrementos que van de 23.8% para el petróleo; 63.4% para el gas natural, y 59.2% para el carbón. Asimismo, aunque el consumo de energéticos renovables se expande con la mayor evolución, como se observa en el cuadro 3, su contribución todavía es mínima en términos absolutos. En definitiva, lo que muestran los datos mencionados es que las sociedades aún dependen de todo tipo de energías primarias, ya sean altamente emisoras de GEI o reducidas, por lo que las cantidades consumidas de gas natural, petróleo y carbón continúan siendo amplias y crecientes (véase cuadro 3).

CUADRO 3  
Consumo mundial de energía (exajulios)

Tipo de energía	Años		Porcentaje de crecimiento (%)	Año 2019	Porcentaje de crecimiento (%)
	2000	2010			
Hidroelectricidad	27	32.25	19.4	37.69	16.9
Gas natural	86	113.78	32.3	140.54	23.5
Energía nuclear	26	26.00	0.0	24.93	-4.1
Petróleo	155	172.53	11.3	191.89	11.2
Energía renovable	3	9.63	221	28.82	199.3
Carbón	99	151.21	52.7	157.64	4.3
Total	396	506.00		575.00	

Fuente: elaboración propia con datos de BP Public Limited Company (PLC), (2021) y Statista (2022b).

La evidencia demuestra que existe un aumento progresivo en el consumo de energía, pero los factores que contribuyen a ello están contenidos en un universo de posibilidades susceptibles de analizar y están sujetas a discusión. Una de las más significativas y que puede facilitar la explicación del consumo de energéticos de forma diferenciada es dividir al mundo en regiones de acuerdo con su crecimiento económico —lo que se refiere a un incremento en el ingreso y bienestar de la población—; esto da por resultado una mayor demanda y consumo de bienes y servicios —los cuales también necesitaron cantidades significativas de energía para su producción—, así como transporte u otra forma de uso energético que posibilita el disfrute de aquellos, además de la constante innovación y uso de nuevas tecnologías en hogares e industrias (Antolin, 1988; Castillo, 2011; Romerio, 2006).

En términos generales, el consumo mundial de energía sigue dominado por los combustibles fósiles, como el petróleo, el carbón y el gas natural. Esto se debe en gran medida a su disponibilidad y bajo costo, y a que son ampliamente utilizados en el sector industrial y el transporte. Sin embargo, cada vez es mayor la inversión tanto en energías renovables —por ejemplo, la eólica, solar y geotérmica— como en tecnologías de almacenamiento de energía, lo que permite aumentar la penetración de estas fuentes en la matriz energética.

En cuanto a la eficiencia de la energía, existen saltos prometeicos en el uso de ésta en los edificios y la industria, pero aún hay mucho margen de mejora. De igual manera, a pesar de los esfuerzos para reducir el consumo energético, se observa una tendencia al alza en países en desarrollo debido al crecimiento económico y a la urbanización, así que el balance de dicho consumo se caracteriza en la actualidad por una combinación de factores. Por un lado, tal consumo sigue aumentando y los combustibles fósiles se mantienen como los principales generadores de energía. Por otro lado, la inversión en energías renovables y tecnologías de eficiencia energética está al alza, lo que permite una transición hacia una matriz energética más sostenible.

El planteamiento anterior ayuda a visibilizar la distribución mundial del consumo de energía, aunque vale la pena mencionar que en este capítulo no se pretende realizar un análisis individual por país, pero sí se puede enlazar con la geografía mundial, ya que dividir al planeta en zonas que consientan generalizar el consumo de energía de forma regional (pese a ser claro que no todos los países tienen el mismo consumo) demuestra que existe un aparente paralelismo entre regiones que consumen mayores cantidades de energéticos con las zonas que ostentan índices superiores sobre desarrollo humano<sup>3</sup> o crecimiento económico<sup>4</sup> acumulado (véase gráfico 1).

---

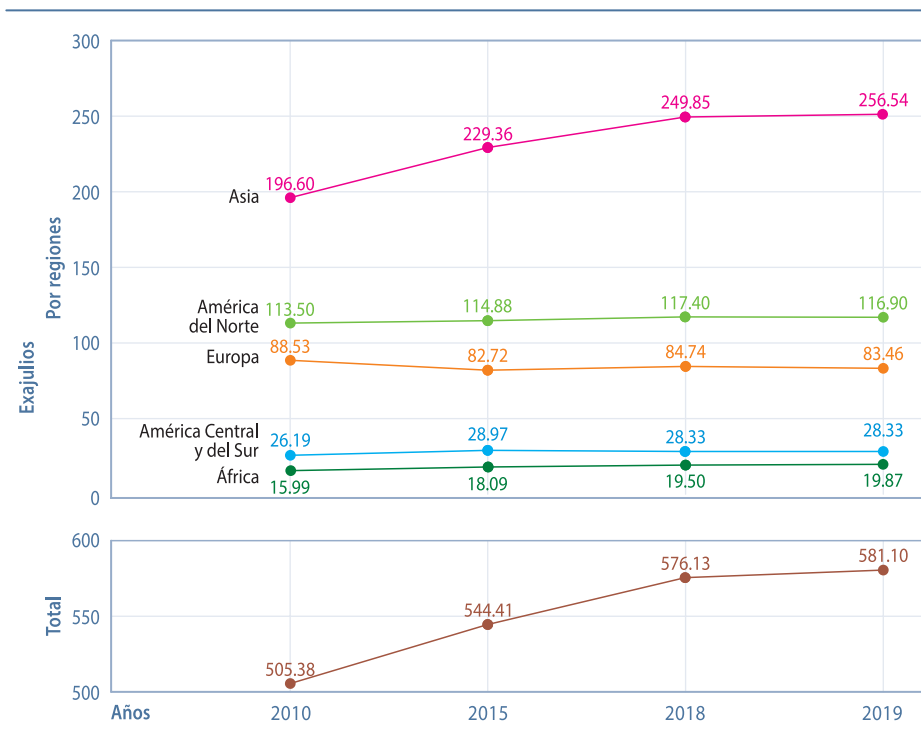
<sup>3</sup> Dentro de los veinte países con mayores índices de desarrollo humano encontramos:

- Europa: Noruega, Irlanda, Suiza, Islandia, Alemania, Suecia, Países Bajos, Dinamarca, Finlandia, Reino Unido, Bélgica y Austria (12).
- Asia: Hong Kong (China), Singapur, Israel y Japón (4)
- América del Norte: Canadá y Estados Unidos (2).
- Finalmente, se integra Australia y Nueva Zelanda (Conceição, 2020).

<sup>4</sup> Los países que se mencionan no son los que en el último año tuvieron el mayor índice de crecimiento económico sino, más bien, los que han acumulado dicho crecimiento y se sitúan como los países con mayor PIB.

- Europa: Alemania, Reino Unido, Francia, Italia y España (5).
- Asia: China, Japón, India y Corea del Sur (4).

GRÁFICO 1  
Consumo de energía primaria en el mundo<sup>5</sup>



Fuente: elaboración propia con información de BP PLC (2021).

Destaca el caso de Asia como la región con el mayor consumo de energía en el mundo, mientras que, dentro del mismo grupo, América del Norte es el principal usuario de gas natural (véase gráficos 1 y 2). En cuanto a la electricidad (véase gráfico 3), corresponde de nuevo a Asia el lugar dominante, seguida por América del Norte y Europa, de tal manera que el primer aglomerado de regiones muestra una tendencia creciente al consumo.

- América del Norte: Estados Unidos, Canadá y México (3).
- América del Sur: Brasil (1).

También se encuentra Rusia, pero al pertenecer a dos regiones se omite de la lista. Además, Australia es una de las integrantes de estas 15 mayores economías en el mundo.

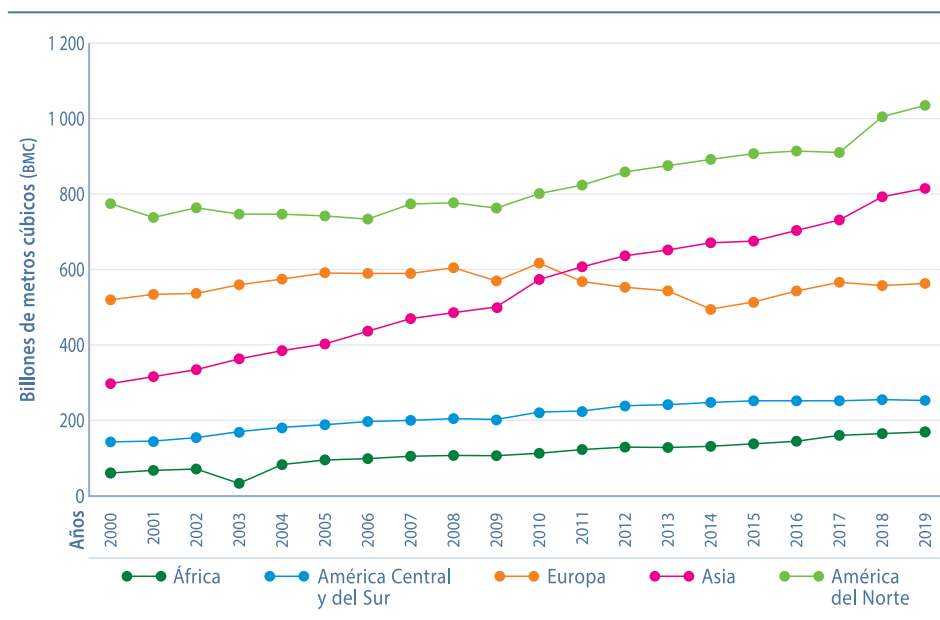
<sup>5</sup> Los valores del consumo total de energía en el mundo no concuerdan con las cifras de las cinco regiones descritas, debido a que se omitió del gráfico el consumo de los Estados Independientes y los que pertenecen a Medio Oriente.

El valor del consumo total de energía primaria en el mundo pertenece al eje secundario.

Respecto al segundo grupo, África, América Central y América del Sur, además de ser regiones carentes de servicios sociales y empobrecidas, también son las que menos consumen energía de cualquier tipo; por ejemplo, de gas natural (véase gráfico 2) o electricidad (véase gráfico 3). Es notable cómo, a pesar de incrementarse su consumo al doble en los últimos veinte años, no alcanzan en conjunto al menor de los consumidores del grupo anterior; su ventaja en extensión de territorio y población no parece ser suficiente para lograrlo; asimismo, sólo llegan a 3.4% y 5%, respectivamente, del consumo mundial total (véase gráfico 1).

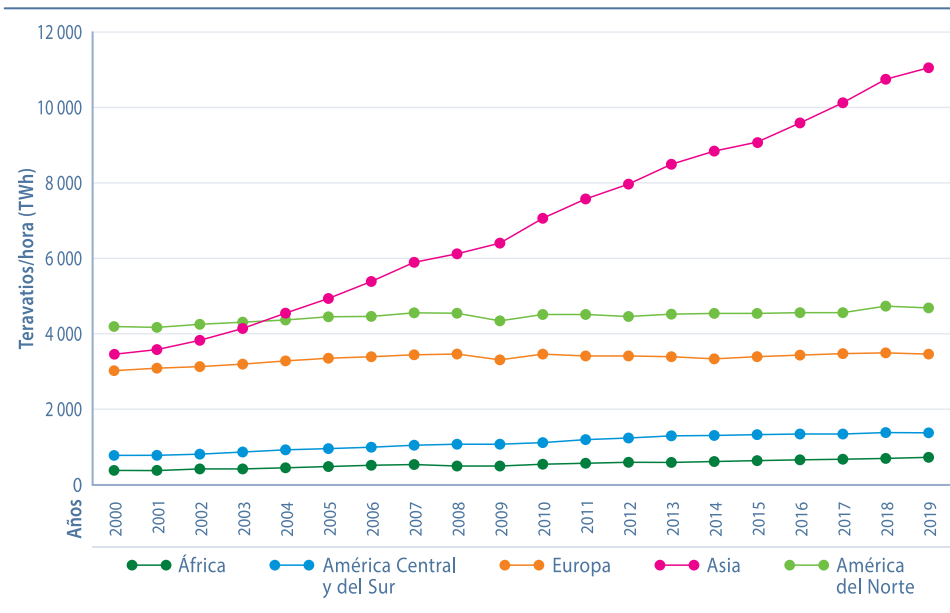
De esta manera, se puede constatar que la distribución en el consumo energético planetario es desigual. El grupo con mayores carencias solamente emplea 8.4% mundial, mientras que las regiones con más países en la cúspide de los índices de desarrollo humano y crecimiento económico tienen un consumo que rondaba 78.6% en 2019; tendencia que no parece modificarse en las últimas dos décadas.

GRÁFICO 2  
Consumo de gas natural por región en el mundo



Fuente: elaboración propia con datos de Enerdata.

GRÁFICO 3  
Consumo de electricidad por región en el mundo



Fuente: elaboración propia con datos de Enerdata.

El incremento en el uso mundial de energía parece estar estimulado por la región asiática, que evidencia la actividad más pronunciada. Pero no hay que ignorar que las otras extensiones territoriales mantienen una situación progresiva en esta actividad, lo que se convierte en un tema social, político, económico y productivo, pues además de ser un importante diferenciador en la arena internacional para demostrar el “compromiso” con esta causa, lo cierto es que genera ingentes cantidades de inversión pública y privada local y extranjera.

Ante la demanda global de energéticos y sus consecuencias sociales y ambientales, la posición es transitar a procesos de generación alternativa con menores daños; sin embargo, esta idea no impide ni limita su continuo uso y empleo, sólo modifica la forma de obtener la energía. Esto plantea un nuevo inconveniente, pues para producir las nuevas tecnologías y su operación es necesario obtener insumos mediante procedimientos que aún utilizan energía altamente contaminante, así que por ahora la innovación contribuye nada más al incremento del consumo energético.

## Energía renovable en el mundo

La situación de la energía renovable en el mundo es cada vez más prometedora, a medida que se reconoce la necesidad de disminuir tanto nuestra dependencia de los combustibles fósiles como de nuestras emisiones de GEI; por ello, en varios países se está aumentando la inversión y hay un despliegue de tecnologías de energía renovable. En particular, las tecnologías de energía solar y eólica experimentan un rápido crecimiento. Tan sólo la capacidad instalada de energía solar fotovoltaica se ha duplicado cada cinco años desde 2010 y se espera que continúe creciendo en el futuro. También se está incrementando la capacidad instalada de energía eólica, especialmente en países como China, EUA y Europa.

Asimismo, se están desarrollando nuevas tecnologías de energía renovable, como la geotérmica, la de olas y la de biomasa, lo que brinda una mayor variedad de opciones para los países que buscan diversificar su matriz energética. Sin embargo, aún hay desafíos importantes para superar. Aunque la energía renovable está ganando terreno, aún representa una pequeña porción de la producción energética global, además de requerirse mayor inversión y apoyo político para acelerar su adopción internacional. Aparte, también existen desafíos técnicos y financieros en el despliegue de tecnologías de energía renovable en ciertas regiones del mundo.

Para analizar el consumo de energía renovable, se mencionan dos conceptos utilizados comúnmente: *a)* la energía verde, una propuesta que ha sido tendencia durante la última década debido a la supuesta preocupación mundial por no persistir con la contaminación o el daño a los entornos naturales; *b)* la energía renovable, la cual toma el lugar predominante en el uso y exposición de las ideas de este capítulo al englobar características de ambos conceptos; más adelante se señala que la energía verde tiene limitaciones y arrastra efectos nocivos para los entornos, razón por la que aquí se equiparan.

### *Energía renovable y energía verde*

Es importante destacar que aunque ambos términos son utilizados por lo general de forma intercambiable, existen diferencias fundamentales entre ellos. La energía verde supuestamente es producida de manera sostenible y amigable con el medio ambiente, pero no tiene que ser por fuerza de fuentes renovables. Por ejemplo, la energía nuclear es considerada



como energía verde debido a que no emite dióxido de carbono, pero no es renovable, ya que se obtiene a partir de reacciones de fisión nuclear producto del uso de isótopos de uranio; dicho material se encuentra disponible en grandes cantidades, pero no es infinito y la mayoría de las reservas existentes están en el mar. A su vez, la energía renovable proviene de fuentes naturales que se regeneran constantemente, como la solar, eólica, hidroeléctrica, geotérmica, entre otras. Estas fuentes no generan GEI ni tienen un impacto significativo en el medio ambiente.

En el contexto mundial actual, se está dando una mayor importancia a la transición hacia la energía renovable, debido a la creciente preocupación por el cambio climático y a la necesidad de reducir las emisiones de GEI. Además, la tecnología ha avanzado de modo significativo en los últimos años, lo que ha vuelto más económica y accesible la producción de energía renovable.

Ahora bien, se puede agregar que tanto la energía renovable como la verde hacen referencia principalmente a procesos minihidráulicos y megahidráulicos eólicos, solares y geotérmicos, aunque algunas veces se incluye la biomasa, el biogás o el gas natural como suministros en la generación de electricidad, pues el beneficio de utilizarlos se revela en la reducción de emisiones de GEI en la atmósfera planetaria, lo cual disminuye el impacto del cambio climático producto de las actividades humanas.

De la misma manera, los dos caminos (la energía renovable y la verde) comparten los objetivos de disminuir la dependencia existente sobre la energía fósil como combustible, ampliar el abanico energético y reducir tanto los riesgos como los costos ambientales y sociales. En este sentido, se busca utilizar las fuentes renovables o verdes como suministro energético en tareas cotidianas: el funcionamiento de las tecnologías industriales, los medios de comunicación o el transporte de mercancías y personas; en forma de materia prima susceptible de ser transformada en energía calorífica o aire acondicionado para ser empleada en los hogares mediante sistemas de calefacción —por ejemplo, el solar para agua—; o en forma de electricidad para utilizarla en la industria productiva (Oviedo, Badii, Guillen y Lugo, 2015).

Entonces, el sector está conformado por procedimientos de generación de energía calorífica, eléctrica y mecánica que involucran el viento, el agua, el sol, el calor del núcleo de la Tierra, así como la biomasa (véase

figura 1) y el gas natural<sup>6</sup> con mínimas emisiones de GEI; sin embargo, los datos estadísticos sobre la generación de energía renovable se encuentran separados:

Primero, en mayor cantidad, la energía producida por gas natural se contabiliza en 68% del total de los procesos señalados. Aun cuando es cierto que emite gases, lo hace en un menor porcentaje que otros combustibles fósiles, motivo por el cual se incluye dentro del listado; pero ha sido rechazado por ambientalistas y organizaciones que se preocupan por el crecimiento del consumo de este energético (Caballero, 2022).

Después tiene lugar la hidroeléctrica con 18%. Se registra separada de las renovables, debido a que no siempre se considera verde al usar infraestructura de grandes dimensiones, lo que pone en peligro la flora, fauna y poblaciones que tienen que migrar al ver inundados sus territorios. Incluso ahora, las minicentrales hidroeléctricas se ven como amenazas al ecosistema y a la seguridad alimentaria, pues la falta de estudios imposibilita determinar la verdadera condición e impactos de este sector (Salisbury, 2018).

Finalmente, la denominada energía renovable sustenta 14% de lo producido, lo cual integra a la energía derivada del viento, la radiación solar y los biocombustibles (BP Public Limited Company [BP PLC], 2021). Por ello, esta última será la que se considere en este capítulo, en virtud de que existe un consenso sobre los procesos que componen a este sector.

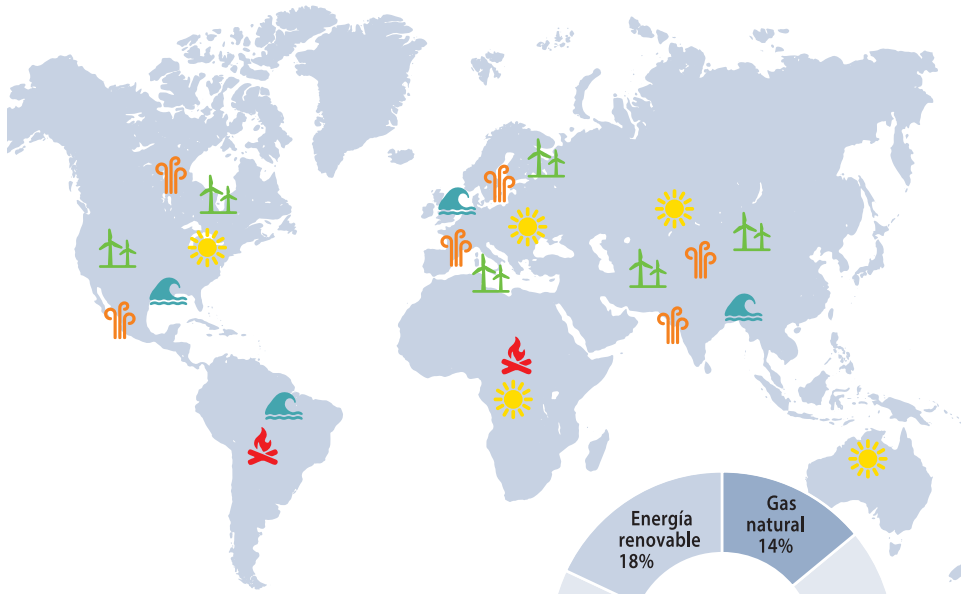
En este contexto, no se marca en este apartado la diferencia entre ambos esquemas, energía renovable o verde, sólo se toma como renovable; además, la producción de paneles solares, turbinas y todo tipo de tecnologías necesarias para la generación de esta energía necesita otro tipo de suministros energéticos que ocasionan emisiones contaminantes previas o posteriores a su utilización final. Por tal motivo, la cantidad usada de energías fósiles y las emisiones contaminantes durante todo el periodo de desarrollo energético evitan llamarla o generalizarla con la denominación de energía verde.

---

<sup>6</sup> En 2021, la Unión Europea decidió analizar al gas natural (y la energía nuclear) como fuente para generar energía verde, debido a su reducida emisión de GEI y al papel fundamental que tiene en la TE mundial (Serbeto, 2022).

De igual manera, el gobierno mexicano ha proyectado, en la Ley de la Industria Eléctrica de 2021, la generación eléctrica en centrales térmicas o de cogeneración como energía limpia, a pesar de que éstas son alimentadas por gas natural o carbón. El requisito en cuanto a emisiones que deben cumplir lo establecerá la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales.

FIGURA 1  
Tipos de energía renovable más comunes en el mundo



**Eólica**  
Es la energía del viento transformada en energía mecánica o eléctrica.



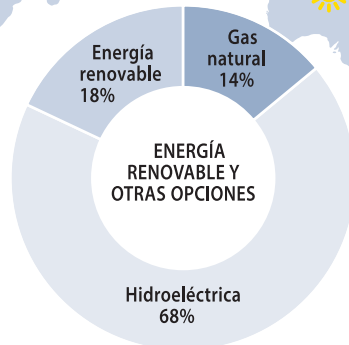
**Hidráulica**  
Es la generación de electricidad a partir de la energía producida por el agua que corre al salvar el desnivel natural o artificial existente entre dos puntos.



**Geotérmica**  
Es la energía proveniente de la tierra en forma de calor: ésta fluye a través de fisuras en rocas y se acerca a la superficie, donde su acumulación depende de las condiciones geológicas del lugar.



**Biomasa**  
Es la energía que se obtiene de residuos animales y vegetales. Se puede aprovechar de dos maneras: quemarla para producir calor o transformarla en combustible (sólido, líquido o gas).

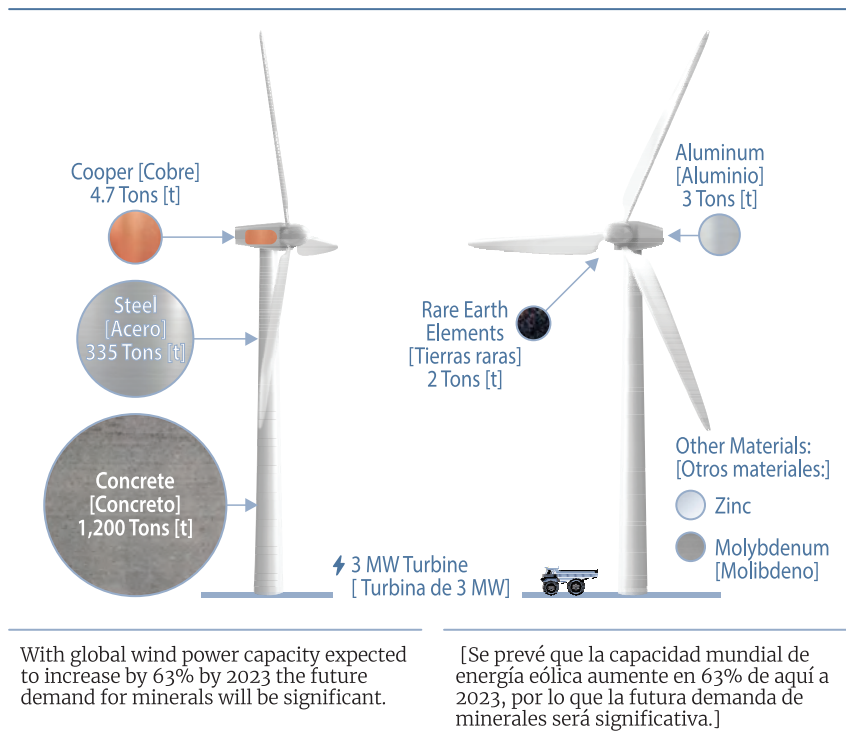


**Solar**  
La energía proveniente de la radiación del sol se divide de acuerdo con la tecnología utilizada en:

- **Fotovoltaica:** es la transformación de la radiación solar en electricidad a través de paneles, celdas, conductores o módulos fotovoltaicos, elaborados principalmente de silicio y formados por dispositivos semiconductores.
- **Solar de alta concentración:** paneles parabólicos que concentran la radiación solar para transformarla en energía eléctrica.
- **Térmica:** es el aprovechamiento de la radiación solar para la captación y almacenamiento de calor a través de colectores termosolares.

Un ejemplo útil para aclarar que la energía verde también puede provocar impactos negativos —como la contaminación en su proceso de producción y en los desechos— es la eólica, puesto que, para construir un aerogenerador que produce 3MW fueron necesarias dos toneladas de tierras raras, tres toneladas de aluminio, cerca de 335 toneladas de acero y 4.7 toneladas de cobre, entre otros minerales, como el zinc, molibdeno y concreto (Banco Mundial [BM], 2019), (véase figura 2); por si fuera poco, el aerogenerador ocasiona contaminación visual y afectaciones a la flora y fauna una vez instalado (Vázquez, 2010).

FIGURA 2  
Consumo de minerales para la construcción e instalación de un aerogenerador (3MG)

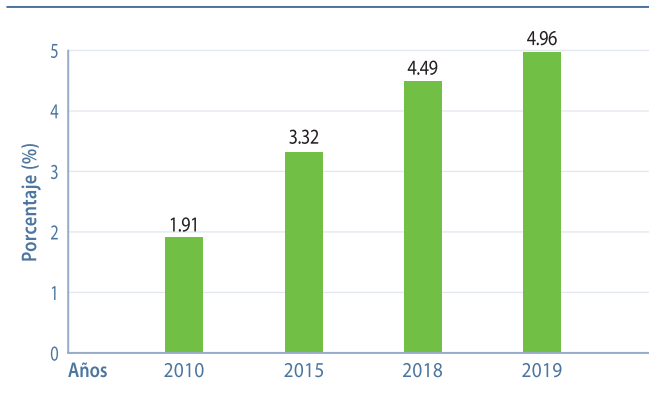


Fuente: BM (2019). Traducción y adaptación de la autora.

Con base en lo anterior, se considera que la energía renovable y la verde no contaminan o reducen al mínimo las emisiones de GEI para hacerlas compatibles con el entorno y sus ecosistemas. Sin embargo, el mercado

internacional ha influido en la promoción del empleo de la energía verde y se ha aprovechado del furor ambientalista por el que pasan los gobiernos de diferentes países, parte de la población y las empresas productivas. Esta situación ha llevado a que se incremente su generación y uso en un periodo muy corto, de tal manera que en el año 2010, el consumo de energía renovable representaba 1.91% del total de la consumida en el mundo (véase gráfico 4); cifra que no es poca, ya que el consumo es inmenso, además de que continúa creciendo.

GRÁFICO 4  
Porcentaje de energía renovable consumida  
en el mundo



Fuente: elaboración propia con información de BP PLC (2021).

Ahora bien, al analizar los últimos 10 años, el consumo de energía renovable ha seguido una tendencia creciente, al grado de que en 2019 se contabilizó 4.96% del total de la energía usada en el mundo, lo que implica un aumento de 260% para dicha etapa (BP PLC, 2021).

Pese a ser un gran logro para aquellos países que consumen este tipo de energía, la realidad muestra que continúa subiendo el consumo de materia fósil (véanse gráficos 1 y 2). Es más, para generar energía renovable durante el desarrollo productivo de las tecnologías utilizadas en este procedimiento, el Banco Mundial (BM, 2019) ha mencionado que tan sólo las empresas que extraen los minerales empleados en la producción de las tecnologías necesarias para generar energía renovable usaron 11% del total de la energía producida en el mundo; es decir, no se alcanzó a cubrir su

propio consumo (que fue menor a 5%). Además, no hay que olvidar que la mayor parte de la extracción de minerales se realiza en países que no cuentan con la tecnología final ni tampoco disfrutan su beneficio.

Asimismo, la energía renovable presenta inconvenientes, pues depende de las condiciones climáticas y de grandes extensiones de territorio para ser funcional; incluso en algunos casos requiere baterías para ser almacenada (Vázquez, 2010), sin que se considere el proceso de producción y extracción de suministros para fabricarlas. Por su lado, tampoco existen estudios de largo plazo que nos ayuden a visualizar posibles problemas ambientales en este tema, por lo que al desconocerse los efectos podría pensarse que no existen o son menores, lo cual quizá no sea real.

Por último, hay dificultades para instalar en las ciudades algunas de las tecnologías para generar energía renovable, por lo que su uso se plantea como opción sólo en regiones aisladas, sin fuentes de electricidad ni abastecimiento de energéticos que puedan utilizarse para iluminar calles y casas, preparar alimentos o calentar agua. Asimismo, tecnologías como los aerogeneradores necesitarán amplios espacios rurales para su instalación (Vázquez, 2010).

### **¿Democracia en el uso y consumo de la energía renovable?**

Para que una nación produzca, distribuya y utilice energía estará sujeta a condiciones definidas por diversos factores, como el mercado, el cual se impone en la variación de los precios que van generalmente al alza; también, existen circunstancias territoriales que involucran cantidades de recursos, capacidades de generación y suministro, los tipos de energéticos existentes, la oferta y el consumo.

De igual manera, se incluyen elementos internacionales, como acuerdos, tratados comerciales y/o la presión mundial por obtener ganancias en conjunto con la inversión nacional y extranjera que opera conforme las regulaciones establecidas o las no decretadas por cada país, con el objetivo de promover la producción de energía y, en algunas situaciones, privatizar los medios útiles que la originan. Igualmente, es importante considerar la relevancia que tiene la transferencia de tecnología y la capacitación en el uso dentro de los hogares, las industrias, plantas de procesamiento y generación, por lo que grupal o individualmente, estas situaciones pueden limitar el aprovechamiento y el acceso de la energía para algún sector de la población o promoverla.

En el caso de la energía renovable, se advierte una diferencia sustancial entre las diversas regiones y países en el mundo en cuanto a uso. Es más, la desigualdad en el consumo se acentúa en mayor medida que lo demostrado en el gasto de energías primarias (véase gráfico 1) o secundarias, como la electricidad (véase gráfico 3). Así, de 100% del consumo planetario de energía renovable hay algunos elementos que destacan:

- Países como China, India y Japón sostienen consumos energéticos de 32.7% de un total de 39% empleado en la región de Asia y Pacífico.
- En América del Norte, el principal consumidor es EUA, que emplea actualmente 19.4% de un total de 22.2% para la región. Deja muy poco para los otros dos países que componen esta zona: Canadá y México, sólo 2.8 por ciento.
- En este mismo escenario se encuentra Europa, que utiliza 28.2% y donde sobresalen Alemania, Reino Unido, España, Italia y Francia con 7%, 3.8%, 2.4%, 2.1% y 2.1%, respectivamente. Esta región se distingue por ser la más equilibrada en consumo, pues la mayoría de las naciones contribuye en alguna magnitud a la dimensión total señalada (BP PLC, 2021).

En el cuadro 4 se muestran los países con mayor consumo de energía renovable en el mundo y la región a la que pertenecen. Éstos se complementan con España (2.4%), Italia (2.1%) y Francia (2.1%).

CUADRO 4  
Países con mayor consumo de energía renovable\*  
en el mundo en 2020

País	Región	Consumo (exajulios)	Porcentaje del total mundial (%)
China	Asia-Pacífico	7.79	24.6
EUA	América del Norte	6.15	19.4
Alemania	Europa	2.21	7.0
Brasil	América del Sur	2.01	6.3
India	Asia	1.43	4.5
Reino Unido	Europa	1.20	3.8
Japón	Asia	1.13	3.6

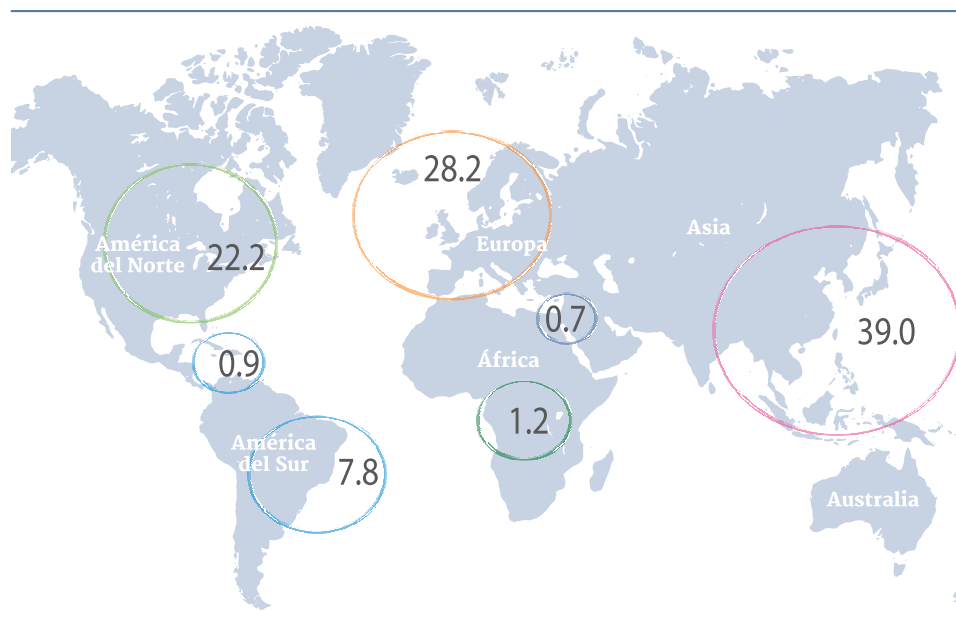
\*Se consideran fuentes eólicas, solares e hidroeléctricas, principalmente.

Fuente: elaboración propia con datos de BP PLC (2021).

Igualmente, encontramos naciones y regiones que muestran índices mínimos y, en algunos casos, insignificantes de uso de energía renovable. Ello incluso provoca no estar dentro de las estadísticas, por ejemplo: a) algunas naciones de África que conglomeran apenas 1.2% del consumo; b) América Central y las islas del Caribe con 0.9%, y c) América del Sur —excepto Brasil— con consumos de 1.5% (BP PLC, 2021), lo cual demuestra lo efímero y desigual del empleo de la energía y, quizá, del acceso a la tecnología para generar energía renovable en varias regiones del mundo.

Así, la energía renovable se consume principalmente en países de América del Norte, Asia y Europa. Adicionalmente, se incluye Brasil dentro de estas naciones —aunque no la región a la cual pertenece— de mayores consumidores. En la figura 3, se muestra una representación de las proporciones existentes hasta el año 2020, en que se refleja lo desigual del gasto en el planeta.

FIGURA 3  
Porcentaje (%) del consumo de energía renovable en el mundo<sup>7</sup>



Fuente: elaboración propia con datos de BP PLC (2021).

<sup>7</sup> La cantidad de 0.7 que muestra el mapa se refiere a 0.2 de países independientes y 0.5 de los países de Medio Oriente.



Ahora bien, hacer notoria la distribución del consumo de la energía renovable sirve para plantear la desigualdad que existe sobre este tema en el mundo. Este fenómeno se vincula con la vulneración de la democracia<sup>8</sup>, al no celebrarse la igualdad en el empleo de estas fuentes energéticas, pues en algunas regiones no son de fácil acceso para toda la población debido a la falta de inversión por las reducidas ganancias, los precios, la abundancia de otros energéticos, la nula tecnología y falta de capacitación para llevar a cabo los procesos de generación de energía. Así, pese a ser un tema mundial y aunque la propaganda sea continua sobre la energía renovable, por el momento no es accesible para toda la población.

En este sentido, se pueden enunciar algunos casos que muestran la condición antidemocrática que implica el uso de la energía renovable o el conjunto de tecnologías intrínsecas. Por ejemplo, en términos planetarios, el acceso a los automóviles eléctricos trae consigo desigualdad, pues no todos los habitantes de los diferentes países o regiones tienen la posibilidad de comprarlos debido a que son bienes costosos en adquisición y mantenimiento. Únicamente en un puñado de naciones, los ciudadanos podrían pagar con sus ingresos de un año un vehículo de este tipo; en cambio, la mayoría de los habitantes de los demás países necesitarían invertir de dos a tres años aproximadamente para adquirirlo (sin tomar en cuenta gastos en alimentación, salud, educación, entre otros).

Para analizar la accesibilidad a un automotor eléctrico<sup>9</sup>, se comparan los ingresos per cápita contra el costo total de un automóvil marca Tesla de 50 mil dólares (véase gráfico 5) y el resultado es que solamente en 14 países del mundo podrían comprarlo con los ingresos de un año. Entre las naciones cuya población se supone podría pagarlo encontramos ocho de Europa, así como EUA, tres naciones de Asia Pacífico, un país de Medio

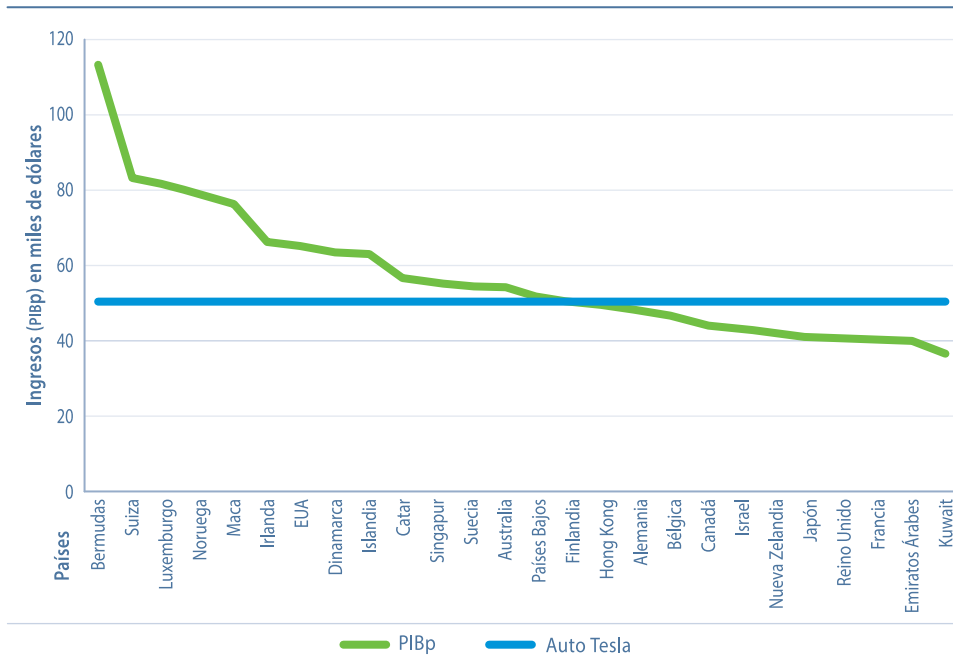
---

<sup>8</sup> Es preciso darle un significado al término democracia, que se menciona transgredido, ya que, aun cuando exista una diversidad de descripciones acerca del concepto que comúnmente se utiliza para describir al pueblo como gobernante o, de igual manera, como una acción de gobernar desde y para el pueblo (Sistema de Información Legislativa), aquí toma una orientación que involucra la igualdad ante la ley. Así se transpola esta concepción al derecho a emplear y obtener energía renovable por igual en el mundo siguiendo “los principios e ideales característicos de la democracia moderna donde se privilegia la idea de igualdad ante la ley e incluso en el ámbito económico o social, y la libertad del individuo frente al poder político” (Sistema de Información Legislativa), aunque también se podría mencionar la libertad de diversas empresas transnacionales que tienen injerencia en cuestiones políticas.

<sup>9</sup> Se propone para el comparativo un automóvil marca Tesla, por ser la compañía con más ventas en el mundo de vehículos de este tipo; además, el referido Model 3 no es el más barato ni el más caro, tiene un precio promedio.

Oriente y, finalmente, uno del Caribe. De los ocho países europeos resalta Noruega, ya que es la primera nación en tener más de 50% de automóviles eléctricos sobre la matrícula total (Mena, 2022).

GRÁFICO 5  
Países que pueden comprar automóviles Tesla con ingresos de un año



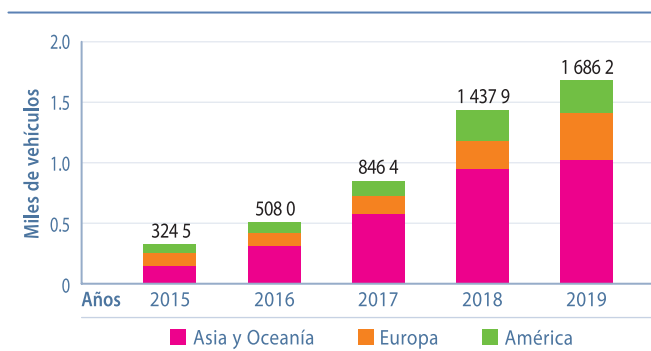
Fuente: elaboración propia con información de DatosMundial.com y Tesla.

Como se observa en el gráfico anterior, aun en países desarrollados y con altos ingresos, el costo de automóviles eléctricos como Tesla se encuentra por encima de las posibilidades de los habitantes en varios países. Ello demuestra que, por lo menos para esta marca en particular (la más conocida en el planeta), no se trata de una solución que pueda ayudar a una TE integral y colectiva.

Sin embargo, la adquisición y las oportunidades también dependen de las políticas financieras, económicas y ambientales de cada nación. Una referencia a ello, como se mencionó antes, es China. De acuerdo con Mena (2022), este país lidera las ventas mundiales, pese a que su ingreso per cápita es de 10550 dólares (DatosMundial.com). Vale la pena mencionar

que, por ahora, el principal factor del consumo de vehículos eléctricos no está determinado por el ingreso per cápita, pero sí muestra la tendencia de los grandes consumidores de esta tecnología por región, que justo se ubican en América, Asia Pacífico y Europa<sup>10</sup> (véase figura 4).

FIGURA 4  
 Venta de vehículos eléctricos de batería (VEB)  
 en el mundo entre 2015 y 2019



Fuente: Chevalier (2020).

Existen otros casos particulares por región o por naciones, que sirven de ejemplo porque están en el mismo tenor. Lo que expone esta desigualdad en el acceso o consumo de la energía renovable es que a ciertos sectores de la población no les es posible conseguir esta energía, pues en los planes de desarrollo de estas naciones no se contempla inversión en infraestructura para este tipo de actividades debido a restricciones económicas.

El primer ejemplo es la región de África, que dispone de un gran potencial de desarrollo de energía renovable disperso en todo el continente, ya que cuenta con características importantes: una de las zonas con mayor radiación solar en el mundo, por detrás de Atacama en Chile; los registros de más horas de sol al año; áreas con recursos eólicos de alta calidad, y recursos hídricos que se traducirían en mayor capacidad para la

<sup>10</sup> En el caso de América, la referencia es para el norte del continente, ya que Estados Unidos representa el mayor consumidor de la región y el segundo en el mundo.

- Asia Pacífico está representada por China, que es el mayor consumidor del mundo, por encima de Estados Unidos.
- Para Europa es más equilibrado el consumo, pero Alemania lidera las compras de vehículos de este tipo.

promoción, generación y acceso a fuentes y tecnologías más modernas y seguras incluso en comunidades aisladas. En resumen, se podría desarrollar la región de forma económica, social y ambiental (Acosta, 2016).

Pese a que África se ha beneficiado de iniciativas de inversión, fondos para la energía y otros mecanismos que han incrementado las posibilidades de generación de energía renovable, su enorme potencial no ha sido explotado, pues la percepción de riesgos y costos del capital no promueve la inversión privada, ya que el punto de vista social no es tan viable como lo sería el económico (Acosta, 2016). Esto se ve reflejado en que es la región con menores consumos de energía, tal como se muestra en los gráficos 1 y 3, así como en la figura 3.

Una segunda referencia son las comunidades en América del Sur que se sitúan en regiones remotas, como montañas, bosques o selvas, por lo cual les está imposibilitado el acceso a la tecnología o al suministro eléctrico mediante redes estatales o privadas debido a que no representan beneficios económicos para las empresas o para el mismo Estado. Además, el suministro ocasionaría el incremento de los costos operativos, sobre todo para los gobiernos, motivo por el cual iniciativas y fondos nacionales e internacionales cumplen en cierta medida la función que han dejado de lado las autoridades (Holmes y Hurley, 2016).

Sin embargo, en el afán de lograr beneficios, algunas organizaciones proveen de productos falsificados y de mala calidad para generar electricidad o poder calorífico. Este hecho debilita la confianza de las poblaciones en la tecnología, pues sólo tienen un periodo corto de funcionalidad y dejan a las comunidades en la misma situación inicial, sin acceso (Holmes y Hurley, 2016).

Para finalizar estos ejemplos, se expone la situación actual de Oaxaca, México, donde se encuentra el parque eólico más grande de América Latina, el cual produce más de 60% de toda la energía eólica del país. A pesar de ello, las comunidades ubicadas alrededor del complejo no disfrutan los beneficios de la distribución eléctrica o reducción de precios, pues estos puntos no estaban contemplados en el proyecto: sólo se pactó suministrar energía a la red eléctrica nacional, que en mayor medida es utilizada por grandes empresas, como Bimbo, Oxxo, Walmart e Iberdrola, entre otras.

Además de no tener acuerdos sobre la electricidad generada, tampoco se ofrecen suficientes empleos para la población, pues sólo estuvieron disponibles temporalmente; es decir, en el momento en que se construyó

el parque, pero no para la operación posterior. Ello ha ocasionado que la comunidad se sienta defraudada por las compañías que se instalaron en sus territorios (Torres, 2019).

Sin embargo, también se debe mencionar que se han presentado algunos intentos en varias partes del mundo, los cuales tienen por objetivo llevar a cabo una verdadera democratización de la energía. De esta manera, se han puesto —en manos de los menos favorecidos— recursos tecnológicos para la generación de energía a bajo costo y que posibilitan la cotidianeidad de la existencia. Algunos de estos prototipos se enumeran a continuación:

Aun cuando no es extraño que distintos países generen energía fotovoltaica para sus hogares a través de tejas, estos ejemplos se encuentran por lo general en Alemania o EUA, pues son naciones que disfrutaban altos índices de innovación tecnológica. Así, en los últimos veinte años, el mercado doméstico de la energía solar se ha desarrollado rápidamente en estos países; contexto que no ha alcanzado a todas las regiones del mundo. Por ello, esta tecnología aún parece revolucionaria. En un intento por modificar esta situación y democratizar la energía solar, la empresa Eternit ha colocado en Brasil tejas de fibrocemento sobre algunos hogares, lo que le permite incorporar las celdas fotovoltaicas compatibles con viviendas de interés social y/o en comunidades (Reid, 2022).

Mientras tanto, en Bangladesh, cerca de 20 millones de habitantes rurales que carecían de acceso a la red eléctrica, además de tener otras limitaciones, resultaron beneficiados por las políticas de energías renovables que el gobierno ha implementado desde 2008 —en conjunto con empresas privadas y organismos internacionales— para captar la energía solar y proveer a los hogares de electricidad; también, se han generado minirredes que iluminan calles, mercados, tiendas y restaurantes, lo que posibilita el ocio nocturno de las comunidades (Hossain S.F.; Pavesio, 2020).

Asimismo, se han incorporado otras tecnologías —como las bombas de riego solares— que conceden a los agricultores mayores rendimientos de sus cultivos; de esta forma, dejan de depender de los combustibles fósiles contaminantes y se crea un escenario que muestra una mejora para la población en situación de pobreza en este país (Pavesio, 2020).

Costa Rica es un referente en cuanto a la modificación de la matriz energética, pues desde 2015 mantiene una producción por encima de 98% de la energía eléctrica proveniente de fuentes renovables. Para 2020,

la producción eléctrica era hídrica (71.9%), geotérmica (14.9%), eólica (12.4%) y solar (0.6%), lo cual reducía al mínimo el empleo de fuentes fósiles (Reporte sostenible, 2021).

Por último, Uruguay ha demostrado ser un modelo excepcional de transición energética en América Latina. En un lapso aproximado de una década, el país transformó de un modo radical su matriz energética, antes altamente dependiente de las importaciones de petróleo. Hoy en día, alrededor de 95% de la electricidad uruguaya proviene de fuentes renovables, una combinación de energía hidroeléctrica, eólica y solar, además de la biomasa. Esta transición ha sido impulsada por una serie de políticas públicas y regulaciones favorables, así como por inversiones significativas en infraestructura energética. La diversificación de las fuentes de energía ha mejorado la resiliencia y seguridad energética del país, lo cual disminuye su vulnerabilidad a las fluctuaciones de precios de los combustibles fósiles. Aparte, Uruguay ha destacado como exportador de energía limpia a sus países vecinos, principalmente Argentina, lo que señala su éxito en la transición hacia un modelo energético más sostenible y resiliente.

El marco anterior ubica a los consumidores de energía renovable en regiones claramente diferenciadas, pues también son en gran parte quienes cuentan con mayores índices de desarrollo y crecimiento económico. Además, describe la desigualdad entre quienes pueden acceder a la tecnología y quienes no. Aunque se ha intentado distribuirla a todo el planeta, los esfuerzos por la obtención de este tipo de energía aún no lo gran materializarse en algunos casos. Así, regiones de África o de América Latina quedan fuera de los beneficios promovidos por una TE que modifica el consumo energético fósil a renovable.

Vale la pena mencionar que en lugares como América Latina, los proyectos energéticos que se pensaba concretar suelen estar inmersos en denuncias por despojo de terrenos, desplazamientos forzados, abusos corporativos, destrucción de la flora y fauna, violaciones de derechos indígenas y humanos, criminalización de la protesta y daños al entorno social. Por si fuera poco, a menudo están ligados a conflictos que se desprenden por la industria minera, la cual suministra los elementos necesarios para producir las tecnologías utilizadas en la generación de energía renovable (Santiago, 2021).

Igualmente, cuando este tipo de proyectos de inversión llegan a países de América Central y América del Sur —así se realice la transferencia financiera y de tecnología—, no se capacita a la población para una buena gestión o para contribuir con la mejora del proceso e innovación tecnológica, lo que implica depender de empresas transnacionales para continuar con la TE (Canseco, 2010).

El acceso a la energía renovable es esencial para garantizar una democracia en el uso y consumo de energía. Sin embargo, en muchos países, la disposición a dicha energía sigue siendo desigual porque hay grupos privilegiados que se benefician de un mayor acceso a estas fuentes de energía, mientras que otros simplemente no pueden utilizarla. Esto se debe a varios factores: la ausencia de infraestructura adecuada, la falta de apoyo gubernamental y la escasez de recursos financieros, entre otros.

La democracia en el uso y consumo de la energía renovable también resulta afectada por la existencia de barreras económicas y políticas que dificultan la transición a fuentes más limpias y sostenibles. Estas barreras incluyen la ausencia de políticas y regulaciones adecuadas, la falta de inversión en investigación y desarrollo o las pocas medidas que promueven el uso de la energía renovable. Es importante mencionar que algunos países han logrado avances significativos en la transición a este tipo de energía, así que han implementado políticas y reglamentos eficaces para fomentar el acceso democrático a estas fuentes energéticas, pero aun queda mucho por hacer para que otras naciones disfruten esta energía.

## Conclusiones

El consumo descontrolado de energéticos se ha extendido en el mundo; situación que por más esfuerzos realizados por expandir la matriz energética y cubrir la demanda no parece tener un final. Es más, año con año, continúa aumentando el uso de diversas fuentes. A la par, el verdadero problema se deja de lado al no existir propuestas para reducir o hacer más eficiente la utilización energética en el nivel global; por este motivo, pese a la combinación de todas las fuentes —ya sean fósiles o renovables—, el suministro resultará insuficiente para satisfacer el incremento de la exigencia mundial de energía.

Por ahora, con base en lo analizado a lo largo de este capítulo, es notorio que algunas regiones o países pertenecientes a Asia, Europa y América del Norte disponen de los mayores consumos energéticos del mundo, en tanto otras partes, como África, América Central y América del Sur son relegadas a un uso reducido en comparación con otros territorios. Por ello, la diferencia en el uso y la producción de energía entre las diversas zonas puede verse afectada por elementos como la inversión estatal y la privada, regulaciones económicas o políticas sociales y ambientales que han determinado en conjunto la política energética de cada país y, en esta misma medida, su consumo.

Asimismo, es preciso incluir los costos de operación en los procesos de generación y las redes de transmisión eléctrica existentes en cada caso, como apoyo, para experimentar el consumo actual. Lo relevante es que, en todos los escenarios, las cuestiones señaladas terminan por contribuir tanto a favor como en contra de los alcances en el gasto energético (Canseco, 2010).

En este marco, se plantea el problema del bajo consumo de energía en zonas del sur del planeta, lo cual se traduce en la reducida o limitada producción de mercancías para exportar o de uso nacional. Al respecto, Folchi y Del Mar (2007) indican que existe una correspondencia estrecha entre la energía disponible y el nivel de producción, debido a que la mayoría de los bienes requieren transformaciones para su aprovechamiento; idea que revela la condición de superioridad de las regiones con grandes gastos de energía respecto a las que consumen en menor medida, en cuanto a las posiciones que ocupan dentro de las clasificaciones de crecimiento económico o índices de desarrollo humano.

Por consiguiente, uno de los inconvenientes de las regiones del sur es que, debido a su bajo consumo energético, estos lugares presentan un reducido crecimiento productivo y económico, a pesar de su gran riqueza natural que facilitaría la producción energética por medios eólicos, solares e hídricos; además, cuentan con vastas reservas de recursos naturales, como carbón, petróleo o biomasa. Así, aunque Stern y Cleveland (2004) aseveren que la energía sería un factor esencial para la producción, aquí se da cuenta de que no es suficiente poseer los recursos sino que influyen otros elementos, como el conocimiento y la tecnología que consume la energía, para que se cumpla lo mencionado por Folchi y Del Mar (2007), por Stern y Cleveland (2004).




Este capítulo presenta evidencia de lo desigual del consumo de energéticos en el mundo. Es claro, por lo tanto, que se deben atender estas diferencias entre las regiones mediante procesos que partan de lo colectivo e involucren y converjan en las sociedades con menores alcances y niveles de uso de energía. Esto, con la finalidad de equiparar las oportunidades de mejora en las condiciones de vida de todos los rincones del planeta que buscan tener acceso a energías para el uso cotidiano. De esta forma, se podría transitar hacia cierta equidad (García, 2019).

Finalmente, no es la intención promover el incremento del consumo energético del sur planetario a los niveles de las regiones del norte como una forma de equidad, sino evidenciar el comportamiento desigual que lo compone. En todo caso, se requeriría una sociedad más sostenible, con tecnologías que no sean insuficientes ni de difícil acceso por los elevados costos que tendrían para la población o el medio ambiente; asimismo, un elemento clave estaría sujeto a la promoción de cambios sobre diferentes aspectos como las prácticas sociales sobre el consumo, la distribución, los patrones de consumo y la producción de bienes (Plata y Quevedo, 2017).

11299883

<https://www.flickr.com/photos/11299883@N08/32512998700/>

A photograph of a stone archway, likely a remnant of a watermill or bridge, set against a building with a balcony and windows. The archway is made of rough-hewn stone and contains a wooden structure of beams. The building above has a balcony with a black metal railing and a window with a wooden frame. The scene is overgrown with moss and small plants, suggesting an old, abandoned structure.

# Transiciones energéticas de la humanidad



## Introducción

El objetivo de este capítulo es analizar la conceptualización de la transición energética (TE) con la intención de ayudar a situar su relevancia en el contexto moderno, para lo cual se describen sus principales motivaciones políticas y sus amplias limitaciones prácticas en la forma como se ha aplicado en la actualidad.

La TE mundial es un tema que ha ganado relevancia en la agenda global, en especial en un contexto donde la crisis climática y la sostenibilidad se han convertido en preocupaciones centrales. La TE busca reemplazar los sistemas de energía basados en combustibles fósiles por alternativas más limpias y sostenibles, como la energía solar, la eólica y la hidroeléctrica. Sin embargo, el término “TE” ha sido objeto de múltiples interpretaciones, lo que ha generado debates y ambigüedades en torno a su verdadero significado y alcance.

Uno de los principales desafíos en la implementación de la TE es la falta de un análisis adecuado, que considere las necesidades y capacidades específicas de cada nación. No todos los países tienen el mismo acceso a recursos naturales, tecnología o capital, por lo que esta transición no es una solución única para todos. Además, la tendencia a centrar la TE en intereses empresariales y económicos ha generado críticas, pues esto podría llevar a soluciones que no son verdaderamente sostenibles en el largo plazo.

Así, la TE es un tema complejo que requiere un enfoque holístico y adaptado a las circunstancias específicas de cada país, pues enfrenta de-

safíos significativos, como la falta de consenso y el enfoque en intereses de corto plazo. Sin embargo, su importancia en la lucha contra el cambio climático la convierte en una prioridad que no debe ser ignorada.

Se podría decir que la comprensión conceptual de este tema despierta la idea del multicolor de la TE; sobre todo, a medida que se entiende cómo la transformación de nuestras actividades productivas y los requerimientos energéticos siempre han estado vinculados al interés económico y a la violencia sistémica contra quien se opone. Este hecho demuestra que la economía “verde” es a menudo roja de fondo.

El capítulo se divide en tres secciones, además de la introducción. La primera explora la evolución de las transiciones energéticas desde un enfoque tradicional hasta uno multidimensional, el cual incluye tecnología, política, economía y cultura. La segunda parte aborda la evolución histórica del uso de energía por la humanidad, desde la fuerza humana y animal hasta los combustibles fósiles. Destaca los avances y desafíos asociados con cada transición energética, incluidos los impactos ambientales. Subraya la importancia de aprender de las lecciones del pasado para adoptar fuentes de energía más limpias y sostenibles en el futuro. La tercera sección se centra en la conceptualización de la TE, al describir su naturaleza integral y multidimensional. No se trata sólo de un cambio tecnológico, sino también implica aspectos sociales, políticos y económicos; enfatiza el hecho de que esta transición debe ser inclusiva, equitativa y justa para ser en verdad efectiva. Finalmente se presentan las conclusiones.

### **Proceso y transición de la energía**

Las primeras transiciones de la humanidad se llevaron a cabo bajo un enfoque tradicional, en el que un recurso fue sustituido por otro, ya sea por escasez de uno o por obtener un mayor beneficio o eficiencia. Bajo esta perspectiva, se migró desde la fuerza corporal personal hacia la domesticación de animales y el aprovechamiento del fuego; después, hacia herramientas que utilizaban la energía cinética del agua y del viento, para llegar por último a los periodos de industrialización, los cuales involucraron el aumento de quema de combustibles: carbón, aceite y gas natural, principalmente.

A pesar del gran desarrollo y crecimiento económico que las transiciones anteriores han significado para un buen número de países, sus beneficios siguen siendo casi inexistentes en economías en vías de desarrollo.



Dicha situación ha dado origen al concepto de transición multidimensional o multinivel; se trata de un enfoque moderno, el cual amplía la TE no sólo a una sustitución de tecnologías, sino a cambios en los usuarios, la política, la ecología, la economía, la infraestructura, la cultura, entre otros rubros, que convergen con la definición de desarrollo sostenible<sup>11</sup>.

Desde un enfoque prospectivo y de acuerdo con el consumo energético y la innovación tecnológica actual, se describe la TE hacia el todo eléctrico. Se entiende como un proceso en el que la transformación debe darse por la oferta y la demanda. Por el lado de la oferta, se busca el despliegue de las energías limpias y renovables que ayuden a mitigar y disminuir los problemas ambientales, así como a solventar las limitaciones que dichas tecnologías conllevan. Por parte de la demanda, se pretende electrificar sectores clave como el transporte y las industrias de alto consumo; sin embargo, surgen nuevos retos; por ejemplo, la gestión de la demanda o la modernización de redes de transmisión y distribución, entre otras acciones que brinden estabilización a la red y disminuyan la probabilidad de fallas. Respecto al sector residencial, además de implementar medidas de eficiencia energética, es imprescindible fomentar el cambio de conductas y rutinas que promuevan la disminución de la demanda, así como la conciencia ambiental.

Es importante destacar las acciones que se refieren al proceso de TE en términos técnicos y económicos, por lo que debe señalarse que este proceso es gradual, abarca comúnmente extensos periodos de tiempo y es influido por los patrones de consumo de un país o región; es decir, por la cantidad de energía consumida, el crecimiento de la población, el desarrollo económico y/o el cambio de una tecnología convencional por alguna más moderna y de mayor productividad o eficiencia.

---

<sup>11</sup> En el contexto de la TE, el desarrollo sostenible se puede definir como un enfoque multidimensional y sistémico para el progreso económico, social y tecnológico que busca equilibrar el crecimiento económico, el bienestar humano y la preservación del medio ambiente para la modificación en la matriz energética enfocada en la adopción de otras soluciones distintas a los hidrocarburos. Este enfoque implica no sólo la sustitución de tecnologías energéticas obsoletas o dañinas por alternativas más limpias y eficientes, sino también cambios integrales en políticas, prácticas económicas, comportamientos sociales y estructuras culturales. Sin embargo, el desarrollo sostenible como concepto ha planteado severas limitaciones en su comprensión, práctica y operacionalización efectiva en el mundo desde su planteamiento en 1987, debido a la falta de una rigurosa conceptualización del mismo, lo que ha llevado a la creación de cientos de definiciones, algunas de ellas incompatibles entre sí o contradictorias.

Al tratarse de un proceso que abarca largos periodos de tiempo, existen distintos factores y actores que funcionan como impulsores o son herramientas para acelerar su despliegue, así como aquellos que oponen resistencia al cambio con el propósito de frenar o limitar la transición. De manera cuantitativa, más no limitativa, se enlista el precio de combustibles; ésta sería quizá la variable más significativa de cualquier cambio en el sistema energético (Azamar, 2023).

Asimismo, características como la innovación, una mayor eficiencia y una mejora en la calidad de vida pueden ser clave para la adopción de tecnologías o servicios nuevos, aunque impliquen un mayor costo. Finalmente, la participación política y gubernamental es crucial para una TE; sus objetivos e ideologías suelen ser esenciales para la implementación y el apoyo de determinadas tecnologías o cambios en el sistema energético. Además, su intervención disminuye la incertidumbre de invertir en proyectos energéticos que suelen involucrar riesgos.

Cualquier TE es un proceso complejo, el cual necesita la participación de todos los actores del sistema para que se visualicen sus beneficios, así como para que se implementen los instrumentos y las herramientas descritas anteriormente.

Es posible reconocer la importancia de llevar a cabo la transformación de un sistema energético a otro. Queda claro que se trata de un cambio profundo y complejo, que si bien implica sustituir una tecnología o recurso, se trata de un proceso de participación conjunta entre ciencia, economía, política y ecología, entre otras ramas involucradas. Alinear las acciones de todos los participantes al bien común es una tarea complicada que requiere constancia, pues cada actor tratará de velar por sus propios intereses; asimismo, al ser un proceso de largo plazo, resulta difícil visualizar el beneficio inmediato.

La transición es un proceso gradual y paulatino, que se espera sea equilibrado y ordenado, y se caracterice sobre todo por el mejor aprovechamiento de los recursos ya disponibles; es decir, mediante técnicas de eficiencia energética. También se espera la modernización de infraestructura que permita el despliegue seguro y confiable de tecnologías, una sinergia entre demanda y oferta, y la participación conjunta de diferentes actores: el gobierno y la sociedad, lo público y lo privado.



## Uso y transformación de la energía

Desde el amanecer de la humanidad, la relación de nuestra especie con la energía ha evolucionado de manera constante y, a menudo, ha sido revolucionaria. En un inicio, nuestros antepasados confiaban en su propia fuerza para cazar y construir sus hogares. Sin embargo, se dieron cuenta de que aumentaban su eficiencia energética al incorporar en la ecuación a otras criaturas y elementos. Este descubrimiento marcó el comienzo de una nueva era en la gestión de la energía, donde la domesticación de animales y la utilización del fuego se convirtieron en los cimientos de las sociedades humanas (Smil, 2004).

Los animales, en particular los caballos, demostraron ser más potentes y versátiles en el trabajo que los humanos, lo que hizo crecer su uso como fuente primaria de energía. Posteriormente, emergió una nueva fase en nuestra relación con la energía al introducir fuentes renovables: la eólica y la hidráulica, que proporcionaron una forma de energía más intensa y concentrada, las cuales se utilizaron de forma amplia previo a los procesos intensivos de la industrialización.

Antes de ese periodo, un giro energético clave se originó en Europa. Hasta entonces, la leña era la principal fuente de calor; pero fue desplazada por el carbón vegetal, una fuente de energía más limpia y potente. Aunque era más costoso, su mayor eficiencia lo hizo popular, particularmente en la industria del metal (Smil, 2010). Sin embargo, su empleo intensivo llevó a una deforestación masiva y, de manera eventual, a un cambio hacia el carbón mineral.

A principios del siglo XVIII, comenzó una nueva tendencia en la generación de energía. El carbón demostró ser una fuente de energía más efectiva y rentable que la leña, lo que resultó en una adopción rápida y mejoras en su extracción. La invención de la máquina de vapor aceleró aún más el uso de esta fuente, lo que permitió la introducción del coque, una forma de carbón de alta calidad. A mediados del siglo XX, a pesar de un cambio hacia la mecanización, este combustible continuó desempeñando un papel crucial en la generación de energía (Smil, 2010).

No obstante, con su auge, el petróleo y el gas natural a finales del siglo XX redujeron significativamente la importancia del carbón. Aunque las tecnologías relacionadas con el petróleo existían desde el siglo XVIII, la combinación de algunos descubrimientos de grandes yacimientos, la postguerra y el auge económico de EUA condujeron a un aumento drás-

tico en la demanda del llamado oro negro. Este cambio también marcó la transición de las máquinas de vapor a los motores de combustión interna, como la principal tecnología de conversión de energía (Solomon y Krishna, 2011).

El apogeo de las industrias del petróleo y del automóvil fue recíproco, con descubrimientos de este tipo de combustible que condujeron a un exceso de producción y una caída en los precios del mismo a principios del siglo XX. Este cambio radical reconfiguró las dinámicas de vida y productivas, al transformar la matriz energética global y marcar una nueva era en la historia de la humanidad.

Las etapas anteriores representan no sólo modificaciones en la fuente de energía utilizada, sino también en cómo nuestra especie ha comprendido y aprovechado la energía. Desde la fuerza física humana y animal hasta la utilización de los fenómenos naturales y los combustibles fósiles, cada transición ha implicado una evolución significativa en nuestra habilidad para manipular y aprovechar la energía en formas cada vez más eficientes y potentes (véase figura 5).

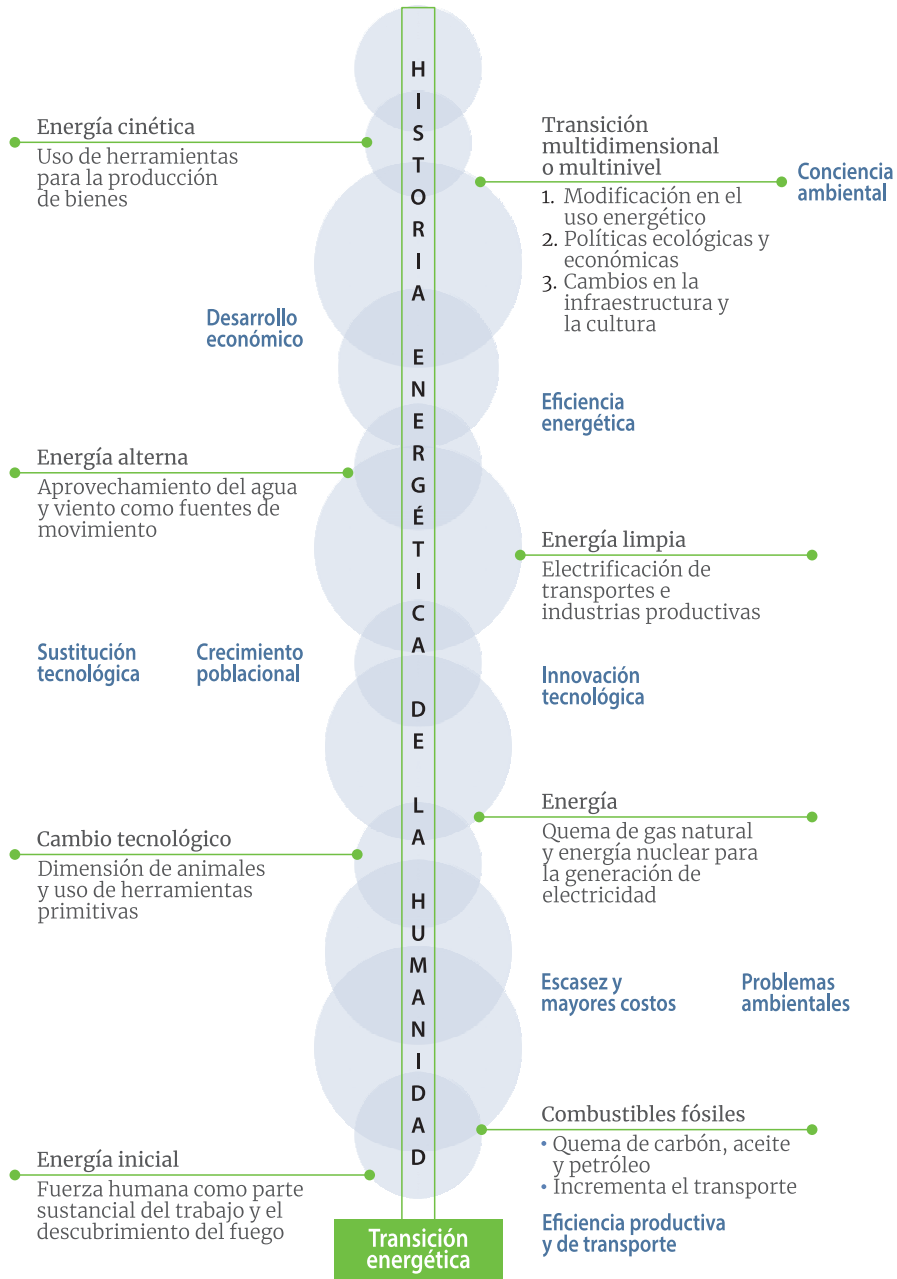
A lo largo de esta evolución, han surgido también complicaciones asociadas con cada fuente de energía. La deforestación causada por la dependencia del carbón vegetal es un ejemplo temprano de cómo estas fuentes pueden tener impactos ambientales devastadores. Del mismo modo, el cambio al carbón y luego al petróleo y gas natural ha llevado a problemas de contaminación y al cambio climático que la humanidad todavía está luchando por resolver.

Como civilización, nos encontramos ante la disyuntiva de buscar y adoptar nuevas fuentes de energía que nos permitan continuar con nuestro desarrollo, sin dejar a un lado la importancia del equilibrio con el entorno. Así como en el pasado hemos transitado desde la dependencia de la fuerza humana y animal hasta el dominio de la energía de los combustibles fósiles, debemos ser capaces de impulsar una nueva transición hacia fuentes de energía más limpias y sostenibles.

Vale la pena señalar que estas fases de TE no son simples cambios en nuestras fuentes de energía, sino que representan la evolución de la relación de la humanidad con su entorno y su comprensión de las fuerzas naturales.

FIGURA 5

## Línea del tiempo: historia energética de la humanidad



## La transición energética mundial

El término TE a menudo se menciona en discusiones sobre tecnologías limpias y disminución del impacto ambiental de los combustibles fósiles. Sin embargo, este concepto ha perdido claridad debido a la ambigüedad de su definición y su aplicación en la práctica. Diversos estudiosos han proporcionado interpretaciones de esta cuestión; pero, en la mayoría de los casos, han generado aún más confusión.

Según Smil (2015), una TE implica un cambio en la adquisición de energía primaria para garantizar la continuidad operativa del sistema económico y productivo. Mientras, O'Connor (2010) la describe como un conjunto significativo de transformaciones en los patrones de uso de la energía en una sociedad. En tanto, Sgouridis y Csala (2014) mencionan que se trata de un proceso controlado que permite a una sociedad avanzada reemplazar todos los insumos energéticos primarios de los combustibles fósiles con recursos renovables, a la par que mantiene un nivel de servicio energético suficiente por persona.

Por su parte, el Foro Mundial Económico (FME, 2018) proporciona una visión más amplia, al describir la TE como una transición hacia un sistema energético global más inclusivo, sostenible, asequible y seguro, que responde a los desafíos globales de energía y ofrece beneficios para las empresas y la sociedad sin comprometer el equilibrio del “triángulo energético”<sup>12</sup>.

Además, el FME sugiere que una TE sostenible implica la construcción de un sistema energético que minimice las externalidades ambientales negativas. Sin embargo, se debe recordar que la sostenibilidad —a menudo citada en las discusiones sobre TE— carece de un marco interpretativo definido y comúnmente aceptado<sup>13</sup>. A pesar de ello, se considera la puntualización del FME como una pauta general para su uso en este capítulo: la sostenibilidad dentro de la TE es “la medida en que el sistema energético se ha construido para minimizar las externalidades ambientales negativas” (FME, 2018, p. 27).

---

<sup>12</sup> Este triángulo se refiere a las tres áreas clave que cualquier sistema energético debe tener en cuenta: desarrollo económico inclusivo, sostenibilidad ambiental y acceso seguro y confiable a la energía.

<sup>13</sup> El concepto de sostenibilidad es ambiguo en su contenido y aplicación práctica, en parte debido al hecho de que existen en la actualidad más de cien conceptualizaciones diferentes sobre el mismo término (Morandín y Azamar, 2019).

Por lo que se puede observar, en casi todas las conceptualizaciones sobre la TE<sup>14</sup> —especialmente en la del FME—, se marcan las pautas mediante las cuales este proceso se puede completar al transitar del uso de un determinado recurso hacia otro; pero todas estas consideraciones se plantean desde lo global y se ignora la particularidad de los sistemas productivos y sociales de cada región.

La TE debería ser un proceso colectivo, en el que el papel de los actores particulares se sobreponga al de las instituciones y empresas, pues más allá de las políticas que se ejecuten o de los incentivos que se promuevan, en tanto un cambio de gran magnitud como éste se desconecte de las necesidades y capacidades locales, será casi imposible llevarlo a cabo.

Un ejemplo de lo anterior es el hecho de que, actualmente, casi tres mil millones de personas en el mundo no utilizan ningún tipo de tecnología sostenible para la generación de energía eléctrica (BM, 2021). Esto implica que, si bien existen importantes barreras económicas, culturales, prácticas, técnicas, etcétera para abrazar algún tipo de tecnología, el principal problema que afecta su adopción es que la TE es impulsada como una medida empresarial y económica en la que se ignoran las necesidades y capacidades locales de la población; pareciera pensarse que, al inducir un determinado esquema energético “sustentable”, desaparecieran todos los demás que supuestamente no lo son, aunque todavía sean útiles.

Y es que la sociedad en general realiza sus progresos técnicos de forma acumulativa y no de manera ordenada y lineal. El hecho de que, en la Antigüedad, las empresas comenzaran a remplazar la madera seca por carbón para energizar sus procesos no significó el fin del uso de la madera como combustible; por el contrario, se volvieron procesos complementarios y la dendroenergía<sup>15</sup> representa hoy al menos 10% de la generación de energía entre personas de menores recursos económicos en todas las regiones del mundo (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO], 2016).

En otras palabras, no se ha dado un verdadero proceso de TE, pues incluso el empleo de la energía animal es todavía un importante recurso para las personas del campo. Lo que en realidad ha sucedido es que, a lo largo de la historia humana, se han ido integrando diferentes fuentes de

---

<sup>14</sup> Sgouridis y Csala (2014) señalan que no existe constancia de una TE completa hasta la actualidad, solamente se ha logrado de forma parcial.

<sup>15</sup> Se refiere a la energía obtenida de la biomasa forestal.

energía primarias a los procesos productivos, lo cual ha dado lugar a la creación de distintas formas técnicas y prácticas de aprovecharlas; en algunos casos se sustituyen y en otros mejoran o invalidan a las otras, de acuerdo con los contextos.

El problema de la interpretación general que se tiene sobre la TE es que se deriva de una propuesta política para enfrentar los retos de la escasez energética que se percibían como una amenaza futura para EUA en la década de los setenta. Este término se mencionó y utilizó por primera vez<sup>16</sup> en 1977 como parte de un discurso del presidente estadounidense Jimmy Carter, quien así se refirió a la intención de preparar a su país para la tercera TE en la historia humana hacia un mundo pospetróleo en el que se utilizaría de forma más intensiva el carbón y otras fuentes renovables, como la energía solar, ante la escasez del oro negro (Carter, 1977).

Esta argumentación fue adoptada y reproducida por políticos de otros países y representantes de la Organización de las Naciones Unidas (ONU), quienes hacían énfasis en la necesidad de establecer un proyecto de trabajo colectivo en el que los esfuerzos de todos los países se enfocaran en lograr una TE ordenada hacia una economía independiente del uso de hidrocarburos (Basosi, 2020). Sin embargo, como lo señala Fressoz (2014), por el contexto en el que se presenta, esta propuesta se ha convertido en un instrumento político prescriptivo que, de fondo, busca la eficiencia técnica y económica antes que el bienestar colectivo, pues el enfoque de la TE como originalmente lo planteó Carter es mantener activos los sistemas productivos modernos, en especial los estadounidenses, ante la amenaza de la escasez y/o el embargo de hidrocarburos (Carter, 1977; United Nations [UN], 1981).

El empuje político estadounidense de este término (TE) tuvo gran relevancia y se generalizó mundialmente en 1981 —poco después del *shock* petrolero de 1979—, cuando se discutieron en la ONU los pasos que la comunidad internacional debería seguir para transitar hacia un objetivo que garantizara seguridad energética, independientemente de los elevados costos y riesgos de escasez que mantenían los hidrocarburos (UN, 1981).

Los resultados de dicha discusión fueron muy criticados tanto por la prensa internacional como por los mismos participantes, pues no se estableció un plan de trabajo sino que únicamente se utilizó el acto como

---

<sup>16</sup> Basosi (2020) señala que el término de TE era utilizado de forma esporádica en documentos que hacían alusión a otros procesos ajenos a los que Carter planteaba.

una palestra para dar a conocer mundialmente una propuesta política estadounidense. Esto fue evidente porque en el resumen del informe de la conferencia, realizado por el mismo país, se destacaba que a pesar de la experiencia de esta nación en procesos de TE a lo largo de su historia, el desarrollo y la distribución de la energía se encontraba en manos del mercado y de actores privados. Lo que, por una parte, ignoraba las necesidades, condiciones y capacidades de cada país para su generación energética y, por otra, proponía 14 fuentes energéticas, incluida la dendroenergía; de éstas, varias no eran renovables, otras se encontraban muy concentradas y algunas más implicaban una inversión demasiado grande para hacer posible su uso generalizado en contradicción de su propia lógica (Basosi, 2020).

Es así que la TE, como se planteó en la ONU, se trata de una propuesta emanada del interés empresarial y económico que impone objetivos homogeneizados en un mundo diverso con serias limitaciones prácticas y financieras para enfrentar un reto de esa magnitud, pues como se comentó al inicio, la TE se enfoca en la actualidad dentro de la perspectiva de la sostenibilidad (Polack, 2021).

Los resultados de esta estrategia son poco claros en cuanto a los beneficios obtenidos. Tomemos como ejemplo el caso de la Unión Europea (UE), que a lo largo de la segunda década del presente siglo ha enfrentado varias crisis en los costos de su generación de electricidad. Tal problema que se ha acentuado gravemente durante los últimos dos años, como resultado de las regulaciones autoimpuestas para su TE, pues la exigencia de disminuir su consumo de carbón<sup>17</sup> ha provocado la revaloración del gas natural e incrementado su precio en el mercado, afectando directamente sus costos de producción (Statista, 2022a).

Este caso resulta paradójico porque EUA, principal socio comercial y político de la UE, así como uno de los más importantes impulsores de la TE mundial actual (White House, 2021a), durante el último año ha incrementado hasta en 20% el uso del carbón para la alimentación de su sistema eléctrico (Energy Information Administration [EIA], 2022), a pesar de mencionar que sus objetivos son disminuir gradualmente sus emisiones contaminantes (White House, 2021a).

---

<sup>17</sup> Su estrategia de largo plazo plantea un sistema económico de cero emisiones de GEI para el año 2050.

Este simple ejemplo describe uno de los múltiples problemas que tiene la estrategia de la TE en el largo plazo, pues al desconocerse las capacidades y los procesos locales productivos de cada región donde se lleva a cabo, se generan situaciones de riesgo; por ejemplo, el incremento en los costos de energía eléctrica terminan por impactar principalmente a la población con mayor debilidad económica.

Como resultado de los retos que enfrenta la UE, la comisión encargada del análisis energético para este territorio (Almeida y Shiryaevskaya, 2021; European Commission [EC], 2022) ha decidido catalogar como renovables a la energía proveniente del gas natural y a la del plutonio, para cumplir su programa de descarbonización<sup>18</sup> regional. Esto ha recibido severas críticas dentro de la misma organización europea porque contraviene sus propios objetivos (Fariza, 2022). Además, aquí vale la pena mencionar que la tendencia en este tema por parte de Europa y EUA no es única, es algo que se advierte en casi todo el mundo (véase gráfico 7).

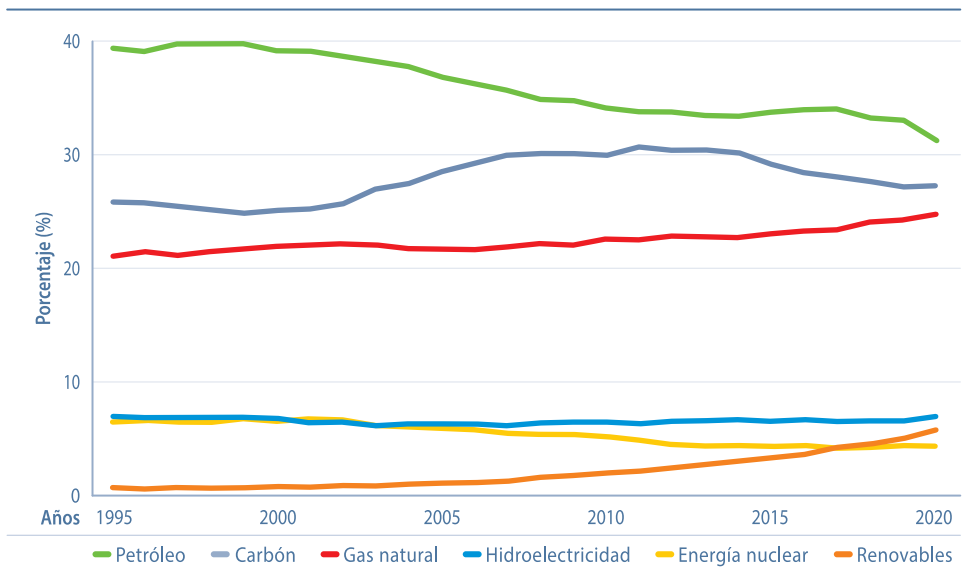
En el gráfico 6 se muestra que, contrario a lo que se podría sugerir respecto a lo planteado en la conferencia de 1981 en la ONU, sólo el uso del petróleo ha disminuido. Pero dicha reducción no se ha compensado con el aumento intensivo de energías renovables, sino que se ha sustituido por el uso de carbón y gas natural; estas tendencias se pueden observar de forma específica en Europa, Asia y América del Norte (véase gráfico 7).

---

<sup>18</sup> Se trata del proceso sistemático y planificado de reducción o eliminación de las emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y otros gases de efecto invernadero en la producción y consumo de energía. Este proceso busca reemplazar fuentes de energía basadas en combustibles fósiles con alternativas más limpias y sostenibles, alineándose con objetivos regionales o globales para mitigar el cambio climático. La descarbonización es un componente clave de las estrategias de desarrollo sostenible y transición energética.

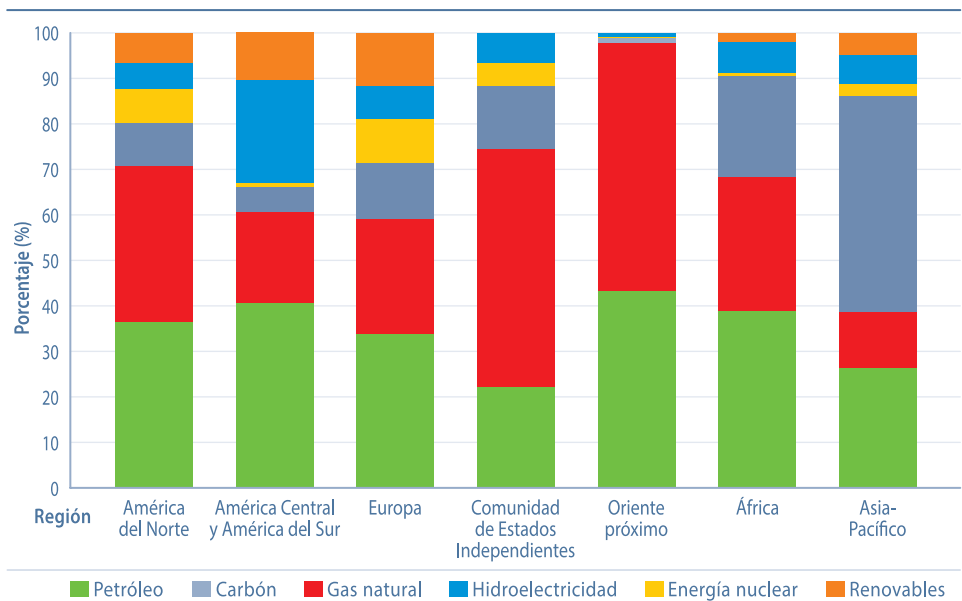


GRÁFICO 6  
Cuotas porcentuales en la generación de energía mundial



Fuente: BP (2021, p. 12).

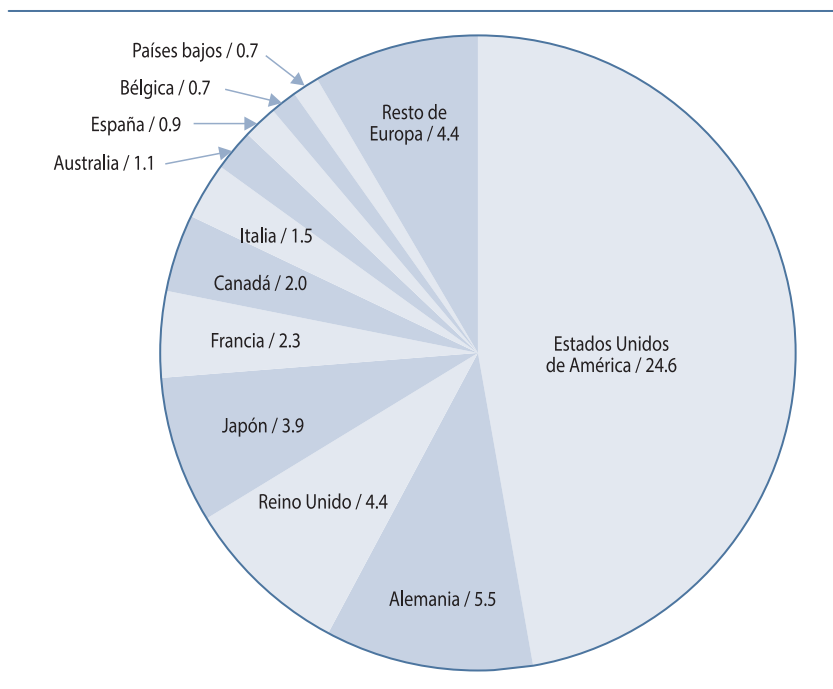
GRÁFICO 7  
Patrón de consumo energético en el mundo



Fuente: BP (2021, p. 12).

Por lo anterior, es posible señalar que se carece de los medios y las capacidades para transitar hacia una supuesta TE homogeneizada sin generar en el proceso otras formas de contaminación y/o riesgos sociales. La transición se enfrenta a un problema surgido por sus propios sesgos analíticos: la persistencia de otras formas productivas basadas en el uso de energéticos que les son más eficientes tanto por sus capacidades como por sus necesidades, así como por la ausencia de apoyo e inversión internacional en esta materia. La falta de capacidad para impulsar un proceso de TE más acelerado termina por crear narrativas espurias de responsabilidad en la contaminación ambiental. Por ello, es importante distinguir la responsabilidad histórica de estos problemas (véase gráfico 8).

GRÁFICO 8  
Contribución porcentual por país de 50% de las emisiones  
de dióxido de carbono en el mundo (1850–2020)



Fuente: elaboración propia con datos de Popovich y Plumer (2020).

Como se muestra en el gráfico 8, durante los últimos 170 años, solamente 23 países —cuya población equivale a 12% del total mundial— han ocasionado 50% de las emisiones contaminantes actuales, además de ser mayormente responsables del agotamiento de los energéticos disponibles. Es evidente que en EUA recae la mayor responsabilidad de esta situación, a pesar de que en la imagen no se están considerando los daños provocados por la imposición de políticas y medidas como la de la TE u otras que históricamente han impulsado el uso intensivo de petróleo, carbón y distintos recursos en diversos países.

Y es que, el hecho de que algunas naciones hoy recurran a incrementar el uso de recursos como el carbón —en el caso de China— o del petróleo y el uranio —para Europa— implica que la forma en que está planteada, la TE carece de un análisis adecuado de las necesidades de cada país tanto en su distribución de recursos naturales como en sus capacidades industriales. Además, la mayor parte de la maquinaria productiva, los medios de transporte y otras formas de capital requieren de una u otra manera hidrocarburos; cuestión que pareciera estar olvidada en el discurso de la transición energética.

Así, la industria siderúrgica necesita carbón y la creación de tecnologías supuestamente sustentables exige el uso de acero y otros minerales cuya transformación utiliza procesos productivos dependientes de combustibles fósiles. Debido a ello, la TE es inviable por la manera en que actualmente se está tratando de aplicar, pues es casi imposible que toda la capacidad industrial humana migre de forma masiva hacia un esquema basado en energéticos y procesos tan diferentes de los que se ocupan sin caer en plazos de tiempo muy amplios, inversiones económicas estratosféricamente elevadas y la incertidumbre de la escasez en los recursos para completarla. Por lo tanto, lo que en realidad se está haciendo es reservar el uso de ciertos recursos —principalmente hidrocarburos y otros que sean útiles para fines privados y especulativos—, lo cual significa que dicho uso se está privatizando para que sólo las grandes empresas tengan ganancias y algunos gobiernos manipulen a otros a través del control de estos recursos.

Esta situación se observa en el incremento de la demanda de varios minerales para cubrir las exigencias de la TE en la creación de soluciones para la generación de energía alternativa a los hidrocarburos. Tal es el caso de minerales como el litio, uno de los más importantes en la actua-

lidad, pues al ser un recurso necesario en los procesos de almacenamiento energético, también se ha convertido en un bien con gran demanda mundial. Sin embargo, se generan diversos riesgos y costos ambientales en este proceso, especialmente en las naciones del sur global, que poseen algunas de las más grandes reservas y capacidades potenciales de extracción de este mineral.

### Conclusiones

El concepto de TE se presenta como un camino hacia una economía sostenible. Sin embargo, su interpretación y aplicación han sido problemáticas, en especial por la falta de un enfoque que considere la amplia diversidad en los contextos donde puede llevarse a cabo. A pesar de que la transición se concibe como un proceso de cambio global hacia fuentes de energía más sostenibles, no se han considerado los contextos específicos de cada región, lo que ha dificultado su implementación efectiva.

La TE se ha convertido en un proyecto político impulsado sobre todo por el sector empresarial, lo que ha llevado a un enfoque homogeneizado que ignora las necesidades y capacidades locales. Un claro ejemplo es que casi tres mil millones de personas aún no utilizan tecnologías sostenibles para la generación de energía eléctrica. Este hecho evidencia que existen barreras significativas, como las económicas, culturales y técnicas, que impiden la adopción extendida de estas tecnologías.

Además, la TE no es un proceso lineal; al contrario, es acumulativo y, por lo tanto, integra diferentes fuentes de energía a lo largo del tiempo. Esto significa que la introducción de nuevas tecnologías no implica necesariamente la eliminación de las existentes, sino que éstas pueden coexistir y complementarse en función de la realidad en donde se desarrollen.

Asimismo, el origen de la TE como concepto y su evolución han sido influidos por factores políticos y económicos. En este sentido, la TE ha estado marcada por una lógica de eficiencia técnica y económica que prioriza la continuidad de los sistemas productivos modernos antes que el bienestar colectivo.

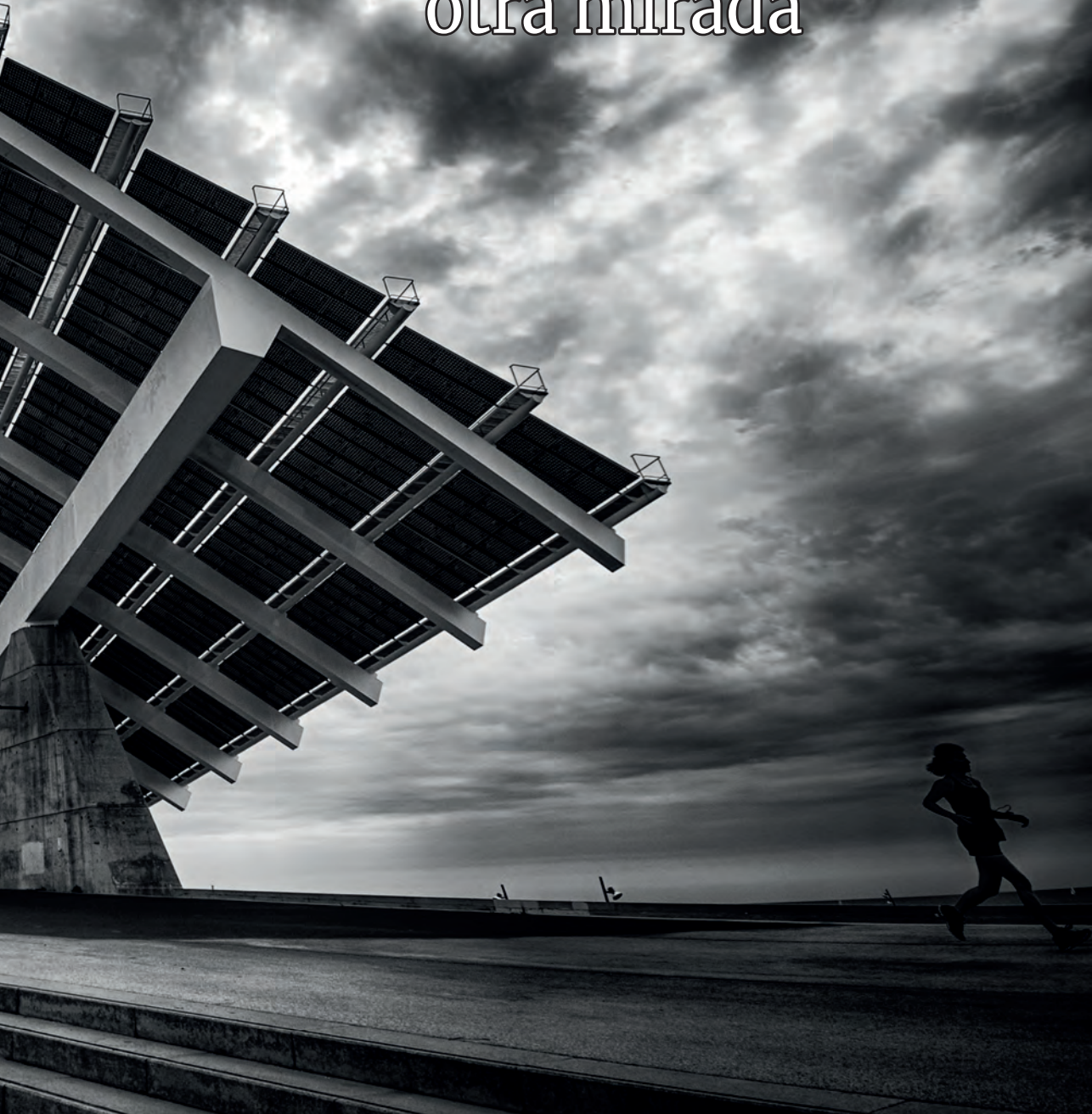
El caso de la UE, que ha enfrentado crisis en los costos de generación de electricidad debido a las regulaciones autoimpuestas para la TE, ilustra el problema de ignorar las capacidades de cada región. Como resultado, la

estrategia de TE puede generar riesgos, como el aumento de los costos de energía, que afecta de manera primordial a la población económicamente vulnerable.

La TE se enfrenta a un dilema crucial: la falta de medios para implementar un cambio globalizado sin generar otras formas de contaminación y riesgos sociales. Por lo tanto, es esencial reconsiderar el enfoque de la TE, tomando en cuenta las posibilidades locales y la participación de todos los actores. Es decir, en lugar de ser un proceso dirigido desde arriba, la TE debería ser un proceso colectivo que equilibre la necesidad de sostenibilidad de cada comunidad. La estrategia de TE requiere ser reformulada para enfrentar de manera efectiva los desafíos energéticos del siglo XXI.

Jose Ramirez  
<https://www.flickr.com/photos/28470120@N05/48316621517/>

# La transición energética desde otra mirada







## Introducción

El objetivo de este capítulo es explorar la transición energética (TE) desde una perspectiva holística y multidimensional, a partir del marco teórico proporcionado por Nicholas Georgescu-Roegen. Así, se busca ampliar la comprensión tradicional de la TE, que se ha centrado principalmente en aspectos técnicos y económicos, para abordar los desafíos interrelacionados que implica este proceso.

La TE es un tema crucial y urgente en la actualidad, impulsado por la necesidad de enfrentar los dilemas ambientales y la dependencia de los recursos no renovables. Históricamente, esta transición se ha conceptualizado como un proceso enfocado en la sustitución de fuentes de energía y la mejora de la eficiencia para dejar de lado otras dimensiones de igual o mayor importancia, como lo social y cultural. Sin embargo, se ha vuelto cada vez más claro que este enfoque reduccionista no es suficiente para enfrentar los problemas complejos de este siglo.

En esta línea, la perspectiva holística de la TE emerge como una alternativa necesaria para buscar transitar por otro camino que, en este caso, se plantea desde la perspectiva de lo discutido por Nicholas Georgescu-Roegen, quien ha proporcionado un marco teórico valioso para abordar la TE desde una visión más amplia y profunda.

Georgescu-Roegen mencionó que no podemos entender la economía sin considerar las leyes de la termodinámica y el flujo de energía y materia en los sistemas naturales y humanos. En este contexto, el mismo autor argumentó que los recursos naturales y la energía son finitos y se degradan con el tiempo, debido al aumento de la entropía. Esto significa

que la economía, como un subsistema del ecosistema más grande de la Tierra, también está sujeta a las leyes de la termodinámica. En otras palabras, el crecimiento económico ilimitado es insostenible en un mundo con recursos limitados. Esta perspectiva amplía nuestra comprensión del desarrollo y nos lleva a replantear la TE como un proceso más complejo y multidimensional.

La TE no puede ser simplemente un cambio de fuentes de energía, sino que requiere un enfoque más amplio que considere las interacciones entre economía, ecología y sociedad. La adopción de esta perspectiva holística nos permite comprender los desafíos clave que enfrentamos en la transición hacia un modelo energético resiliente.

En el proceso de la TE, la obra de Georgescu-Roegen nos recuerda la importancia de desarrollar tecnologías menos destructivas y disipativas que puedan integrarse de manera armoniosa en el sistema ecológico global. En lugar de una simple sustitución de tecnologías, se trata de un proceso de profundización y recuperación, en el que la gestión de la entropía juega un papel fundamental.

Asimismo, en este capítulo también se aborda la perspectiva de Gilbert Simondon, la cual es profundamente transformadora y ofrece una visión más matizada de cómo abordar los desafíos energéticos. A diferencia de Georgescu-Roegen, quien consideraba la tecnología como un mero artefacto, Simondon la ve como un proceso en constante evolución. Este proceso de “individuación” establece un nuevo conjunto de relaciones entre el objeto técnico y su entorno, lo que permite una reorganización dinámica de nuestras interacciones con el mundo. En este sentido, la tecnología no es sólo un medio para alcanzar un fin, sino un sistema vivo capaz de cambiar nuestras prácticas y relaciones de manera significativa. Simondon argumenta que la entropía no es una cantidad estática que deba minimizarse, ya que es un concepto sujeto a discusión, negociación y redistribución, lo cual abre nuevas posibilidades para abordar la sostenibilidad energética de manera más efectiva.

Además, Simondon introduce el concepto de “sinergias funcionales”, el cual se centra en la creación de nuevas relaciones, más respetuosas con el medio ambiente y eficientes en el uso de la energía. Este enfoque menciona que no sólo se requiere un cambio tecnológico, sino también un compromiso ético con la sostenibilidad; algo que Simondon considera intrínseco al proceso tecnológico en sí. En lugar de ver el progreso tecnológico como una trayectoria lineal, Simondon lo describe como un proceso

de “profundización”, susceptible de incluir retrocesos, reprocesamientos y rectificaciones. Este enfoque holístico nos invita a repensar nuestras prácticas y relaciones energéticas desde una perspectiva más sostenible y ética, lo que podría llevar a soluciones más efectivas y duraderas en el ámbito de la transición energética.

En este capítulo, se aborda la posibilidad de mirar la TE desde una perspectiva alternativa al recordar el espectro multicolor de la misma, ya que si bien dichas ideas han sido impulsadas sobre todo por intereses mezquinos empresariales, también pueden ser orientadas a cumplir una función social cuyo principio sea en realidad beneficiar tanto a las personas como a la naturaleza: un caleidoscopio de colores que nos incluya a todos.

El capítulo se estructura en dos apartados. En el primero, se presenta una visión general de los conceptos y propuestas de Georgescu-Roegen y Simondon en relación con el enfoque holístico de la TE. En el segundo apartado se exploran algunas posibilidades y desafíos de las alternativas de la TE tanto desde el enfoque de Georgescu-Roegen como el de Simondon. Por último, se presentan las conclusiones.

### **Enfoque holístico de la transición energética**

Abordar la TE de manera exitosa requiere una comprensión profunda de su complejidad y sus dimensiones multifacéticas. Este enfoque multidimensional se puede ilustrar con más claridad si consideramos las perspectivas teóricas propuestas por Nicholas Georgescu-Roegen, que nos instan a reconocer la interacción entre lo económico, lo social y lo ambiental en el desarrollo de estrategias de TE. Al hacerlo, no sólo nos damos cuenta de que la TE no es un simple desafío tecnológico o económico, sino un cambio sistémico que implica una reevaluación profunda de cómo entendemos el crecimiento y el bienestar.

Primero, es fundamental tener en cuenta que el proceso de TE es intrínsecamente interdisciplinario. Es decir, necesita una evaluación continua que vaya más allá del progreso tecnológico o los costos asociados a las tecnologías emergentes. Para Georgescu-Roegen, esto implica la necesidad de un acercamiento más amplio que incorpore conceptos termodinámicos —como “entropía”— para entender la inevitabilidad del agotamiento de los recursos naturales y la importancia de los límites ecológicos en las decisiones económicas.

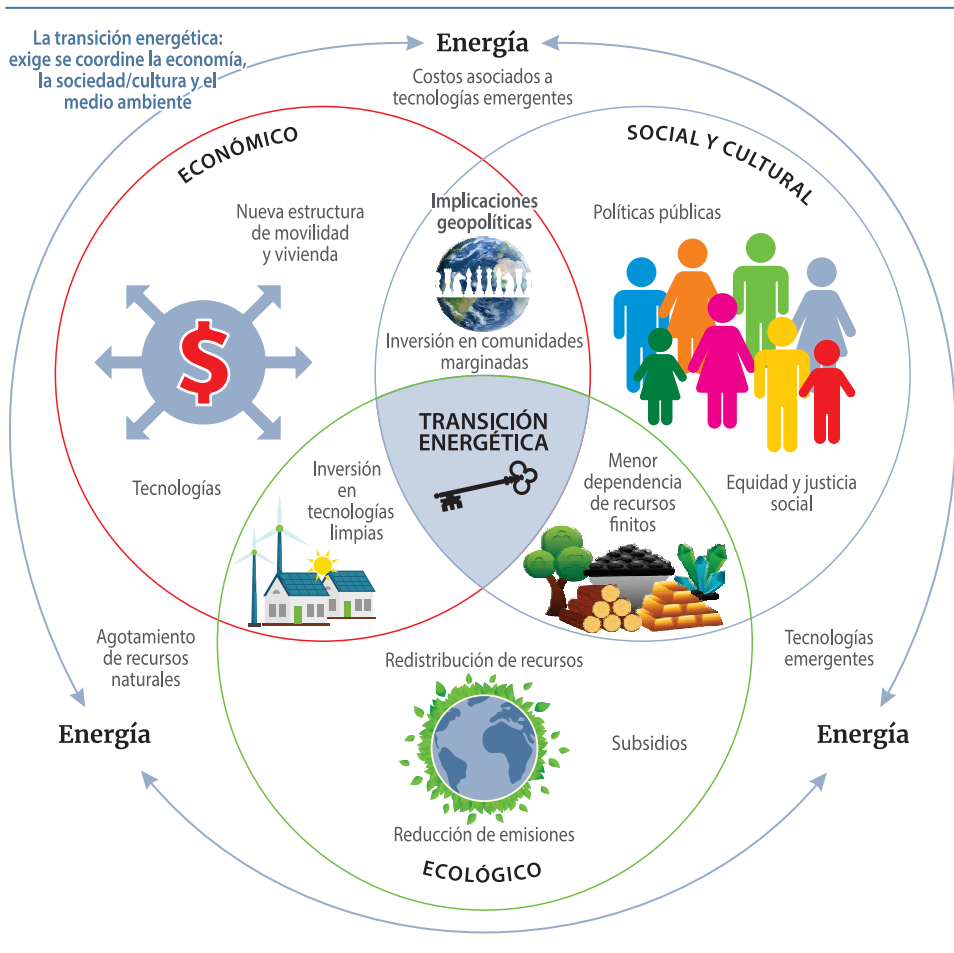
En un sentido más amplio, una TE holística debe reconocer que las cuestiones de equidad y justicia social son inherentes al proceso de transición, pues la adopción histórica de nuevas tecnologías energéticas ha beneficiado de manera desproporcionada a ciertos sectores sociales; incluso, muchas veces se han exacerbado las desigualdades preexistentes. Un enfoque más inclusivo requiere considerar de qué forma la inversión en tecnologías limpias podría también ser una inversión en comunidades marginadas y ofrecer no sólo un aire más limpio y una menor dependencia de recursos finitos.

Al mismo tiempo, una estrategia de TE holística no puede ignorar las implicaciones geopolíticas, pues la realidad es que la transición hacia una economía de bajo carbono conlleva desafíos significativos en la distribución mundial de recursos. Los países ricos en fuentes fósiles pueden enfrentar dificultades económicas al verse forzados a dejar “bajo tierra” estos activos. A su vez, países con abundantes recursos en energías renovables podrían convertirse en los nuevos líderes energéticos, lo que cambiaría dinámicas de poder y de acceso a los recursos.

De la misma manera, la planificación urbana y la infraestructura son cruciales para una TE efectiva, ya que la forma en que diseñamos nuestras ciudades, desde los sistemas de transporte hasta las construcciones de edificios, juegan un papel clave en el consumo de energía. Un enfoque holístico considera cómo estas estructuras interactúan con los ecosistemas locales y globales (véase figura 6).

En la práctica, todo lo anterior requiere una reorientación del marco de inversión, pues no basta redirigir capitales hacia tecnologías más limpias; también es necesario que esta redistribución de recursos tenga en cuenta el bienestar social general. Esto podría implicar, por ejemplo, políticas de subsidios para tecnologías emergentes que tengan un alto impacto social y ambiental positivo o impuestos sobre aquellas actividades que generan un alto grado de degradación ambiental.

FIGURA 6  
Transición energética holística



Fuente: elaboración propia.

Entender la TE como una reevaluación de la manera en que concebimos el bienestar y el crecimiento lleva a una forma más integrada de pensar en el progreso. En lugar de indicadores económicos aislados, como el PIB, deberíamos considerar métricas más representativas del bienestar humano y la salud del ecosistema. Al final, la TE no es sólo un desafío técnico que se resuelve con la mera adopción de tecnologías más limpias, es un proceso complejo que exige un enfoque coordinado que incorpore la economía, la sociedad, la cultura y el medio ambiente en un marco de toma de decisio-

nes más holístico. Al considerar todas estas dimensiones de manera conjunta, estamos más cerca de lograr una transición que no nada más sea sostenible desde un punto de vista técnico, ya que también debe ser justa y equitativa para las generaciones presentes y futuras.

### *Las limitaciones en los procesos de transición energética: la entropía*

El papel de las energías renovables en el escenario energético contemporáneo es innegable ante la cada vez más evidente escasez de los hidrocarburos, que no solamente disminuyen en calidad sino también en cantidad. Se puede decir que esta limitación en la disponibilidad de energéticos ha empantanado el crecimiento económico y productivo de las naciones industrializadas. Este contexto se encuadra en el postulado que señala que cualquier proceso que utilice energía y material provocará la degradación progresiva de los mismos, lo cual imposibilita su regreso a un estado inicial para ser utilizadas de nuevo; abstracción que Georgescu-Roegen calificó como restricción entrópica. Mediante el análisis de los principios termodinámicos y las enseñanzas de Georgescu-Roegen, es posible identificar cómo la TE debe considerar tanto la producción como el consumo para ser efectiva en el largo plazo.

Los países industrializados son los más afectados por el agotamiento de los combustibles fósiles, pero también son los mayores infractores al acelerar este ciclo de entropía. La lógica del crecimiento económico y productivo en estas naciones ha exacerbado tanto la demanda como la merma de recursos, pero también ha impulsado una degradación que podría haberse evitado o al menos minimizado.

Si bien el papel de las energías renovables en el escenario energético contemporáneo es crucial, la restricción entrópica sigue siendo una sombra que oscurece el camino hacia un futuro de bienestar colectivo. Emplear fuentes como la solar, la eólica o la hidráulica es ciertamente una mejora en comparación con los hidrocarburos. Pero incluso estas formas de energía “verde” vienen con sus propias limitaciones entrópicas, por lo que tienen matices oscuros. Por ejemplo, la fabricación de paneles solares, turbinas eólicas y baterías eléctricas requiere la extracción y procesamiento de materias primas como metales raros, acero, aluminio y hormigón. Es decir, la TE, como se ejecuta actualmente, sólo cambiaría una forma de agotamiento de recursos por otra que podría ser aún más limi-

tada y sujeta a tensiones de mercado más estrechas, debido a la hiperconcentración de varios de estos recursos.

Y es que la adopción de energías renovables podría no implicar un cambio significativo en el paradigma económico subyacente ya que la lógica de explotación y anticipación de nuevos recursos puede seguir intacta en una economía “verde”, al igual que lo está en una economía basada en hidrocarburos. Aquí también, la entropía sigue siendo un factor de limitación; incluso si mitigamos las emisiones de carbono, el enfoque aún podría centrarse en explotar al máximo los recursos disponibles, pero esta vez en nombre de la sostenibilidad.

Por lo tanto, una perspectiva más holística de la TE debería ir más allá del simple cambio de fuentes de energía. Sería importante centrarnos no sólo en qué energías producimos, sino también de qué forma las consumimos. La eficiencia energética y la conservación deben ser partes integrales de cualquier plan de largo plazo para aminorar las limitaciones impuestas por la entropía. Es, en última instancia, un juego de equilibrio donde necesitamos discernir y adoptar aquellas prácticas que, según Georgescu-Roegen, ralentizan el proceso de entropía en lugar de acelerarlo (véase figura 7).

La entropía es un recordatorio de que nuestras acciones tienen consecuencias termodinámicas irreversibles, es una verdad que ancla nuestras discusiones sobre la TE en la realidad física; negar o pasar por alto este hecho sería, en el mejor de los casos, imprudente y, en el peor, peligrosamente miope. Por lo tanto, cualquier intento serio de cambiar nuestra trayectoria energética tiene que considerar este límite fundamental para ajustar nuestras expectativas y planes, a fin de que se alineen con lo que las leyes de la física nos permiten.

Para abordar de manera efectiva la restricción entrópica, es fundamental discernir entre aquellos desarrollos que aceleran la entropía y aquellos que la ralentizan (Georgescu-Roegen, 1996). Un enfoque más amplio de la TE debe tomar en cuenta las fuentes de energía, al igual que la eficiencia en su uso y conservación.

FIGURA 7  
Restricción entrópica de la energía



Fuente: elaboración propia.

### Intercambio energético

El concepto de restricción entrópica, introducido por Georgescu-Roegen, es un marco fascinante que nos ayuda a entender los intrincados desafíos a los que se enfrentan nuestros sistemas energéticos y económicos. La entropía, en esta perspectiva, se convierte en una suerte de “contable natural” que marca los límites de la energía y la materia, las cuales pueden ser usadas de manera eficaz en cualquier sistema dado. El núcleo de esta idea se centra en que no toda la energía es igual: algunas formas son fácilmente accesibles y utilizables, mientras que otras no lo son.

Según Georgescu-Roegen, para sortear esta limitación entrópica hay que pensar en términos de energías libres; en este contexto, él identifica dos grandes categorías de energía-materia: 1) una que está en depósitos minerales terrestres y 2) otra que él denomina “cósmica”; es decir, la energía solar. Estas distinciones nos permiten reconsiderar cómo es-



tructuramos nuestros sistemas económicos y energéticos. Por supuesto, como nos recuerda este autor, la entropía no afecta de la misma manera a todos los sistemas, depende de la escala en la que estemos operando. Por ejemplo, aunque la Tierra es un sistema cerrado en términos de intercambio de materia, sí recibe energía del Sol y nos ubica en lo que Georgescu-Roegen denomina una “reserva cósmica de energía libre”.

Sin embargo, captar esa energía libre no es tan sencillo como abrir una ventana y dejar entrar la luz del sol. Hay una serie de factores físicos y económicos, desde la intensidad del flujo solar hasta las inversiones necesarias en tecnología, los cuales condicionan qué tan accesible y utilizable es esa energía para nosotros. Es decir, aunque la energía solar parece infinita, en la práctica, la cantidad que podemos emplear está limitada por nuestra capacidad para capturarla y convertirla en formas útiles para la sociedad.

En esta línea, Georgescu-Roegen nos advierte que nuestra comprensión actual del fenómeno sigue siendo incompleta. Su modelo presenta a la Tierra como un receptor pasivo de radiación solar, sin abordar las interacciones entre diversas escalas, desde sistemas más grandes como el Universo, hasta más pequeños como ecosistemas individuales dentro del planeta. Este “giro espacial”, aunque útil, no es exhaustivo y requiere mayor análisis.

Uno de los aspectos más importantes para avanzar en nuestra comprensión de la restricción entrópica implica considerar el concepto de “accesibilidad”, que no sólo es cuestión de cuánta energía solar hay disponible, sino de qué tan eficiente puede ser transformarla de manera útil y a qué costo económico. Esta cuestión obliga a adoptar un enfoque holístico y multiescalar en la investigación y formulación de políticas energéticas, pues la energía no se distribuye de modo uniforme en la sociedad y hay desigualdades que deben abordarse. La justicia y la equidad habrán de ser elementos clave en la toma de decisiones sobre cómo asignar y utilizar recursos energéticos en el futuro.

Esta transición hacia una economía más sostenible, además de ser un problema técnico, tiene importantes dimensiones políticas y sociales. La gobernanza efectiva y las políticas bien diseñadas pueden jugar un papel fundamental en la aceleración de esta transición. Inversiones en tecnologías más limpias, junto con la promoción de prácticas de consumo responsable, tienen el potencial de mitigar las limitaciones entrópicas de nuestro sistema.

Sin embargo, la ausencia de una gobernanza efectiva hacia el bienestar colectivo es precisamente el cuello de botella más significativo en el esfuerzo por aliviar la restricción entrópica en nuestros sistemas energéticos. Aunque las soluciones técnicas y científicas son cruciales, con frecuencia las entorpecen los sistemas políticos que, en el mejor de los casos, son lentos para adaptarse y, en el peor, son activamente regresivos. Estas limitaciones políticas tienen implicaciones profundas, ya que la lucha contra la degradación irreversible de energía y materia en nuestros sistemas requiere un enfoque integral y multiescalar que vaya más allá del alcance de cualquier tecnología individual.

Para empezar, la cuestión de la energía es inherentemente política y hay que preguntarse: ¿quién tiene acceso a la energía?, ¿cómo se distribuye?, ¿qué tipos de energía se priorizan? Todas éstas son cuestiones que se deciden a menudo en el ámbito político. La falta de gobernanza efectiva puede llevar a políticas cortoplacistas que favorezcan soluciones energéticas de fácil acceso, pero insostenibles, lo cual perpetuaría la restricción entrópica en lugar de mitigarla. Por ejemplo, aunque sabemos que los combustibles fósiles son una fuente de energía imposible de mantener en el largo plazo, el poder político que las industrias relacionadas ejercen sobre los gobiernos frena a menudo la adopción de alternativas.

Otra limitación clave en la dimensión política es la falta de coordinación entre diferentes niveles de gobierno y sectores de la sociedad. Para ello, es necesario un enfoque eficaz para abordar la restricción entrópica, lo cual requiere una colaboración sin precedentes entre las autoridades locales, estatales, nacionales e incluso internacionales. Además, debe incluir a múltiples sectores, desde la industria y la academia hasta las organizaciones de la sociedad civil. Sin una gestión adecuada que organice estos esfuerzos, nos encontraremos con una serie de iniciativas fragmentadas que no logren abordar el problema en su totalidad.

Este desafío es aún más complicado porque la restricción entrópica es una cuestión que cruza fronteras en más de una forma, ya que no sólo estamos hablando de limitaciones físicas, como la degradación de la energía, sino también de cuestiones económicas, sociales y prácticas globales. En este sentido, el cambio hacia sistemas energéticos razonables debe ser entendido como una iniciativa internacional que requiere una supervisión correcta a una escala igualmente mundial.

Por lo tanto, la construcción de un proceso energético integral es imperativo. Este enfoque debe ir más allá de las soluciones tecnológicas y

considerar la energía como un sistema que está incrustado en estructuras políticas y sociales más amplias. Debe buscar activamente mitigar las limitaciones a través de un régimen eficaz que incluya la formulación de políticas basadas en la ciencia, la coordinación intergubernamental y la inclusión de diversas partes interesadas. Al hacerlo, este enfoque integral tendrá el potencial de acelerar la transición hacia sistemas energéticos más sostenibles; algo drástico dadas las trabas impuestas por la entropía.

La transición hacia una economía de baja emisión de carbono no es meramente un desafío técnico o económico; también lo es social y político, pues la falta de una administración que orqueste este cambio en múltiples niveles es una limitación significativa. Por ello, un enfoque integral que incorpore estas dimensiones no es sólo deseable sino esencial. No podemos permitirnos abordar la complejidad de la restricción entrópica con soluciones fragmentadas o vistas estrechas.

### *La construcción de un proceso energético integral*

Debido a la sobrexplotación de los recursos naturales y a la labor humana, se puede considerar que algunas sociedades industrializadas se han desacoplado del espacio como si no dependieran de éste. Sin embargo, en la perspectiva de Georgescu-Roegen, destaca la necesidad de reconsiderar la relación con el espacio en el contexto de la transición hacia fuentes de energía más sostenibles. A continuación, se examinan diferentes enfoques contemporáneos para comprender la dinámica espacial de las nuevas tecnologías energéticas y cómo pueden contribuir a la discusión sobre la transición energética.

Vaclav Smil, por ejemplo, destacó la utilidad de evaluar la densidad de la energía como una métrica valiosa para entender la huella espacial de las tecnologías energéticas. Esta aproximación, si bien es útil para ofrecer un marco cuantitativo, no se adentra lo suficiente en los efectos sociales y ecológicos asociados con el cambio hacia fuentes de energía más limpias. La densidad de energía se convierte en un aspecto importante, pero insuficiente para evaluar las implicaciones espaciales de la tecnología energética en el ecosistema en general y en las comunidades humanas (Smil, 2004).

Además, hay estudios centrados en la cuantificación del uso del suelo necesario para implementar la TE, como se ha realizado en el Reino Unido.

Este enfoque cuantitativo brinda información crucial para anticipar las necesidades de infraestructura, pero falla en capturar las implicaciones sociales, ecológicas y paisajísticas más profundas. Las métricas cuantitativas pueden ayudar a prever futuras rivalidades en el uso del suelo —por ejemplo, entre la agricultura y la producción de energía—, pero no ofrecen un marco suficientemente holístico (Scheidel y Sorman, 2012; Trainor, McDonald y Fargione, 2016).

Un tercer enfoque que se ha explorado es la “transición por diseño”, la cual busca integrar y renovar perspectivas anteriores. El uso de fotomontajes y la planificación ecológica regional son ejemplos de cómo se han de identificar áreas frágiles y coordinar el desarrollo de tecnologías energéticas en espacios más apropiados. Sin embargo, incluso esta vanguardia en la planificación energética sigue sin captar plenamente la visión más completa de Georgescu-Roegen, quien sugiere que el espacio es más que un contenedor pasivo para la actividad humana (Kiesecker y Naugle, 2017).

A pesar de la relevancia de los enfoques anteriores, la reflexión de Georgescu-Roegen sobre la relación entre energía, materia y espacio aún puede ser explorada con más amplitud. Y es que, a menudo, el espacio se concibe como un mero contenedor de actividades humanas y los potenciales tecnológicos predefinidos se superponen en una superficie. Si bien esto sería útil para evaluar las futuras rivalidades en el uso de la Tierra, no proporciona un marco adecuado para abordar las elecciones antropogénicas y entrópicas, además de las sinergias que deben desarrollarse en el contexto de la transición energética.

Por lo tanto, es fundamental reexaminar cómo concebimos la construcción del potencial tecnológico en el ámbito energético. Esto significa ir más allá de una perspectiva exclusivamente multisectorial y comprender cómo nuestras elecciones en tecnologías y prácticas energéticas influyen en el espacio y en los ecosistemas circundantes.

Para abordar de manera más efectiva los desafíos de la TE y las preocupaciones planteadas por Georgescu-Roegen, se requiere una orientación interdisciplinaria y holística que combine la investigación sobre densidades de energía, estimaciones de uso del suelo y análisis de impacto social y ecológico. Este enfoque debería contemplar las sinergias y compensaciones entre los diferentes sectores, como la energía, la agricultura y la conservación, además de los conflictos y las interdependencias entre las escalas geográficas y temporales.

El trabajo de Georgescu-Roegen ofrece una visión valiosa sobre la necesidad de repensar la relación entre energía, materia y espacio en el contexto de la TE; pero, a pesar de los avances en la investigación contemporánea sobre tecnologías energéticas y su huella espacial, aún no se ha desarrollado una orientación completa y coherente que aborde adecuadamente estos desafíos. Para enfrentar las preocupaciones planteadas por Georgescu-Roegen y lograr una TE sostenible, es necesario adoptar un enfoque interdisciplinario y participativo que considere las sinergias y compensaciones entre sectores y escalas, así como los impactos sociales y ecológicos de nuestras elecciones energéticas.

### *La importancia de la gobernanza participativa en la transición energética integral*

Dentro del complejo entramado de consideraciones que comprende una TE integral, la gobernanza participativa emerge como un elemento crucial. Este enfoque de toma de decisiones no es nada más un añadido altruista o una cuestión de ética social, pues constituye una pieza integral para el éxito en el largo plazo de cualquier estrategia de transición energética.

La razón es simple: la TE no ocurre en un vacío, se lleva a cabo en espacios y paisajes que son, al mismo tiempo, físicos y sociales. La tierra que podría ser idónea para una granja solar también podría estar llena de significado cultural para una comunidad local, o ser un hábitat determinante para una especie en peligro de extinción. Sin un proceso de gobernanza que involucre de manera activa las partes interesadas en la toma de decisiones, las implementaciones de tecnología pueden llevar a conflictos con las comunidades y, en última instancia, a la insostenibilidad de los proyectos.

Una de las críticas a los enfoques más tradicionales de planificación de la energía es que a menudo se desarrollan en “silos”, donde las decisiones se toman de manera vertical dentro de organizaciones o sectores específicos, sin una consulta o coordinación significativa con otros. Este tipo de enfoque unilateral suele minimizar la importancia de los impactos ecológicos y sociales en favor de métricas más cuantitativas como la eficiencia y los costos. La gobernanza participativa rompe estos silos, al fomentar una toma de decisiones más horizontal y colaborativa.

Tal modelo de gobernanza representa también una forma de abordar los desafíos identificados por Georgescu-Roegen sobre cómo las elección-

nes tecnológicas y las prácticas energéticas influyen en el espacio y los ecosistemas. Al permitir una variedad de voces, incluidas las de las comunidades que viven más cerca de los espacios afectados por la transición, es factible identificar y tal vez mitigar los impactos no deseados antes de que se conviertan en problemas insuperables. Además, la participación activa de las comunidades puede conducir a soluciones más innovadoras que las que surgirían de un proceso de toma de decisiones más cerrado.

La interdisciplinariedad, otro de los aspectos destacados que es crucial para una TE integral, también se beneficia de una gobernanza participativa en la que se involucren científicos sociales, ingenieros, biólogos, políticos y representantes de la comunidad, quienes a menudo tienen perspectivas diferentes sobre lo que podría considerarse una “transición exitosa”. En un foro participativo, estos diversos puntos de vista pueden coalescer en estrategias que son técnicamente factibles, pero también social y ecológicamente responsables.

Sin embargo, el éxito de este modelo de gobernanza no es automático, requiere una planificación cuidadosa y un compromiso genuino con el diálogo y la colaboración. De igual manera, es necesario un cambio en cómo se entienden los conceptos de “experto” y “conocimiento”. En la gobernanza participativa, el conocimiento local y la experiencia vivida se valoran junto con el conocimiento técnico, ampliando la base de información sobre la cual se toman decisiones.

En última instancia, una TE que aspire a ser integral debe considerar las implicaciones tecnológicas y espaciales, pero también la compleja matriz de factores sociales y ecológicos que la rodean. Aquí es donde la gobernanza participativa demuestra su valor, al actuar como un catalizador para soluciones más robustas, equitativas y, en última instancia, más sostenibles. De esta manera, se convierte en un pilar adicional y fundamental en el logro de una verdadera TE integral.

### **Alternativas de la transición energética**

La TE en nuestra sociedad contemporánea es de importancia decisiva, tanto en la lucha contra el cambio climático como en la búsqueda de un futuro sostenible. La obra de Nicolas Georgescu-Roegen brinda algunas direcciones especialmente útiles para navegar en este terreno complejo. Este autor abogó por un salto prometeico en la tecnología, y enfatizó la necesidad de desarrollar técnicas y estrategias que no sólo sean menos

destructivas sino que también se integren de manera armónica en el sistema ecológico global. Su visión de usar la radiación solar como una fuente inagotable de energía fue pionera y sigue siendo relevante hoy en día.

Sin embargo, más allá de simplemente encontrar maneras de “conectarnos” al sol como fuente de energía, Georgescu-Roegen insistió en la necesidad de hacer un análisis más profundo que considere las complejas relaciones entre energía, materia y espacio. Este punto no puede ser subestimado, ya que la adopción de nuevas fuentes de energía no es un simple acto de reemplazar un recurso agotable por otro más abundante: es una reconfiguración de nuestra relación con el entorno natural y una reevaluación de la manera en que utilizamos y disipamos la energía en primer lugar.

Por ello, en este contexto, las ideas de Gilbert Simondon (2008 y 2009) son notoriamente complementarias y expanden nuestra comprensión de cómo abordar la TE. A diferencia de Georgescu-Roegen, quien veía la tecnología sobre todo como un artefacto, Simondon la entendía como un proceso. Éste implica una “individuación”, que crea un nuevo conjunto de relaciones entre el objeto técnico y su entorno. Aquí, la tecnología no es simplemente un medio para un fin, es un sistema dinámico que tiene el potencial de reorganizar nuestras interacciones con el mundo de formas significativas.

En la concepción de Simondon, la entropía no es una cantidad fija que se debe reducir o minimizar; en cambio, puede ser objeto de discusión, negociación, redistribución y recuperación parcial. Esto ofrece una perspectiva mucho más matizada y dinámica sobre cómo abordar la cuestión de la TE. No se trata sólo de reemplazar las fuentes de energía fósiles con energía solar o eólica sino de repensar fundamentalmente nuestras prácticas y relaciones energéticas para hacerlas más sostenibles y, en el proceso, reconfigurar nuestras interacciones con el entorno circundante.

Simondon también abogó por el desarrollo de “sinergias funcionales”; un enfoque centrado en crear nuevas relaciones, más respetuosas con el entorno y que permitan un uso más eficiente de la energía. Esta perspectiva requiere un compromiso con la sostenibilidad; una ética que Simondon considera intrínseca al propio proceso tecnológico. En lugar de ver el progreso tecnológico como una línea recta hacia adelante, Simondon subraya que es más un proceso de “profundización”, el cual puede incluir retrocesos, reprocesamientos, recuperación y rectificación.

Estos enfoques éticos y matizados del desarrollo tecnológico y de la TE tienen implicaciones profundas. Nos instan a abandonar la idea de que la tecnología es nada más una herramienta utilitaria para satisfacer nuestras necesidades energéticas y adoptar un enfoque mucho más integral y reflexivo. Sólo al hacerlo podremos desarrollar estrategias que aborden las preocupaciones inmediatas relacionadas con la sostenibilidad energética y la reducción de la entropía, además de ser también respetuosas con las complejas interconexiones entre energía, materia y espacio que definen nuestro mundo.

Por lo tanto, la TE no debe ser vista como una simple evolución de una fuente de energía a otra, sino más bien como un cambio fundamental en cómo entendemos e interactuamos con el mundo que nos rodea, lo cual requiere un enfoque integral que contemple no sólo las necesidades inmediatas de eficiencia energética y sostenibilidad, sino también las implicaciones más amplias de estos cambios en nuestras interacciones con el entorno natural y social. Si seguimos los ricos matices ofrecidos por las teorías de Georgescu-Roegen y Simondon, podremos abordar la TE de una manera ética y efectiva, que tenga el potencial de llevarnos hacia un futuro más respetuoso con el medio ambiente.

*Las ideas de Simondon:  
una revisión profunda de la transición energética*

Si bien Georgescu-Roegen abre el espacio para una TE más integral, Gilbert Simondon aporta una dimensión adicional centrada en las implicaciones ontológicas y éticas del desarrollo tecnológico en sí. Este enfoque amplía nuestra comprensión del desafío tecnológico, pero también tiene el potencial de revolucionar nuestra relación con la energía y el medio ambiente de formas fundamentales.

Para empezar, la idea de Simondon de que la tecnología es un “proceso” y no un simple “artefacto” es crucial. En esta visión, cada innovación tecnológica es una “individuación”, un evento que reconfigura las relaciones entre la tecnología y su entorno. Esto significa que cualquier tecnología energética que desarrollemos —ya sea una célula solar, una turbina eólica o una tecnología aún no imaginada— no es tan sólo un objeto aislado susceptible de insertarse en un sistema existente. En cambio, su implementación reorganizará todo el sistema de formas que necesitamos



entender y guiar. En términos prácticos, esto podría significar que la introducción de energías renovables necesita ir acompañada de cambios en las infraestructuras, las políticas y los comportamientos humanos para ser realmente efectiva.

Asimismo, Simondon nos ofrece una forma más dinámica de entender la entropía en el contexto de la TE. A diferencia de una visión más tradicional, que ve la entropía como un estado que se ha de evitar o minimizar, Simondon observa en ésta una característica del sistema que puede ser “negociada”. Esta idea de que la entropía no es un absoluto sino algo que es posible gestionar, redistribuir y, en algunos casos, recuperar, ofrece una flexibilidad que falta en muchas discusiones sobre sostenibilidad, así que podría llevarnos a tecnologías y estrategias que no sólo buscan minimizar el gasto de energía sino también recuperar o redistribuir la misma energía que se ha disipado en un intento de trabajar más en sintonía con los sistemas termodinámicos naturales.

En este contexto, el concepto de “sinergias funcionales” de Simondon es relevante. Este autor plantea que debemos buscar nuevas formas de interacción entre la tecnología y su entorno, las cuales originen relaciones más sostenibles y equitativas. Por ejemplo, en lugar de construir plantas de energía solar que simplemente envíen electricidad a una red, una opción sería diseñar sistemas que también proporcionen sombra para la agricultura o que sean parte de un ecosistema más amplio donde se incluya la gestión del agua y del hábitat. En este sentido, el objetivo no es nada más remplazar una fuente de energía por otra, sino crear una nueva ecología de relaciones energéticas que sean intrínsecamente más equitativas y razonables.

De igual manera, Simondon insta a un enfoque ético en el desarrollo tecnológico, por lo que hace un llamado a la responsabilidad que va más allá de la eficiencia energética o el diseño sostenible. Para este estudioso, cada acto de “individuación” tecnológica habrá de estar acompañado de una reflexión ética que tenga en cuenta no sólo el objeto técnico en sí sino también el nuevo entramado de relaciones que genera. Esto obliga a formular preguntas complejas sobre: ¿quién se beneficia de una tecnología?, ¿quiénes quedan marginados?, ¿qué efectos de largo plazo podría tener en el entorno natural y humano? Este enfoque ético es intrínsecamente más holístico, por lo que se centra en la totalidad del sistema en lugar de componentes aislados.

La visión de Simondon sobre el desarrollo tecnológico como un proceso no lineal ofrece una crítica útil al optimismo tecnológico que a menudo caracteriza las discusiones sobre la TE. No podemos asumir que el camino hacia la sostenibilidad será sencillo o directo. De hecho, según Simondon, deberíamos esperar y estar preparados para “profundizaciones”, retrocesos y revaluaciones. Esto no sólo es realista, sino éticamente necesario, ya que nos permite corregir y ajustar nuestro curso a medida que adquirimos una comprensión más completa de las implicaciones de nuestras elecciones tecnológicas.

Las ideas de Simondon ofrecen una rica estructura teórica, capaz de ayudar a guiar nuestra TE de una manera más ética y más eficaz. Su enfoque en la individuación, la negociación de la entropía y el desarrollo de sinergias funcionales brinda herramientas conceptuales que complementan y, en muchos casos, amplían las perspectivas ofrecidas por otros pensadores, como Georgescu-Roegen. Al adoptar un enfoque más dinámico y reflexivo, tenemos una mejor oportunidad de crear una TE en realidad sostenible, éticamente responsable y adaptada a los complejos sistemas de relaciones que definen nuestro mundo.

### **Conclusiones**

La TE representa un desafío complejo y multidimensional, lo cual requiere un enfoque holístico para abordar sus implicaciones técnicas, económicas, sociales y ambientales. Desde la perspectiva de las propuestas de Nicholas Georgescu-Roegen, es evidente la necesidad de reconsiderar la TE desde una mirada más amplia y dinámica, que vea las interacciones entre energía, materia y espacio, así como las sinergias funcionales que pueden promover un desarrollo responsable con el medio ambiente.

Georgescu-Roegen nos recuerda que la economía y la tecnología no pueden entenderse de forma aislada, sin las leyes de la termodinámica y los límites físicos y ecológicos. La noción de entropía como una medida de la degradación y la irreversibilidad en los procesos económicos enfatiza la importancia de desarrollar tecnologías menos destructivas y disipativas que se integren en el sistema ecológico global. Esto significa que la TE no puede centrarse únicamente en la modificación del uso de fuentes de energía, sino abarcar cambios profundos en la forma en que producimos, consumimos y valoramos la energía y los recursos naturales.

La idea de un salto prometeico hacia tecnologías más eficientes, como la captación de la radiación solar, es valiosa, pero no es suficiente. Un enfoque ético, como el propuesto por Simondon, es fundamental para comprender y enfrentar la complejidad de la TE. La gestión de la entropía implica un proceso de “profundización” y “recuperación” que promueva sinergias funcionales con el entorno circundante.

Así, pues, se trata de un tema complejo que requiere un enfoque integral y colaborativo. Las ideas de autores como Georgescu-Roegen y Simondon son cruciales para comprender y abordar en forma adecuada el desafío complejo que la TE plantea. La perspectiva holística propuesta por el primero resalta la interdependencia entre energía, materia y espacio, e insta a considerar las sinergias funcionales y el desarrollo sostenible. Su enfoque en las leyes de la termodinámica y los límites físicos recuerdan que la economía y la tecnología deben integrarse con el ecosistema global.

En cambio, el enfoque ético de Simondon enfatiza la necesidad de gestionar la entropía y promover la armonía con el entorno circundante, al abogar por tecnologías menos destructivas. Ambos autores nos llevan a una reflexión más profunda sobre el papel de la política y la colaboración para lograr una transición equilibrada y ordenada hacia tecnologías más eficientes y respetuosas con el medio ambiente.

Asimismo, la participación política y gubernamental son esenciales para acelerar el proceso de TE, ya que las políticas e ideologías pueden impulsar o frenar el cambio hacia tecnologías más sostenibles. El precio de los combustibles, la innovación y una mayor eficiencia también influyen en la adopción de tecnologías y servicios nuevos.

Es necesario alinear las acciones de todos los actores involucrados hacia el bien común, al tener en cuenta que los beneficios pueden no ser inmediatos y que se verán a largo plazo.

Asimismo, la transición hacia el todo eléctrico representa un desafío que involucra cambios profundos en la sociedad, la política, la economía y la cultura. Es esencial la participación activa de todos los actores, tanto gubernamentales como privados, a fin de acelerar y promover una TE hacia un futuro más próspero y equitativo para las generaciones venideras.







Minerales  
esenciales para  
la transición  
energética



## Introducción

El objetivo de este capítulo es proporcionar una visión general de la importancia y las características de los minerales utilizados en la transición global hacia una matriz energética más sostenible.

Así, es posible señalar que la transición energética (TE) representa un cambio crucial en todas las dinámicas de la sociedad moderna. Por ello requiere atención en todos sus aspectos, pues puede representar desafíos significativos, uno de los cuales es la creciente demanda de minerales esenciales. Éstos juegan un papel vital en la producción de tecnologías clave para las energías renovables, como paneles solares, turbinas eólicas y baterías de vehículos eléctricos. En consecuencia, la forma en que extraemos, refinamos y distribuimos dichos minerales tendrá un impacto tremendo en la viabilidad y sostenibilidad de esta transición.

Entre los minerales esenciales citados encontramos litio, cobalto, níquel, cobre, entre otros. Los dos primeros son fundamentales para la fabricación de baterías de vehículos eléctricos, el níquel mejora la eficiencia de estas baterías y el cobre es clave para la infraestructura de la energía renovable, dado su uso en la construcción de turbinas eólicas y paneles solares. A medida que el mundo se esfuerza por reducir las emisiones de carbono, el papel de estos elementos en la economía global se amplía con oportunidades y desafíos; su demanda creciente lleva consigo implicaciones en cuanto a explotación minera, derechos humanos y laborales, impacto ambiental, social y cultural, así como geopolítica global.

Este capítulo se desarrolla en tres apartados. En el primero se define qué es un mineral, después se enlistan los principales minerales que

son necesarios para la TE, algunas características en cuanto a uso y efectos tanto a la salud humana como ambientales. En la segunda sección se expone lo esencial de estos minerales y la dependencia actual de los que son utilizados en la fabricación de aerogeneradores, paneles fotovoltaicos y baterías que permitirían, por una parte, reducir las emisiones contaminantes producto de minerales fósiles, pero por otra, sobrecargar el medio ambiente en las siguientes décadas. En el tercer apartado se menciona cuáles son los minerales imprescindibles y las condiciones que los identifican de esta forma, así como los minerales que a partir de la modificación de la matriz energética serán determinantes para la industria de la energía renovable. Al final, se presentan las conclusiones.

### **Creciente demanda de minerales en la transición hacia la energía renovable**

La promoción de algunos países, empresas y sujetos por incentivar esta modificación de la matriz energética también se basa en promover la innovación y producción de tecnologías útiles en la generación de energía renovable. Este escenario se ha vuelto una realidad, dado que se ha registrado un mayor consumo mundial de este tipo de energía, al pasar de 2.6 a 31.7 exajulios (más de 1000%) consumidos durante las últimas dos décadas (Statista, 2021a).

Al mismo tiempo, se puede identificar en el mundo un continuo crecimiento de la demanda tanto en cantidad como en mayor diversidad de minerales, debido a que la tecnología que produce energía baja en emisiones contaminantes emplea a cambio, de manera intensiva, este tipo de elementos que son indispensables para la fabricación de dicha tecnología (Hund, La Porta, Fabregas, Laing y Drexhage, 2020). Algunas de las más importantes incluyen los siguientes minerales:

- **Cobre:** resulta crucial para la TE, debido a su alta conductividad eléctrica. Es indispensable en la fabricación de vehículos eléctricos, donde se utiliza en motores y baterías. Además, el cobre es esencial en la infraestructura de energía renovable, como la eólica y solar. Por ejemplo, una sola turbina eólica puede contener hasta cuatro toneladas de cobre. Asimismo, las redes de transmisión y distribución eléctrica necesitan cobre para mejorar la eficiencia y reducir las pérdidas de energía.



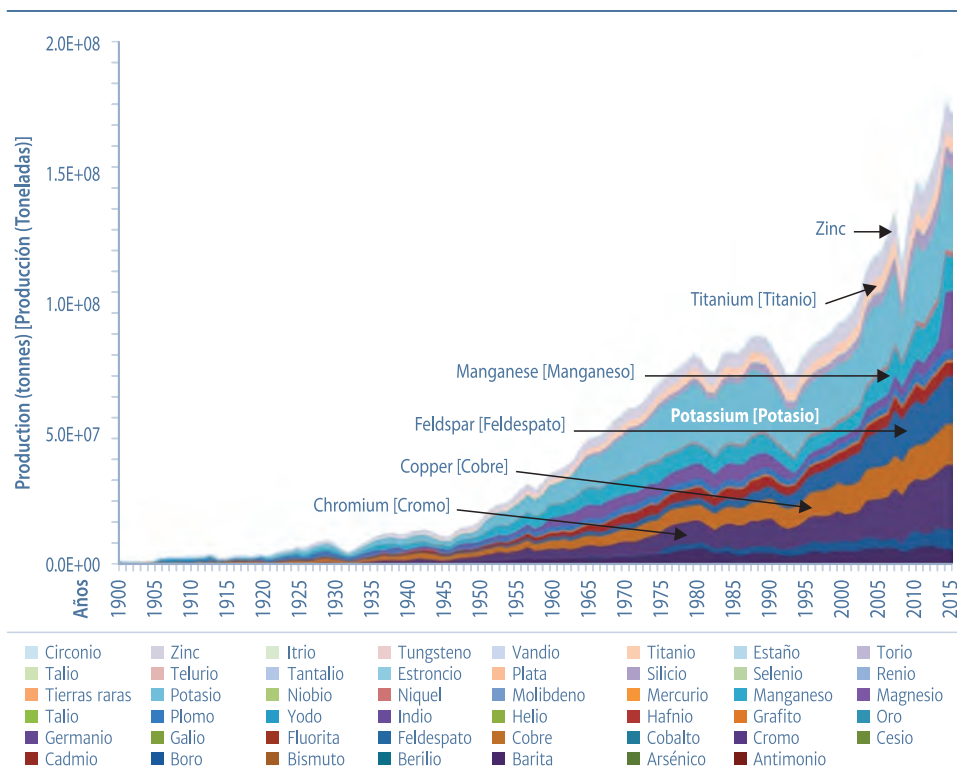
- **Litio:** es el componente principal de las baterías de iones de litio, usadas en vehículos eléctricos y sistemas de almacenamiento de energía renovable. Por ejemplo, un coche eléctrico medio puede contener hasta 20 kg de litio en su batería. Además, la capacidad de las baterías de litio para almacenar grandes cantidades de energía las hace ideales para equilibrar la producción intermitente de fuentes de energía renovable, como la solar y eólica, lo cual asegura una entrega de energía constante.
- **Cobalto:** es fundamental en el uso de las baterías de iones de litio, en particular en los cátodos. Estas baterías son indispensables para los vehículos eléctricos y el almacenamiento de energía renovable. Un coche eléctrico puede contener hasta 10 kg de cobalto. Aparte, este elemento ayuda a aumentar la vida útil de las baterías y su capacidad para retener energía y hacer posible que los vehículos eléctricos tengan un rango de conducción más largo y que las fuentes renovables proporcionen energía durante periodos de baja producción.
- **Silicio:** se utiliza para fabricar celdas fotovoltaicas en paneles solares, que convierten la energía del Sol en electricidad. Por ejemplo, un panel típico puede contener alrededor de 20 kg de silicio. Además, este mineral se usa en semiconductores que son fundamentales para la tecnología de eficiencia energética y la gestión de la red eléctrica.
- **Neodimio:** es clave para los imanes permanentes usados en motores de vehículos eléctricos y turbinas de viento. Los imanes de neodimio son en extremo potentes, por lo que mejoran la eficiencia de estos sistemas. Por ejemplo, una turbina eólica de tamaño medio puede contener varios cientos de kilos de neodimio. Además, los motores de los vehículos eléctricos también utilizan estos imanes, por lo que contribuyen al aumento de la eficiencia energética y la reducción de las emisiones de carbono.
- **Tungsteno:** por sus propiedades de alta densidad y punto de fusión extremadamente alto, es esencial en aplicaciones energéticas de alta temperatura y elevada presión. En la TE, el tungsteno se utiliza en el campo de la energía nuclear, en específico en la fusión nuclear, donde se emplea en componentes resistentes al calor en los reactores.

Son cerca de 50 minerales clave en total, aunque esta cantidad puede variar según el país o la institución a la que se le requieran estos datos.

Es importante destacar que la TE necesita una gran cantidad de minerales y materias primas para su desarrollo e implementación. Además, es preciso contar con una disponibilidad sostenible y ética de estos recursos para garantizar el éxito de esta transición.

A continuación, en el gráfico 9 se muestra la tendencia progresiva de la extracción de minerales durante el siglo XX y parte del XXI, así como la orientación del crecimiento de la extracción y la diversidad de minerales obtenidos de este proceso, por lo que a partir de 1950 comienza a ser visible un incremento sustancial. Asimismo, se observa que a partir del año 2000, una pendiente va creciendo hacia arriba en la extracción de minerales con una inclinación más pronunciada y en un periodo más corto; etapa en la que las tecnologías para la generación de energía renovable se desarrollan y mantienen en auge.

GRÁFICO 9  
Desarrollo de la producción minera en el mundo (1900–2015)



Fuente: tomado de Valero, Valero, Calvo y Ortego (2018). Traducción y adaptación de la autora.

Por lo tanto, el efecto de la creciente demanda de tecnologías para generar energía baja en emisiones contaminantes ha provocado una ampliación en la extracción de minerales, con la finalidad de cubrir el incremento de la demanda mundial de materias primas empleadas en la producción de dicha tecnología. En este sentido, el Banco Mundial (BM) estima que, de continuar con el mismo ritmo de uso tecnológico, se necesitarán 1800 millones de toneladas para cubrir la demanda de minerales y metales que supuestamente requiere la industria tecnológica para el año 2050.

Asimismo, si se quiere cumplir con los objetivos de estar por debajo de los dos grados de calentamiento global, se tendría que llegar a 3000 millones de toneladas, ya que de esta forma existiría la continuidad de un sistema maduro de energía renovable producto de fuentes eólicas, solares, geotérmicas y de almacenamiento de energía (Hund, La Porta, Fabregas, Laing y Drexhage, 2020).

### ¿Qué son los minerales?

Los minerales se identifican como diversas sustancias y compuestos químicos provenientes de la naturaleza. Éstos se diferencian por su composición química y su estructura interna, originada a partir de alguno de los siguientes tres procesos geológicos:

- **Magmático:** en éste intervienen la presión y los gases del entorno, aunque la característica principal es la solidificación del magma que da origen a los minerales.
- **Metamórfico:** se produce al transformar la estructura química de los minerales al exponerse a los efectos del cambio de temperatura, presión y fluidos circundantes.
- **Sedimentario:** constituido por depósitos de minerales que han tenido un proceso de solidificación sin la intervención de factores de transición como la temperatura, la presión o un fluido (Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, 2016).

Por su lado, se encuentran los metales. Se trata de elementos químicos caracterizados por ser buenos conductores de calor y electricidad, tener brillo metálico, ser maleables y dúctiles. Si bien pueden encontrarse en

forma pura en la naturaleza, por lo general se obtienen al extraerse de los minerales mediante procesos de refinación.

En esta medida habrá un gran número de sustancias extraídas de la corteza terrestre; sin embargo, interesa mencionar a los principales minerales utilizados para la construcción y producción de tecnologías, como aerogeneradores, baterías, acumuladores y celdas fotovoltaicas que posibilitan la generación de energía renovable. Para ello, se requieren principalmente los siguientes minerales: aluminio, cobre, litio, manganeso, tierras raras<sup>19</sup>, zinc, entre otros, cuyo vínculo con estas tecnologías se expone en el siguiente cuadro (véase cuadro 5).

CUADRO 5  
Minerales que se necesitan para la TE

Minerales y metales fundamentales para la transición	Porcentaje para paneles fotovoltaicos (%)	Porcentaje de baterías (%)			Toneladas para aerogeneradores de tres megavatios de capacidad
		Para automóvil de gran tamaño	Para automóvil compacto	Para uso común: telefonía, electrodomésticos y otros dispositivos inteligentes	
Cristal	70.0				
Aluminio	7.0	5.0			3.0
Cobre	1.0				4.7
Plata	0.1				
Plomo	0.1				
Estaño	0.1				
Silicio	4.0				
Níquel		80.0		33.3	
Cobalto		15.0		33.3	
Óxido de litio			100.0		
Manganeso				33.3	
Acero					335.0
Tierras raras					2.0
Zinc					ND
Molibdeno					ND

Fuente: elaboración propia con información del BM (2019).

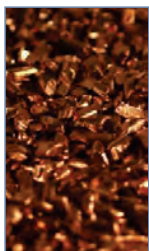
<sup>19</sup> El término “tierras raras” se refiere a 17 elementos difíciles de obtener de forma pura, entre los que se encuentran: escandio, itrio, lantano, cerio, praseodimio, neodimio, prome-tio, samario, europio, gadolinio, terbio, disprosio, holmio, erbio, tulio, iterbio y lutecio.

Asimismo, se mencionan las características más importantes de cada uno de estos minerales, con la intención de aclarar para qué sirven y cuáles son algunos de los efectos o impactos que generan tanto en la sociedad como en la naturaleza.



#### Aluminio

Es uno de los materiales más amigables y maleables al ser utilizados, es un buen conductor térmico y eléctrico, representa menores costos durante el transporte y fundición (690 grados centígrados). Otra de sus cualidades es la no degradación, condición que permite hacerlo 100% reciclable y reutilizable en una cantidad innumerable de veces, lo que incluye un costo de reciclado menor en 95% de lo que cuesta extraerlo y procesarlo como materia prima inicial. Así, este material de aspecto grisáceo metálico es el tercer elemento con mayor presencia en la Tierra en cuanto a cantidad después del oxígeno y el silicio. Sin embargo, tiene un grado de toxicidad; aun cuando es bajo, si los humanos lo absorben puede provocar daños hepáticos y renales, y está vinculado a la incidencia de Alzheimer (Espíndola, 2020; Uriarte, 2021).



#### Cobre

Es uno de los primeros minerales que el ser humano aprendió a usar como herramienta, debido a su gran capacidad para conducir el calor y, actualmente, por la conducción de energía eléctrica; sin embargo, este metal de color rojo marrón contamina el aire durante la fundición y ocasiona graves problemas respiratorios, además de acidificar grandes extensiones de tierra para destruir así la vegetación del entorno. Tiene propiedades bactericidas; pero, en caso de que se acumule en exceso en el cuerpo humano, puede tener efectos dañinos para el hígado y el cerebro. Finalmente, se considera uno de los pocos minerales factibles de reciclar casi al 100%, lo que lo hace reutilizable (Cabrera, Velásquez y Vrhovac, 2014; Uriarte, 2021).



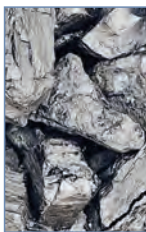
#### Plata

Es un mineral grisáceo brillante que se utiliza en la industria electrónica debido a su gran conductividad eléctrica y calorífica, así como en fotografía y joyería. En pequeñas cantidades no es tóxica e incluso tiene propiedades desinfectantes, aunque la exposición en gran magnitud sí puede causar problemas, como: irritación de la piel, mareos, dificultades para respirar, inconciencia e incluso la muerte, pero los temas más delicados son producto de procesos de extracción que provocan inconvenientes de salud y ambientales por la contaminación del aire, suelos y recursos hídricos, debido a los desechos generados por la aplicación de cianuro, arsénico o mercurio y otros metales pesados utilizados para separar la plata de otros minerales (Covarrubias y Peña, 2017; Uriarte, 2021).



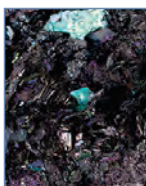
#### Plomo

Este metal de color gris opaco siempre se encontrará unido a otros, como la plata, el oro, el zinc, etcétera, con los que forma aleaciones; además, es producto de la desintegración de elementos radioactivos, como el uranio o el torio. Se utiliza en blindajes, fabricación de cerámicas, acumuladores, balas, recubrimiento de productos eléctricos y embalajes de productos radioactivos, ya que funciona como una barrera. Asimismo, se evidencia su toxicidad para los seres humanos y la fauna, al ser radioactivo y dañar el sistema nervioso y renal; provocar vómitos, diarrea, dificultad de aprendizaje, agresividad, y en algunas ocasiones inducir mutaciones (Covarrubias y Peña, 2017; Lenntech, 2022; Uriarte, 2021).



### Estaño

Este mineral grisáceo tiene múltiples usos, pero el más importante es como soldador en la industria electrónica, anticorrosivo y fortalecedor de vidrio y esmaltes cerámicos. Es un elemento presente en la naturaleza sin daños a la salud o al medio ambiente; sin embargo, los compuestos creados a partir de este elemento por el ser humano pueden tener consecuencias, como la intoxicación, dificultades neurológicas, anemia y alteraciones hepáticas. En cuanto a efectos nocivos al medio ambiente, su dispersión altera el crecimiento y la reproducción de plancton y algas, lo cual repercute en la alimentación de organismos acuáticos (British Federal México; Lenntech, 2022; Rowlatt, 2014; Telos World, 2022).



### Silicio

Se utiliza para darle resistencia a otros elementos, como el aluminio y el cobre, pero su principal uso se encuentra en la industria de los circuitos integrados y las celdas fotovoltaicas. Los efectos sobre la salud humana están relacionados con irritaciones en la piel, ojos y pulmones; la afectación más grave es la silicosis y el cáncer de pulmón. No hay evidencia sobre daños al ambiente. Se ha empleado como un mineral que ayuda a las plantas a enfrentar plagas, enfermedades y sequías (Lenntech, 2022; Ruiz, 2021).



### Níquel

Este mineral blanco plateado forma aleaciones con otros metales debido a su dureza; la mayor parte es utilizado para fabricar acero inoxidable, intercambiadores de calor, imanes y baterías. La exposición a este elemento se da por aire, agua y alimentos o por fumar; en grandes cantidades provoca reacciones alérgicas e irritación en la piel, dolores de estómago, alteraciones en la sangre, bronquitis crónica, cáncer pulmonar por ser un agente cancerígeno y aumento en las tasas de mortalidad, así como disminución del peso de niños recién nacidos. Finalmente, después de que el níquel es liberado por plantas generadoras de energía e incineradoras de basura, éste se queda en el aire por un tiempo prolongado, lo que lo hace potencialmente dañino (Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades, 2005; Codam, 2022; Lenntech, 2022).



### Cobalto

Es un mineral ferromagnético y resistente a altas temperaturas, al desgaste y la corrosión, motivo por el que es utilizado en gran variedad de aleaciones dentro de la industria tecnológica y la producción de imanes. Este elemento es beneficioso en ciertas cantidades para el cuerpo humano, ya que es utilizado para tratar la anemia y estimular los glóbulos rojos; sin embargo, en altas concentraciones puede dañar los pulmones y provocar asma o neumonía, problemas del corazón, de la vista y daño a la tiroides. La liberación del cobalto se da mediante la combustión de carbón, la minería o las plantas nucleares que depositan el mineral en el ambiente; esta condición trae problemas de salud al consumir plantas y animales (Codam, 2022; Department of State Health Services, 2012; Lenntech, 2022).



### Óxido de litio

Este mineral tiene una gran conductividad térmica y es utilizado en la producción de esmaltes para porcelanas. También se usa como aditivo para alargar la vida de los acumuladores y las baterías, y en soldaduras. Este compuesto tiene reacciones explosivas cuando libera gases, los cuales son irritantes para el sistema respiratorio; asimismo, al contacto con la piel puede causar quemaduras por ser una sustancia muy corrosiva para cualquier órgano humano. Al ser corrosivo tiene un gran potencial para producir afectaciones al ambiente: daña la fauna y la flora, saliniza la tierra y el agua, contamina el aire y provoca pérdida de la biodiversidad. Por último, su extracción tiene repercusiones en los sistemas hídricos (Lenntech, 2022; Minería en Línea, 2020; Villalobos, 2019).





### Manganeso

Mineral de color grisáceo brillante utilizado para maximizar la dureza y solidez del acero, así como para mejorar el octanaje de la gasolina; la exposición suele presentarse en trabajadores de la industria del acero y por la alimentación, ya que algunos alimentos contienen este mineral. Es un elemento nutritivo para el cuerpo humano en cantidades moderadas, pero si se expone constantemente y se acumula puede dañar el sistema nervioso que involucra la coordinación de los movimientos, el desarrollo del cerebro, el comportamiento o irritar los pulmones. Se encuentra en la naturaleza y es un componente esencial que interfiere en el crecimiento de los seres vivos, la formación de huesos y la reproducción (Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades, 2016; Lenntech, 2022).



### Tierras raras

El nombre de estos minerales se debe a la dificultad del proceso de extracción y procesamiento y no a la cantidad que puede encontrarse en la naturaleza. Por ahora son utilizados como "arma" geopolítica; estos elementos son empleados en la industria de la electrónica para la producción de dispositivos magnéticos, almacenamiento de datos, láser, aerogeneradores, paneles fotovoltaicos, iluminación led o baterías. Su proceso de minado requiere químicos contaminantes que generan gases tóxicos y contaminación de recursos hídricos; además, algunos son radioactivos y dejan su rastro en el entorno. Otra consecuencia de la extracción es la desaparición de vegetación, contaminación radioactiva de los alrededores y afectaciones a la ganadería y la agricultura, lo cual repercute en la salud de animales y del ser humano. Finalmente, el empleo tan reducido sobre dispositivos pequeños imposibilita su reciclaje (Lamm, s.f.; Rostek, 2019).



### Zinc

Elemento de color gris, utilizado para recubrir otros metales. Es buen conductor del calor y a ciertas temperaturas se vuelve un superconductor eléctrico. Es esencial para el desarrollo de los seres vivos, al influir sobre el crecimiento, la madurez y la manifestación de anemia; sin embargo, grandes cantidades irritan la piel, causan vómitos y úlceras en el estómago. El zinc se encuentra en la naturaleza, pero la manipulación del ser humano incrementa la presencia en ríos y suelos, lo que aumenta la acidez del agua y los peces que la habitan; de esta manera se incorpora a la cadena trófica. Si los suelos se contaminan con este mineral, sólo algunas plantas podrán crecer (Lenntech, 2022; Uriarte, 2021).



### Molibdeno

Uno de los usos principales es su aleación con acero, ya que así soporta altas temperaturas y presiones, lo cual lo hace muy resistente para la construcción y la industria automotriz. Además, es utilizado para remover azufre en la industria petrolera, generar conductores eléctricos, aplicaciones aeroespaciales y la producción de rayos láser. Los registros de este mineral gris brillante no muestran efectos sobre el ambiente, pero en trabajadores expuestos crónicamente a este elemento surgen problemas hepáticos, dolor y deformidades en articulaciones (Lenntech, 2022; MéxicoMinero.org, 2022).



### Grafito

Se utiliza para la producción de crisoles de alta temperatura, gracias a su estabilidad térmica. Además, por su alta conductividad eléctrica se usa como ánodo en baterías, puntillas de lápiz y lubricantes de motores eléctricos. Los daños a la salud están más relacionados con la parte del carbón, denominada "negro de carbón", la cual es resultado de la carbonización de materia orgánica y tiene efectos en los pulmones y el corazón. No se han identificado daños al medio ambiente (Lenntech, 2022).

La intención de mencionar los principales minerales utilizados en la generación de energía renovable parte del entendimiento y la conciencia social en cuanto a la relación que existe entre la salud y el medio ambiente con las herramientas y medios tecnológicos utilizados para mejorar las condiciones de vida y/o cubrir las necesidades cotidianas energéticas.

Adicionalmente, el rol que tienen los minerales en la tecnología utilizada es crucial, ya que son la materia prima para llevar a cabo la anhelada TE que pregonan algunos gobiernos y varias empresas, las cuales han magnificado la producción tecnológica en aras de lograr sus objetivos. De esta manera, la demanda por algunos minerales tendrá una tendencia análoga y en la misma dirección que la producción de las herramientas requeridas para la generación de energía renovable, aun cuando existan inconvenientes, como la imposibilidad de eliminar del medio ambiente la dispersión de contaminantes y la generación de residuos producto de estos procesos en el corto plazo.

Además, aunque cada vez existen más e importantes operaciones de reciclado, siempre habrá un gran nivel de extracción y una parte imposible de reciclar en 100%. A pesar de lo anterior, el empleo de minerales será mayor con el paso de los años, debido a que la industria ya los adoptó y los convirtió en recursos de los que ahora depende, mientras acumula y disemina sustancias tóxicas en el mundo que repercuten en la salud, las sociedades y el ambiente (Giurco, Arndt y Ali, 2017).

### **¿Por qué son importantes los minerales?**

Las actividades cotidianas y formas de vida que ostentan las sociedades modernas están fundamentadas en una gran dependencia de fuentes energéticas todavía fósiles; sin embargo, la energía que se produce a partir de fuentes renovables ha tenido un amplio crecimiento durante las últimas dos décadas, en búsqueda de reducir las emisiones de contaminantes; por ello la han impulsado gobiernos nacionales, organismos internacionales y empresas. Pero al final, esta situación terminará por agregar un mayor peso sobre los recursos naturales, ya que la materia prima para dichas fuentes de energía son minerales que necesitan ser extraídos mediante procesos altamente contaminantes, los cuales perjudican el ambiente y dañan la salud de las personas (Sanchis, 2020).



La posición que admite generar energía renovable a la vez que se depende de la energía fósil ha edificado una nueva necesidad por el suministro de recursos minerales, de tal manera que la disponibilidad de ambos recursos está condicionada por dos situaciones: *a)* por un lado, la producción de bienes y herramientas tecnológicas, como ordenadores o computadoras, teléfonos celulares o móviles, medios de transporte y comunicación, y *b)* por el otro, la generación de energía renovable por medio de aerogeneradores, paneles solares y baterías que permitan el uso de las tecnologías antes mencionadas, en virtud de que sin los minerales no se podrían elaborar ni emplear esos bienes, así como las estructuras necesarias para dicha energía.

La industria que crea tecnología y genera energía requiere un constante incremento en el suministro de minerales para sostenerse; coyuntura que lleva a la activación y reactivación de proyectos mineros en todo el mundo, con el fin de extraer una mayor variedad de minerales que aumenten la disponibilidad de esta materia prima para las empresas, pero también para mantener poder económico y geopolítico por parte de los gobiernos (Carralero, 2021a).

Pese a la presión que se ejerce sobre los ecosistemas, proveer minerales es indispensable para la industria productora de aerogeneradores, paneles fotovoltaicos y vehículos eléctricos. A continuación, se mencionan tres elementos importantes en este tenor:

- Los aerogeneradores utilizan imanes con alto contenido de tierras raras; por ejemplo, se necesitan alrededor de dos toneladas para un aerogenerador que produce 3MW, pero las cantidades minerales variarán según el tamaño y modelo de las turbinas. Esto se debe a las características electromecánicas de estos elementos, que los hacen reducir los costos de mantenimiento o ser más eficientes, al evitar rozamiento y perder energía por la fricción. Otra característica importante es el tamaño de los aerogeneradores y los parques donde se instalan, pues éstos son enormes y requieren una cantidad igual en amplitud; es decir, millones de toneladas de minerales, como cobalto, zinc, molibdeno, aluminio, cobre, entre otros (Carralero, 2021a; Sanchis, 2020).
- Debido a la cantidad de paneles fotovoltaicos necesarios para producir energía renovable, el consumo de minerales se amplifica, ya que tan

sólo para generar 1 MW es preciso emplear entre 2500 y 4000 paneles, así como un área de 1.6 a 2 hectáreas, equivalente a unos cuatro campos de fútbol americano (Hund, La Porta, Fabregas, Laing y Drexhage, 2020).

- Ahora bien, la plata es un mineral necesario para la industria de los paneles fotovoltaicos. Este componente es fundamental por sus características particulares, como resistencia a la corrosión, punto de fusión alto, gran conductividad, capacidad de soldadura y reducción de los costos. Por ello, este sector empleó 7% de la producción mundial de este mineral tan sólo en 2017, a pesar de que apenas y en conjunto con el estaño y el plomo representan 0.1% de la estructura final de los paneles (Carralero, 2021b; The World Bank, 2022).
- Las baterías son la única tecnología, entre las mencionadas, que no se utilizan para generar energía sino para acumularla. Por ello se les denomina *herramienta secundaria*, la cual dota de funcionamiento a dispositivos que no estén conectados de forma directa a la red eléctrica, tales como: teléfonos inteligentes, computadoras o medios de transporte.

Este otro sector industrial, además de emplear otros minerales como el acero, el silicio o algunos polímeros en la fabricación de baterías, tiene como materia prima indispensable: *a)* litio en un grado casi puro, *b)* aluminio, *c)* cobalto, *d)* manganeso, *e)* níquel y *f)* grafito (Hund, La Porta, Fabregas, Laing y Drexhage, 2020).

La mayor complicación en la industria de las baterías es la dificultad para reutilizar el litio, ya que este mineral se necesita en un grado altamente puro, así que por lo general no se recicla. Por ejemplo, en el año 2019 se reciclaba sólo 1%, razón por la cual se entiende que su extracción mundial haya pasado de 28.2 a 86.3 mil toneladas (205.9%) en una década: del año 2010 al 2020 (BP PLC, 2021).

La industria productiva mundial, en conjunto con el continuo incremento en la extracción de minerales por parte de empresas y gobiernos, más que dedicarse a generar energía renovable y atender problemas climáticos y de salud humana parece estar enfocada en salvar al sector minero, para lo cual se apoya en la trascendencia de cada mineral dentro de la producción de la estructura que proveerá energía renovable. En este sentido,

al expandirse, la industria tecnológica ampliará la demanda de minerales, que se pronostica se incrementará de forma colosal en las siguientes décadas.

Es importante resaltar que algunos minerales sufren limitaciones en su suministro; por ejemplo, las tierras raras han visto restringido su mercado, debido a que existe un monopolio relativo en su proceso de extracción. La mayor parte de éste se concentra en China, donde en el año 2010 se tomó la decisión de limitar la exportación de estos elementos; situación que ejerció presión sobre otros gobiernos y empresas que los utilizaban para la producción de tecnología. Este contexto contribuye a plantear la importancia que poseen los minerales en el desarrollo de tecnología y energía renovable, además de dotarlos de relevancia internacional sobre cuestiones geopolíticas (Carralero, 2021b), tema que se retoma en el siguiente capítulo con más detalle.

Al final, los minerales se han vuelto tan valiosos que la UE ha adoptado medidas que incorporan en sus procesos productivos la eficiencia en el uso de los recursos y ha aumentado los programas de reciclado de metales. Estas medidas se tomaron con la intención de prevenir una crisis por recursos, además de cubrir parte de la futura demanda con el supuesto compromiso de sostener el bienestar humano y ambiental (Comisión Europea, 2011). Sin embargo, la realidad es que dichas medidas son para evitar que esta región se queda sin energía.

### **Minerales críticos y estratégicos**

Existe una diferencia importante entre los términos “minerales estratégicos” y “minerales críticos”. Los primeros son los necesarios para la seguridad nacional o la seguridad energética de un país, cuya producción o importación es relevante para garantizar la continuidad de la economía y la industria. Por su lado, los minerales críticos son aquellos cuyos suministros son escasos o vulnerables y cuyos usos son fundamentales para la economía y la industria moderna. Éstos incluyen minerales como el litio, el grafito y el cobalto, que son esenciales en la fabricación de baterías para vehículos eléctricos y tecnologías verdes.

La TE hacia fuentes más limpias y sostenibles ha llevado a un aumento en la demanda de los minerales críticos, ya que son necesarios para la producción de tecnologías, como paneles solares, turbinas eólicas y baterías de almacenamiento de energía. Sin embargo, debido a la escasez de

estos elementos y la dependencia hacia países extranjeros para su abastecimiento, es importante desarrollar estrategias de seguridad de suministro nacional e internacional, a fin de garantizar la disponibilidad de los mismos en el futuro.

Asimismo, para que el mundo consiga los objetivos de reducción de emisiones contaminantes durante la generación de energía y utilización de medios de transporte necesita diversos minerales, los cuales tienen que ser sometidos a procesos previos de extracción, producción, procesamiento y desarrollo que por lo general tienen consecuencias dañinas para el medio ambiente y las poblaciones humanas.

Además, durante la adquisición de minerales, se pueden manifestar otras condiciones adversas; por ejemplo, en muchos casos, el control de los territorios con contenido mineral o el bien resultante de la extracción se encontrará acumulado, concentrado y controlado por pocas empresas o naciones que dejan fuera del suministro a otros países cuya industria también depende de los recursos minerales que ahora son limitados (Morales, 2021).

De esta manera, dejamos de lado la escasez de los minerales en la naturaleza. Es más, la realidad es que éstos han tenido un auge importante en su extracción durante las últimas dos décadas. Sin embargo, debe señalarse que la conexión con la escasez es ocasionada artificialmente por gobiernos que la utilizan como medio para manipular los mercados tecnológicos, así como los precios y las relaciones internacionales. A continuación, se señalan algunas condiciones que son resultado de la manipulación en el precio y la demanda de los minerales en el plano internacional, de tal manera que pueden afectar la oferta y volver críticos a los minerales:

- La alta concentración geográfica de minerales en naciones que impiden diseminar y cubrir la oferta mundial. Por ejemplo, Australia manifiesta la mayor producción de litio, la República Democrática del Congo la del cobalto y China la de tierras raras. Este escenario provee de condiciones a estos países para manipular y restringir la exportación de minerales; o también para impedir su extracción en situaciones conflictivas, al no existir una diversidad de actores que provean de minerales, lo que además resulta en la volatilidad de los precios de éstos. De esta manera, dichos elementos serán clave para las economías de los gobiernos de esos países, pero aún más para las naciones con industrias tecnológicas de-

pendientes de esta materia prima. Otro efecto de dicha concentración será evitar la adquisición de bienes y minerales de forma fácil y accesible, estancando la industria tecnológica. Con ello, no se contribuirá al uso de los medios y herramientas que reduzcan las emisiones contaminantes con miras al cumplimiento de los objetivos mundiales.

- Aun cuando no se cuente con la posesión de los minerales, el hecho de que las empresas establezcan sus proyectos extractivos en algunos territorios genera problemas socioambientales y provoca impactos culturales negativos. Es decir, cuando este tipo de proyectos se instalan en zonas donde existe estrés hídrico, calor extremo o inundaciones, entre otros factores, se presentan conflictos por la posesión de territorios en el interior de las naciones, además de rechazo de la población, lo que en muchos casos lleva a criminalizar las protestas o a que se susciten enfrentamientos entre las empresas, los gobiernos y la población; por ejemplo, a menudo hay asesinatos o desapariciones de opositores. Esto podrá ocasionar que se pausen los proyectos de extracción, lo cual, desde un punto de vista económico, terminará por afectar la oferta (Morales, 2021).

El contexto en el que se reduce el suministro de minerales y la poca o nula diversificación de la oferta evidencia la vulnerabilidad de las naciones, pero también algunas alternativas que buscan reducir esta condición de fragilidad ante quienes manipulan los destinos y las cantidades de materias primas distribuidas en el mundo. De manera que, para evadir los problemas mencionados, se han desarrollado en paralelo proyectos que incentivan la innovación y promueven las nuevas tecnologías que sustituyan algunos minerales por ahora esenciales en la cadena de suministros. Asimismo, algunas propuestas van dirigidas a incrementar el reciclaje y fomentar la economía circular para ayudar a reducir el suministro primario; pero aún falta mucho por hacer, además de que no se eliminarían estos problemas por completo.

### *¿Qué hace a un mineral crítico?*

Desde el siglo pasado y lo que llevamos del actual, la civilización se ha construido con base en la energía producto del petróleo. Por consiguiente, gracias a esta sustancia, la humanidad puede fabricar casi todo tipo de

bienes, transportarse, aguantar periodos climáticos fríos o calientes propios del planeta (por la calefacción o aire acondicionado, gas, luz, etcétera), construir diversas infraestructuras (viviendas, carreteras, escuelas, presas, etcétera) e incluso formular medicamentos, todo con el objetivo de subsistir y mantener una vida considerablemente confortable.

No obstante, utilizar el oro negro como fuente energética también ha propiciado intervenciones, conflictos políticos y militares en distintos países, además de provocar cambios en el clima planetario y reducción de las reservas existentes. Esto, por una parte, ha llevado a restringir el uso del petróleo y, por otra, a incrementar los riesgos ambientales y sociales por el empleo de este recurso, motivo por el cual cada vez es más caro y difícil de obtener, así como distribuirlo en el mundo. Ello pone a prueba el actual modelo civilizatorio, que mantiene un crecimiento continuo de consumo y producción, mientras la energía fósil de la que dependemos se ve cada vez más limitada.

En esta misma situación, en que los gobiernos lidian con la propiedad de sustancias mediante confrontaciones políticas, militares, económicas, sociales y/o comerciales, se encuentra la nueva estructura energética orientada a lo renovable. Sin embargo, ahora los minerales que son utilizados como materia prima en la fabricación de bienes se han vuelto indispensables en la generación de energía renovable, la cual busca ocupar el lugar que aún ostenta la energía producto de la combustión de minerales fósiles. Así, este tránsito a la creación de herramientas tecnológicas que permitan modificar la matriz energética necesitará consumir inmensas cantidades de minerales.

Al respecto, el uso de minerales tiene el inconveniente de su suministro y distribución futura, pues algunas de estas materias primas poseen la característica de ser finitas, además de encontrarse repartidas en regiones de difícil acceso o concentradas en ciertas zonas. También, es importante mencionar que en ocasiones suele existir oposición entre la población de las regiones donde se extraen minerales, lo que genera disputas sociales y problemas ambientales. Al final, los conflictos socioambientales son factores que afectarán los precios y, por lo tanto, su adquisición.

A pesar de los obstáculos señalados para obtener minerales, vale la pena puntualizar que éstos son indispensables para el actual y futuro funcionamiento de las economías e industrias tecnológicas del mundo. En tales circunstancias, un mineral se identificará en este texto como crítico si mantiene condiciones que afectan su suministro y distribución

hacia la industria tecnológica mundial, debido a la concentración de lo extraído por pequeños grupos de países o de empresas, así como la existencia de ambientes de inestabilidad política, condiciones nocivas ambientales y sociales, volatilidad en los precios y/o por las bajas reservas existentes. Finalmente, se denomina mineral crítico porque se le atribuye la particularidad de ser fundamental para los procesos donde es empleado (Carralero, 2021a).

A continuación, se explican algunas de las limitaciones señaladas de las que son objeto los minerales críticos, para al final presentar las que son determinantes desde la perspectiva de la autora.

### *Concentración geográfica*

Los recursos como el petróleo, el gas o el carbón son limitados y se encuentran concentrados en pocos lugares del planeta; situación que, en casos como el del petróleo, han llevado a pugnas constantes por su posesión al involucrar a las naciones en diversos conflictos armados e incluso al generar problemas político-militares internos, lo que provoca el incremento de precios y la reducción de la producción. Ahora bien, respecto a los minerales señalados en este capítulo, también pueden asociarse a esta misma situación de disputa, debido a que de igual forma existe concentración geográfica extractiva y de procesamiento. Así, la celeridad de la transición a energías renovables y la inseparable fabricación de tecnologías para generarla ofrece y da continuidad a conflictividades similares, como las que han existido por el petróleo, pero sobre todo a sucesos de desabasto por la poca diversidad de actores que cubran la demanda (Klare, 2021).

Se puede puntualizar que los países más relevantes en cantidad de materiales críticos son: China, Rusia, Australia, Brasil y Sudáfrica. Además, China es el principal productor mundial de litio, neodimio, cobalto, grafito y tungsteno, entre otros. Por su parte, Rusia es un gran productor de cobalto, grafito, cobalto y tungsteno; Australia de litio, cobalto, grafito y tungsteno; Brasil de niobio y tántalo, y Sudáfrica de cobalto, entre otros.

En casos como el del cobalto de la República Democrática del Congo o las tierras raras de China, son elementos que están ubicados en territorios delimitados; es decir, las altas concentraciones de minerales se encuentran en pocos puntos del planeta, que además se especializan y generan

la suficiente tecnología; asimismo, tienen regulaciones ecológicas y elementos políticos, económicos y sociales que permiten la extracción y/o el procesamiento. Sin embargo, estos escenarios ya revelaron situaciones conflictivas, las cuales llevaron al desabasto de los elementos mencionados en el plano internacional, como consecuencia de confrontaciones internas y/o externas; pero sobre todo, como causa de su mínima diversificación en cuanto a países donde se extraen, así como a los pocos actores que realizan este proceso.

Tan sólo para ejemplificar lo crítico que es el cobalto, se deben resaltar dos características. Primero, es un mineral necesario para la industria electrónica, por lo que tiene alta demanda y ofrece amplias ganancias económicas; segundo, pese a que la industria tecnológica lo exige tanto, contiene factores que ponen en peligro su suministro, tales como los que Duval (2018) y Salazar (2018) enfatizan a partir del proceso de extracción; en este procedimiento suelen estar presentes condiciones insalubres o de nula existencia de seguridad laboral, además de que prevalecen la esclavitud y el trabajo infantil, pero si tales factores fueran controlados podrían provocar una disminución de la oferta, debido a que los costos se incrementarían o se elevarían los precios.

Por si fuera poco, este mineral tiene la característica de estar concentrado en una zona geográfica, ya que la mayor capacidad de extracción en el planeta se encuentra a cargo de la República Democrática del Congo. Tan sólo en 2020 se extrajeron 95 000 toneladas métricas, cantidad muy por encima de la que obtuvo el segundo país extractor de este mineral, Rusia, donde se extrajeron 6 300 toneladas métricas en el mismo año; esta cantidad sería insuficiente para cubrir alguna eventualidad que redujera la extracción del mineral, pues la diferencia es mayor a 1500% entre estos dos países, los cuales ocupan la primera y segunda posiciones en el mundo (Statista, 2021a).

Un ejemplo en relación con lo anterior es que el planeta sufrió un periodo de desabasto de cobalto y otros minerales<sup>20</sup> —en menor medida— durante los años 1996 y 2002 a causa de la inestabilidad política de la República Democrática del Congo, donde a juicio de Kabunda (2010), la misma riqueza mineral y natural lleva a cruentos conflictos tanto internos como con los países vecinos, que tienen intenciones depredadoras y

---

<sup>20</sup> Cobre, coltán, diamantes, oro, petróleo y otros recursos hídricos, forestales y suelos fértiles (Kabunda, 2010).



expansionistas por la sed de adueñarse de los recursos naturales de dicho país, lo cual corrobora que la energía tiene muchos colores. Esta posición deja el cobalto en cierta incertidumbre en cuanto al suministro, pues la inestabilidad del país y la concentración en el territorio no permitirán cubrir la demanda en caso de un posible conflicto; de esta manera se presenta como mineral crítico.

De igual forma, China es uno de los principales extractores y procesadores de minerales utilizados en la fabricación de bienes productores de energía renovable. Este país es el suministrador primario de diez de los minerales mencionados en este capítulo: aluminio, plomo, estaño, silicio, manganeso, acero, tierras raras, zinc, molibdeno y grafito (véase figura 8), y se encuentra dentro de los primeros tres lugares de otros elementos: cobre, litio y plata. Esta coyuntura hace que China se posicione como el mayor concentrador de minerales, lo que vuelve críticos al silicio, al acero, a las tierras raras y al zinc, al concentrar la extracción y limitar el suministro.

China es un caso especial, pues posee grandes reservas y la mayor capacidad de extracción; además, su industria tecnológica depende del continuo suministro de minerales, de tal manera que tiene el control de gran parte de la industria minera mundial, pero también cuenta con los recursos e influencia geopolítica para modificar las tendencias y los usos de estos recursos. Por ejemplo, en el año 2010, después de mantener una disputa por el liderazgo mundial en cuanto a condiciones políticas, tecnológicas y económicas, China y EUA se enfrentaron abiertamente en el plano comercial, lo cual resultó en la disminución de exportaciones de tierras raras con el supuesto de garantizar el abastecimiento de las empresas nacionales chinas; pero se podría interpretar que más bien fue un ataque comercial directo, ya que uno de los principales importadores de tierras raras es EUA, que considera indispensables estos elementos para objetivos tecnológicos y de seguridad nacional. Esta disputa al final afectó a otros consumidores, como Japón y la UE, pero modificó sobre todo la competitividad tecnológica global (Martínez y Del Valle, 2014).

Su limitación, convierte a las tierras raras en un mineral crítico, y aun cuando no se ha presentado otro evento similar con los demás minerales, China mantiene un poder geoestratégico sobre ellos, por lo que puede hacer uso de éste en cualquier momento y dejar que otras naciones se enfrenten a la escasez, además de disminuir la soberanía sobre su propia industria tecnológica.

FIGURA 8  
Distribución geográfica de algunos de los principales  
minerales necesarios para la TE



China ha monopolizado el procesamiento de minerales, a excepción de algunos de los que no es el principal productor, aunque sí se observa dentro de las primeras tres posiciones. Tal es la situación del cobre en el que Chile es dominante, México en plata, Indonesia en níquel, República del Congo en cobalto y Australia en litio.

Mientras hay una descarbonización de la energía eléctrica, la minería ocupa entre 2 y 11% de la energía total producida en el mundo; además, los principales proyectos mineros se encuentran en regiones con estrés hídrico.

China produce aproximadamente 50% del acero en el mundo, 90% de tierras raras y 7% de grafito. Además, tiene empresas en la extracción de la mayoría de los minerales, a pesar de no encontrarse en su territorio.

Fuente: elaboración propia con información de Hund, La Porta, Fabregas, Laing y Drexhage (2020); Olson (2021), y Statista (varios años).

Así, pues, se pueden mencionar ciertas características del sector minero en algunas de las naciones con mayor relevancia en la exportación de los mismos:

- China: es el principal proveedor mundial de minerales críticos, como cobalto, grafito, neodimio y terbio, entre otros. Sin embargo, también es el importador número uno de estos minerales, lo que ha llevado a tensiones con otros países productores debido a la competencia por el suministro.

- Rusia: es un importante proveedor de minerales críticos, como cobalto, grafito, niobio y terbio. Sin embargo, este país ha sido criticado por su política ambiental y su falta de transparencia en la minería.
- República del Congo: es el principal proveedor mundial de cobalto, un mineral crítico utilizado en la fabricación de baterías para vehículos eléctricos y dispositivos electrónicos. Sin embargo, la minería de cobalto en este lugar ha sido criticada por su impacto ambiental y la explotación laboral de los trabajadores.
- Australia: es un importante proveedor de minerales críticos, como cobalto, grafito, niobio y terbio. Sin embargo, ha sido criticada por su ausencia de regulaciones ambientales y su falta de transparencia en la minería.

### *Riesgos ambientales y/o climáticos*

Para descarbonizar la energía eléctrica, empresas y gobiernos han amplificado proyectos mineros para obtener e intensificar el empleo de los minerales en la producción de tecnología. Esto, a pesar de que, al mismo tiempo, implica altos consumos de energía (alrededor de 11% de lo producido en el mundo), así como estrés hídrico en los territorios donde se extraen estos minerales, además de otros problemas ambientales y de salud humana (Hund, La Porta, Fabregas, Laing y Drexhage, 2020).

Tal es el caso del litio, pues aun cuando es una industria relativamente nueva, distintas comunidades del mundo ya se están presionando para cerrar minas o evitar que se implementen proyectos mineros, debido en gran parte a que dicho recurso se encuentra en zonas que presentan inconvenientes por la cantidad de agua disponible para consumo humano. Por ejemplo, el Consejo Indígena de Atacama, en Chile, presentó y ganó una demanda en contra del proyecto de remediación que la empresa minera Sociedad Química y Minera de Chile (SQM) proponía, debido a la sobreexplotación y bombeo de agua. Ahora las comunidades están abogando por la revocación de permisos ambientales y el cierre en sus operaciones de litio, ya que no consideraron satisfactoria la respuesta que la empresa ofreció ante los daños en su territorio, los cuales serán invaluable (Sherwood, 2020). En este caso, no se logró detener el proyecto minero; de hecho, la empresa pretende expandir la capacidad extractiva de litio en Chile para los próximos años, aunque se interpongan demandas por el

cierre de operaciones. Sin embargo, las condiciones de rechazo social y los daños ambientales son una constante que enfrenta la extracción minera, lo que vuelve vulnerable al sector del litio, entre otros minerales, convirtiéndolo en un mineral crítico<sup>21</sup>.

Por último, se pueden mencionar otros elementos cuya explotación presenta problemas socioambientales, como la plata, ya que debido a su relación y vínculo con el oro, así como a su proceso de extracción comúnmente a tajo abierto, invade y modifica grandes extensiones de territorio. Por si fuera poco, se utilizan prácticas nocivas para la separación de los minerales a través de lixiviación, por lo que se usan sustancias altamente contaminantes para el medio ambiente y la salud humana. Sin embargo, la diferencia es que en muchas regiones del planeta se extrae este mineral, lo que no condiciona ni limita el suministro a un solo punto. Es decir, existen varios lugares del mundo en los que se seguirá extrayendo, a pesar de tener un proceso de extracción dañino.

Uno de los elementos más abundantes en el planeta y de los más reciclados es el aluminio, cuya extracción por ahora no ha presentado situaciones conflictivas ni daños a la salud; tampoco se ha incumplido con el abastecimiento de la industria tecnológica. En este mismo tenor, entre los minerales sin problemas de suministro encontramos el plomo, estaño, níquel, silicio, grafito, manganeso, acero, zinc y molibdeno, los cuales son elementos importantes para el desarrollo de la tecnología y para darle continuidad a la TE, por lo que no se señalan como críticos aun cuando se haya comentado que China mantiene la extracción y el procesamiento de la mayoría de ellos.

---

<sup>21</sup> Más aún, en un momento en el que se ha incrementado la amenaza hacia los ecosistemas y a los defensores de la tierra, al mismo tiempo que ha crecido la demanda por mejores condiciones de vida y el cierre de proyectos que destruyen el ecosistema. En este contexto, es importante mencionar que durante 2019, Global Witness (2020) registró un total de 212 homicidios e incontables detenciones, ataques directos, amenazas de muerte y demandas a defensores, así como la posibilidad de otros asesinatos que no están documentados en todo el mundo, como consecuencia del intento por detener la destrucción ambiental y los hogares, siendo el sector minero el más letal con 50 casos documentados.

El gran número de lamentables asesinatos está directamente relacionado con el aumento de la defensa de los ecosistemas y la posición de descontento en contra de los proyectos mineros, poniendo en situación de emergencia a los actores que intervienen en la extracción de minerales.

La lista de asesinatos por país es la siguiente: Colombia 64, Filipinas 43, Brasil 24, México 18, Honduras 14, Guatemala 12, Venezuela 8, India 6, Nicaragua 5, Indonesia 3, República Del Congo 2, Burkina Faso 2, Rumania 2, Kazajstán 2, Uganda 1, Perú 1, Camboya 1, Bolivia 1, Ghana 1, Kenia 1, Costa Rica 1 (Global Witness, 2020).

Es importante mencionar que es posible encontrar documentos que señalen lo crítico de un determinado mineral; sin embargo, en el cuadro 6 se mencionan los minerales críticos para la TE a través de fuentes solares y eólicas y/o el uso de baterías, pero también los que aún no representan riesgos para el suministro, sin dejar de lado su condición de necesarios.

CUADRO 6  
Diversas problemáticas para la obtención  
de minerales necesarios para la TE

Minerales	Problemática		
	Hídrica, de flora, de fauna o social	Geopolítica, concentración mineral, problemas internos y externos por intervención militar	Mineral crítico
Aluminio	—	—	×
Cobre	✓	—	✓
Plata	×	—	×
Plomo	×	—	×
Estaño	—	—	—
Silicio	—	—	—
Níquel	—	—	—
Cobalto	—	✓	✓
Óxido de litio	✓	—	✓
Grafito	—	—	—
Manganeso	—	—	—
Acero	—	×	×
Tierras raras	—	✓	✓
Zinc	—	—	—
Molibdeno	—	—	—

✓ Con la información encontrada, el mineral enlistado se sitúa en la descripción de la columna.  
 × Con la información encontrada, el mineral enlistado no se sitúa en la descripción de la columna.  
 — Al no existir suficiente información que ayude a inferir y sustentar el posicionamiento en alguna celda de especificación, se emplea el juicio de No hay Descripción.

Fuente: elaboración propia con información de Kabunda (2010), Klare (2021), Martínez y Del Valle (2014) y Sherwood (2020).

Por lo anterior, vale la pena resaltar que aun cuando algunos documentos, como el *Critical Mineral and US Public Policy* de Humphries (2019), integran una serie de minerales que denominan críticos<sup>22</sup>, éstos lo son para el funcionamiento de la industria estadounidense y su seguridad nacional; pero para la modificación de la matriz energética con enfoque en los parques eólicos, paneles fotovoltaicos, fabricación y uso de baterías, esto tendría algunos cambios.

### Conclusiones

Los minerales son importantes para la producción de bienes altamente sofisticados y la infraestructura que provee energía renovable a la sociedad. A pesar de ello, la energía renovable tiene el inconveniente de que necesita llevar a cabo extracción minera, proceso que por lo general es ampliamente contaminante, lo cual pone en riesgo a las comunidades y los ecosistemas del planeta.

Por su lado, se necesitan cantidades exorbitantes de minerales para mantener la demanda mundial. Tan sólo en el año 2018 se ocuparon alrededor de 40 millones de toneladas de minerales para la producción de tecnologías generadoras de energía baja en emisiones de carbono, pero para las próximas décadas podemos tener los siguientes escenarios:

Para el año 2050, en caso de que el calentamiento global se mantenga por debajo de los 2 grados, se proyecta que se requerirán 3100 millones de toneladas de minerales para cubrir la demanda requerida en la fabricación de la tecnología necesaria.

En caso de situarse por debajo de los 2 grados, será necesario el consumo de 3500 millones de toneladas de minerales críticos para mantener la capacidad de producción de tecnología necesaria para enfrentar esta situación (Hund, La Porta, Fabregas, Laing y Drexhage, 2020).

Dichas cantidades de extracción se incrementarán de forma masiva en cualquiera de los dos escenarios, lo cual nos lleva a pensar que se podrían originar mayores conflictos socioambientales, políticos y económicos por los recursos minerales.

---

<sup>22</sup> Los minerales señalados en el informe se enlistan de la siguiente manera: aluminio, antimonio, arsénico, barita, berilio, bismuto, cesio, cromo, cobalto, flúor, galio, germanio, grafito, helio, indio, litio, manganeso, magnesio, niobio, platino, potasio, tierras raras, renio, rubidio, escandio, estroncio, tantalio, telurio, estaño, titanio, tungsteno, uranio, circonio (Humphries, 2019).

Ahora, si bien es cierto que la energía captada del sol y del viento es renovable y no genera emisiones contaminantes durante su generación o que las baterías y los acumuladores de medios de transporte contribuyen a no usar combustibles fósiles altamente contaminantes, vale la pena decir que, para obtener la tecnología utilizada durante este proceso final, se desarrollaron varias etapas que involucran la extracción, el transporte y el procesamiento de minerales; tales situaciones son menos cuidadosas con el medio ambiente y generalmente tienen constantes denuncias de las poblaciones debido a la forma nociva en que se ejecutan estos procedimientos previos.

Con esto se finaliza la identificación de los minerales y su relevancia para la industria de las energías renovables; asimismo, se enuncia que en caso de incrementarse la producción de energía renovable, de igual manera podrían aumentar los daños al ambiente y a la salud, pues el crecimiento del empleo y la extracción minera generarían desechos incontables.

Por último, vale la pena mencionar que los minerales se han vuelto imprescindibles para el propio funcionamiento del sistema productivo y que los gobiernos son cada día más dependientes de la industria eléctrica, por lo que sufren ante la reducción de los suministros minerales; tal situación los puede involucrar en circunstancias conflictivas internas o contra otros países, pues los minerales también han sido utilizados como un mecanismo de geopolítica. Por ahora, la tendencia de extracción y consumo es creciente, con futuros que todavía son inimaginables, así como con efectos y consecuencias desconocidas. Por ello, es necesario plantear y revisar a fondo la estructura que sustenta el intempestivo e impetuoso tránsito a las energías renovables.





# Tablero geopolítico por los recursos naturales estratégicos





## Introducción

El objetivo de este capítulo es identificar áreas de vulnerabilidad y riesgo en las cadenas de suministro de los minerales críticos, así como proponer medidas para fortalecer la resiliencia y seguridad de estas cadenas. Se enfatiza la necesidad de establecer prácticas sostenibles y responsables para reducir el impacto socioambiental y de la extracción de estos minerales en el planeta. Asimismo, se plantea la importancia de la colaboración entre países aliados y socios internacionales para abordar los desafíos en la cadena de suministro y garantizar la seguridad económica y nacional.

Por lo anterior, vale la pena señalar que la geopolítica de los recursos estratégicos (RE) en la transición energética (TE) actual está marcada por una demanda irracional de estos bienes minerales y energéticos, lo cual provoca que los países se bloqueen entre sí con el fin de asegurar el acceso a los recursos clave para su desarrollo energético.

En la actualidad, algunas naciones poseedoras de reservas de litio, cobalto y otros minerales utilizados en baterías para almacenar energía ganan influencia en el escenario mundial; sin embargo, su posición se encuentra limitada, debido a que la mayoría de los países proveedores se han mantenido históricamente en los límites de la pobreza y marginación a causa de los impactos que tienen los esquemas extractivistas en las economías basadas en el comercio de estos recursos. Además, la disputa por el control de rutas de transporte, suministro de gas y petróleo sigue siendo relevante.

La competencia por liderar la innovación tecnológica en energías limpias también afecta las relaciones internacionales con países y regiones

como China, EUA y la UE, ya que buscan fortalecer su posición. La transición energética crea nuevas alianzas y tensiones geopolíticas, donde la cooperación internacional se vuelve esencial para abordar desafíos compartidos, entre éstos el cambio climático y la seguridad energética.

Asimismo, el uso del comercio y la regulación en la extracción de estos recursos se asume como si fueran armas para dañar a los competidores, lo cual nos recuerda que la TE impulsada por Occidente funciona más bien como un garrote para controlar a otros y no como un proceso colectivo realmente enfocado en tratar de luchar contra la crisis climática. En este sentido, la TE como arma comercial no refleja un color, sino que representa la ausencia de todos (a diferencia de los procesos antes comentados), pues se vuelve un negro absoluto porque no tiene como fin algún tipo de bienestar social o ambiental; al contrario, es el resultado de una ambición desmedida y orientada hacia el conflicto.

Estos temas se abordan en este capítulo por medio de cuatro apartados. En el primero se discute la vulnerabilidad de los suministros de materias primas clave para la seguridad y la competitividad económica, y cómo estos materiales son vitales para el desarrollo de tecnologías renovables y la movilidad eléctrica. En la segunda sección se analiza la importancia de la transparencia, la sostenibilidad en la extracción y el procesamiento de minerales críticos; además, se menciona la necesidad de establecer prácticas sostenibles y responsables para reducir el impacto ambiental y social de la extracción. En el tercero se discute la importancia de los minerales para la economía y la seguridad nacional de EUA; también, se plantean recomendaciones para fortalecer la cadena de abastecimiento y reducir la dependencia de los suministros extranjeros. En el cuarto apartado se abordan los desafíos y las oportunidades que enfrentan los países con reservas de minerales críticos, incluida la necesidad de diversificar las fuentes de suministro y reducir la dependencia de China; de igual manera, se tratan las preocupaciones sobre la sostenibilidad y la transparencia en la extracción y el procesamiento de estos materiales.

### **Tensiones geopolíticas y carrera por los minerales críticos: implicaciones para la transición energética global**

La economía mundial experimenta una gran transición hacia la descarbonización y una nueva revolución industrial. Como resultado, la obtención de ciertos materiales críticos se ha convertido en una actividad competi-

va que refleja los intereses geopolíticos de las grandes potencias. La pandemia de COVID-19 agravó aún más la vulnerabilidad de los suministros de materias primas clave para la seguridad y la competitividad económica.

Vale la pena mencionar que la inteligencia artificial, la expansión del 5G y el desarrollo de nuevas tecnologías cuánticas están aumentando la demanda de ciertos minerales. Por ejemplo, el cesio es vital para la tecnología 5G, ya que permitirá procesar grandes volúmenes de datos, necesarios para impulsar nuevos modelos de comercio, educación y transporte. De hecho, un informe del Banco Mundial (BM) de 2020 estimó que la demanda de minerales esenciales para tecnologías energéticas alternativas podría aumentar 488% durante las siguientes décadas; asimismo, se espera que la demanda de minerales como cobalto, litio y tierras raras crezca aún más, debido a su papel estratégico en la producción de turbinas eólicas, vehículos eléctricos y almacenamiento de energía.

Por su parte, la Agencia Internacional de la Energía (AIE) ha señalado que se espera que la demanda de ciertos minerales críticos aumente drásticamente para cumplir los objetivos de la TE. Esto puede provocar una competencia global por el acceso a estos recursos y afectar en forma directa los intereses geopolíticos de las grandes potencias.

El problema de este proceso de explotación intensiva de los recursos para la creación de soluciones energéticas globales es que se carece de mecanismos sostenibles para alcanzar dicho objetivo, pues la recuperación y el reciclaje de algunas de estas tecnologías (como las baterías) es menor a 50%. Esto implica que, por lo menos en el corto plazo, aumentará la competencia por la obtención de estos recursos en las vetas disponibles y generará vulnerabilidad en los espacios donde se encuentran. Y es que, aunque estos elementos están distribuidos en todo el mundo, algunos se concentran en regiones específicas, la mayoría en espacios cercanos o inmediatos a comunidades marginadas e indígenas (Azamar, 2022).

La situación de estos materiales críticos cobra mayor relevancia porque no sólo son importantes para el desarrollo de tecnologías alternativas, sino también para la fabricación de dispositivos de uso masivo, como teléfonos móviles, consolas de videojuegos, ordenadores, televisores y un sinnúmero de maquinaria industrial y médica clave para el bienestar humano.

Así, pues, en la medida que aumenta la demanda de estos materiales, también lo hace la preocupación por la seguridad de su suministro al generar impactos en los precios de estos recursos, tal como sucedió durante

los primeros años de la segunda década de este siglo, cuando el valor de varios recursos industriales se elevó notablemente por la posible escasez a raíz de la competencia; algo que se demostró era falso durante los primeros meses del año 2023, pero provocó un acelerado descenso en el precio de estos recursos.

También afectan esta situación las interrupciones en la extracción, ya sea por conflictos socioambientales locales, cuestiones geopolíticas, desastres naturales o pandemias, como se ha confirmado tanto por los recientes conflictos bélicos de este siglo y la cada vez mayor agresividad de EUA hacia China y Rusia: dos de los países con mayor relevancia en la cantidad de estos recursos.

Sin embargo, la situación geopolítica mundial de estos materiales es en la actualidad mucho más compleja de lo que parece a simple vista, por lo que es necesario analizar el escenario general de extracción, así como algunos casos particulares para revisar los distintos desafíos que todavía tiene que enfrentar la transición energética.

A fin de abordar este tema, que se encuentra en consonancia con los capítulos anteriores donde se trataron la naturaleza y las causas de la TE como concepto y fenómeno social, el contexto en el que se desenvuelve dicho fenómeno y los materiales necesarios para lograrlo, se desglosa la naturaleza de los minerales críticos y estratégicos, aparte de la relevancia geopolítica que tienen algunos países en cuanto a su extracción y uso.

### **Vulnerabilidad frente a la dependencia y escasez de minerales críticos**

La interdependencia mundial y la presión sobre la disponibilidad de recursos naturales han situado la vulnerabilidad a la escasez de minerales críticos en la vanguardia de la agenda internacional. La complejidad de este problema exige un enfoque holístico basado en disciplinas que van desde la economía política internacional (Bunker, 1984), la economía ecológica (Aguilera y Alcántara, 2011; Castiblanco, 2007; Daly, 1980; Martínez y Roca 2000; Naredo y Parra, 1993) y la ecología política (Martínez Alier, 2015) hasta la geopolítica de recursos (Bridge, 2008).

Uno de los aspectos fundamentales de la vulnerabilidad global es la dependencia económica. Ejemplos paradigmáticos son el litio y el cobalto, minerales esenciales en las baterías de vehículos eléctricos, cuya



falta podría desacelerar el avance hacia una economía baja en carbono (Pirgmaier y Steinberger, 2019) y subrayar la debilidad misma de la transición energética.

La concentración geográfica de la producción de estos minerales representa otra dimensión de vulnerabilidad. China controla gran parte de la producción de tierras raras (Hurst, 2010) y la República Democrática del Congo es líder en producción de cobalto (Resumen Latinoamericano, 2018). Esta realidad geopolítica podría desencadenar interrupciones en las cadenas de suministro, al resultar en crisis económicas y tensiones políticas (Bleischwitz, *et al.*, 2012).

Además, las implicaciones ambientales y sociales de la extracción de minerales críticos son cada vez más evidentes. Como señala Bridge (2008), las prácticas extractivas pueden degradar el paisaje, contaminar el agua y desplazar comunidades locales. La búsqueda de minerales en zonas ecológicamente sensibles agravaría estos problemas y plantearía cuestiones de (in)justicia ambiental (Martínez Alier, 2011).

El impacto de la vulnerabilidad global frente a la dependencia y escasez de minerales críticos puede ser significativo. Interrupciones en las cadenas de suministro quizá llevarían a crisis económicas, desafíos en la seguridad nacional y tensiones políticas (Buijs y Sivers, 2011). Sin embargo, este problema también puede generar oportunidades para la cooperación internacional, la innovación en reciclaje (Graedel y Reck, 2016) y la búsqueda de alternativas más sostenibles.

En síntesis, la vulnerabilidad frente a la dependencia y escasez de minerales críticos plantea desafíos globales significativos. Al enfrentar estos problemas, es crucial considerar las interdependencias económicas, las dinámicas geopolíticas y las consecuencias ambientales y sociales. Abordar la vulnerabilidad de la escasez de minerales críticos nos ofrece la oportunidad de repensar nuestro enfoque hacia el desarrollo sostenible y la resiliencia global.

### **Situación internacional**

China se ha convertido en uno de los principales —sino es que el más importante— actores mundiales en la extracción y el procesamiento de minerales estratégicos y tierras raras. Asimismo, destaca Rusia, que concentra y controla algunas de las cadenas de minerales industriales más relevantes en la actualidad (Prego, 2021; Rizzi y Fariza, 2021).

Esta situación ha generado que los países o regiones con mayor nivel de industrialización en el mundo —incluidos EUA, la UE, Corea y Japón, entre otros— hayan manifestado públicamente su necesidad por superar su dependencia de ciertas materias primas y cadenas de suministro, ya que éstas pueden ser utilizadas principalmente por China y Rusia como herramientas de control geopolítico, lo cual tendría graves consecuencias para la competitividad industrial, la TE y el desarrollo tecnológico (Cano, 2022; Rosales, 2022).

Por su lado, China, Rusia y otras naciones con reservas estratégicas de estos recursos y que se encuentran fuera de la esfera de cooperación cercana a los países occidentales, también tienen una notable dependencia en cuanto al acceso a la tecnología necesaria para aprovechar de mejor manera estos minerales. Un ejemplo es la situación que enfrenta la empresa electrónica Huawei, que desde el año 2018 ha sido acusada por EUA de espionaje y ha visto limitado su acceso a tecnologías clave para el desarrollo de componentes más eficientes; este hecho ha provocado una profunda caída en su posición de liderazgo global en este sector, a pesar de que China posee los recursos minerales estratégicos, pero no las herramientas para fabricarlos.

Esta interdependencia en la cadena de suministro de minerales estratégicos y tierras raras ha llevado a librar un juego de ajedrez geopolítico, en el que las naciones buscan proteger sus intereses y garantizar un acceso continuo a estos recursos. La dinámica de poder entre los países con mayores reservas de estos minerales y las potencias occidentales ha conducido a desplegar una serie de acciones y estrategias por parte de los gobiernos y las corporaciones para asegurar la estabilidad y diversificación de sus fuentes de suministro.

Una de las primeras acciones de los países industrializados ha sido invertir en investigación y desarrollo de tecnologías alternativas que reduzcan la dependencia de minerales específicos o permitan el reciclaje y la reutilización de materiales ya existentes. Aunque también se ha presentado dentro del marco de las estrategias contra el cambio climático, que han impuesto penalizaciones para los países extractivistas de estos recursos (Chomón y Ganser, 2021). Estas tecnologías incluyen la nanotecnología, nuevos materiales y procesos de fabricación más eficientes que disminuyen la necesidad de ciertos minerales críticos.



Además, países como China o EUA han aumentado sus esfuerzos diplomáticos, económicos y militares para asegurar o imponer acuerdos de suministro —según sea la situación concreta— con naciones ricas en minerales que se encuentran fuera de la órbita de influencia de China y Rusia. Por ejemplo, las declaraciones que en 2022 realizó Laura Richardson, jefa del Comando Sur de EUA, destacaron la importancia de detener la influencia de China y Rusia en el cono sur de América Latina con el fin de asegurar el acceso a estos recursos para la seguridad estratégica de EUA (Canal Abierto, 2023; Solís, 2023).

En paralelo, China y Rusia han buscado consolidar aún más su posición dominante en la cadena de suministro de minerales estratégicos mediante inversiones en infraestructura y tecnología en países con reservas de minerales importantes, así como a través de acuerdos comerciales y diplomáticos que les permitan asegurar su acceso a estos recursos. Estas inversiones no sólo garantizan la extracción y el procesamiento de minerales, sino también ayudan a estas naciones a desarrollar sus propias capacidades tecnológicas y reducir su dependencia de las tecnologías occidentales, como ha sucedido de forma intensiva en África y algunos lugares de Asia donde China y Rusia han impulsado una agenda de inversión y trabajo muy intensiva (Rubi y Mercado, 2019; Salazar, 2018;).

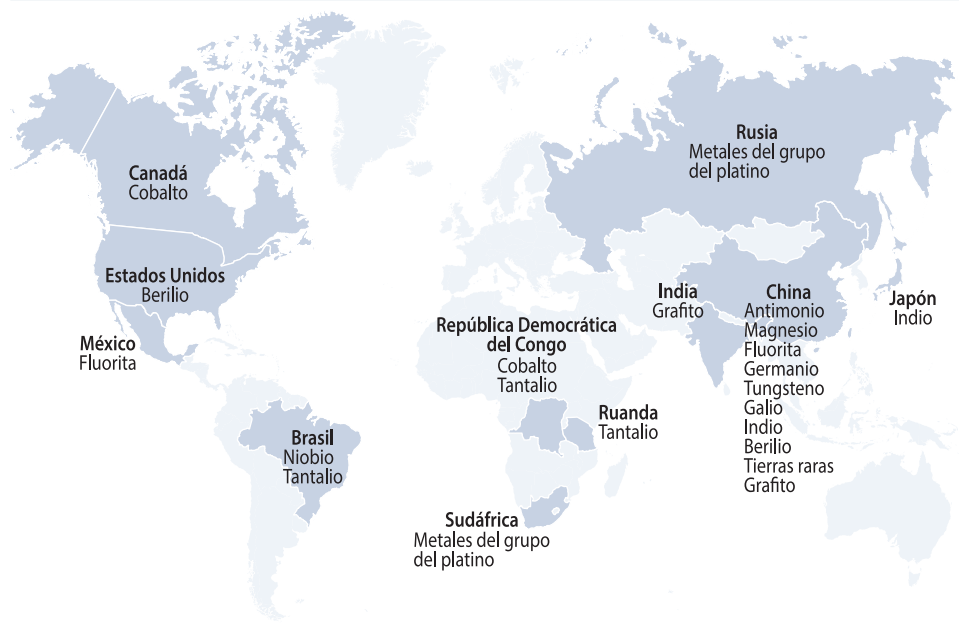
En respuesta a estas tensiones, ha aumentado la exploración y el desarrollo de nuevas reservas de minerales estratégicos y de tierras raras en regiones previamente inexploradas o consideradas no rentables, como Afganistán, una nación que debido a los múltiples conflictos bélicos internacionales en su territorio había sido caldo de cultivo para el desarrollo de varios grupos extremistas —también conocidos como talibanes—, quienes a pesar de las múltiples condenas mundiales por sus acciones han llegado a acuerdos con China y Rusia para el aprovechamiento de sus recursos minerales (Assari y Ramond, 2023).

A su vez, en México, EUA y Canadá se han impulsado varias acciones políticas y económicas para asegurar que estos países aprovechen el litio mexicano. Vale la pena señalar que las reservas de dicho mineral no tenían antes ninguna relevancia y recientemente han sido descubiertas en territorio mexicano, aunque no se tiene claridad de la cantidad y calidad de las mismas (Azamar, 2022).

## Minerales estratégicos para la transición energética

La distribución de las reservas de los RE es crucial en la geopolítica global y la economía mundial, ya que estos minerales son fundamentales para el desarrollo de tecnologías emergentes y la transición hacia fuentes de energía más sostenibles. A pesar de la concentración geográfica de estos recursos, no todos los países con reservas de RE tienen la capacidad de producirlos en niveles significativos, lo que a menudo provoca tensiones y competencia en el mercado internacional.

FIGURA 9  
Principales minerales estratégicos en el mundo



Fuente: Martínez (2022).

Como se observa en la figura 9, China es el principal jugador en el mercado de RE, ya que posee casi 40% de las reservas mundiales (más de la tercera parte de éstas); asimismo, es el mayor productor y comprador de estos minerales. Su mina más prominente es la de Bayan Obo, que se encuentra en Mongolia interna, la cual produce tierras raras, hierro y niobio.

Vale la pena resaltar que aunque la producción china de RE en la década de los noventa era de 50 000 toneladas, para el año 2020 había alcanzado la cifra de 132 000 (Prego, 2021). Ahora bien, este crecimiento es resultado del uso de procesos y mecanismos que algunos países occidentales han catalogado como ilegales o demasiado agresivos para la naturaleza y el bienestar humano, en especial los que se llevan a cabo en la zona sur de ese país. No obstante, dichas críticas se enmarcan en conflictos de intereses, pues la mayoría provienen de EUA y Europa, regiones que no tienen capacidad de competir con China, por lo que los procesos de documentación y análisis de dichos impactos también pueden ser cuestionables.

Por su lado, EUA es el segundo productor de RE, aunque con una diferencia significativa respecto a China, ya que su capacidad de producción es apenas de 26 000 toneladas; es decir, casi 20% de la nación asiática. Durante buena parte del siglo XX, los RE de EUA habían sido los más importantes en el nivel global y este último país era el principal proveedor del mercado chino; pero la nación asiática empezó un acelerado proceso de desarrollo sectorial extractivo de una manera muy favorable y desplazó a la nación norteamericana tanto en el comercio bilateral como en el mercado global. Tal ha sido el éxito que el gobierno chino ha impuesto tasas de exportación más altas en RE que en los productos manufacturados que los utilizan, lo cual ha afectado a empresas estadounidenses automotrices, tecnológicas y manufactureras que desde principios de este siglo han cambiado sus bases de operaciones principales al gigante asiático.

Asimismo, la nación de Myanmar (también conocida como Birmania) es el tercer productor de RE, con una producción de 22 000 toneladas principalmente de tierras raras; la mayor parte de éstas son obtenidas por China o se dirigen a su mercado, pero en la última década han surgido varias tensiones debido al incremento intensivo de las técnicas de extracción que este gigante asiático utiliza, así como por cuestiones políticas que han distanciado a estos actores que comparten fronteras y un alto nivel de comercio. Lo anterior genera incertidumbre sobre la viabilidad de las operaciones extractivas en este país, algo que podría afectar los precios internacionales en caso de disminuir la cantidad de RE extraídos.

Australia es otro gran productor de RE, con una producción de 21 000 toneladas y una industria en crecimiento en este sector. Otros países con reservas y producción de RE, aunque menores a 5 000 toneladas, son: India, Rusia, Madagascar, Tailandia, Brasil y Vietnam. Cabe destacar que todas estas naciones poseen un potencial de extracción mucho mayor del

que manifiestan actualmente, pero no lo pueden aumentar debido a restricciones ambientales, sociales, políticas y/o económicas.

La distribución desigual de las reservas y la capacidad de producción de RE en el mundo ha generado una serie de desafíos y oportunidades para los países involucrados en este sector. Las tensiones comerciales y políticas entre China y EUA, así como entre China y otros países productores como Myanmar y Australia, destacan la importancia estratégica de los RE en la economía global y la geopolítica. Aparte, los límites ambientales del planeta en cuanto a la capacidad para obtener estos recursos han revelado que el uso de RE para sostener la TE es un error estratégico en el largo plazo, ya que éstos, además de estar concentrados también son relativamente escasos debido a la falta de capacidades técnicas para localizar y extraer otras fuentes alternativas, como las que existen en depósitos submarinos o en otras formas físicas.

El crecimiento de la demanda mundial de RE, impulsado por el desarrollo de tecnologías emergentes y la transición hacia fuentes de energía más sostenibles, plantea un reto para los países que buscan diversificar sus fuentes de suministro y reducir su dependencia de los mayores productores, como China y EUA. Esto ha llevado a que EUA y Australia exploren nuevas posibilidades para ampliar sus propias capacidades de producción de RE y establezcan alianzas estratégicas con otros productores.

Por su lado, países como India, Madagascar y Brasil, que tienen reservas de RE significativas, pero aún no explotadas, representan una oportunidad para que otras naciones diversifiquen sus fuentes de suministro y colaboren en el desarrollo de la capacidad de producción en estas regiones; asimismo, se presenta una situación de riesgo, pues la extracción intensiva de estos recursos ocasionaría un elevado nivel de presión ambiental en los ecosistemas donde se encuentran estos bienes.

Así, pues, la distribución de los RE en el mundo es un factor clave en la geopolítica y la economía global. Los riesgos y posibles beneficios que enfrentan los países con reservas de RE incluyen la necesidad de diversificar las fuentes de suministro, reducir la dependencia hacia China, abordar las preocupaciones ambientales, promover la cooperación y el desarrollo sostenible en la extracción y producción de estos minerales críticos.

El análisis de la distribución de los RE y su impacto en las relaciones internacionales es esencial para comprender el panorama geopolítico actual y anticipar futuros cambios en el mercado global de minerales estratégicos. Este razonamiento es útil cuando se analiza el flujo comercial

histórico de los RE, especialmente en las implicaciones de China como actor principal en la extracción y comercialización de los mismos. En el siguiente apartado se aborda este aspecto.

### **Evolución histórica de los RE en el mundo**

El dominio de los RE es fundamental para el liderazgo internacional en la era moderna. Estos recursos son cruciales para la fabricación de tecnologías de vanguardia, pero su acceso desigual ha generado rivalidades económicas y políticas entre las principales potencias, por lo que su aprovechamiento intensivo ha llevado a un cambio en la dinámica geopolítica mundial. La posesión y producción de estos minerales son fundamentales para el desarrollo tecnológico y la influencia global, como lo demuestra el caso de China.

El ascenso de este país asiático como potencia dominante en la producción y exportación de RE ha sido un factor clave en su crecimiento económico y su influencia global. A pesar de las críticas de la comunidad internacional y la Organización Mundial del Comercio (OMC) por su política proteccionista, China ha seguido defendiendo sus acciones y manteniendo una posición dominante en el mercado mundial de RE (Rosales, 2022).

Una respuesta de China a esta concentración del mercado ha sido la reactivación de minas en países como EUA, Sudáfrica y Australia, las cuales habían dejado de producir RE en los años noventa (Palmer y Moffett, 2012). Además, la investigación en materiales alternativos a los RE y la fabricación de nuevos productos que no requieran el uso de estos minerales ha sido otra estrategia para disminuir la dependencia hacia la nación de Asia. El reciclaje de productos fabricados con componentes procedentes de RE también se ha promovido como una forma de reducir la demanda de estos materiales.

A pesar de los esfuerzos anteriores, la rivalidad económica entre China y EUA ha impactado el comercio mundial, lo que ha planteado desafíos para el liderazgo internacional. La disputa entre estos dos países supera sus relaciones comerciales y pone de relieve la lucha por el poder y la influencia en el escenario global. Vale la pena señalar que previo a la década de los sesenta del siglo pasado, los RE no eran altamente valorados; sin embargo, con la invención y comercialización tanto de la televisión a color como de otros productos en el mismo espectro tecnológico, la

demanda de estos minerales aumentó significativamente. En respuesta, EUA maximizó la explotación de sus minas en Mountain Pass, California, y comenzó a importar este tipo de materiales de China.

Por su parte, en 1986, el gobierno chino lanzó el Plan Nacional de Investigación y Desarrollo en Alta Tecnología, que impulsó el crecimiento de su industria de defensa y electrónica. Esto transformó a China en un consumidor de RE. El líder Deng Xiaoping reconoció la importancia de estos minerales en 1992, al compararlos con el petróleo en el Medio Oriente. Desde entonces, ese país ha seguido una trayectoria imparable hacia el liderazgo mundial en la producción y consumo de RE.

En 2001, la adhesión de China a la OMC marcó un punto de inflexión en la política comercial internacional. Hubo tensiones entre China, EUA y Japón, ya que el primero redujo drásticamente sus exportaciones de RE y aplicó nuevos criterios impositivos. Como resultado, empresas norteamericanas y japonesas, como General Motors, Hitachi, Honda y Panasonic, sufrieron pérdidas significativas y se vieron obligadas a trasladar sus operaciones o aumentar los precios de sus productos.

En 2010, China llegó a controlar la casi totalidad de la producción mundial de RE, lo que provocó un aumento de 500% en los precios; asimismo, generó pánico entre la mayoría de los países, pues estos recursos no se pueden remplazar con facilidad y se suscitaron varias críticas de la OMC en contra de las dinámicas chinas. Dicho país decidió modificar su proceso de comercialización al disminuir o eliminar varias de sus cuotas de exportación; pero, a cambio, ha fortalecido otros mecanismos de control (Telep y Lutz, 2018).

La carrera por el control de los RE también tiene implicaciones en la política de seguridad y defensa. El empleo de estos minerales en aplicaciones militares hace que su acceso y producción sean cuestión de seguridad nacional. Los países deben considerar cómo abordar este desafío, sin dejar de garantizar al mismo tiempo la estabilidad y la paz en las relaciones internacionales. La colaboración de varias naciones en la investigación y el desarrollo de tecnologías de defensa que requieren menos RE, así como la promoción de la transparencia en las cadenas de suministro de estos minerales podrían ayudar a abordar las preocupaciones de seguridad y reducir la competencia.

Por último, el papel de las instituciones internacionales y las normas en la gobernanza de los RE es crucial para garantizar un acceso justo y equitativo a estos recursos. Para ello, las naciones y los organismos inter-

nacionales deben colaborar en la creación de marcos normativos y reglamentarios que fomenten la transparencia y la cooperación en la extracción y el comercio de estos materiales. La OMC y la ONU desempeñarían un papel decisivo en este proceso, si trabajaran para garantizar un acceso justo y equitativo a los RE para todas las naciones.

Ahora bien, es importante destacar las características particulares de algunos de los países que ya se han mencionado, sobre todo en cuanto a sus capacidades de extracción, intereses y procesos. A continuación, se abordan algunos casos que tienen gran relevancia mundial para los recursos energéticos.

### *China*

Esta nación depende cada vez más de las importaciones de ciertos minerales para desarrollar sus industrias emergentes estratégicas. Importa 95% de cromo, 90% de cobalto, 79% de oro, 73% de cobre y 73% de hierro. Esta elevada dependencia hacia las importaciones representa un gran riesgo para China, pero también juega un papel clave en la cadena de suministro global de las tecnologías que se emplean en las energías renovables, en las que se utilizan minerales como cobalto, níquel o litio (Patterson y Gold, 2018).

El crecimiento de la industria minera china puede entenderse como parte de la transformación que se presenta en el país, pues durante las últimas décadas ha dejado de lado su economía basada en las exportaciones de productos tecnológicamente simples para convertirse en una potencia industrial que, además de consumir una gran cantidad de minerales, también comercia con éstos. Según su 14<sup>o</sup> Plan Quinquenal presentado en marzo de 2021, China fortalecerá la gestión y el control de sus recursos minerales estratégicos (Liu y Zhang, 2021).

Esta nación se ha vuelto proveedora dominante de todas las listas de minerales críticos que las potencias han elaborado durante los últimos años en función de sus necesidades estratégicas, lo cual le otorga una ventaja competitiva sobre los materiales que se utilizan en sectores clave, como las energías renovables o la defensa. En la lista de la UE, China aparece como la mayor fuente de 10 minerales de gran importancia para esta región. Asimismo, entre los 24 minerales críticos identificados por el gobierno australiano en su informe Critical Minerals Prospectus 2020, China figura como el mayor productor de 11 de ellos. También, en la lista

de Reino Unido, China es el principal productor de 23 minerales. Y en el caso de EUA, el mismo país de Asia se ubica como el mayor proveedor de 13 de 35 minerales clave y como el productor más relevante de 19 de estos elementos.

Por su lado, es posible que China no produzca cantidades significativas de cobalto o níquel, pero cuenta aproximadamente con 65% del cobalto procesado del mundo y 35% del níquel procesado que obtiene de sus desarrollos mineros en África. Asimismo, aunque el gigante asiático produce 11% del litio del mundo, es responsable de casi 60% del litio procesado (IEA, 2021) que adquiere a partir de sus inversiones y empresas en América Latina y Australia. Además, ese país está reforzando su control sobre el suministro global de manganeso procesado, el cual se utiliza en la fabricación de acero; éste, a su vez, es necesario para la fabricación de vehículos eléctricos. Además, China genera más de 90% de los productos de manganeso del mundo, que van desde aditivos para fortalecer el acero hasta compuestos para baterías (Yap, 2021).

Sin embargo, cuando se trata de tierras raras, China es dominante. Las tierras raras son un activo estratégico en el ámbito industrial y en los planes de desarrollo económico de ese país. Asimismo, desde hace algunos años, ha dejado de ser un mero exportador de estos minerales para convertirse en un fabricante de productos finales, lo que supone añadir valor a su economía. Adicionalmente, no sólo proporciona 60% de las materias primas del mundo, sino casi 90% de los RE procesados (Teufel, 2020). Por ello, sería muy difícil que otros países emprendieran una transición masiva de combustibles fósiles a una economía basada en energías renovables sin comprometerse económicamente con China.

Sin duda, varias naciones se esforzarán por reducir el grado de esa dependencia, pero al momento no existe una perspectiva realista para no emplear de manera necesaria las tierras raras, el litio y otros materiales clave chinos en el futuro previsible de la energía. Desde un punto de vista geopolítico, ese país utiliza esta dependencia en distintas negociaciones, sobre todo en los asuntos que mantiene con EUA (International Energy Agency [IEA], 2021).

Es importante destacar que la restricción de China a la exportación de tierras raras en 2010 también mostró la vulnerabilidad de las demás potencias económicas ante la concentración productiva y del procesamiento de estos materiales. Esto llevó a que la UE, EUA y Japón colaboraran en conjunto para buscar alternativas a las tierras raras y diversificar el sumi-



nistro de estos elementos. La OMC dictaminó al final que China eliminara los derechos de exportación sobre estos materiales en 2014, lo cual se acató en 2015. Sin embargo, todavía es preocupante la alta dependencia de estas potencias económicas hacia los materiales críticos que principalmente posee China, por lo que se está trabajando en encontrar alternativas y soluciones de largo plazo para garantizar un suministro estable y seguro de estos elementos.

Además de la restricción anterior, en septiembre de 2010, China limitó las exportaciones de tierras raras a Japón debido a un incidente cerca de las islas de Senkaku/Diaoyu, en el mar de China oriental; estas islas se han considerado una fuente de disputa territorial entre ambos países.

A pesar de esta posición ventajosa de la que hoy disfruta China en relación con la producción y procesado de tierras raras, también se enfrenta a una mayor demanda de minerales vinculados a las energías limpias y la tecnología. En este sentido, es necesario mencionar que la Belt and Road Initiative (BRI), con la que China pretende enlazar Eurasia, África y América del Sur, requiere cantidades crecientes de minerales críticos. Esta ruta de conexión, que va más allá de los espacios físicos de tierra, aire y mar, está caracterizada por una conectividad digital basada en la inteligencia artificial y la tecnología.

Además, el país asiático no cesa tampoco en su empeño de buscar la justificación para limitar su comercio de materias primas estratégicas, por lo que aprobó una ley reciente que permite la restricción de exportaciones de material sensible para proteger la seguridad nacional, lo cual ha levantado la sospecha de que, entre estos materiales, se encuentren las tierras raras y otros minerales. Por lo tanto, la seguridad nacional se ha convertido en un argumento con gran poder disruptivo en el mercado de los minerales estratégicos, así que se puede deducir que China y EUA comparten la visión de que estos minerales son cuestión de seguridad nacional (Venditti, 2023).

Conforme China se consolida como una potencia global, su influencia en las organizaciones internacionales también se fortalece. Esto es evidente en el campo de la estandarización, donde China tiene una presencia creciente en instituciones como la International Organization for Standardization (ISO). Históricamente, la creación de normas había sido dominada por EUA, la UE y Japón, pero con la aparición de tecnologías emergentes como el 5G, la inteligencia artificial y el internet, China está cada vez más involucrada en la elaboración de normas que reflejan sus in-

tereses. En este sentido, la influencia china en la estandarización es una parte más de su estrategia geopolítica comercial relacionada con tecnologías emergentes, materiales críticos y la iniciativa Belt and Road. Por lo tanto, el gigante asiático también está influyendo a través del reconocimiento mutuo de normas con los países involucrados en la BRI, lo que facilita las transacciones comerciales (Boisseau, 2020).

La competencia por el 5G también impactará en la obtención de minerales necesarios para implementar esta tecnología, y uno de ellos es el cesio. Actualmente, China parece tener una posición privilegiada en la extracción de este recurso, ya que sólo hay tres minas en el mundo: una en Canadá, otra en Zimbabue y otra en Australia, que pueden producirlo. Además, a pesar de su situación productiva (limitada o imposibilitada de manera temporal), todas las anteriores se encuentran controladas total o parcialmente por China. Sin embargo, la viabilidad de la explotación de otros yacimientos, como el proyecto Lilypad en Canadá, podría cambiar esta situación en el futuro (Avalon, 2023).

Dada su creciente dependencia de las importaciones, el gobierno chino se ha visto obligado a mejorar la seguridad del suministro. Sin embargo, como otras potencias, China se enfrenta a dos opciones: *a*) incrementar la producción interna o *b*) importar. La primera está cada vez más obstaculizada por problemas de contaminación, como se ha demostrado en provincias cercanas a Beijing, donde hasta 30% de la capacidad de producción podría cerrarse para combatir esta problemática.

Asimismo, China está buscando formas de incrementar la seguridad del suministro de materiales críticos, y una opción es aumentar el control de sus empresas en las operaciones mineras en el extranjero. Sin embargo, este proceso es lento y gradual; por ejemplo, en la década de los noventa, este control era muy bajo, de alrededor de 0.1% a 0.2%; en cambio, en 2018, éste había aumentado hasta 3%. A pesar de tal incremento, las empresas australianas y canadienses todavía dominan una parte significativamente mayor del valor total de la producción mundial de minas no combustibles que las empresas de China. En 2013, las compañías australianas poseían cerca de 10% y las canadienses 8%, dos o tres veces más que las chinas (Ericsson, Löf y Löf, 2020).

En 2018, los inversores chinos controlaban la producción minera en el extranjero por un valor de 21500 millones de dólares, donde el cobre y el cobalto eran los metales más importantes con una inversión de 8000 millones. En segundo lugar, se encontraba el hierro con 4900 millones

de dólares, seguido del oro con 1900 millones y la bauxita con 1400 millones. A pesar de que la bauxita sólo representa 7% del valor total, es el metal de más rápido crecimiento en extracción y comercialización mundial: para 2018 aumentó 14 veces en comparación con 2014. Asimismo, se pueden identificar tres áreas geográficas principales en las que China se ha expandido:

- África austral y recientemente África occidental.
- Alrededor de la Cuenca del Pacífico, incluidos: Australia, Canadá y en años más recientes, América Latina.
- En los países vecinos, incluidos Mongolia, Laos, Corea del Norte, Myanmar, Tayikistán y Vietnam.

Los inversionistas del sector minero chino tienen como objetivo principal Australia y el sur de África, debido a dos razones clave: *a)* la abundancia de recursos, como hierro y cobre, que son altamente valorados por los empresarios chinos, y *b)* su ubicación geográfica relativamente cercana a China. Además, en Australia, existe una comunidad minera joven y audaz que puede llevar a cabo proyectos de exploración arriesgados, por lo cual es una opción atractiva.

En contraste con Australia, las inversiones chinas en los recursos no combustibles de África han sido menos significativas. En 2018, China controlaba menos de 7% del valor total de la producción minera en África, ya que se ha centrado principalmente en los sectores de transporte y energía en el continente. Aunque las inversiones chinas en la minería de materiales no combustibles en África han contribuido al aumento de la producción, también han generado preocupaciones sobre el creciente control de ese país asiático sobre la producción de minerales y metales africanos (Ericsson, *et al.*, 2020).

Vale la pena recordar que a lo largo de la historia, los recursos mineros de África han sido objeto de interés para comerciantes, gobiernos y empresas de diferentes partes del mundo. En el siglo XX, los intereses europeos y estadounidenses dominaron la industria minera en ese continente. Sin embargo, en el siglo XXI, se ha iniciado una nueva lucha por el control de los recursos minerales africanos y China ha sido uno de los principales actores que mayor inversión y acuerdos en esta materia extractiva ha logrado en la región.

Los inversores orientales están muy interesados en África y una de las razones es una mejor colaboración intergubernamental entre China y los países africanos. En la Cumbre de Beijing de 2018, se acordó un plan de acción para promover la cooperación China-África y la implementación del BRI en la región. Las inversiones chinas para la exploración minera en África han aumentado en los últimos años y representan 12.3% del presupuesto total de exploración en 2020, mientras en 2011 fue de 8.1% (Yao y Holden, 2021).

La posición de las empresas chinas en la producción minera africana es considerable, ya que controlan más de 25% de la producción de cobre y su posición es particularmente sólida en naciones como la República Democrática del Congo y Zambia. Además, las empresas del país asiático son responsables de más de 40% de la producción de cobalto identificada en África (Yao y Holden, 2021).

La empresa más grande de origen chino que controlaba la producción minera en África en 2018 es China Moly, con una participación de 1.5% del valor total de la producción en ese continente, lo que equivale a cerca de 1300 millones de dólares. Asimismo, la empresa China Minería de Metales no Ferrosos (CNMC, por sus siglas en inglés) se encuentra en segundo lugar con 0.5% del valor total, equivalente a unos 440 millones de dólares; le sigue Zijin, Minmetals y Jinchuan, cada una con un control de alrededor de 400 y 250 millones de dólares, respectivamente (Yao y Holden, 2021).

Aparte, el dominio de la producción de cobalto en la República Democrática del Congo por parte de empresas chinas es motivo de preocupación, ya que el cobalto es fundamental para las tecnologías de baterías en la transición hacia una economía libre de combustibles fósiles. Además, en esa república africana existe una gran cantidad de pequeños mineros artesanales, cuya producción es comprada por comerciantes y empresas chinas, lo que podría aumentar el control real chino sobre la extracción de cobalto.

Asimismo, es importante mencionar que se han planteado denuncias de explotación minera ilegal por parte de empresas chinas en la provincia de Kivu del Sur (una de las veintiséis provincias de la República Democrática del Congo), lo que ha llevado a la suspensión de sus actividades y investigaciones. Por ello, el gobierno chino ha condenado cualquier actividad ilegal y ha amenazado con sanciones a sus propias empresas si no respetan la legislación congoleña (Mureithi, 2022).

En otros países africanos como Eritrea y la República de Guinea, las compañías chinas comparten el control de la producción minera con el gobierno local. En el primero, las empresas chinas tienen una participación mayoritaria de 60%, mientras que en el segundo controlan 37% de la producción minera nacional total. Aunque estas cifras son más altas que en Zambia y la República Democrática del Congo, los valores totales de la producción minera son menores en Guinea y Eritrea. Además, la minería representa una parte menos importante de la economía en estos países que en Zambia y el Congo.

También, China ha mostrado interés en el potencial minero de Sudán, por ello ha mantenido cooperación en este campo. De hecho, tras la firma del Memorando de Entendimiento sobre Cooperación en la Industria Minera en 2010, el Servicio Geológico de China ha llevado a cabo estudios geoquímicos en colaboración con expertos en minería sudaneses. De igual manera, recientemente, la empresa china Wanbao Sahara Mining Co., Ltd. y el Ministerio de Energía y Minería de Sudán han firmado un contrato de concesión de exploración y producción en Sudán, con el supuesto objetivo de convertir la colaboración minera en un nuevo motor del crecimiento económico de este país. Por ello, en este contrato se menciona que las empresas chinas que operen en Sudán tendrán que cumplir con las leyes y regulaciones locales, incluidas las relativas a la protección ambiental y la seguridad, así como respetar las costumbres locales y cumplir con sus responsabilidades sociales corporativas. Por su parte, China espera que Sudán genere un entorno empresarial más favorable para las operaciones comerciales e inversiones chinas. Todo esto, bajo la estrategia de cooperación práctica y *win-win* que China emplea en sus relaciones comerciales.

Asimismo, China tiene grandes expectativas de inversión en Arabia Saudita para la obtención de minerales y aprovecha las ventajas que este país ofrece para convertir el sector minero en el tercero más importante de su economía en 2030. Es importante mencionar que en 2020, el Servicio Geológico de China firmó un contrato de exploración geoquímica con el país árabe por un valor de 56 millones de dólares. Se trata del proyecto de estudio geológico internacional más grande en la historia adjudicado a China mediante una licitación internacional (Haoran, 2020).

Ahora bien, respecto a la presencia de las empresas mineras orientales en América Latina se ha experimentado un incremento significati-

vo de inversión en exploración y extracción en los últimos años. Tan sólo Venezuela ha recibido inversiones chinas por un valor de más de 180 millones de dólares en la minería de níquel y otros servicios mineros. Chile y Perú son países importantes para China en cuanto a la extracción de cobre, al que suministran 55%. Por su parte, la empresa estatal china Chinalco tiene una participación mayoritaria en las minas de cobre peruanas de Toromocho y Las Bambas, mientras que la compañía Xinjiang TBEA ha adquirido una participación de 49% en la industria del litio de Bolivia (Ramos, 2019).

Asimismo, en el sudeste asiático, las empresas chinas han establecido una importante presencia en la industria minera; de hecho, Myanmar es un proveedor clave de tierras raras refinadas para China. También, en Europa, las compañías chinas tienen 25 activos mineros, incluida la reciente adquisición por parte de Zijin de las minas de cobre y oro de Bor y Tymok en Serbia, como parte del Plan de la Ruta de la Seda de los Balcanes y la BRI (Yao y Holden 2021).

Por último, es importante mencionar que las empresas chinas podrían verse en desventaja a medida que aumentan las tensiones geopolíticas, especialmente en el sudeste asiático, debido a las disputas entre EUA y China. Esto podría disminuir la inversión en exploración de las empresas del gigante oriental en Canadá, el sudeste asiático y Australia, que representaron 22.5% del presupuesto total de exploración de China en 2011, incluido el gasto nacional.

### *Estados Unidos de América (EUA)*

Es reconocido por ser uno de los países mineros más antiguos y avanzados del mundo no sólo por su producción de carbón, oro, cobre y otros metales, sino debido a que algunas de sus compañías mineras se encuentran entre las más importantes en el ámbito mundial. Asimismo, la lista más reciente publicada en 2018 de minerales críticos incluye 35 minerales considerados cruciales para la seguridad económica y nacional del país, como las tierras raras, además de materiales comunes como el aluminio, el estaño y el magnesio (US Geological Survey, 2018).

De acuerdo con datos del Servicio Geológico de EUA, China tiene una posición de liderazgo en el suministro de 21 de los 35 minerales críticos que son fundamentales para la seguridad económica y nacional del país.

Por ello, China es la mayor fuente de importaciones de EUA para estos minerales, ya que posee los depósitos más grandes del mundo o es el mayor productor. Aparte, EUA trata de impulsar la producción nacional de algunos de estos materiales, pero depende totalmente de las importaciones extranjeras para 14 de éstos, en su mayoría de China. Por ejemplo, el arsénico es uno de los minerales críticos en los que EUA depende casi totalmente del país asiático, al importar alrededor de 91% de su suministro (Xie, 2021).

Igualmente, el cesio es utilizado en numerosos procesos de fabricación y sólo hay tres minas en todo el mundo que pueden producirlo. En 2019, los propietarios estadounidenses de la única mina de cesio en su país la vendieron a Sinomine Resource Group de China, lo cual significa que ahora el gigante oriental controla las tres minas de cesio del mundo. Esta situación ha aumentado la dependencia de EUA de las importaciones de cesio y esto podría tener implicaciones significativas para la seguridad económica y nacional del país (Xie, 2021).

Aunque Estados Unidos ocupa el segundo lugar en la producción de tierras raras del mundo, aún depende en gran medida de China para el suministro de estos minerales. En 2020, la mina Mountain Pass de California produjo 16% del suministro mundial de tierras raras, pero éste se envía a China para su procesamiento y la fabricación de componentes y productos. De hecho, EUA importa de la nación oriental alrededor de 80% de sus necesidades de tierras raras. A pesar de que el país americano tiene reservas significativas de tierras raras en California y otros estados, no han sido explotadas debido a que prefieren comprarle a China, debido a los bajos costos de producción de este país en su territorio, por lo que EUA se beneficia de una regulación ambiental menos estricta (Xie, 2021).

Asimismo, el cobalto es un elemento que representa una debilidad para EUA. En la actualidad, este país depende de las importaciones de este mineral para satisfacer 76% de sus necesidades, mientras que sólo extrae 1% del cobalto mundial; se estima que los recursos de este elemento identificados en EUA son alrededor de un millón de toneladas y la mayoría se encuentran en Minnesota.

La dependencia de EUA en el suministro exterior de minerales y otros materiales ha preocupado a los gobiernos estadounidenses recientes. La administración de Biden, al igual que la de Trump, se han centrado en abordar estas vulnerabilidades del suministro exterior, así como en pro-

teger la seguridad nacional y promover la fabricación nacional. Con la estrategia de “desacoplamiento económico de China” y el objetivo de desarrollar cadenas de suministro decisivas o cooperar con aliados y socios, se presentó en abril de 2021 la ley denominada *American Critical Minerals Independence 2021* al Congreso para promover la exploración doméstica, la investigación, el desarrollo y el procesamiento de minerales críticos para garantizar la seguridad económica y nacional (Blakemore, 2021).

El informe publicado por la Casa Blanca en junio de 2021, titulado *Building Resilient Supply Chains, Revitalizing American Manufacturing, and Fostering Broad-based Growth. 100-Day Reviews under Executive Order 14017*, analiza las cadenas de suministro fundamentales para los intereses estadounidenses. De hecho, varios departamentos, como Energía, Comercio, Defensa, Sanidad y Asuntos Sociales, llevaron a cabo estudios para este informe. El objetivo del texto es identificar áreas de vulnerabilidad y riesgo de dichas cadenas, así como proponer medidas para fortalecer la resiliencia y seguridad de éstas, además de fomentar la fabricación nacional y promover el crecimiento económico (White House, 2021b).

Asimismo, el informe destaca la importancia de la transparencia y la sostenibilidad en la extracción y el procesamiento de minerales críticos. Se hace especial hincapié en la necesidad de establecer prácticas sostenibles y responsables para reducir el impacto ambiental y social de la extracción. La colaboración con países aliados y socios internacionales, incluida la UE, Japón, Corea del Sur y Australia, también se menciona como un abordaje importante de los desafíos en la cadena de suministro y de seguridad económica y nacional.

En definitiva, el informe de la Casa Blanca reconoce la importancia decisiva de los minerales para la economía y la seguridad de Estados Unidos, por lo que plantea una serie de recomendaciones para fortalecer las cadenas de suministro y reducir la dependencia de componentes extranjeros. En este sentido, se reconoce la necesidad de adoptar un enfoque coordinado y colaborativo tanto en el nivel nacional como el internacional, para abordar los desafíos que representan los minerales críticos y garantizar la sostenibilidad y la transparencia en la extracción y el procesamiento de estos materiales en todo el mundo (Blakemore 2021).

Es cierto que el Departamento de Defensa ha mostrado un gran interés en la seguridad para el acceso a las tierras raras en EUA, pero también es importante señalar que otros sectores industriales, como el de las ener-



gías renovables y la electrónica, están haciendo esfuerzos para reducir su dependencia de China en el suministro de estos minerales. Por ejemplo, el gobierno estadounidense ha propuesto una inversión de 17000 millones de dólares en la producción y reciclado de baterías para vehículos eléctricos; asimismo, ha establecido objetivos ambiciosos para aumentar la proporción de energía renovable en la matriz energética de este mismo país. Además, algunas empresas tecnológicas y automotrices han establecido iniciativas para asegurar la capacidad de obtener minerales críticos, incluida la inversión en proyectos de exploración y extracción en el país de Norteamérica, así como la colaboración con socios internacionales en el desarrollo de tecnologías de reciclado y sustitución de materiales.

Respecto a una posible interrupción en la obtención de materias primas en el sector energético, a pesar de que no tendría consecuencias en el corto plazo, sus efectos se verían en el largo plazo, pues afectarían el desarrollo futuro de las energías limpias, así como el cumplimiento de los objetivos de descarbonización y el liderazgo tecnológico de EUA. Por lo anterior, la administración de Biden busca un enfoque holístico y no sólo la propuesta de soluciones específicas para disminuir la vulnerabilidad de las cadenas de suministro.

La intención del gobierno de Biden es lograr la eliminación total de la dependencia de combustibles no renovables en la generación de electricidad en su país para el año 2035, con una apuesta principal por la energía solar y eólica. Según un informe, la electrificación de 20% de la flota de vehículos ligeros de EUA que utilizan baterías de litio supondría un aumento de la producción de níquel de 25%, 49% de litio y 22% de cobalto en comparación con lo extraído en 2019. Además de aumentar la producción de estos minerales, la administración de Biden ha propuesto incentivos fiscales y de ayuda para atraer al sector de la manufactura de baterías con la finalidad de impulsar la fabricación de vehículos eléctricos en su país y para ayudar a reducir el desempleo generado por la pandemia.

Después de su creación en 2019, la Iniciativa para la Gobernanza de los Recursos Energéticos (Energy Resource Governance Initiative, ERGI) ha sido respaldada por nueve países, incluidos Australia, Botsuana, Perú, Argentina, Brasil, República Democrática del Congo, Namibia, Filipinas, Zambia y, posteriormente, Canadá. Se espera que en el futuro se unan más países de la UE, Japón y algunos asiáticos con una alta demanda de minerales en el sector energético. Es importante mencionar que, con esta

propuesta, EUA busca tener el control de toda la cadena de valor del sector de vehículos eléctricos y reducir la dependencia de China tanto en materias primas como en productos manufacturados, como las baterías (Blakemore, 2021).

Estas colaboraciones con socios en el exterior para la exploración y extracción de los recursos mineros demuestran que el desarrollo nacional de este tipo de proyectos es una opción menos viable para la administración de Biden, aunque no descartable, si se tiene en cuenta la presión de las asociaciones medioambientales. Asimismo, vale la pena mencionar que en el actual gobierno de EUA se tuvieron muchas esperanzas sobre el supuesto interés respecto a la protección ambiental, pero en realidad todas sus acciones han reforzado prácticas extractivas destructoras, aunque muchas de ellas se realizan fuera de su país.

Además, es importante resaltar que este discurso sobre la preocupación por el medio ambiente resulta contradictorio, al observar que EUA ha mostrado un creciente interés por invertir en proyectos mineros de África, sobre todo en países como la República Democrática del Congo, Zambia, Namibia y Sudáfrica, ya que tienen un territorio rico en minerales críticos para la producción de baterías y otros productos electrónicos. Esto evidencia la intención de trasladar los costos socioambientales a otros lugares; pero con estas prácticas dañinas aseguran recursos y energía para el futuro.

Sin embargo, estas inversiones generan cierta controversia, debido a las preocupaciones sobre la falta de transparencia y la corrupción en algunos de estos países, así como sobre los posibles impactos negativos en las comunidades locales y el medio ambiente. Por lo tanto, es esencial que las empresas estadounidenses respeten los derechos humanos y ambientales en sus operaciones mineras en el extranjero y, en su caso, trabajen en estrecha colaboración con las comunidades locales y los gobiernos para abordar estos problemas.

Por último, vale la pena mencionar que, en términos de política exterior, el aumento de la presencia estadounidense en África representa una respuesta estratégica a la creciente influencia de China en el continente, especialmente en el contexto de la guerra comercial en curso entre las dos superpotencias económicas.

## *Rusia*

Esta nación es una de las principales potencias en el ámbito de los minerales estratégicos, gracias a sus vastas reservas y a la importancia de estos recursos en su economía y seguridad nacional. La Federación Rusa posee abundantes recursos naturales, lo que la convierte en un actor clave en la producción y suministro de éstos en el mercado global.

Entre los minerales más relevantes para la industria y el comercio ruso se encuentran níquel, cobalto, platino, paladio, niobio, vanadio y tierras raras. Éstos son fundamentales en la fabricación de productos de alta tecnología, aplicaciones militares, industria aeroespacial y energías renovables, entre otros sectores.

El níquel y el cobalto son especialmente importantes en la industria rusa, ya que ambos elementos son esenciales para la fabricación de baterías de iones de litio y aleaciones de alta resistencia. Asimismo, Rusia es uno de los mayores productores de níquel en el planeta y cuenta con importantes reservas de cobalto, lo que le confiere una posición estratégica mundial.

El platino y el paladio, por su parte, son cruciales en la industria automotriz y de tecnologías de la información, ya que se emplean en la fabricación de catalizadores y componentes electrónicos, y Rusia es el mayor productor mundial de paladio. Además, es uno de los principales productores de platino, lo que refuerza su relevancia en el suministro de estos metales preciosos.

Rusia también es un actor importante en el mercado de tierras raras, las cuales son fundamentales para la fabricación de componentes electrónicos, dispositivos de alta tecnología y sistemas de defensa. Aunque las reservas de tierras raras rusas no son comparables con las de China, el país cuenta con una sólida infraestructura de extracción y procesamiento de estos minerales.

La relevancia de los minerales estratégicos para Rusia se refleja en sus políticas gubernamentales, que buscan garantizar el control y la explotación eficiente de estos recursos, por lo que el país ha adoptado medidas para aumentar la inversión en exploración y explotación minera, desarrollar tecnologías de procesamiento y mejorar la infraestructura de transporte y exportación.

### *América Latina y la Unión Europea*

América Latina es una zona rica en minerales estratégicos, con países como Brasil, Chile, Argentina y Perú, que cuentan con abundantes reservas y una larga historia de explotación minera. Entre los elementos de este tipo más importantes de la región se encuentran litio, cobalto, tantalio, niobio, cobre y tierras raras.

Como se ha mencionado, el litio es un mineral clave para la producción de baterías de iones de litio, los cuales son esenciales para la industria de vehículos eléctricos y el almacenamiento de energía. América Latina alberga aproximadamente 60% de las reservas mundiales de litio tan sólo entre Argentina, Bolivia y Chile, que conforman el mal llamado “triángulo del litio”. Además, la creciente demanda de vehículos eléctricos y energías renovables hace que el litio sea un mineral estratégico de gran importancia para la región.

El cobalto y el tantalio también son minerales de gran relevancia en América Latina. El primero es un componente clave en la fabricación de baterías y aleaciones de alta resistencia, mientras que el segundo se utiliza en la producción de componentes electrónicos y en la industria aeroespacial. Brasil, por ejemplo, es uno de los mayores productores mundiales de tantalio y niobio, además de poseer importantes reservas de tierras raras.

### ***Unión Europea (UE)***

La UE ha reconocido la importancia de los minerales estratégicos para su economía y seguridad, por lo que ha implementado políticas para garantizar el suministro y reducir la dependencia de importaciones de terceros países. Si bien la UE no cuenta con reservas tan grandes como las de América Latina, sí posee yacimientos de ciertos minerales estratégicos, como wolframio, antimonio y tierras raras.

Esta región ha establecido una Lista de Materias Primas Críticas, en la cual identifica los minerales estratégicos de mayor importancia para su economía y seguridad. Esta lista ha sido actualizada periódicamente para incluir minerales como el cobalto, niobio, litio y tantalio. Además, ha servido de base para desarrollar políticas de abastecimiento y fomento a la investigación de nuevas tecnologías.

Entre las iniciativas de la UE para garantizar el suministro de minerales estratégicos, se encuentra el establecimiento de alianzas con países productores, como los de América Latina, con la finalidad de diversificar las fuentes de suministro y reducir la dependencia hacia países como China. Asimismo, la UE ha impulsado la inversión en proyectos de exploración y explotación de minerales estratégicos dentro de su territorio, así como en otros espacios donde tiene influencia política o militar.

El establecimiento de acuerdos comerciales y de inversión en el sector minero puede fomentar la transferencia de tecnología, el desarrollo de infraestructuras y la creación de empleo en América Latina; sin embargo, sigue presente la amenaza de una intensificación extractivista, ya que no se han abandonado los modelos comerciales de la región, los cuales se han visto impulsados hacia ese extremo debido a la constante presión de regiones como la UE para extraer recursos.

### **¿Qué lugares o zonas quedan por explorar en el mundo?**

Las potencias económicas, como EUA, China, Japón y la UE, han prestado cada vez más atención a las nuevas oportunidades de extracción de minerales en dos áreas clave: 1) el Ártico y 2) la minería que se encuentra en el fondo del mar. En el Ártico, la explotación de recursos está impulsando una nueva carrera para la exploración y explotación de yacimientos submarinos de hierro, cobre, níquel, cobalto y otros minerales clave para la industria de las tecnologías limpias. China ha tomado la delantera en la carrera del Ártico, donde ha adquirido licencias para la explotación de depósitos de hierro y otros minerales en Groenlandia, por ejemplo.

Por su lado, la minería submarina es vista como una nueva frontera en la extracción de minerales ubicados en las profundidades del océano. China también lidera esta carrera, aunque cada vez más países se están interesando en estos recursos.

Sin embargo, tanto la explotación de recursos minerales en el Ártico como la minería submarina plantean desafíos importantes en términos de sostenibilidad y protección ambiental, así como en relación con la regulación y la gobernanza de estas actividades. Por lo tanto, se requiere un equilibrio entre la necesidad de asegurar el acceso a los minerales críticos

para las tecnologías limpias y proteger los ecosistemas marinos, así como los derechos humanos de las comunidades locales que puedan verse afectadas por estas actividades.

### *El Ártico*

El Ártico se ha convertido en una zona de conflicto geopolítico entre las naciones que lo rodean, a las que se suman países más alejados como China, con importantes intereses estratégicos en la región. El calentamiento que sufre esta área desde hace varias décadas y el consiguiente deshielo han abierto nuevas oportunidades económicas, al permitir la apertura de nuevas rutas comerciales y la explotación de recursos naturales, entre los que se encuentran los minerales críticos.

Groenlandia, una región autónoma bajo soberanía de Dinamarca, se encuentra en una zona de gran interés estratégico, debido a sus abundantes recursos minerales; entre éstos hay uranio, zinc, plomo, hierro y otros metales preciosos, así como importantes reservas de petróleo y gas. Además, su ubicación geográfica la convierte en un punto clave para la defensa y seguridad en la región del Ártico. Así, pues, se alinea con la propuesta del expresidente estadounidense Donald Trump de comprar Groenlandia, lo cual fue recibido con escepticismo y rechazo por parte del gobierno danés y los habitantes de la isla (Inman, 2019).

Asimismo, Groenlandia está mostrando interés en atraer inversión extranjera para la explotación de sus recursos naturales, pero la economía de la región depende en gran medida de la pesca y otras actividades primarias. Sin embargo, se piensa que podría haber importantes depósitos de minerales en el territorio, lo cual representa una oportunidad estratégica y económica, pero un gran riesgo para los procesos productivos y de vida locales.

Por su lado, China está involucrada en dos depósitos clave en Groenlandia, lo cual prueba su necesidad en expandir su presencia en el Ártico en el futuro. Uno de estos depósitos es Isua, una mina de hierro adquirida por General Nice Development en 2015, una empresa china de productos básicos, que se convirtió en el primer proyecto del Ártico en ser propiedad total de una empresa china.

### *Minería submarina*

La minería en el fondo del mar se ha convertido en una nueva área de interés, debido a los grandes depósitos de minerales que se encuentran en dichas zonas. Entre los minerales más destacados están: cobre, cobalto, níquel, manganeso, fósforo, molibdeno, tierras raras, oro, plata, platino, teluro, etcétera. Además, se hallan recursos energéticos como los hidratos de gas. Esta nueva frontera minera plantea importantes retos ambientales, pues la extracción de estos recursos puede tener graves consecuencias para los ecosistemas marinos. Por ello, se han establecido normas internacionales para regular la actividad minera en el fondo del mar y tratar de disminuir el impacto de esta actividad, aunque ello sea casi imposible.

La Convención de las Naciones Unidas sobre el Derecho del Mar (CNUDM) establece que los países tienen jurisdicción sobre tres áreas marítimas: *a)* el mar territorial que se extiende hasta 12 millas náuticas; *b)* la zona económica exclusiva, que alcanza las 200 millas náuticas; y *c)* la plataforma continental. Sin embargo, más allá de estos lugares, existe un área internacional de los fondos marinos que está bajo la jurisdicción de la Autoridad Internacional de los Fondos Marinos (ISA, por sus siglas en inglés). Esta zona se define como el fondo marino y oceánico y el subsuelo del mismo, más allá de los límites de la jurisdicción nacional; por ello, la ISA se encarga de regular la actividad minera en este espacio.

A medida que se produzcan los avances tecnológicos, será posible extraer con más facilidad estos recursos del fondo marino. Aparte de las cuestiones medioambientales que esta modalidad genere, también pueden surgir problemas por la competencia geopolítica de dominios que pertenecen a la comunidad internacional y sobre los que ningún país tiene jurisdicción.

Es cierto que la minería de los fondos marinos profundos no está permitida actualmente en aguas internacionales; sin embargo, algunos países estudian la posibilidad de llevar a cabo actividades mineras en estas zonas con el objetivo de recuperar depósitos de minerales críticos para las nuevas tecnologías. Según la Convención de las Naciones Unidas sobre el Derecho del Mar, las empresas mineras privadas sólo pueden extraer fondos marinos si son patrocinadas por un Estado. Es importante destacar que la explotación minera del fondo marino plantea importantes desafíos ambientales, por lo que se han establecido normas internacionales para

regular dicha actividad en estas áreas, aunque aún quedan pendientes varias cosas por revisar.

Asimismo, se observa un creciente interés de varios países en la minería de aguas profundas, como una oportunidad de desarrollo económico. Hoy, la carrera por la explotación de los recursos mineros marinos ha comenzado y China parece estar a la cabeza. Sin embargo, Japón también tiene grandes expectativas en relación con los enormes yacimientos submarinos de tierras raras que se encuentran en las aguas de su zona económica exclusiva.

La ISA, de la que forman parte 167 miembros más la UE, es el organismo dentro de la ONU que se encarga de regular la exploración y explotación del fondo marino internacional. Como organismo regulador, su principal preocupación es encontrar la forma de equilibrar los beneficios sociales de la explotación minera de los fondos marinos —como son el acceso a los minerales esenciales, la falta de desplazamiento de las comunidades, la investigación en aguas profundas y el desarrollo tecnológico— con la necesidad de proteger este medio. Sin embargo, varios aspectos determinantes cuestionan la eficacia y la ética de su enfoque, que se mueve en el tornasol del multicolor energético hacia un tono oscuro, por ejemplo, con el tema de la instrumentalización política y el conflicto por el uso de estos recursos.

Primero, la ISA opera con un modelo que prioriza el desarrollo económico. Aunque se habla de equilibrio, la realidad es que los incentivos económicos a menudo eclipsan las preocupaciones medioambientales. Esto se evidencia en la concesión de licencias para la exploración y explotación minera sin los suficientes estudios de impacto ambiental.

Segundo, la falta de transparencia y participación pública en las decisiones de la ISA es preocupante. Aunque 167 miembros y la UE forman parte de este organismo, las comunidades directamente afectadas, como los pueblos indígenas y las naciones en desarrollo, a menudo se encuentran marginadas en el proceso de toma de decisiones.

Tercero, la investigación en aguas profundas y el desarrollo tecnológico no deberían justificar la explotación sin restricciones. Los ecosistemas marinos son frágiles y cualquier perturbación puede tener efectos en cadena irreversibles. Además, la tecnología para mitigar el daño ambiental está lejos de ser infalible.



Cuarto, la ISA no ha demostrado lo suficiente cómo abordará el desplazamiento de comunidades y la degradación del medio marino, que son consecuencias inevitables de la explotación minera.

### **Minerales no tan limpios para las energías renovables**

El salto prometeico hacia la energía renovable no está libre de la dependencia de los recursos minerales. Por ejemplo, los paneles solares, las turbinas eólicas y las baterías de almacenamiento de energía requieren minerales específicos para su fabricación. Además, el litio, cobalto, neodimio y cobre, entre otros, son indispensables para varios procesos de la TE. El dilema es que la extracción de estos minerales no es tan “limpia” como la energía que ayudan a producir.

Para empezar, la minería a gran escala genera una serie de problemas ambientales, incluida la degradación del paisaje, la pérdida de biodiversidad, la contaminación del agua y las emisiones de GEI. A pesar de los avances suscitados con el paso de los años en las técnicas mineras, la extracción sigue siendo un proceso destructivo de forma inherente. Así que cuando las grandes potencias industrializadas se embarcan en una carrera por los minerales, la escala de estas amenazas se magnifica enormemente.

Sin embargo, el extractivismo minero se presenta a menudo con el discurso de la sostenibilidad. En la retórica actual, los minerales son “críticos” o “estratégicos” para la TE y, si bien esta noción no es errónea *per se*, tiende a eclipsar los costos ambientales de la minería. Por ejemplo, la producción de litio, esencial para las baterías de vehículos eléctricos y los sistemas de almacenamiento de energía, implica el uso intensivo de agua. Esto amenaza los recursos hídricos locales en áreas ya propensas a la sequía, como el salar de Atacama en Chile, los salares de Puna en Argentina o los salares de Uyuni en Bolivia.

En segundo lugar, la distribución global desigual de estos minerales crea nuevas dinámicas de dependencia y potencial de explotación, ya que muchos de los minerales necesarios se encuentran en países en desarrollo o en regiones geopolíticamente inestables. Esto puede dar lugar a la “maldición de los recursos”, un fenómeno documentado en el que la riqueza minera no se traduce en desarrollo o crecimiento socioeconómico, sino más bien ocasiona conflictos, violencia, corrupción y desigualdades.

Vale la pena mencionar que la transparencia y trazabilidad de las cadenas de suministro de minerales son limitadas. Esto puede resultar en condiciones laborales precarias, violaciones de derechos humanos y daño ambiental en los países que se dedican a la producción: todo lo que se oculta a la vista de los consumidores finales en los países industrializados. Asimismo, algunas veces, estos problemas se abordan mediante iniciativas de certificación, pero la eficacia de tales esquemas es variable y está sujeta a críticas.

### Conclusiones

La TE global y la “Cuarta Revolución Industrial” han puesto en primer plano la importancia de los minerales estratégicos. La creciente demanda de estos recursos esenciales para el desarrollo de tecnologías renovables y la movilidad eléctrica han desencadenado una competencia geopolítica que refleja los intereses de las grandes potencias. Sin embargo, este proceso de explotación intensiva de los recursos naturales para la creación de soluciones energéticas globales plantea desafíos significativos, especialmente en términos de costos socioambientales y riesgos asociados.

Uno de los aspectos menos discutidos pero críticos de esta carrera por los minerales estratégicos es el impacto ambiental específico que la extracción y el procesamiento de estos recursos puede tener. Por ejemplo, la minería de tierras raras —esenciales para la fabricación de baterías de iones de litio y turbinas eólicas— a menudo implica el uso de productos químicos tóxicos que pueden contaminar las fuentes de agua locales. Además, la explotación de minerales en el fondo del mar, una fuente cada vez más atractiva, tiene el potencial de destruir ecosistemas marinos frágiles y liberar sustancias tóxicas en el océano. Estos daños ambientales no sólo amenazan la biodiversidad, sino tienen implicaciones para las comunidades locales que dependen de estos ecosistemas para su subsistencia.

Asimismo, la contaminación del fondo del mar es un tema particularmente preocupante. La extracción de recursos en las profundidades oceánicas puede perturbar los sedimentos y liberar metales pesados y otras toxinas. Estos elementos pueden entrar en la cadena alimentaria marina, con efectos potencialmente devastadores para la vida marina y, en últi-

ma instancia, para los seres humanos. Además, la recuperación de estos ecosistemas podría llevar décadas o incluso siglos, lo que plantea serias preguntas sobre la sostenibilidad de tales prácticas.

En el ámbito geopolítico, la posibilidad de instrumentalizar el comercio de minerales estratégicos como arma es una preocupación creciente, pues las naciones con abundantes reservas podrían, en teoría, restringir el acceso a estos recursos críticos como una forma de ejercer presión política o económica sobre otros países. Esta dinámica añade una capa adicional de riesgo y complejidad al ya intrincado juego de ajedrez geopolítico en torno a los minerales estratégicos. China, por ejemplo, controla una gran parte del mercado de tierras raras y podría utilizar este dominio como palanca en disputas internacionales, por lo que para anticipar este escenario, países como Estados Unidos y miembros de la Unión Europea buscan alternativas e intentan diversificar sus fuentes de suministro.

Además, intensificar la explotación de estos recursos plantea serios desafíos socioambientales, ya que la extracción de minerales a menudo implica prácticas destructivas, causantes de daños irreparables al medio ambiente y a las comunidades locales. Asimismo, la creciente demanda de minerales estratégicos puede agotar rápidamente los recursos, lo que plantea preocupaciones sobre la sostenibilidad de estas prácticas en el largo plazo.



# El otro costo de las tecnologías para la transición energética







## Introducción

El objetivo de este capítulo es presentar una discusión sobre los argumentos que limitan la reducción de los costos de los procesos de generación eléctrica por mecanismos renovables. Se argumenta que en cada etapa de estos procesos, se ven envueltas circunstancias de corte social, ambiental, cultural, político y económico que suponen problemas y costos adicionales que deben contemplarse en la suma del importe final.

Si se considera dicho objetivo, debe señalarse que el otro costo de las tecnologías para la TE se refiere a los impactos negativos asociados con la extracción de recursos necesarios para la implementación de estas tecnologías. Por ejemplo, la minería de cobalto, litio y tierras raras es fundamental para producir baterías y paneles solares, pero su extracción puede causar daños ambientales significativos y afectar a comunidades locales.

La deforestación y la degradación del suelo para obtener biomasa también pueden perjudicar a los ecosistemas y al clima. Además, es probable que la producción masiva de “tecnologías verdes” genere residuos electrónicos tóxicos y difíciles de reciclar.

Es esencial abordar estos desafíos y desarrollar prácticas más sostenibles y éticas en la obtención de recursos; por ello, la TE debe buscar un equilibrio entre la reducción de emisiones de carbono, la preservación del medio ambiente y el respeto a los derechos de las comunidades afectadas, al promover el desarrollo de tecnologías más limpias y responsables en todas las etapas de su ciclo de vida.

En este punto en particular, es posible señalar que la TE occidentalizada ha tendido más hacia el conflicto y la destrucción de la naturaleza en espacios alejados de los centros urbanos concentrados en el sur global, y también hacia el desprecio por la vida de quienes han sido históricamente marginados, como la población del sur global, en especial mujeres, indígenas, campesinos y poblaciones de la periferia. Ya no hablamos de un color en sí, sino de la ausencia de éste como resultado del desdén por la existencia misma que genera el inescrupuloso interés económico.

Este capítulo se divide en tres secciones. En la primera se mencionan algunos costos propios de la etapa que abarca la extracción, distribución y almacenaje de minerales, los cuales se han vuelto imprescindibles para la fabricación de las tecnologías utilizadas en la generación eléctrica renovable. En el segundo apartado, se analiza la privatización de los medios o las fuentes utilizadas para producir energía eléctrica, y cómo estos procesos impactan a las sociedades y a la naturaleza. En la tercera sección se revisan algunos casos en que las poblaciones han demandado daños a sus comunidades y al medio ambiente por estas fuentes de energía. Esta revisión tiene la intención de evidenciar la existencia de otros costos socioambientales en la TE por la posesión o extracción minera. Finalmente, se presentan las conclusiones de este análisis, que incluyen la sugerencia de incorporar otros costos para que de esta forma se complemente el panorama de la realidad por generar electricidad por medios renovables.

### **Costos ocultos y desafíos en la transición hacia la generación de energía renovable**

En la última década, la propaganda de grandes empresas y gobiernos en el tema ambiental es que las fuentes renovables para generar energía serán la columna vertebral del sistema eléctrico de un futuro casi inmediato, pues contribuirán a la descarbonización de la estructura productiva y de los hogares. Con ello, se presume una reducción potencial de los efectos nocivos al ecosistema planetario por calentamiento global; al mismo tiempo, asistirán a la movilidad humana y a la continua innovación tecnológica.

Finalmente, las herramientas tecnológicas, que constantemente se innovan, están listas para ser usadas en cualquier parte del mundo. A pesar de lo anterior, vale la pena mencionar que sería prudente llevar a cabo proyectos energéticos en pequeña escala, de manera inicial, para una vez



analizados los resultados obtenidos y si éstos son positivos, ampliarlos a mayor escala; es decir, a las grandes ciudades (IRENA, 2021; López, 2020).

En este contexto, la propuesta y tendencia creciente que se inclina por la generación de la energía eléctrica a partir de proyectos basados en mecanismos renovables —es decir, aquellos que emplean procesos eólicos, solares, geotérmicos, hídricos e incluso por biomasa—, se sustentan en la reducción de costos de producción para venta al servicio público.

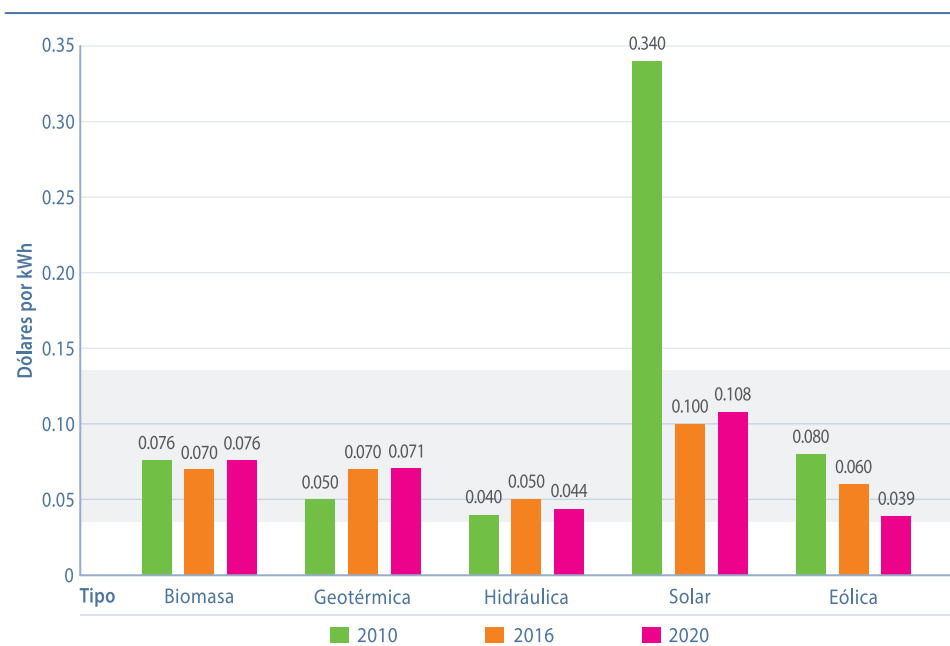
En este sentido, la International Renewable Energy Agency (IRENA [2018, 2021]) ha mostrado datos en donde los costos de producción de energía para el periodo 2010 a 2020 disminuyeron, lo que hace competitivas estas alternativas y las vuelve una opción para remplazar los procedimientos que utilizan fuentes fósiles como materia prima, pues, por ahora, los costos de ambas fuentes ya se encuentran dentro de los mismos rangos por producción de energía eléctrica, que en el caso de las fuentes fósiles se mantienen entre los valores 0.05 a 0.17 dólares por kilowatt hora (kWh).

Esta relativa estabilidad de costos para producir energía ha sido resultado de la búsqueda mundial por satisfacer sus necesidades energéticas, por lo que IRENA (2018) expone y agrupa algunos aspectos que han intervenido para situarse en esta posición. Se enumeran tres causantes principales:

- la mejora en eficiencia e innovación tecnológica, así como la disminución de los precios de estas herramientas,
- la mayor competencia empresarial nacional e internacional y
- un mayor interés internacional por la ampliación de megaproyectos energéticos.

Posteriormente, en su informe de 2021, la misma IRENA complementa los factores, además de proponerlo como una acción colaborativa entre las causantes mencionadas y las condiciones que emanan desde el ámbito político de las naciones en busca de promover la instalación de la infraestructura y la operación en favor de la transición energética (TE), de la misma manera que el impulso se da desde las industrias productivas con discursos socialmente responsables.

GRÁFICO 10  
Costo promedio de la electricidad en Europa  
(en dólares por kWh)



Fuente: elaboración propia con datos de IRENA (2018 y 2021).

La perspectiva se muestra favorable para la energía eléctrica resultante de los procesos renovables, de tal manera que la reducción tanto de costos económicos como de las probables emisiones de gases altamente contaminantes parece ser el aliciente para continuar con la ampliación de proyectos de este tipo, a pesar de que no todas las fuentes mencionadas han tenido el mismo progreso. Por ejemplo, en el periodo de 2010 a 2020 (véase gráfico 10), la reducción de los costos promedio de la electricidad en el mundo se sostiene sólo en los casos de las fuentes solar y eólica, pasando de valores 0.34 a 0.108 y de 0.08 a 0.039 dólares por kWh respectivamente. En cambio, no fue así para la electricidad producto de la biomasa que se mantuvo constante; mientras la geotérmica incrementó sus valores de 0.05 a 0.71 dólares por kWh, la hidráulica tuvo una variación fluctuante en el periodo, pero creciente en costos (IRENA, 2018; 2021).

El panorama en las energías renovables indica una bifurcación en la trayectoria de las tecnologías utilizadas. En tanto la energía solar y eólica han mostrado una reducción de costos impresionantes en la última década —lo que indica un avance tecnológico prometeico y una adopción masiva—, otros tipos, como la biomasa y la geotérmica, han superado desafíos en términos de eficiencia económica.

El aumento del costo de la energía geotérmica puede reflejar barreras tecnológicas o logísticas aún no superadas, las cuales podrían requerir mayor inversión en investigación y desarrollo. La estabilidad de los costos de la biomasa podría ser un indicador de la madurez de esta tecnología, lo que puede sugerir un límite en cuanto a su capacidad para reducir el costo de su producción sin innovaciones significativas.

La variabilidad de los costos de la energía hidroeléctrica indica una fuerte dependencia en las condiciones geográficas y climáticas locales, lo que limita su aplicabilidad en algunas regiones. Estos patrones destacan la importancia de una estrategia diversificada en la transición hacia las energías renovables, donde la innovación continua y la adaptabilidad local son fundamentales para optimizar la eficiencia y la adopción de estas fuentes de energía sostenible. Vale la pena resaltar todos los procesos alternativos de generación eléctrica que se encuentran en el interior del rango de costos de producción de las fuentes fósiles (véase franja gris en el gráfico 10).

Sin embargo, aunque se ha mencionado que los costos se han reducido con el empleo de proyectos renovables para producir energía eléctrica, hasta ahora sólo se ha señalado la medición promedio de los costos por la etapa de generación para el suministro del servicio público; contexto que no abarca todo el desarrollo productivo, debido a que deja de lado cualquier otra fase que involucre la expansión de estos mecanismos alternativos.

En estas condiciones, en este capítulo se presenta la discusión sobre los argumentos que limitan la percepción que se tiene de la reducción de los costos de los procesos de generación eléctrica por mecanismos renovables, ya que, como se ha mencionado, en cada etapa se ven envueltas otras circunstancias de corte social, ambiental, cultural, político y económico que suponen problemas y junto a ello otros costos adicionales que deberán contemplarse en la suma del importe final.

### **Costos por extracción y distribución de minerales para la TE**

El crecimiento de la demanda de tecnologías para generar energía eléctrica por medio de mecanismos renovables tiene como efecto el incremento de la exigencia de minerales, principalmente para la industria solar y eólica que de continuo están innovando; situación que involucra costos económicos directos o indirectos para operación, tales como: mano de obra, maquinaria, comercialización o industrialización; pero también otros, como los socioambientales, los cuales están relacionados con el agotamiento y la degradación ambiental (Ochoa, 2012).

El hecho de que los minerales sean esenciales para fabricar paneles fotovoltaicos, aerogeneradores o baterías, da pie al análisis e integración de otros costos que se dan durante las etapas de extracción, transporte a plantas de procesamiento y, de nuevo, llevar a cabo otro traslado, aunque ahora éste se dirija a empresas que se sitúan en regiones lejanas y dispersas del lugar de donde se sustrae el mineral, debido a que, por lo regular, estas corporaciones que transforman la materia prima en bienes empleados en la construcción y operación de la infraestructura que produce electricidad son globales y se ubican en naciones que no están tan expuestas al extractivismo.

Por consiguiente, se debería agregar el resultante de las actividades de extracción y distribución de recursos minerales al cúmulo de costos de generación eléctrica por métodos renovables, a consecuencia de que, además de expandirse día con día, durante la operación de estas actividades se hace uso de energía generada a partir de fuentes fósiles que permiten hacer funcionar la maquinaria y los medios móviles. La razón de incorporar estos costos se debe a que no son cantidades de energía pequeñas y despreciables; todo lo contrario, esta actividad tiene estimaciones de consumo con valores cercanos a 11% del total de la energía producida en el mundo (BM, 2019) y, aunque alude a la minería en general, la situación de los minerales aquí señalados como recursos para la transición no parece estar alejada de esa realidad debido a que generalmente son procesos con condiciones similares de explotación.

En este sentido, asegurar territorios abundantes en recursos para la minería pondrá en riesgo la salud y la capacidad de supervivencia del propio ecosistema, pero también de la humanidad, que manifiesta, visibiliza y asigna valor y utilidad a la naturaleza. Este costo se genera porque se dejan de emplear los entornos como medio de vida para comunidades,

por anteponer proyectos extractivos que comercializan la naturaleza; por ello, será el que se alude y aspira a incorporar al monto del gasto final en la generación de energía eléctrica, a pesar de que pueda existir otra valoración independiente sobre la naturaleza “de su utilidad o beneficio, real o potencial para el ser humano” (Gudynas, 2010). Por consiguiente, la actividad minera, al explotar los recursos naturales, impone costos que al final las comunidades con menores ingresos tendrán que pagar debido a que son altamente dependientes de la naturaleza (Programa para el Medio Ambiente, 2015).

En este tenor, es importante mencionar también la postura empresarial de los últimos años, que promueve un tipo de minería señalada como “verde o responsable”, la cual presenta diversos argumentos para ser aceptada: *a)* la reducción de emisiones contaminantes, al modificar el uso de fuentes fósiles por solares y eólicas; *b)* minería circular comprometida con el reciclaje; *c)* producción de hidrógeno verde para empleo inmediato y exportación; *d)* producción minera con menor impacto ambiental y social, y *e)* uso eficiente de todos los recursos disponibles, pero sobre todo del agua, si es posible sustituir el agua dulce por agua de mar (Antara, 2020; Razmilic, 2021).

Pese a los esfuerzos realizados por la industria minera, vale la pena resaltar que el nexo con la destrucción ambiental y social es imposible de eliminar debido a que esta industria depende de la explotación de amplios territorios para obtener minerales, que finalmente llegarán a transformarse en tecnologías. Además, el hecho de que un mineral se emplee como materia prima significa que debe suministrarse y satisfacer la demanda existente; por lo tanto, tendrá que recorrer, en la mayoría de los casos, largas distancias que comprenden la etapa de transporte, uso de vehículos y maquinaria que emplean fuentes energéticas fósiles para llevar a cabo esta actividad —de suma importancia para los mercados tecnológicos globales. Por ello, los procesos necesarios para producir energía son multicolor, ya que como se puede observar, para lograr la TE se llevan a cabo procesos que ocasionan distintos perjuicios tanto a la sociedad como a la naturaleza, lo cual deja en duda lo “verde” de la energía.

Respecto a lo anterior, Rumbo Minero (2017) adiciona que el transporte conlleva costos por condiciones como la rapidez de la entrega, la forma en que se envía, las largas distancias que cubre, la eficiencia del transporte y las emisiones contaminantes que provoca el uso de energéticos fósiles hasta llegar al punto de procesamiento.

Al final, cuando los minerales lleguen a su destino, cada uno tendrá su propio proceso de transformación, en el cual habrá mermas y uso de energía para modificar y fabricar herramientas tecnológicas que serán utilizadas conforme la industria y la demanda lo determinen. Posteriormente, algunas veces, a partir de este punto del ciclo de vida de la demanda de minerales al necesitar más suministros, se tratarán de recuperar por medio de programas de reciclaje, en varios casos, como el aluminio o el cobre. Sin embargo, para otros minerales, este proceso será más costoso que extraerlo y trasladarlo desde otros sitios. Éste es el caso del litio y el cobalto, que para usarlos se necesita una extremada pureza, lo que limita el empleo de materiales reciclados de este tipo (Hund, La Porta, Fabregas, Laing, y Drexhage, 2020).

A pesar de que se extrae y transporta sólo una vez el mismo mineral, la demanda de estas materias primas alimenta un ciclo en el que extraer minerales no cubre la continua y creciente exigencia de la industria tecnológica; de manera que, con el paso del tiempo, existe una mayor dependencia de los minerales y con ello de consumo de energía desde las etapas iniciales hasta la producción final de energía eléctrica.

Asimismo, la extracción mineral y la generación eléctrica se volverán inseparables, pues ambos mecanismos serán cada vez más intensivos el uno del otro con el paso de los años. Finalmente, esta relación incrementará los costos socioambientales a causa de los patrones de extracción, los cuales tienen de forma inherente la destrucción natural; por esta razón, es necesario integrarlos y contabilizarlos, sobre todo cuando se mencionan los costos por producir electricidad de forma renovable, ya que el proceso no debe limitarse a la generación eléctrica porque sólo es una parte del desarrollo global.

Además, hay que agregar que aun cuando parezca un ciclo infinito de consumo, ésta no es una particularidad de la minería y mucho menos de la industria tecnológica que es intensiva en el uso de los minerales, pues los recursos naturales son finitos y limitados. Por ello, en algún momento disminuirá el suministro y ralentizará el proceso que por ahora se muestra como cíclico para finalmente ponerlo en pausa.

### *Costos por despojo*

Según el Programa para el Medio Ambiente (PNUMA, 2015), en el año 2015 había en el mundo cerca de 1200 millones de personas que habitaban en

zonas rurales que, de manera simultánea, se encontraban en condiciones de extrema pobreza y sólo dependían para sobrevivir del denominado “capital natural”<sup>23</sup>, expresión que considera a la naturaleza como un bien al que se le puede asignar valor monetario e intercambiarlo. Sin embargo, esta expresión debería ser considerada en referencia a la valoración que tienen las comunidades, en vista de que todas sus actividades involucran: alimentación, vivienda, salud, cultura y los simbolismos que se encuentran relacionados con el uso de la naturaleza como fuente principal de recursos en cuanto a las virtudes que disfruta el colectivo y no como simples objetos de intercambio para el mercado de bienes (Gudynas, 2010).

Aparte, sobre estas mismas condiciones de ruralidad y pobreza, los datos que aporta el Fondo Internacional de Desarrollo Agrícola (FIDA, 2022) ofrecen otra perspectiva más severa, al identificar una cifra cercana a los 2400 millones de individuos pertenecientes a este grupo dependiente de recursos naturales. Por esto, llevar a cabo o imponer actividades que sacrifican recursos hídricos, forestales y suelos al contaminarlos o extraerlos de manera intensiva, así como promover el despojo de territorios y los recursos contenidos en éstos, representa la pérdida de capacidad de sobrevivencia para este bloque de la población, el cual equivale entre 20% y 40% del total de los habitantes del planeta.

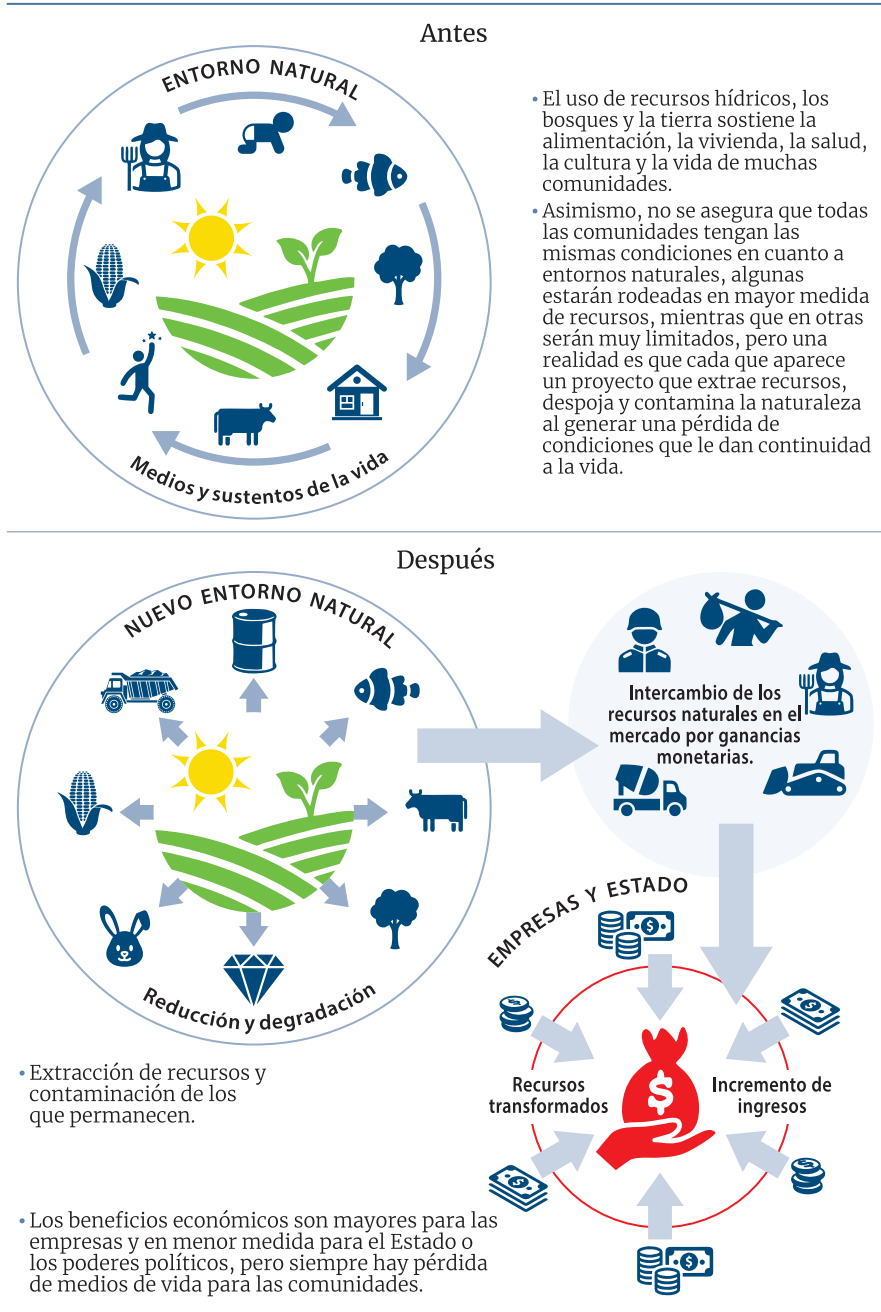
Vale la pena resaltar que, al final, los daños al medioambiente que acompañan el despojo de territorios alcanzarían a toda la humanidad, no por el hecho en sí mismo de ser un proceso de despojo, sino por los mecanismos y procedimientos industriales energéticos, extractivos o productivos que se llevan a cabo, además de que dañan áreas naturales disputadas entre comunidades y el sector industrial.

Al respecto, no se puede entender el despojo de los territorios sólo en el marco monetario; es decir, como la pérdida de riqueza o beneficios para las presentes y futuras generaciones, al no recibir contribuciones o ingresos por la explotación o extracción de recursos, ya que esa circunstancia lo hace ver como un saqueo debido a que las ganancias económicas son para agentes externos al territorio e incluso a la nación (Cárdenas, 2013).

---

<sup>23</sup> Se fundamenta en la relevancia económica que tienen la protección del medioambiente y los seres vivos contenidos en éste para su posterior empleo, de tal forma que sólo serán bienes o servicios ambientales a los que se les puede asignar un precio para ser intercambiados (Gudynas, 2010).

FIGURA 10  
Reducción de los entornos y los medios de vida





Es necesario ampliar la interpretación e integrar elementos, como la pérdida de los entornos a causa de la incorporación de los recursos naturales a la lógica de mercado a través de la extracción o la contaminación de éstos como fruto de las actividades de explotación que dirigen las grandes industrias (Castro, 2005), pues el resultado será que los habitantes ya no tengan acceso a la naturaleza como fuente de alimentación, construcción, atención a la salud, vivienda o simbolismos; por lo tanto, no se podría conservar la cultura y la vida en esos sitios; es más, es importante mencionar que la tierra a partir de ese momento se encontrará en controversia. Así, en la figura 10 se muestra el antes y el después de involucrar a los entornos naturales con los sectores productivos y energéticos, de tal manera que se expone la reducción de medios de vida para las comunidades, y esta situación es parte importante en la integración de los costos que arrastra la industria energética para continuar su desarrollo.

También es importante mencionar que, cuando se trata de minerales que se utilizan para la TE, generalmente se ven involucrados recursos que, por la expansión capitalista productiva, se extraen a través del despojo de tierras. Tal situación es propiciada por autoridades políticas o empresas, de modo que elementos como agua, minerales del subsuelo, tierras para el cultivo o pastoreo y zonas de culto en territorios indígenas, campesinos u otras minorías étnicas, además de tener la función de dar continuidad a la vida de grupos poblacionales, en la actualidad se han convertido en bienes intercambiables por la iniciativa privada y, en algunos casos, legitimados por las naciones a falta de capacidades políticas y normativas, o por estar arraigadas en prácticas de corrupción. Esto termina desmantelando los sistemas sociales y de producción campesina de forma violenta en la mayoría de las ocasiones, además de recrudecer la condición de pobreza (Paz, 2012).

En este sentido, es difícil concertar una cifra monetaria que dé cuenta de los costos derivados de la minería, que recaen sobre las actividades realizadas por las comunidades para subsistir. Pese a ello, la variable próxima puede ser diferenciada por su dimensión ambiental, la peculiaridad del deterioro y el agotamiento natural que provoque la pérdida de medios de subsistencia de los pueblos, aunque esto no cubriría la parte cultural y simbólica; además, no incluye actividades cotidianas que desarrollen las comunidades, tales como cultivar sus alimentos, pastoreo, pesca, recolección o caza. En consecuencia, no tendrán fuentes de alimentación o de

ingreso tras el despojo de los espacios que posteriormente se dedicarían a la extracción minera, sin olvidar el resultado subsecuente: la inmensa contaminación que degradaría aún más los entornos (Paz, 2012).

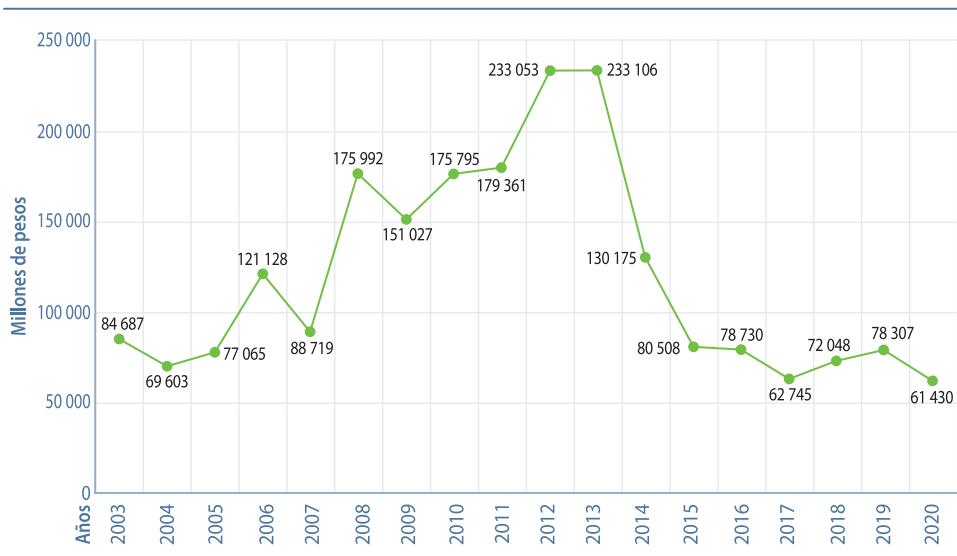
### *Costos por agotamiento y degradación ambiental*

Los recursos naturales que emplea la humanidad para satisfacer sus necesidades energéticas, alimenticias, de vivienda, etcétera, son finitos; pero la población y las actividades económicas planetarias en constante crecimiento los están degradando y agotando con rapidez, de tal modo que, debido a este patrón de exportación de minerales y energéticos que alimentan el desarrollo de infraestructura y manufactura para la producción, en 2015 fue necesario el consumo de los recursos presupuestados para ese año más 40% extra sólo para solventar los requerimientos humanos. Por ello, mantener la misma tendencia triplicaría la extracción de recursos para el año 2050, situación que no puede ser sostenible por la finitud de los recursos del planeta y la salud de las próximas generaciones (Programa para el Medio Ambiente, 2015).

Aun cuando no todos los países estén preocupados por saber las consecuencias de la destrucción de los entornos, México (uno de los cinco países en América Latina con una instrumentalización muy alta en este tema) da un ejemplo sobre la contabilidad de los costos por agotamiento y degradación ambiental por cada actividad productiva realizada en su territorio. Así, se encuentran datos sobre el agotamiento que sufren los recursos naturales a causa de la actividad minera, los cuales indican millones de pesos que la minería ha dejado como pérdida al agotar y degradar los entornos alrededor de proyectos extractivos (véase gráfico 11).

El punto máximo se dio en el año 2013 con 233106 millones de pesos en costos por agotamiento y degradación ambiental y, aunque parezca que después de ese año se reducirá dicha cantidad, esta situación es acumulativa, la naturaleza no se puede regenerar a la misma velocidad. Además, vale la pena mencionar que la minería no representa nada más costos por inversión en capital fijo, operativo o de insumos, sino que tiene costos monetarios sobre el medioambiente, además de otros que no se pueden contabilizar, como los daños a la salud de las personas por contaminación de agua o de aire, derrames, derrumbes, incendios, inundaciones, entre otros.

GRÁFICO 11  
**Costos del agotamiento y degradación ambiental del sector minero en México 2003-2020 (millones de pesos)**



Fuente: elaboración propia con información del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI [varios años])

Precisamente esta complejidad en los costos y efectos de la minería nos lleva a considerar otros aspectos igual de importantes, como los efectos sociales y los riesgos asociados con la transición energética.

### **Efectos y riesgos sociales de la exclusión en la transición energética**

Aunque la perspectiva global sobre las energías renovables es en gran medida optimista, marcada por los avances tecnológicos y la reducción de costos de producción, esta visión se torna más compleja al examinar la accesibilidad a estas tecnologías, especialmente en contextos geográficos, políticos y socioeconómicos desfavorables. A primera vista, el desarrollo de la energía renovable promete beneficios universales; sin embargo, el alcance de su implementación no es uniforme y, de hecho, puede exacerbar las desigualdades existentes si no se abordan ciertos desafíos clave.

Por ejemplo, no todos los lugares son adecuados para la instalación de paneles solares, turbinas eólicas o plantas hidroeléctricas. A esto se suma que las regiones más aisladas a menudo carecen de la infraestructura ne-

cesaria para transportar energía desde centros de producción más accesibles. Este tipo de barreras son más evidentes en comunidades rurales o indígenas de países en desarrollo, donde la falta de conectividad ya es una desventaja significativa.

La geografía no es la única limitación. En entornos políticamente volátiles o sistemas de gobernanza débiles, la inversión en proyectos de energía renovable puede considerarse riesgosa o no prioritaria. Las zonas en conflicto son sobre todo vulnerables en este aspecto, ya que la estabilidad necesaria para emprender proyectos de largo plazo es incierta. El compromiso político es esencial para financiar, aprobar y mantener estas iniciativas, y si llegan a faltar, las poblaciones ya marginadas sufren aún más.

Incluso cuando la geografía y la política no son obstáculos, el acceso al capital puede serlo. Las economías más pequeñas o empobrecidas no tienen a menudo los recursos para invertir en tecnologías limpias. Aquí, la brecha económica se convierte en energética, así que las comunidades se mantienen en un ciclo de pobreza y exclusión. Y aunque se argumenta que el costo de producción de las energías renovables está disminuyendo, éste no es el único que se debe considerar, pues los costos iniciales de instalación y mantenimiento también pueden ser prohibitivos para estas localidades.

Estas preocupaciones se agravan con el fenómeno del “desconocimiento derivado de la marginación”. Algunas poblaciones marginadas a menudo se encuentran fuera del alcance de los flujos de información convencionales, lo que limita su capacidad para adaptarse o incluso comprender las nuevas tecnologías. Esto puede dar lugar a una especie de “analfabetismo energético”, donde las comunidades carecen de los conocimientos necesarios para acceder a o mantener soluciones energéticas sostenibles.

La falta de accesibilidad a las fuentes de energía renovable en comunidades desfavorecidas plantea riesgos y efectos negativos profundos. No sólo perpetúa la desigualdad energética, sino que inhibe el desarrollo social y económico, lo cual puede llevar a más inestabilidad política y social. Mientras el mundo avanza hacia un futuro más sostenible, es crucial no dejar atrás a quienes ya están marginados. De lo contrario, las divisiones existentes sólo se profundizarán, al socavar los avances globales y generar problemas en contra de los mismos objetivos de sostenibilidad y equidad que la transición energética pretende alcanzar.

Todas estas cuestiones ponen de manifiesto las contradicciones inherentes del desarrollo sostenible que promueve la TE, ya que por lo general existe tensión entre las corporaciones que lideran estos proyectos, al requerir grandes espacios territoriales a precios muy bajos y las comunidades locales que comercian con sus tierras y recursos para tales emprendimientos. Y es que, si bien estos proyectos pueden generar empleo y, en teoría, desarrollar la infraestructura local, la realidad muchas veces pinta un cuadro menos halagador. La dinámica de poder desequilibrada entre las grandes corporaciones y las poblaciones se traduce a menudo en prácticas que perpetúan las desigualdades existentes en lugar de mitigarlas.

Por ejemplo, las corporaciones que establecen parques solares, granjas eólicas o plantas hidroeléctricas suelen negociar contratos de arrendamiento de tierras. Aunque esto pareciera una fuente de ingresos para estas localidades, las tasas de arrendamiento son a menudo desproporcionadamente bajas en comparación con las ganancias que estas instalaciones generan para las compañías. Estas tasas insignificantes rara vez son suficientes para impulsar el desarrollo comunitario de forma significativa o sacar a las personas de la pobreza. Además, las comunidades pueden verse forzadas por la falta de opciones y el desconocimiento técnico a aceptar términos desfavorables.

Aún más inquietante es que, en muchos casos, la energía generada en estos proyectos no beneficia de manera directa a las personas que han cedido sus tierras. En lugar de ello, esta energía a menudo se canaliza hacia las redes nacionales o incluso internacionales, para alimentar ciudades y zonas industriales a gran distancia. Los habitantes locales, aunque viven a la sombra de turbinas eólicas o de campos de paneles solares, continúan dependiendo de fuentes de energía más caras y menos sostenibles, lo que perpetúa un ciclo de pobreza energética.

Esta situación crea un paradigma irónico, pues los pobladores que podrían beneficiarse de manera más directa del acceso a energía renovable y más barata se convierten en meros espectadores de sus propios recursos naturales. De esta forma, se les niega la oportunidad de mejorar sus condiciones de vida a través del supuesto desarrollo sostenible, que se está llevando a cabo literalmente en sus propios patios traseros.

Esta desigualdad se agrava aún más cuando se considera el impacto ambiental local de tales proyectos. Por ejemplo, las plantas hidroeléctricas pueden alterar los ecosistemas fluviales y afectar los medios de subsistencia basados en la pesca, mientras que las granjas eólicas y solares

llegan a tener impactos en la fauna local y el uso de la tierra. Estos costos ambientales son asumidos por la comunidad, pero los beneficios económicos fluyen en gran medida hacia los accionistas de las empresas y los consumidores en áreas más desarrolladas.

Para abordar este problema, es necesario que exista mayor transparencia y equidad en la forma en que se negocian y se implementan estos proyectos. Los gobiernos y las organizaciones internacionales deben desempeñar un papel en la creación de marcos regulatorios que aseguren que los locales no sólo sean compensados de manera justa por su tierra y sus recursos, sino que tengan acceso a la energía generada. Además, es fundamental adoptar un enfoque más participativo que involucre a las comunidades en la toma de decisiones desde las etapas iniciales de los proyectos.

En última instancia, si la transición hacia la energía renovable ha de ser realmente sostenible y equitativa, no puede hacerse a expensas de quienes ya están en desventaja. Los proyectos de este tipo de energía tienen el potencial de ser una fuerza poderosa para el bien común, pero sólo si se gestionan de manera que empoderen en lugar de explotar a las comunidades más vulnerables.

### *Violencia y desigualdad: el lado oscuro de la transición energética*

Es crucial subrayar un aspecto especialmente inquietante de esta tensión entre el desarrollo de proyectos de energía renovable y las comunidades locales, sobre todo indígenas y campesinas; es decir, la violencia dirigida hacia los líderes y defensores comunitarios que se oponen a estos proyectos. Esta violencia adopta muchas formas, desde la intimidación y el acoso hasta ataques físicos y, en los casos más extremos, el asesinato. La fuente de esta hostilidad a menudo varía, ya que puede provenir de actores estatales, como la fuerza pública, o de actores no estatales, como empresas privadas y grupos del crimen organizado.

Dicha violencia no es un subproducto accidental de la transición energética, sino una manifestación de las estructuras de poder profundamente arraigadas que priorizan las ganancias económicas por encima de los derechos humanos y la justicia social. Es un método cruel y efectivo para

silenciar a los disidentes y allanar el camino para la implementación de “proyectos de desarrollo verde” que, en teoría, deberían beneficiar a la comunidad en general.

Por ejemplo, en ciertas áreas donde se pretenden instalar proyectos hidroeléctricos, las comunidades indígenas que dependen de los ríos para su subsistencia se ven particularmente afectadas. Quienes se oponen al proyecto se enfrentan a amenazas y agresiones de fuerzas de seguridad privadas que son contratadas por las empresas o, en casos más extremos, son objeto de violencia por parte de las autoridades estatales. En otras instancias, el crimen organizado llega a tener intereses financieros en el éxito de tales proyectos, por lo que también se involucra en la intimidación y las agresiones contra los líderes comunitarios.

Lo más alarmante es que estos actos de violencia a menudo quedan impunes. Las investigaciones son insuficientes, las condenas son pocas y las víctimas y sus familias pocas veces reciben justicia. Esta impunidad no sólo perpetúa el ciclo de violencia, sino que también envía un mensaje desalentador a los detractores de estos proyectos y a menudo resulta en un efecto disuasorio, al marginar aún más las voces de los más vulnerables en el debate sobre el desarrollo sostenible y la transición energética.

La violencia y opresión tienen un impacto duradero, pues crean un ambiente de miedo e incertidumbre que afecta todos los aspectos de la vida local. Los jóvenes, al ver los riesgos asociados con el activismo, quizá opten por no participar en la lucha por sus tierras y recursos. Las mujeres, que a menudo están en la vanguardia de las luchas, son especialmente vulnerables a la violencia física y la intimidación, lo que amplifica las desigualdades de género existentes dentro de estos lugares.

Por lo anterior, a continuación se mencionan algunos casos de violencia en procesos de extracción de recursos esenciales para la TE. Esto, con la finalidad de ejemplificar lo que está sucediendo en diversos territorios con tal de que unos cuantos obtengan recursos que se consideran valiosos para la transición energética.

### *Minería de cobalto y cobre en la República Democrática del Congo*

El cobalto, como se mencionó, es fundamental para la creación de baterías eléctricas de alto rendimiento y en aleaciones necesarias para motores, herramientas y productos de alta calidad médica y práctica; el cobre se considera uno de los minerales de mayor relevancia para la transición

energética, debido a la muy amplia cantidad de aplicaciones posibles para este recurso. Estos dos minerales de tan alto valor para la TE se encuentran concentrados en gran medida en la República Democrática del Congo (RDC), una nación que ha estado marcada por una historia de violencia e intervencionismo extranjero, el cual se beneficia del conflicto en este lugar para obtener los recursos a bajo costo. En el informe de 2023, *DRC: Powering Change or Business as Usual?* de Amnistía Internacional, se arroja luz sobre esta problemática y se revela una situación alarmante que requiere atención inmediata.

La RDC es un epicentro en la extracción de cobalto y cobre, metales cruciales para la fabricación de baterías de iones de litio que alimentan desde teléfonos móviles hasta vehículos eléctricos. La demanda de estos metales ha aumentado de manera exponencial en los últimos años y ha sido impulsada por la creciente especulación con tecnologías basadas en el uso de estos recursos. Tal demanda ha llevado a prácticas empresariales que despojan a las comunidades locales de sus derechos y territorios para obtener las riquezas mineras, por medio de desalojos forzados, intimidación y violencia letal. Éstas son sólo algunas de las tácticas empleadas por las empresas mineras, a menudo con el apoyo tácito o explícito de las autoridades estatales y locales.

La explotación minera intensiva no es un fenómeno nuevo en la RDC; este país ha sufrido abusos durante las épocas colonial y poscolonial. Sin embargo, la actual ola de explotación es en particular insidiosa porque se enmascara bajo el pretexto de la sostenibilidad y la TE. Las comunidades afectadas, como las de la ciudad de Kolwezi, han sido desplazadas y no se les ha consultado su opinión respecto a estos proyectos, a pesar de que allí viven; asimismo, las supuestas compensaciones que les han ofrecido las empresas no sirven para mantener un nivel de vida mínimo y dejan a las personas en condiciones precarias, sin hogar y, por supuesto, sin acceso a servicios básicos como agua y electricidad.

La falta de mecanismos de rendición de cuentas y acceso a la justicia agrava la situación, pues las empresas involucradas, como la Compagnie Minière de Musonoie Global SAS (Commus, Francia), la Chemicals of Africa SA (Chemaf, Dubai) y la Eurasian Resources Group (ERG, Luxemburgo) han mostrado un flagrante desprecio por las normas internacionales, los derechos humanos y los Principios Rectores de la ONU sobre las Empresas y los Derechos Humanos, ya que se saben casi intocables debido a su importancia estratégica para la transición energética.



Las violaciones a los derechos humanos incluyen desde la demolición de viviendas hasta la agresión sexual y la destrucción de cosechas, como se documenta en el informe de Amnistía Internacional. Este tipo de agresiones se han realizado de la mano del uso de fuerzas del orden público, así como con el despliegue de militares y perros entrenados, lo que implica que la participación del Estado no es circunstancial, sino clave para la creación de este tipo de proyectos que se imponen por la fuerza y en contra del bienestar colectivo.

### *El costo de la extracción de litio en América Latina*

La extracción de litio, especialmente en los salares de América de Sur, ha generado una serie de impactos ambientales y sociales que no pueden ignorarse. La degradación del suelo, la contaminación del aire y, sobre todo, la escasez de agua en regiones áridas como el salar de Atacama, en Chile, son algunas de las consecuencias más palpables. Según informes de organizaciones como Amigos de la Tierra y Bienaventuradores de Pobres, la producción de litio mediante estanques de evaporación consume aproximadamente 21 millones de litros de agua al día. Esta cifra es alarmante, si se considera que se necesitan alrededor de 2.2 millones de litros del vital líquido para producir una sola tonelada de este mineral.

Además de los impactos ambientales, la extracción de litio ha exacerbado las tensiones sociales y los conflictos por el agua en las localidades. En el caso de la comunidad de Toconao, en el norte de Chile, la minería ha limitado su acceso a recursos hídricos vitales, lo que pone en peligro sus medios de vida y la biodiversidad de la región. Estos conflictos se ven agravados por la falta de estudios de impacto ambiental confiables y la ausencia del Estado en la protección de estas comunidades.

La situación se complica aún más con la creciente inversión extranjera, en especial de China, en proyectos extractivos en América Latina. Estas inversiones, aunque generan ciertos beneficios económicos, han sido objeto de denuncias por abusos de derechos humanos e impactos ambientales cuestionables. Tan sólo en Argentina, la política minera favorece a grandes corporaciones extranjeras; asimismo, esa misma política promueve la militarización de los territorios y la criminalización de la población que se opone a los proyectos extractivos.

Por lo anterior, entre otras razones, la resistencia a estos proyectos está creciendo, pero las comunidades a menudo son objeto de criminali-

zación y estigmatización. Sonia Ramos y Santiago Machado, activistas sociales, subrayan la necesidad de cuestionar a las empresas que mantienen este mercado insostenible. La transición energética, aunque necesaria, no debe llevarse a cabo a expensas de comunidades ya marginadas y en ecosistemas frágiles.

La falta de mecanismos internacionales efectivos para responsabilizar a las empresas por los impactos de sus actividades es en extremo preocupante, pues los Estados, en lugar de proteger los derechos de sus ciudadanos, a menudo se alinean con intereses corporativos y dejan a las comunidades vulnerables, sin recursos para defender sus derechos y su entorno. Marta Pérez Fargas, del Observatori del Deute en la Globalització de Catalunya, señala que la llegada de empresas como Zijin ha tenido incluso un impacto cultural, al promover la cultura china y generar situaciones de abuso de poder.

### *Riesgos y violencia en la imposición de la TE en México*

En la zona centro de México se encuentra el estado de Puebla, que se caracteriza por una alta presencia de comunidades indígenas en la Sierra Norte de la entidad. Desde hace décadas, estos pueblos viven amenazados ante el avance de megaproyectos energéticos que encuadran en el interés de la TE del país, a pesar de que varios de éstos son en extremo contaminantes.

Lo anterior se realiza mediante el proyecto integral Morelos. Se trata de un proyecto de industrialización energética, el cual se lleva a cabo en la zona centro del país a través de la reorganización del territorio que abarca gran parte de las localidades de Morelos, Puebla y Tlaxcala. Con esto se ha afectado a más de 60 comunidades campesinas e indígenas que habitan estos lugares y no solamente no han sido consultadas sino que han manifestado públicamente su rechazo tajante para su realización. A pesar de ello, no han sido escuchadas por las autoridades. Este megaproyecto, impulsado por la Comisión Federal de Electricidad (CFE) en colaboración con empresas y contratistas privados nacionales e internacionales desde la década de los noventa del siglo pasado, busca establecer una gran cantidad de infraestructura pública para generar energía eléctrica desde distintas fuentes, como centrales termoeléctricas, gasoductos y acueductos, algunos de los cuales se van a utilizar para ayudar a cumplir las metas de TE nacionales.

Contra esos proyectos y megaproyectos, varias comunidades de Puebla tienen una larga historia de lucha que ha costado la vida a defensores del territorio, como Antonio Esteban Cruz y Manuel Gaspar Rodríguez, quienes se oponían a la construcción de una hidroeléctrica en la Sierra Norte; también se menciona la desaparición de Sergio Rivera Hernández, opositor a un proyecto hidroeléctrico, pero en la Sierra Negra, al suroriente del estado.

La Sierra Norte es sin duda la región con más territorio ocupado por megaproyectos en el país. Vale la pena resaltar que es notorio que, en donde existen hidroeléctricas en proyecto o en operación, hay concesiones mineras vigentes también. De igual manera, se encuentran zonas ya destinadas para el *fracking* (técnica para extraer petróleo).

Mientras, en la zona de Serdán, en el centro-oriente de la entidad, la organización social contra los parques solares en proyecto ha fortalecido su lucha, aunque han sido violentados por autoridades civiles y por el Ejército. Ahí, los campesinos llevan más de un año en denunciar el uso de tecnologías para modificar el ciclo de la lluvia. En esa zona ya existe un parque eólico en operación (de la empresa española Iberdrola en el municipio de Esperanza) y cuatro más en proyecto. Por ello, en oposición a éstos se conformó el Frente en Defensa del Territorio, el Agua y la Vida del Valle de Tehuacán, Sierra Negra y Cañada de Cuicatlán, para la defensa de sus territorios amenazados, pero no han sido apoyados por el Estado a pesar de demostrar sus dichos.

Resalta de forma poderosa que en las zonas mencionadas, a pesar de la presencia policial y militar para proteger los megaproyectos, también exista una fuerte presencia del crimen organizado y una alta incidencia delictiva, lo cual ha llevado a gran parte de la población a suponer que las mismas empresas utilizan a estas organizaciones para violentarlos y así tratar de disminuir el rechazo a las actividades relacionadas con la energía.

Es importante destacar que los casos de violencia aquí registrados no son los únicos, pero son una pequeña muestra del daño y riesgo que representa una TE guiada por intereses puramente económicos. El reconocimiento y la protección de los derechos de las comunidades locales e indígenas es fundamental para cualquier modelo de desarrollo o transición energética que aspire a ser verdaderamente sostenible e inclusivo. Los gobiernos, las empresas y las organizaciones internacionales deben trabajar en conjunto para poner fin a la violencia contra los defensores del

territorio, garantizar que los perpetradores sean llevados ante la justicia y establecer mecanismos de consulta y consentimiento que respeten el derecho de autodeterminación.

Más allá de la retórica del desarrollo sostenible y la mitigación del cambio climático, es imperativo abordar las estructuras de poder subyacentes que perpetúan la violencia y la explotación. La transición energética es una necesidad imperante, pero debe llevarse a cabo de manera justa y equitativa. No puede continuar siendo una vía para la opresión y la marginación de estos espacios que, en teoría, tendría que empoderar. En última instancia, la sostenibilidad no sólo trata de proteger el medio ambiente, sino también de garantizar la dignidad, la justicia y los derechos humanos para todos.

### **Conclusiones**

En las últimas décadas, se ha promovido la generación de energía eléctrica a partir de fuentes renovables como una solución para reducir los efectos nocivos al medio ambiente y combatir el cambio climático. Se argumenta que las fuentes renovables serán la columna vertebral del sistema eléctrico en un futuro cercano, debido a su potencial para descarbonizar la producción y los hogares, así como para impulsar la movilidad humana y la innovación tecnológica.

Se ha observado una tendencia de reducción de los costos económicos en la generación de energía renovable, lo que la hace más competitiva en comparación con las fuentes fósiles. Además, la mejora en eficiencia e innovación tecnológica, la mayor competencia empresarial y la expansión de desarrolladores de proyectos han contribuido a esta reducción de costos. Sin embargo, es importante considerar que estos costos se refieren principalmente a la etapa de generación de energía y no abarcan todo el desarrollo productivo, como la instalación, operación y producción de la tecnología necesaria, así como la extracción y transporte de minerales utilizados en la fabricación de dicha tecnología.

La extracción y distribución de los minerales necesarios para la fabricación de tecnologías renovables conlleva costos económicos, sociales, culturales y ambientales. El agotamiento y la degradación del ambiente, así como el despojo de territorios, representan una pérdida de medios de vida y recursos para las comunidades locales. Estos costos deben ser considerados al evaluar la viabilidad y sostenibilidad de la generación de

energía renovable. Además, es preciso considerar los impactos negativos de la transición hacia fuentes de energía limpia en los trabajos, las comunidades y la biodiversidad.

Por su lado, es importante tomar en cuenta que, a pesar de los esfuerzos por implementar una minería “verde” o responsable, la relación entre la minería y la degradación socioambiental es difícil de eliminar y en la TE deben de tomarse en cuenta estos elementos, ya que se usan grandes cantidades de minerales para producir energía. Asimismo, la expansión de la actividad minera puede resultar en el despojo de tierras y recursos, pero también afectar la salud y la capacidad de supervivencia de las comunidades locales. Además, el transporte de minerales a larga distancia y el uso de energía fósil en estas actividades generan costos adicionales y emisiones contaminantes.

Es importante saber que la generación de energía renovable no se limita sólo a la etapa de generación eléctrica, sino que abarca todo el ciclo de vida, desde la extracción de minerales hasta la fabricación de tecnología. Por lo tanto, tienen que considerarse los costos totales, incluidos los impactos laborales, sociales, económicos, ambientales y culturales, para evaluar de manera integral la sostenibilidad de la generación de energía renovable o “verde”.

La transición a la energía renovable ofrece beneficios ambientales y una posible reducción en los costos de producción, pero también tiene la capacidad de impulsar el desarrollo económico sostenible y crear empleos de calidad en sectores emergentes. Sin embargo, no debemos pasar por alto los desafíos inherentes, como la extracción y distribución de minerales, la posible reubicación de las comunidades y la potencial degradación ambiental.

Adoptar un enfoque que considere todas las etapas del ciclo de vida de la energía renovable puede ayudar a maximizar los beneficios y minimizar los impactos negativos. Además, la inclusión de las comunidades locales en la toma de decisiones y la implementación de medidas de mitigación y compensación son cruciales para garantizar una transición justa y equitativa. Un enfoque integrado y colaborativo es esencial para asegurar que la transición a la energía renovable sea sostenible y beneficiosa para todos.

Esto incluye la participación activa de las comunidades locales en la toma de decisiones, la implementación de medidas de mitigación y compensación, así como el fomento de prácticas responsables en la

extracción y distribución de minerales. Es evidente que la TE es una necesidad urgente para combatir el cambio climático, pero se ha convertido en una herramienta de conflicto político y económico entre naciones. Los países desarrollados que intentan liderar la transición han invertido en tecnologías que se ajustan a sus políticas para beneficiar las fuentes de energía renovables que más les favorecen en términos geoestratégicos, como se ha mencionado.

La TE hacia fuentes más sostenibles es una necesidad imperante en el contexto del cambio climático; sin embargo, cuando esta transición está impulsada por intereses mezquinos y no se lleva a cabo de manera ética y socialmente responsable, los resultados pueden ser devastadores para las comunidades más vulnerables.

Tan sólo en África, la minería de cobalto y cobre, esenciales para la fabricación de baterías de vehículos eléctricos, ha generado violencia social, desplazamiento forzado y destrucción de territorio y campos de cosecha. En Argentina y Chile, la extracción de litio ha contaminado el agua y el suelo, lo cual afecta tanto a las personas como a los ecosistemas locales. En México, el Proyecto Integral Morelos ha resultado en el desplazamiento forzado y, en algunos casos, el asesinato de opositores al proyecto. Estos ejemplos demuestran que una transición energética mal gestionada puede convertirse en una nueva forma de colonialismo, donde las grandes corporaciones y los gobiernos saquean los recursos naturales sin tener en cuenta el bienestar de las comunidades locales.

Es crucial que la TE se realice de manera que beneficie a todos, y no sólo a una élite económica; de lo contrario, se corre el riesgo de perpetuar y, en algunos casos, exacerbar las desigualdades sociales y económicas existentes. La violencia, la explotación, el daño a la salud y a los ecosistemas no pueden ser los costos ocultos de un futuro más “verde”. Se necesitan políticas inclusivas y éticas que tengan en cuenta tanto la sostenibilidad ambiental como la justicia social. Esto implica una planificación cuidadosa, consultas genuinas con las comunidades y una distribución más equitativa de los beneficios. Sólo entonces podremos lograr una transición energética que sea verdaderamente sostenible y justa para todos.

Álvaro Ibáñez

<https://www.flickr.com/photos/alvy/26741992994/>





# Bibliografía





- Acosta Santana, Y. (2016). Renovables en África: potencial y expectativas de desarrollo. *World Economic Forum*. Disponible en: <https://es.weforum.org/agenda/2016/10/renovables-en-africa-potencial-y-expectativas-de-desarrollo> (10/04/2022).
- Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades (2005). Resumen de Salud Pública Níquel. *Departamento de Salud y Servicios Humanos de los EEUU* (7440-02-0). Disponible en: [https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es\\_phs15.pdf](https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs15.pdf) (05/05/2022).
- Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades (2016). ToxFAQS TM-Manganeso. *Departamento de Salud y Servicios Humanos de los EEUU* (7439-96-5). Disponible en: [https://www.atsdr.cdc.gov/es/toxfaqs/es\\_tfacts151.html](https://www.atsdr.cdc.gov/es/toxfaqs/es_tfacts151.html) (09/05/2022).
- Aguilera Klink, F. y Alcántara, V. (Comp.) (2011). *De la economía ambiental a la economía ecológica*. ICARIA. [https://www.fuhem.es/media/ecosocial/File/Actualidad/2011/LibroEA\\_EE.pdf](https://www.fuhem.es/media/ecosocial/File/Actualidad/2011/LibroEA_EE.pdf)
- Almeida, I., Blas, J. y Shiryayevskaya, A. (2021). Starved of Gas, European Electricity Producers Snap Up Coal. *Bloomberg Green*. <https://www.bloomberg.com/news/articles/2021-09-24/starved-of-gas-european-electricity-producers-snap-up-coal?srnd=premium-europe>
- Antara (8 de abril de 2020). Minería verde, ¿qué significa y cuáles son sus aportes a la industria? Antara Mining. Disponible en: <https://www.antaramining.cl/noticias.html?32-mineria-verde-%C2%BFque-significa-y-cuales-son-sus-aportes-a-la-industria> (17/06/2022).
- Antolin, F. (1988). Electricidad y crecimiento económico. Los inicios de la electricidad en España. *Revista de Historia Económica*, España. 6(3), 635-655.

- Assari, K. y Ramond, P. (2023). “En diplomacia, la historia puede ser un argumento en las negociaciones”, una conversación con Gérard Araud. *El Grand Continent*. Disponible en: <https://legrandcontinent.eu/es/2023/05/11/en-diplomacia-la-historia-puede-ser-un-argumento-en-las-negociaciones-una-conversacion-con-gerard-araud/>
- Australian Vanadium Limited (2020). *Australian Critical Minerals Prospectus*. Disponible en: [https://www.australianvanadium.com.au/wp-content/uploads/2020/10/Australian\\_Critical\\_Minerals\\_Prospectus.pdf](https://www.australianvanadium.com.au/wp-content/uploads/2020/10/Australian_Critical_Minerals_Prospectus.pdf).
- Avalon (2023). *Securing Canada’s Critical Minerals Future. Fall 2023*. Disponible en: [https://avalonadvancedmaterials.com/\\_resources/pdf/Securing-Canadas-Critical-Minerals-Future-Fall-2023.pdf](https://avalonadvancedmaterials.com/_resources/pdf/Securing-Canadas-Critical-Minerals-Future-Fall-2023.pdf)
- Azamar Alonso, A. (2019). Extractivismo corporativista en México: Minería en Guanajuato. *Economía y Sociedad*. 24 (55), 78-100.
- Azamar Alonso, A. (2023). ¿Hacia dónde se dirige la transición energética mexicana? *Revista Argumentos. Estudios críticos de la sociedad*.
- Azamar Alonso, A. (Coord.) (2022). *Litio en América Latina: Demanda global contra daño socioambiental*. SEMARNAT y Universidad Autónoma Metropolitana (UAM).
- Ball, D. W. (2004). *Fisicoquímica*. Gale Cengage Learning.
- Banco Mundial (2019). Climate-Smart Mining: Minerals for Climate Action. Disponible en: <https://www.worldbank.org/en/news/infographic/2019/02/26/climate-smart-mining> (04/04/2022).
- Banco Mundial (11 de mayo de 2020). La producción minera se dispara con el aumento de la demanda de energía limpia. Comunicado de prensa, núm. 186. Disponible en: <https://www.bancomundial.org/es/news/press-release/2020/05/11/mineral-production-to-soar-as-demand-for-clean-energy-increases> (27/04/2022).
- Banco Mundial (2021). El acceso universal a la energía sostenible seguirá siendo inalcanzable, a menos que se aborden las desigualdades. Disponible en: <https://www.bancomundial.org/es/news/press-release/2021/06/07/report-universal-access-to-sustainable-energy-will-remain-elusive-without-addressing-inequalities>
- Basosi, Duccio (2020). Lost in Transition. The World’s Energy Past, Present and Future at the 1981 United Nations Conference on New and Renewable Sources of Energy. *Journal of Energy History/Revue d’Histoire de l’Énergie*, (4). Disponible en: <http://energyhistory.eu/fr/dossier/lost-transition-worlds-energy-past-present-and-future-1981-united-nations-conference-new>

- Blakemore, R. (2021). *Biden's Major Report on Critical Minerals Supply: Domestic Mining, Processing, Innovation, EVs, Global Allies*. Disponible en: <https://energypost.eu/bidens-major-report-on-critical-minerals-supply-domestic-mining-processing-innovation-evs-global-allies-more/>
- Bleischwitz, R., Bahn-Walkowiak, B., Ekardt, F., Feldt, H. y Fuhr, L. (2012). *International Resource Politics. New Challenges Demanding New Governance Approaches for a Green Economy*, Serie Ecología, 26, Heinrich Boll Stiftung.
- Bnamericas (2019). *Los principales proyectos brasileños de litio a los que estar atentos en 2020*. Disponible en: <https://www.bnamericas.com/es/noticias/los-principales-proyectos-brasilenos-de-litio-a-los-que-estar-atentos-en-2020+&cd=1&hl=es&ct=clnk&gl=mx>
- Boisseau, S. (2020). *The Belt and Road: China's "Community of Destiny" for Southeast Asia?* ifri Center for Asian Studies. Disponible en: [https://www.ifri.org/sites/default/files/atoms/files/boisseau\\_bri\\_community\\_destiny\\_2020.pdf](https://www.ifri.org/sites/default/files/atoms/files/boisseau_bri_community_destiny_2020.pdf)
- BP (2021). *Statistical Review of World Energy 2021*. 70th edition. Disponible en: <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2021-full-report.pdf>
- BP PLC (2021). *Statistical Review of World Energy (2021)*. Reino Unido. Disponible en: <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2021-full-report.pdf> (01/03/2022).
- Bridge, G. (2008). Environmental Economic Geography: A Sympathetic Critique. *Geoforum*, 39(1), 76–81. Disponible en: <http://doi.org/10.1016/j.geoforum.2007.06.00>
- British Federal México (2019). Impacto del estaño en la industria y el ambiente. *BF México*. Disponible en: <https://www.bfmex.com/industria/impacto-del-estano-en-la-industria-y-el-medio-ambiente/> (05/05/2022).
- Buijs, B. y Sievers, H. (2011). Critical Thinking about Critical Minerals. Assessing Risks Related to Resource Security. *Poninares*. Disponible en: [https://www.clingendaelenergy.com/inc/upload/files/Critical\\_thinking\\_critical\\_minerals.pdf](https://www.clingendaelenergy.com/inc/upload/files/Critical_thinking_critical_minerals.pdf)
- Bunker, S. (1984). Modes of Extraction, Unequal Exchange, and the Progressive Underdevelopment of an Extreme Periphery. *American Journal of Sociology*, 89, 1017–64.
- Caballero, A. (2 de febrero de 2022). ¿Pueden ser verdes la energía nuclear y el gas? Las claves de la taxonomía europea. Rteve, España. Disponible en: <https://www.rtve.es/noticias/20220202/pueden-ser-verdes-nuclear-gas-taxonomia-europea/2263341.shtml> (02/04/2022).

- Cabrera Marutz, C., Velásquez Alcalá, S. y Vrhovac Biljesko, J. (2014). Enfermedades profesionales en la industria del cobre: extracción, manufactura y reciclaje. *Medicina y seguridad del trabajo*. 60(237), 756-778.
- Canal Abierto (2023). El camino que estamos siguiendo es de mucho peligro para la soberanía. Disponible en: <https://canalabierto.com.ar/2023/04/19/el-camino-que-estamos-siguiendo-es-de-mucho-peligro-para-la-soberania/>
- Cano Cruz, P. (2022). *Invasión rusa de Ucrania: un análisis desde el realismo ofensivo*. Universidad de Granada. Disponible en: <https://aecpa.es/files/view/pdf/congress-papers/16-0/2895/>
- Canseco García-Pita, M. (2010). Energías renovables en América Latina. *Fundación Ciudadanía y Valores*. Madrid. Disponible en: [http://plataforma.responsable.net/sites/default/files/1279184521\\_energias\\_renovables\\_en\\_america\\_latina.pdf](http://plataforma.responsable.net/sites/default/files/1279184521_energias_renovables_en_america_latina.pdf) (02/04/2022).
- Cárdenas, J. (2013). La minería en México: despojo a la nación. *Cuestiones Constitucionales*, (28), 35-74. Disponible en: [https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1405-91932013000100002](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-91932013000100002)
- Cardwell, D. S. L. (1971). *From Watt to Clausius; the Rise of Thermodynamics in the Early Industrial Age*. Ithaca. Disponible en: <https://archive.org/details/fromwatttoclausio000card>
- Carralero, D. (15 de marzo, 2021a). ¿Pueden los minerales críticos impedir la TE? *Climática*. Disponible en: <https://www.climatica.lamarea.com/especial-minerales-criticos-1/> (20/05/2022).
- Carralero, D. (17 de marzo de 2021b). ¿Qué materiales requiere la TE? *Climática*. Disponible en: <https://www.climatica.lamarea.com/especial-minerales-criticos-2/> (12/05/2022).
- Carter, J. (1977). *Address to the Nation on Energy*. Disponible en: <https://www.presidency.ucsb.edu/documents/address-the-nation-energy>
- Castiblanco, C. (2007). La economía ecológica: Una disciplina en busca de autor. *Ecological Economics*, 10(3), 7-21. Disponible en: <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/22767/1424-6796-1-PB.pdf>
- Castillo Martín, P. (2011). Política económica: crecimiento económico, desarrollo económico, desarrollo sostenible. *Revista Internacional del Mundo Económico y del Derecho*, 3, 1-12. Disponible en: <http://www.revistainter nacionaldelmundoeconomicoydelderecho.net/wp-content/uploads/RIMED-Pol%C3%ADtica-econ%C3%B3mica.pdf> (20/03/2022).
- Castro, G. (2005). El movimiento social en Mesoamérica por la defensa de los recursos naturales. *Observatorio Social de América Latina*, 17(1). Disponible en: <http://biblioteca.clacso.edu.ar/clacso/osal/20110313044520/5soto.pdf>.

- Chevalier Naranjo, S. (2020). ¿Cómo va la adopción de vehículos eléctricos en el mundo? *Statista*. Disponible en: <https://es.statista.com/grafico/22999/numero-de-vehiculos-electricos-de-bateria-en-el-mundo/04/04/2022>).
- Chomón Pérez, J. M. y Ganser, A. (2021). *Las tierras raras y la lucha por la hegemonía mundial*. Instituto Español de Estudios Estratégicos. Disponible en: [https://www.ieee.es/publicaciones-new/documentos-de-opinion/2021/DIEEO141\\_2021\\_JUACHO\\_Tierras.html](https://www.ieee.es/publicaciones-new/documentos-de-opinion/2021/DIEEO141_2021_JUACHO_Tierras.html)
- Codam (s.f.). *Níquel para la industria*. Disponible en: <https://codam.com.ar/catalogo-niquel/05/05/2022>).
- Comisión Chilena del Cobre (Cochilco), (2020). *Oferta y demanda de litio hacia el 2030*. Disponible en: <https://www.cochilco.cl/Mercado%20de%20Metales/Produccion%20y%20consumo%20de%20litio%20hacia%20el%202030.pdf>
- Comisión Europea (26 de mayo de 2011). Medio ambiente: ¿debemos triplicar el uso de los recursos para 2050 o mejorar la eficiencia y el reciclado? Web oficial de la UE. Disponible en: [https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/es/IP\\_11\\_646](https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/es/IP_11_646) (14/05/2022).
- Conceição, P. (2020). Informe sobre Desarrollo Humano 2020, panorama general. La próxima frontera. El desarrollo humano y el Antropoceno. Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. EUA. Disponible en: [https://hdr.undp.org/sites/default/files/hdr\\_2020\\_overview\\_spanish.pdf](https://hdr.undp.org/sites/default/files/hdr_2020_overview_spanish.pdf) (20/03/2022).
- Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías y Secretaría de Energía (2022). Sistema de Información Geográfica de Fuentes Renovables de Energía para la Planeación del Desarrollo Regional Sustentable (SIGFRE-DRS). Disponible en: <http://energia.ugto.mx/sigfredrs/index.php/component/content/?view=featured>
- Covarrubias, S. y Peña Cabriales, J. (2017). Contaminación ambiental por metales pesados en México: Problemática y estrategias de fitorremediación. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*. 33, 7-21.
- Daly, H. (1980). *Economics Ecology, Ethics: Essays Toward a Steady State*. State Economy.
- DatosMundial.com. Ingreso promedio a nivel mundial. Disponible en: <https://www.datosmundial.com/ingreso-promedio.php> (10/04/2022).
- Dirección General de Industria, Energía y Minas (2002). La electricidad. El recorrido de la energía. *Iberdrola*, Comunidad de Madrid. Disponible en: <https://www.fenercom.com/wp-content/uploads/2019/05/recorrido-de-la-energia-la-electricidad.pdf> (20/03/2022).
- Duval, J. (2018). La fiebre del cobalto en el Congo. *El Salto*. Disponible en: <https://www.elsaltodiario.com/africa/fiebre-cobalto-congo-mineria-china-glencore> (27/05/2022).

- Enerdata (s.f.). Energía y clima mundial-Anuario estadístico 2021. Disponible en: <https://datos.enerdata.net/electricidad/datos-consumo-electricidad-hogar.html> (15/03/2022).
- Energy Information Administration [EIA] (2022). *Coal*. Disponible en: <https://www.eia.gov/totalenergy/data/monthly/#coal>
- Ericsson, M., Löf, O. y Löf, A. (2020). Chinese Control Over African and Global Mining-Past, Present and Future. *Mineral Economics*, 33(1-2), 153-181. Disponible en: <https://link.springer.com/article/10.1007/s13563-020-00233-4>
- Espíndola J. (26 de octubre de 2020). Aluminio, amigo del medio ambiente. *Reporte Índigo*. Disponible en: <https://www.reporteindigo.com/piensa/aluminio-amigo-del-medio-ambiente-contaminacion-consumo-reciclaje/> (05/05/2022).
- European Commission (2022). EU Taxonomy: Commission Presents Complementary Climate Delegated Act to Accelerate Decarbonisation. Disponible en: [https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip\\_22\\_711](https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_22_711)
- Fariza, I. (2022). España rechaza la propuesta de Bruselas para que la nuclear y el gas se consideren energías verdes. *El País*. Disponible en: <https://elpais.com/economia/2022-01-02/espana-rechaza-la-propuesta-de-bruselas-para-que-la-nuclear-y-el-gas-sean-consideradas-energias-verdes.html>
- Fawthrop, A. (2021). Lithium Prices Could Triple by 2030 as Demand Outpaces Supply. *ns Energy*. Disponible en: <https://www.nsenergybusiness.com/features/lithium-supply-demand-prices/>
- Folchi, M. y Del Mar, Rubio, M. (2007). El consumo aparente de energía fósil en los países latinoamericanos hacia 1925: una propuesta metodológica a partir de las estadísticas de comercio exterior. *CEPAL*, Chile. Serie: Estudios Estadísticos y Prospectivos, (47).
- Fondo Internacional de Desarrollo Agrícola [FIDA] (s.f.). ¿Por qué la población rural? Disponible en: [https://www.ifad.org/es/investing-in-rural-people#:~:text=Se%20estima%20que%203%20000%20millones%20de%20personas,granjas%20familiares%20para%20obtener%20sus%20ingresos%20y%20sustento.\(19/06/2022\).](https://www.ifad.org/es/investing-in-rural-people#:~:text=Se%20estima%20que%203%20000%20millones%20de%20personas,granjas%20familiares%20para%20obtener%20sus%20ingresos%20y%20sustento.(19/06/2022).)
- Fressoz, J. B. (2014). Pour une Histoire De'sorientée de l'Energie. *25èmes Journées Scientifiques de l'Environnement-L'Économie Verte en Question*. Disponible en: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00956441>
- García Alcocer, G. (2019). La TE hacia las tecnologías limpias: un motor para el desarrollo de México. (101-118). En: Anglés Hernández, M. y Palomino Guerrero, M. (Coords.). *Aportes sobre la configuración del derecho energético en México*. Instituto de Investigaciones Jurídicas, UNAM.

- García-Carmona, A. y Criado, A. M. (2013). Enseñanza de la energía en la etapa 6-12 años: un planteamiento desde el ámbito curricular de las máquinas. *Enseñanza de las ciencias*, (31.3).
- García Ortega, J., Cantero, A., Rull, E., Bravo, C. (2003). Energía verde. *Revista Trimestral*, Greenpeace, 4, pp. 24-33.
- GeoComunes, Red Mexicana de Afectados por la Minería (REMA)-MiningWatch Canadá (2021). Informe. El litio: la nueva disputa comercial dinamizada por el falso mercado verde. Disponible en: [https://geocomunes.org/Analisis\\_PDF/Litio\\_Informe\\_Final\\_Enero2021.pdf](https://geocomunes.org/Analisis_PDF/Litio_Informe_Final_Enero2021.pdf)
- Georgescu-Roegen, N. (1996). *La ley de la entropía y el proceso económico*. Fundación Argentaria.
- Gielen, D. (2021). *Critical Materials for the Energy Transition. Technical Paper 5/2021*. International Renewable Energy Agency (IRENA). Disponible en: [https://irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Technical-Papers/IRENA\\_Critical\\_Materials\\_2021.pdf](https://irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Technical-Papers/IRENA_Critical_Materials_2021.pdf)
- Giurco, D., Arndt, N. y Ali, S. (14 de septiembre de 2017). Time for a Global Agreement on Minerals to Fuel the Clean Energy Transition. *The Conversation*. Disponible en: <https://theconversation.com/time-for-a-global-agreement-on-minerals-to-fuel-the-clean-energy-transition-87186> (28/04/2022).
- Global Witness (29 de julio de 2020). Global Witness registra un récord de personas defensoras de la tierra y el medio ambiente asesinadas en un año, vinculado al preocupante avance del cambio climático. Comunicado de prensa. Disponible en: <https://www.globalwitness.org/es/comunicados-de-prensa/global-witness-records-the-highest-number-of-land-and-environmental-activists-murdered-in-one-year-with-the-link-to-accelerating-climate-change-of-increasing-concern-es/> (28/05/2022).
- González Mateos, J. (enero 14, 2022). La insoportable levedad de Europa: sin energía, ni defensa. *Noticias Gipuzkoa*. Disponible en: <https://www.noticiasdegipuzkoa.eus/actualidad/union-europea/2022/01/15/insoportable-levedad-europa-energia-defensa/1175178.html> (13/03/2022).
- Graedel, T. E. y Reck, B. K. (2016). Six Years of Criticality Assessments: What Have We Learned So Far? *Journal of Industrial Ecology*, 20(4), 692-699. Disponible en: <https://doi.org/10.1111/jiec.12305>
- Gudynas, E. (2010). La senda biocéntrica: valores intrínsecos, derechos de la naturaleza y justicia ecológica. *Tabula Rosa*. Bogotá, Colombia, (13), 45-71.
- Haoran, S. (2020). Solid China-Saudi Friendship. *Global Times*. Disponible en: <https://www.globaltimes.cn/content/1195426.shtml>



- Herwood, D. (2020). Grupos indígenas en Atacama de Chile presionan para cerrar la principal minera de litio SQM. *Reuters*. Disponible en: <https://www.reuters.com/article/us-chile-lithium-sqm/indigenous-groups-in-chiles-atacama-push-to-shut-down-top-lithium-miner-sqm-idUSKCN25A2PB?edition-redirect=in> (27/05/2022).
- Holmes, J., Hurley Depret, M. (2016). Energía sin conexión a la red en comunidades remotas: Lecciones de América del Sur. *Smart Villages. New Thinking for Off-Grid Communities Worldwide*. Disponible en: <https://e4sv.org/wp-content/uploads/2016/04/BR11-Off-grid-energy-in-remote-communities-Lessons-from-South-America-es.pdf> (12/04/2022).
- Hossain, M. (s.f.). Consecución de los objetivos en materia de energía sostenible en Bangladesh. Naciones Unidas. Disponible en: <https://www.un.org/es/chronicle/article/consecucion-de-los-objetivos-en-materia-de-energia-sostenible-en-bangladesh> (20/04/2022).
- Humphries, M. (2019). Critical Minerals and US Public Policy. *Congressional Research Service*. Disponible en: <https://crsreports.congress.gov/product/pdf/R/R45810/2> (30/05/2022).
- Hund, K., La Porta, D., Fabregas, T., Laing, T. y Drexhage, J. (2020). Minerals for Climate Action: The Mineral Intensity of the Clean Energy Transition. *World Bank Group*. Disponible en: <http://enernews.com/pdfjs/web/viewer.php?file=/public/archivos/ALTFD00A4jXLRyFAW9bBoIRGRFWD3atIHgjoAKRX.pdf&title=BANCO+MUNDIAL%3A+MINERALES+PARA+LA+ACCI%C3%93N+CLIM%C3%81TICA+%28ENGLISH%29> (13/05/2022).
- Hurst, C. (2010). *China's Rare Earth Elements Industry: What Can the West Learn?*. Institute for the Analysis of Global Security (IAGS). Disponible en: <http://www.iags.org/rareearth0310hurst.pdf>
- Ideas medioambientales. Distancias entre aerogeneradores. Disponible en: <https://ideasmedioambientales.com/distancias-entre-aerogeneradores/> (05/05/2022).
- Inman, P. (2019). Why Does Donald Trump Want to Buy Greenland? *The Guardian*. Disponible en <https://www.theguardian.com/us-news/2019/aug/19/why-does-donald-trump-want-to-buy-greenland>
- International Energy Agency [IEA], (2021). *The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions*. París. Disponible en: <https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions>.
- IRENA (2018). *Renewable Power Generation Costs in 2017*. International Renewable Energy Agency. Abu Dhabi.
- IRENA (2021). Costos de generación de energía renovable en 2020. Resumen ejecutivo. International Renewable Energy Agency. Disponible en: <https://www.irena.org/publications/2021/Jun/Renewable-Power-Generation-Costs-2020-Summary-ES> (14/06/2022).



- Journal*. Disponible en: <https://www.wsj.com/articles/china-hones-control-over-manganese-a-rising-star-in-battery-metals-11621597490>
- Kabunda, M. (2010). Causas y efectos de la conflictividad en la República Democrática del Congo y los Grandes Lagos. *Papeles de relaciones ecosociales y cambio global*. (110), 133-144.
- Klare, M.T., (2021). *Litio, cobalto y tierras raras. La carrera por los recursos post-petróleo*. Disponible en: <https://desinformemonos.org/litio-cobalto-y-tierras-raras-la-carrera-por-los-recursospospetroleo/>
- Lajtman, T. y García, A. (2021). *Panorama litio en América Latina*. Disponible en: <https://www.celag.org/panorama-litio-en-america-latina/>
- Lamm, V. (s.f.). Tierras raras: elevados daños ambientales ocasionados por la fabricación tecnológica. *Fundación vida sostenible*. Disponible en: <https://www.vidasostenible.org/tierras-raras-elevados-danos-ambientales-ocasionados-por-la-fabricacion-tecnologica/> (09/05/2022).
- Lenntech. Disponible en: <https://www.lenntech.es/periodica/elementos/cu.htm> (04/05/2022).
- Limón, R. (28 de marzo 2021). Un estudio calcula que los paneles solares generarán 80 millones de toneladas de residuos en tres décadas. *EL PAÍS*. Disponible en: <https://elpais.com/ciencia/2021-03-29/un-estudio-calcula-que-los-paneles-solares-generaran-80-millones-de-toneladas-de-residuos-en-tres-decadas.html> (12/05/2022).
- Liu, Z. y Zhang, C. (2021). One Belt, one Road, two Routes Regulation: Regulatory Interactions Between China and Host Countries in the Context of the Belt & Road Initiative. *us-China Law Review*, 18(5), 205-226. Disponible en: <https://eprints.gla.ac.uk/258966/>
- López, P. (15 de junio, 2020). Fuentes renovables de energía, más económicas que las fósiles. *Gaceta UNAM*. Disponible en: <https://www.gaceta.unam.mx/fuentes-renovables-de-energia-mas-economicas-que-las-fosiles/> (10/06/2022).
- Martínez Alier, J. (2011). Conflictos ecológicos y justicia ambiental. *Convivir para perdurar: conflictos ecosociales y sabidurías ecológicas* (51-70). Disponible en: [https://istas.net/descargas/Conflictos\\_ecologicos\\_J1%20\\_MARTINEZ\\_ALIER.pdf](https://istas.net/descargas/Conflictos_ecologicos_J1%20_MARTINEZ_ALIER.pdf)
- Martínez Alier, J. (2015). Ecología política del extractivismo y justicia socio-ambiental. *INTERdisciplina* 3(7). Disponible en: <https://doi.org/10.22201/ceiich.24485705e.2015.7.52384>
- Martínez Alier, J. y Roca, J. J. (2000). *Economía ecológica y política ambiental*. Fondo de Cultura Económica.

- Martínez, J. (2022). Tierras raras y materias primas críticas: los elementos presentes en tu patinete o móvil que la UE necesita urgentemente. *20 minutos*. Disponible en: <https://www.20minutos.es/noticia/4906295/0/crisis-tierras-raras-materias-primas-criticas-desabastecimiento-productos-europa-necesita-movil-patinete/>
- Martínez, J. y del Valle, A. (2014). *Las tierras raras: un sector estratégico para el desarrollo tecnológico de China*. Cuadernos de trabajo del Centro de Estudios China-México [CECHIMEX], México, (6).
- Mena Roa, M. (2022). ¿Cómo avanza la transición hacia la movilidad eléctrica? *Statista*. Disponible en: [https://es.statista.com/grafico/22026/paises-con-mayor-porcentaje-de-vehiculos-electricos-respecto-a-las-ventas-matriculaciones-de-turismos-nuevos-en-2019/\(13/04/2022\)](https://es.statista.com/grafico/22026/paises-con-mayor-porcentaje-de-vehiculos-electricos-respecto-a-las-ventas-matriculaciones-de-turismos-nuevos-en-2019/(13/04/2022)).
- México minero.org. Molibdeno. Disponible en: [https://mexicominero.org/tipos-de-minerales/molibdeno/\(10/05/2022\)](https://mexicominero.org/tipos-de-minerales/molibdeno/(10/05/2022)).
- Minería en línea (16 de enero de 2020). Gobierno peruano espera tener este año regulación para explotar litio. *Minería en línea*. Perú. Disponible en: [https://mineriaenlinea.com/2020/01/gobierno-peruano-espera-tener-este-ano-regulacion-para-explotar-litio/\(07/05/2022\)](https://mineriaenlinea.com/2020/01/gobierno-peruano-espera-tener-este-ano-regulacion-para-explotar-litio/(07/05/2022)).
- Mining Technology (2019). *Top Ten Biggest Lithium Mines in the World*. Disponible en: <https://www.mining-technology.com/features/top-ten-biggest-lithium-mines/>
- Montoya, B. (2022). Chile: ocho proyectos mineros cercan el Parque Nacional Nevado Tres Cruces. *Mongabay*. Disponible en: <https://es.mongabay.com/2022/01/chile-ocho-proyectos-mineros-cercan-el-parque-nacional-nevado-tres-cruces/>
- Morales, I. (27 de julio de 2021). Ante el aumento de la demanda. Minerales críticos son el nuevo oro en la era de las renovables. *El Confidencial*. Disponible en: [https://www.elconfidencial.com/medioambiente/empresa/2021-07-27/los-minerales-criticos-son-el-nuevo-oro-en-la-era-de-las-renovables\\_3201884/\(17/05/2022\)](https://www.elconfidencial.com/medioambiente/empresa/2021-07-27/los-minerales-criticos-son-el-nuevo-oro-en-la-era-de-las-renovables_3201884/(17/05/2022)).
- Morandín Ahuerma, I. y Azamar Alonso, A. (2019). Sustentabilidad y cultura. En A. Azamar Alonso y J. Matus Parada (Coords.). *Tendiendo puentes para una sustentabilidad integral* (24-59), México: Universidad Autónoma Metropolitana. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/337951532\\_Sustentabilidad\\_y\\_cultura](https://www.researchgate.net/publication/337951532_Sustentabilidad_y_cultura)
- Mureithi, C. (2022). *Trade Between Africa and China Reached an All-Time High in 2021*. Quartz. Disponible en: <https://qz.com/africa/2123474/china-africa-trade-reached-an-all-time-high-in-2021>
- Naredo J. y Parra, F. (1993). *Hacia una ciencia de los recursos naturales*. Siglo XXI Editores.

- Ochoa García, H. (2012). Mapeo de conflictos ambientales y alternativas en Jalisco, aportes para una metodología. En: Tetreault, D., Ochoa, H. y Hernández, E. (Coords.). *Conflictos socioambientales y alternativas de la sociedad civil*. 67-92. Colección Alternativas al Desarrollo, ITESO, México.
- O'Connor, P. (2010). Energy Transitions. *The Pardee Papers*, (12). Disponible en: <https://www.bu.edu/pardee/files/2010/11/12-PP-Nov2010.pdf>
- Olson, S. (2 de julio de 2021). Aquí están: Las nueve mineras más grandes de China. MiningPress. Disponible en: [https://miningpress.com/poder-de-china/338923/aqui-estan-las-nueve-mineras-mas-grandes-de-china#:~:text=China%20Molybdenum%20es%20una%20empresa%20de%20exploraci%C3%B3n%20y,compa%C3%B1a%20fueron%20de%2022%20mil%20millones%20de%20RMB%20\(20/05/2022\)](https://miningpress.com/poder-de-china/338923/aqui-estan-las-nueve-mineras-mas-grandes-de-china#:~:text=China%20Molybdenum%20es%20una%20empresa%20de%20exploraci%C3%B3n%20y,compa%C3%B1a%20fueron%20de%2022%20mil%20millones%20de%20RMB%20(20/05/2022)).
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO] (2016). Forestry for a Low-Carbon Future: Integrating Forests and Wood Products in Climate Change Strategies. Disponible en: <https://www.fao.org/publications/card/en/c/45619457-bbf1-4fda-964b-d24dc-defbadf/>
- Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos [OCDE] (2012). Perspectivas ambientales de la OCDE hacia 2050: Consecuencias de la inacción. OCDE y la Agencia de Evaluación Ambiental de los Países Bajos. Disponible en: <https://www.oecd.org/env/indicators-modelling-outlooks/49884278.pdf> (11/03/2022).
- Orús, A. (2021). Consumo mundial de energía renovable de 2000 a 2020. *Statista*. Disponible en: [https://es.statista.com/estadisticas/635724/volumen-de-energia-renovable-consumido-a-nivel-mundial/\(27/04/2022\)](https://es.statista.com/estadisticas/635724/volumen-de-energia-renovable-consumido-a-nivel-mundial/(27/04/2022)).
- Oviedo-Salazar, J., Badii, M., Guillen, A. y Lugo Serrato, O. (2015). Historia y uso de energías renovables. *Internacional Journal of Good Conscience*, 10(1), 1-18.
- Palmer, D. y Moffett, S. (2012). China enfrenta caso OMC por tierras raras. *Reuters*. Disponible en: <https://www.reuters.com/article/negocios-comercio-china-omc-idLTASIE82Co3T20120313/>
- Patterson, S. y Gold, R. (2018). There's a Global Race to Control Batteries—and China Is Winning. *The Wall Street Journal*. Disponible en: <https://www.wsj.com/articles/theres-a-global-race-to-control-batteriesand-china-is-winning-1518374815>
- Pavesio, L. (2020). Cómo la energía solar cambió a todo un pueblo rural de Bangladesh. *Noticias Ambientales*. Argentina, (4103). Disponible en: [https://noticiasambientales.com/energia/energia-solar-bangladesh/\(20/04/2022\)](https://noticiasambientales.com/energia/energia-solar-bangladesh/(20/04/2022)).

- Paz Salinas, M. (2012). Deterioro y resistencias. Conflictos socioambientales en México. En: Tetreault, D., Ochoa, H. y Hernández, E. (Coords.). *Conflictos socioambientales y alternativas de la sociedad civil*. 27-47. Colección Alternativas al Desarrollo, ITESO, México.
- Pirgmaier, E. & Steinberger, J. K. (2019). Roots, Riots, and Radical Change—A Road Less Travelled for Ecological Economics. *Sustainability*, 11(7). Disponible en: <https://www.mdpi.com/2071-1050/11/7/2001>
- Plata Mendoza, J. y Quevedo Urías, H. (2017). Fundamentos para una Crítica de la Economía Verde en la Era de la TE. *CULCYT*, 14(61), pp. 39-50.
- Polack, A. (2021). *Enabling Frameworks for Sustainable Energy Transition*. Commonwealth Sustainable Energy Transition Series 2021/03. Londres: Commonwealth Secretariat. Disponible en: [https://production-new-commonwealth-files.s3.eu-west-2.amazonaws.com/migrated/inline/Sustainable%20Energy%20Transition%20Series\\_Enabling%20Frameworks%20for%20Sustainable%20Energy%20Transition.pdf](https://production-new-commonwealth-files.s3.eu-west-2.amazonaws.com/migrated/inline/Sustainable%20Energy%20Transition%20Series_Enabling%20Frameworks%20for%20Sustainable%20Energy%20Transition.pdf)
- Popovich, N. y Plumer, B. (2020). Who Has The Most Historical Responsibility for Climate Change? *The New York Times*. Disponible en: <https://www.nytimes.com/interactive/2021/11/12/climate/cop26-emissions-compensation.html?referringSource=articleShare>
- Poveda Bonilla, R. (2021). Políticas públicas para la innovación y la agregación de valor del litio en Chile. *CEPAL*. Disponible en: <https://minsus.net/mineria-sustentable/wp-content/uploads/2021/07/Politicaspubblicas-para-la-innovacio-y-la-agregacio-de-valor-del-litio-en-chile.pdf>
- Prego Reboredo, R. (2021). Las tierras raras, una pieza clave en el *puzzle* de la energía. *Energía y Geoestrategia 2021* (309-377). Instituto Español de Estudios Estratégicos, Comité Español del Consejo Mundial de la Energía y Club Español de la Energía.
- Programa para el Medio Ambiente (2015). El planeta podría evitar los costos financieros y ambientales del agotamiento de recursos y ahorrar grandes sumas de dinero a través de un... *ONU*. Disponible en: <https://www.unep.org/es/noticias-y-reportajes/reportajes/el-planeta-podria-evitar-los-costos-financieros-y-ambientales-del> (19/06/2022).
- Ramos, D. (2019). Bolivia Picks Chinese Partner for \$2.3 Billion Lithium Projects. *Reuters*. Disponible en: <https://www.reuters.com/article/us-bolivia-lithium-china/bolivia-picks-chinese-partner-for-2-3-billion-lithium-projects-idUSKCN1PV2F7/>
- Razmilic, M. (8 de noviembre de 2021). Minería verde: sueño y realidad en marcha. *Revista Nueva Minería y Energía*. Disponible en: <https://www.nuevamineria.com/revista/mineria-verde-sueno-y-realidad-en-marcha/#:~:text=Miner%C3%ADa%20verde%20es%20la%20miner%C3%ADa%20que%20aporta%20al,se%20produce%20hidr%C3%B3geno%20verde%2C%20el%20combustible%20del%20futuro.> (17/06/2022).

- Redacción (2021). Litio: el gran salto boliviano hacia la industrialización. *Ahora El Pueblo*. Disponible en: [https://www.ylb.gov.bo/archivos/notas\\_archivos/especial\\_-\\_litio\\_bolivia\\_\\_\\_compressed\\_\(1\).pdf?fbclid=IWAR2qpyFA5TrkHd\\_u\\_b-kBHQrgX014EzTfhyPzPhAh5wE59NuK8sQL9QJKB8](https://www.ylb.gov.bo/archivos/notas_archivos/especial_-_litio_bolivia___compressed_(1).pdf?fbclid=IWAR2qpyFA5TrkHd_u_b-kBHQrgX014EzTfhyPzPhAh5wE59NuK8sQL9QJKB8)
- Reid, M. (2022). Comienza la producción en masa de tejados solares made in Brasil. *El Horticultor*. Disponible en: [https://elhorticulor.org/comienza-la-produccion-en-masa-de-tejados-solares-made-in-brasil/?fbclid=IWAR3cX5OASJlNYGZ06Fcwvh3Ns8Sj7ungWLnNiCdZBobqbITOXJCD8GgAoro\(21/04/2022\)](https://elhorticulor.org/comienza-la-produccion-en-masa-de-tejados-solares-made-in-brasil/?fbclid=IWAR3cX5OASJlNYGZ06Fcwvh3Ns8Sj7ungWLnNiCdZBobqbITOXJCD8GgAoro(21/04/2022)).
- Resumen Latinoamericano (2018). *África: la fiebre del cobalto en el Congo*. Disponible en: <https://www.resumenlatinoamericano.org/2018/08/31/africa-la-fiebre-del-cobalto-en-el-congo/>
- Rizzi, A. y Fariza, I. (2021). Atlas de perdedores y ganadores del gran pulso energético. *El País*. Disponible en: <https://elpais.com/economia/2021-10-03/atlas-de-perdedores-y-ganadores-del-gran-pulso-energetico.html>
- Romeo, G. (2019). Riesgo ambiental e incertidumbre del litio en salares de Argentina, Bolivia y Chile. En Fornillo, B. (Coord.) *Litio en Sudamérica. Geopolítica, energía, territorios*. IEALC, Editorial el Colectivo, CLACSO. Disponible en: [http://biblioteca.clacso.edu.ar/clacso/se/20190717034932/Litio\\_en\\_Sudamerica.pdf](http://biblioteca.clacso.edu.ar/clacso/se/20190717034932/Litio_en_Sudamerica.pdf)
- Romerio, F. (2006). La energía como fuente de crecimiento y desarrollo en la perspectiva del fin de la era de los combustibles fósiles. *Economía Informa*. (340), 33-47.
- Rosales, O. (2022). El conflicto Estados Unidos-China y las perspectivas del “desacoplamiento estratégico”. *El trimestre económico*, LXXXIX(2), 491-532. Disponible en: <https://doi.org/10.20430/ete.v89i354.1491>
- Rostek-Buetti, A. (8 de junio 2019). Cuando las tierras raras se convierten en un arma. DW. Disponible en: [https://www.dw.com/es/cuando-las-tierras-raras-se-convierten-en-un-arma/a-49109708\(09/05/2022\)](https://www.dw.com/es/cuando-las-tierras-raras-se-convierten-en-un-arma/a-49109708(09/05/2022)).
- Rowlatt, J. (14 de febrero de 2014). Estaño: lo que el mundo le debe a este soso metal gris. *BBC News*. Disponible en: [https://www.bbc.com/mundo/noticias/2014/02/140214\\_finde\\_metalos\\_estano\\_ch#:~:text=El%20esta%C3%B1o%20fue%20la%20base%20de%20la%20primera,ser%20fundido%20poniendo%20una%20roca%20en%20el%20fuego.](https://www.bbc.com/mundo/noticias/2014/02/140214_finde_metalos_estano_ch#:~:text=El%20esta%C3%B1o%20fue%20la%20base%20de%20la%20primera,ser%20fundido%20poniendo%20una%20roca%20en%20el%20fuego.)
- Rubi, L. N. y Mercado Gutiérrez, L. A. (2019). El ascenso de China en Asia central y su relación con Rusia: un análisis desde las iniciativas multilaterales (2013-2018). *Colección*, 30(2), 219-254. Disponible en: <https://repositorio.uca.edu.ar/bitstream/123456789/9565/1/ascenso-china-asia-central.pdf>
- Ruiz, S. (16 de febrero de 2021). Efectos de la sílice sobre la salud. *Elportaldelasalud.com*. Disponible en: [https://www.elportaldelasalud.com/efectos-de-la-silice-sobre-la-salud/\(12/05/2022\)](https://www.elportaldelasalud.com/efectos-de-la-silice-sobre-la-salud/(12/05/2022)).

- Rumbo Minero (17 de noviembre de 2017). Logística de transporte en minería: eficiencia para las operaciones. *Rumbo Minero Internacional*. Disponible en: <https://www.rumbominero.com/revista/informes/logistica-de-transporte-en-mineria-2/> (19/06/2022).
- Salazar López, K. (2018). Las guerras del cobalto en el Congo. *Otra lectura*. Disponible en: <https://otralectura.com/2018/03/24/las-guerras-del-cobalto-en-el-congo/> (25/05/2022).
- Salisbury, C. (10 de noviembre de 2018). Las minicentrales hidroeléctricas son un gran problema global que la ciencia y las políticas pasan por alto. *Mongabay*. Disponible en: <https://es.mongabay.com/2018/11/el-gran-problema-global-de-las-minicentrales-hidroelectricas/> (01/04/2022).
- Sanchis, A. (2020). Las energías renovables necesitarán el triple de minerales que los extraídos hoy: la nueva crisis ecológica. *Magnet*. Disponible en: <https://magnet.xataka.com/en-diez-minutos/energias-renovables-necesitaran-triple-minerales-que-extraidos-hoy-nueva-crisis-ecologica> (10/05/2022).
- Santiago, A. (2021). Energía renovable en América Latina, abusos y violencia en aumento. *Avispa Midia*. Disponible en: <https://avispa.org/energia-renovable-en-america-latina-abusos-y-violencia-en-aumento/> (08/04/2022).
- Scheidel, A. y Sorman, A. (2012). Energy Transitions and the Global Land Rush: Ultimate Drivers and Persistent Consequences. *Global Environmental Change*, 22, 588-595.
- Secretaría de Economía (2015). Energías renovables. *ProMéxico*, México. Disponible en: [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/76391/DS\\_Energias\\_Renovables\\_ES.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/76391/DS_Energias_Renovables_ES.pdf) (28/03/2022).
- Secretaría de Economía (2021). Proyectos mineros operados por compañías de capital extranjero, 2021. Dirección General de Desarrollo Minero. Disponible en: [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/649165/Directorio\\_de\\_Proyectos\\_Primer\\_Sem\\_2021.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/649165/Directorio_de_Proyectos_Primer_Sem_2021.pdf)
- Secretaría de Energía (2010). Balance Nacional de Energía 2009. Subsecretaría de Planeación Energética y Desarrollo Tecnológico, México. Disponible en: [https://www.ier.unam.mx/~rbb/Lic/Balance\\_Nacional\\_2009.pdf](https://www.ier.unam.mx/~rbb/Lic/Balance_Nacional_2009.pdf) (10/03/2022).
- Secretaría de Energía (2011). Balance Nacional de Energía 2010. Subsecretaría de Planeación Energética y Desarrollo Tecnológico, México. Disponible en: [https://www.ier.unam.mx/~rbb/ERYS2013-1/Balance\\_NacionaldeEnergia2010\\_2.pdf](https://www.ier.unam.mx/~rbb/ERYS2013-1/Balance_NacionaldeEnergia2010_2.pdf) (09/03/2022).
- Secretaría de Minería (2020). South America's Lithium Triangle and the Future of the Green Economy. Argentina, January, 2020. Ministerio de Desarrollo Productivo-Argentina. Disponible en: [https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/litio\\_en\\_argentina\\_-\\_wilson\\_center\\_ingles.pdf](https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/litio_en_argentina_-_wilson_center_ingles.pdf)

- Serbeto, E. (1 de enero de 2022). La UE se prepara para considerar verdes el gas y la energía nuclear. *ABC, Sociedad*, España. Disponible en: [https://www.abc.es/sociedad/abci-union-europea-prepara-para-considerar-verdes-y-energia-nuclear-202201011543\\_noticia.html](https://www.abc.es/sociedad/abci-union-europea-prepara-para-considerar-verdes-y-energia-nuclear-202201011543_noticia.html) (01/04/2022).
- Sgouridis, S. y Csala, D. (2014). A Framework for Defining Sustainable Energy Transitions: Principles, Dynamics, and Implications. *Sustainability*, 6, 2601-2622. doi:10.3390/su6052601
- Sherwood, D. (2020). Juez ambiental chileno urge por estudio de agua en “frágil” Salar de Atacama. *Infobae*. Disponible en: <https://www.infobae.com/america/agencias/2020/07/27/juez-ambiental-chileno-urge-por-estudio-de-agua-en-fragil-salar-de-atacama/>
- Simondon, G. (2008). *El modo de existencia de los objetos técnicos*. Prometeo.
- Simondon, G. (2009). *La individuación: A la luz de las nociones de forma e información*. Editorial La Cebra y Editorial Cactus.
- Sistema de Cuentas Nacionales de México (s.f.). Cuentas Económicas y Ecológicas de México. Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). Disponible en: <https://www.inegi.org.mx/temas/ee/#Tabulados> (18/06/2022).
- Sistema de Información Geográfica de Fuentes Renovables de Energía para la Planeación del Desarrollo Regional Sustentable (2022). Secretaría de Energía. Disponible en: <http://energia.ugto.mx/index.php/balance-de-energia/energia-primaria> (09/03/2022).
- Sistema de Información Legislativa. Democracia. Secretaría de Gobernación. México. Disponible en: [http://sil.gobernacion.gob.mx/Glosario/definicion\\_pop.php?ID=67](http://sil.gobernacion.gob.mx/Glosario/definicion_pop.php?ID=67) (29/03/2022).
- Smil, V. (2004). *World History and Energy*. En C. Cleveland (Ed.) *Encyclopedia of Energy* (549-561), Elsevier.
- Smil, V. (2010). *Energy Transitions: History, Requirements, Prospects*. Praeger.
- Smil, V. (2015). *Power Density: A Key to Understanding Energy Sources and Uses*. Cambridge.
- Solís, C. (2023). Laura Richardson: la jefa del Comando Sur de EEUU que pretende el litio sudamericano y que cierran *Russia Today* y *Sputnik*. *Interferencia*. Disponible en: <https://interferencia.cl/articulos/laura-richardson-la-jefa-del-comando-sur-de-eeuu-que-pretende-el-litio-sudamericano-y-que>
- Solomon, B. y Krishna, K. (2011). *The Coming Sustainable Energy Transition: History, Strategies, and Outlook*. Disponible en: [https://econpapers.repec.org/article/eeeeenepol/v\\_3a39\\_3ay\\_3a2011\\_3ai\\_3a11\\_3ap\\_3a7422-7431.htm](https://econpapers.repec.org/article/eeeeenepol/v_3a39_3ay_3a2011_3ai_3a11_3ap_3a7422-7431.htm)



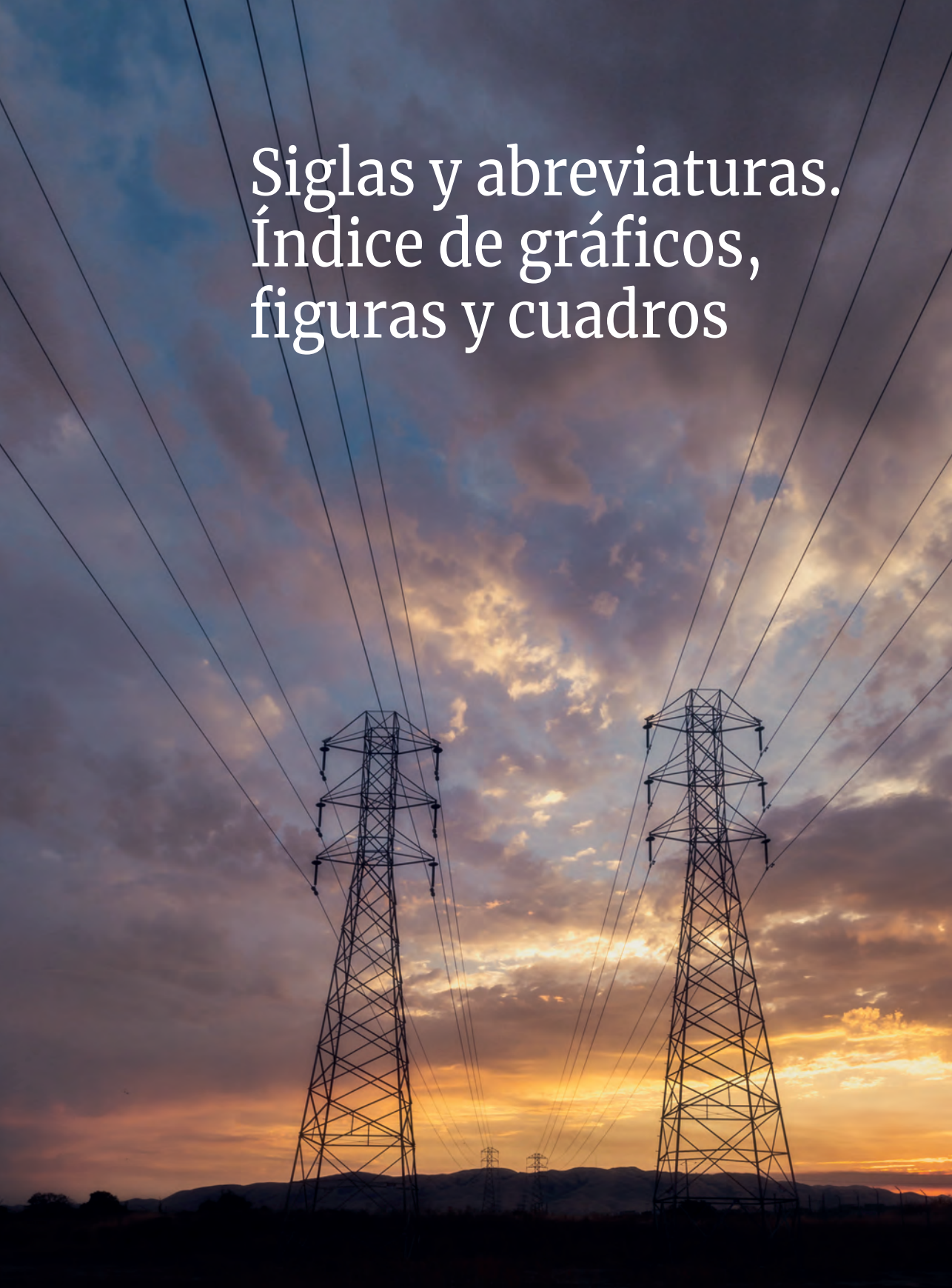
- Statista (2021a). Consumo mundial de energía renovable de 2000 a 2020. Disponible en: [https://es.statista.com/estadisticas/635724/volumen-de-energia-renovable-consumido-a-nivel-mundial/\(27/04/2022\)](https://es.statista.com/estadisticas/635724/volumen-de-energia-renovable-consumido-a-nivel-mundial/(27/04/2022)).
- Statista (2021b). *Ranking* de países con mayor producto interno bruto (PIB) estimado de 2020 a 2026. Disponible en: [https://es.statista.com/estadisticas/600234/ranking-de-paises-con-el-producto-interior-bruto-pib-mas-alto-en/\(20/03/2022\)](https://es.statista.com/estadisticas/600234/ranking-de-paises-con-el-producto-interior-bruto-pib-mas-alto-en/(20/03/2022)).
- Statista (2022a). Consumo mundial de energía de 2000 a 2050. Disponible en: [https://es.statista.com/estadisticas/634593/consumo-global-de-energia-por-fuente/\(04/03/2022\)](https://es.statista.com/estadisticas/634593/consumo-global-de-energia-por-fuente/(04/03/2022)).
- Statista (2022b). Precio medio final anual de la electricidad en España de 2010 a 2022. [Base de datos en línea]. Disponible en: <https://es.statista.com/estadisticas/993787/precio-medio-final-de-la-electricidad-en-espana/>
- Stern, D. y Cleveland, C. (2004). Energy and Economic Growth. *Rensselaer Working Papers in Economics*. USA, (0410).
- Telep, J. M. y Lutz, R. C. (2018). China's Long Road to Market Economy Status. *Georgetown Journal of International Law*, 49, 693-708. Disponible en: <https://www.law.georgetown.edu/international-law-journal/wp-content/uploads/sites/21/2018/08/GT-GJIL180023.pdf>
- Telos World. Estaño. Disponible en: [https://telosworld.com/estano/\(07/05/2022\)](https://telosworld.com/estano/(07/05/2022)).
- Teufel Dreyer, J. (2020). *China's Monopoly on Rare Earth Elements-and Why We Should Care*. Foreign Policy Research Institute. Disponible en: <https://www.fpri.org/article/2020/10/chinas-monopoly-on-rare-earth-elements-and-why-we-should-care/>
- Texas Department of State Health Services (2012). Lo que usted debe saber de cobalto. *Environmental and Injury Epidemiology / Toxicology Group*. Disponible en: <https://www.dshs.texas.gov/epitox/educational/CobaltSP.doc> (05/05/2022).
- The World Bank. Climate-Smart Mining: Minerals for Climate Action. Disponible en: <https://www.worldbank.org/en/news/infographic/2019/02/26/climate-smart-mining> (10/05/2022).
- Toledo Manzur, V. (2013). Metabolismo social: una nueva teoría socioecológica. *Relaciones*. UNAM, (136), 41-71.
- Torres, H. (22 de septiembre de 2019). Energía limpia, pero no para Oaxaca. *El Imparcial*. Disponible en: [https://imparcialoaxaca.mx/oaxaca/356618/energia-limpia-pero-no-para-oaxaca/\(04/05/2022\)](https://imparcialoaxaca.mx/oaxaca/356618/energia-limpia-pero-no-para-oaxaca/(04/05/2022)).
- Trainor, A., McDonald, R., Fargione, J. (2016). Energy Sprawl Is the Largest Driver of Land Use Change in United States. *PLOS ONE*, 11(9), 1-16.



- United Nations [UN] (1981). *Summary of the National Report Submitted by The United States of America*. Disponible en: <https://digitallibrary.un.org/record/22567?ln=en>
- Universidad Autónoma de Ciudad Juárez (2016). Los minerales. *Hojas Técnicas de Divulgación*. (12), 1-8.
- Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo (s.f.). Desarrollo sustentable y medio ambiente. *Apuntes digitales*. Centro de Innovación para el Desarrollo y la Capacitación en Materiales Educativos. Disponible en: [http://cidecame.uaeh.edu.mx/lcc/mapa/PROYECTO/libro3/23\\_fuentes\\_de\\_energa.html](http://cidecame.uaeh.edu.mx/lcc/mapa/PROYECTO/libro3/23_fuentes_de_energa.html) (08/03/2022).
- Uriarte, J. (2021). Aluminio. *Características.co*. Disponible en: <https://www.caracteristicas.co/aluminio/> (04/05/2022).
- Uriarte, J. (2021). Cobre. *Características.co*. Disponible en: <https://www.caracteristicas.co/cobre/> (04/05/2022).
- Uriarte, J. (2021). Plata. *Características.co*. Disponible en: <https://www.caracteristicas.co/plata/> (04/05/2022).
- Uriarte, J. (2021). Plomo. *Características.co*. Disponible en: <https://www.caracteristicas.co/plomo/> (04/05/2022).
- Uriarte, J. (2021). Zinc. *Características.co*. Disponible en: <https://www.caracteristicas.co/zinc/> (09/05/2022).
- US Geological Survey. (2018, May 18). *Interior Releases 2018's Final List of 35 Minerals Deemed Critical to US National Security and the Economy*. Disponible en: <https://www.usgs.gov/news/national-news-release/interior-releases-2018s-final-list-35-minerals-deemed-critical-us>
- US Geological Survey [USGS] (2022). Lithium. [Base de datos en línea]. Disponible en: <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2022/mcs2022-lithium.pdf>
- Valero, A., Valero, A., Galvo, G. y Ortego, A. (2018). Material Bottlenecks in the Future Development of Green Technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. (93), 178-200. Disponible en: <https://www.animalpolitico.com/res-publica/energias-limpias-minerales-sucios/>
- Van Olphen, T. y Catalano Gonzaga, L. (17 de julio 2020). Baterías sangrientas: la extracción de cobalto en Congo. *EL PAÍS*. Disponible en: [https://elpais.com/elpais/2020/06/18/planeta\\_futuro/1592483206\\_404289.html](https://elpais.com/elpais/2020/06/18/planeta_futuro/1592483206_404289.html) (12/15/2022).
- Vázquez Martínez, E. (2010). Energía verde y energía nuclear. *Ingenierías*. 8(47), 3-7.
- Venditti, B. (2023). *The Critical Minerals to China, EU, and US National Security*. Disponible en: <https://www.visualcapitalist.com/the-critical-minerals-to-china-eu-and-u-s-national-security/>

- Villalobos, G. (5 de julio de 2019). ¿Cuáles serán los impactos socioambientales de la explotación del litio en el salar de Uyuni? *Observatorio de Conflictos Mineros de América Latina*. Disponible en: <https://www.ocmal.org/cuales-seran-los-impactos-socio-ambientales-de-la-explotacion-del-litio-en-el-salar-de-uyuni/> (07/05/2022).
- White House (2021a). *FACT SHEET: President Biden’s Leaders Summit on Climate*. Disponible en: <https://www.whitehouse.gov/briefing-room/statements-releases/2021/04/23/fact-sheet-president-bidens-leaders-summit-on-climate/>
- White House (2021b). *Building Resilient Supply Chains, Revitalizing American Manufacturing, and Fostering Broad-based Growth. 100-Day Reviews under Executive Order 14017*. Disponible en: <https://www.whitehouse.gov/wp-content/uploads/2021/06/100-day-supply-chain-review-report.pdf>
- World Bank (2020). *The New Kids on the Block: Redefining “Critical” Minerals Essential for a Clean Energy Future*. Disponible en: <https://www.worldbank.org/en/news/feature/2020/05/08/defining-critical-minerals-essential-for-a-clean-energy-future>
- World Economic Forum (2018). *Fostering Effective Energy Transition. A Fact-Based Framework to Support Decision-Making. With Analytical Support from McKinsey & Company*. Disponible en: <https://www.mckinsey.com/~media/mckinsey/industries/oil%20and%20gas/our%20insights/a%20framework%20for%20fostering%20effective%20energy%20transitions/fostering-effective-energy-transition.pdf>
- Xie, J. (2021). Studies Reveal China’s Dominant Position in High-Tech Minerals. *Voanews*. Disponible en: [https://www.voanews.com/a/east-asia-pacific\\_voa-news-china\\_studies-reveal-chinas-dominant-position-high-tech-minerals/6206341.html](https://www.voanews.com/a/east-asia-pacific_voa-news-china_studies-reveal-chinas-dominant-position-high-tech-minerals/6206341.html)
- Yao, S., & Holden, J. (2021). Chinese Foreign Mining Investment—China’s Private Sector Eyes Low-Cost Regions. *S&P Global Market Intelligence*. Disponible en: <https://www.spglobal.com/marketintelligence/en/news-insights/latest-news-headlines/chinese-foreign-mining-investment-8212-china-s-private-sector-eyes-low-cost-regions-63066809>
- Yap, C.-W. (2021). China Hones Control Over Manganese, a Rising Star in Battery Metals. *The Wall Street Journal*. Disponible en: <https://www.wsj.com/articles/china-hones-control-over-manganese-a-rising-star-in-battery-metals-11621597490>

# Siglas y abreviaturas. Índice de gráficos, figuras y cuadros





## **Siglas y/o abreviaturas**

- Agencia Internacional de la Energía (AIE)
- Autoridad Internacional de los Fondos Marinos (ISA, por sus siglas en inglés)
- Banco Mundial (BM)
- Belt and Road Initiative [Iniciativa de la Franja y la Ruta] (BRI, por sus siglas en inglés)
- British Petroleum [BP PLC]
- China Minería de Metales no Ferrosos (CNMC, por sus siglas en inglés)
- Comisión Federal de Electricidad (CFE)
- Convención de las Naciones Unidas sobre el Derecho del Mar (CNUDM)
- Energy Information Administration (EIA)
- Energy Resource Governance Initiative (ERGI)
- Estados Unidos de América (EUA)
- Eurasian Resources Group (ERG)
- European Commission (EC)
- Fondo Internacional de Desarrollo Agrícola (FIDA)
- Foro Mundial Económico (FME)
- Gas licuado de petróleo (gas LP)
- Gases de Efecto Invernadero (GEI)
- International Energy Agency (IEA)
- International Organization for Standardization (ISO)
- International Renewable Energy Agency (IRENA)
- kilogramo (kg)
- kilowatt hora (kWh)
- megawatt (MW)
- Organización de las Naciones Unidas (ONU)
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, por sus siglas en inglés)
- Organización Mundial del Comercio (OMC)

- Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE)
- Producto Interno Bruto (PIB)
- Programa para el Medio Ambiente (PNUMA)
- Recursos estratégicos (RE)
- República Democrática del Congo (RDC)
- Sociedad Química y Minera de Chile (SQM)
- Transición energética (TE)
- Unión Europea (UE)
- Vehículos eléctricos de batería (VEB)

## Índice de gráficos

1. Consumo de energía primaria en el mundo . . . . .	35
2. Consumo de gas natural por región en el mundo . . . . .	36
3. Consumo de electricidad por región en el mundo . . . . .	37
4. Porcentaje de energía renovable consumida en el mundo . . . . .	43
5. Países que pueden comprar automóviles Tesla con ingresos de un año . . . . .	48
6. Cuotas porcentuales en la generación de energía mundial . . . . .	71
7. Patrón de consumo energético en el mundo . . . . .	71
8. Contribución porcentual por país de 50% de las emisiones de dióxido de carbono en el mundo (1850-2020) . . . . .	72
9. Desarrollo de la producción minera en el mundo (1900-2015) . . . .	104
10. Costo promedio de la electricidad en Europa (en dólares por kWh) .	168
11. Costos del agotamiento y degradación ambiental del sector minero en México 2003-2020 (millones de pesos) . . . . .	177

## Índice de figuras

1. Tipos de energía renovable más comunes en el mundo . . . . .	41
2. Consumo de minerales para la construcción e instalación de un aerogenerador (3MG) . . . . .	42
3. Porcentaje (%) del consumo de energía renovable en el mundo . . . .	46
4. Venta de vehículos eléctricos de batería (VEB) en el mundo entre 2015 y 2019 . . . . .	49
5. Línea del tiempo: historia energética de la humanidad . . . . .	65
6. Transición energética holística . . . . .	83
7. Restricción entrópica de la energía . . . . .	86
8. Distribución geográfica de algunos de los principales minerales para la TE . . . . .	120
9. Principales minerales estratégicos en el mundo . . . . .	136
10. Reducción de los entornos y los medios de vida . . . . .	174

## Índice de cuadros

1. Fuentes energéticas primarias . . . . .	28
2. Fuentes energéticas secundarias . . . . .	30
3. Consumo mundial de energía (exajulios) . . . . .	33
4. Países con mayor consumo de energía renovable en el mundo en 2020 . . . . .	45
5. Minerales que se necesitan para la TE . . . . .	106
6. Diversas problemáticas para la obtención de minerales necesarios para la TE . . . . .	123







*El multicolor de la energía.*

*Desafíos y oportunidades para la transición energética*  
de Aleida Azamar Alonso

se terminó de imprimir en enero de 2024.

El tiro consta de 500 ejemplares impresos sobre papel

Inspira de 120 gramos; cubiertas impresas sobre  
cartulina sulfatada de 14 puntos.

Producción editorial:

Monarca impresoras, Schumann 255

col. Vallejo, Alcaldía G. A. Madero,

C.P. 07870 Tel. 55.19.97.80.45,

Cel. 55.28.55.27.14

monarcaimpresoras@hotmail.com

## NOVEDADES EDITORIALES

- *Análisis multidisciplinario de la situación mundial postcovid 19*  
Alfonso Abigail Rodríguez Nava (coord.)
- *El rock mexicano. Un espacio en disputa*  
María del Carmen de la Peza Cásares
- *Ciudadanía digital. La crisis de la idea occidental de democracia y la participación en las redes digitales*  
Massimo Di Felice
- *Epistemologías de las discapacidades. De la exclusión a la incidencia*  
Alejandro Cerda García
- *El placer del cine. Conversaciones sobre análisis cinematográfico*  
Lauro Zavala Alvarado
- *Etnografía de la espera en urgencias. Caso de los hospitales públicos de la Ciudad de México*  
Bruno Henri Lutz
- *Derechas católicas y cultura ciudadana en tres momentos del siglo XX mexicano*  
Gabriela Contreras Pérez y Tania Hernández Vicencio (coords.)
- *Diccionario de protagonistas del mundo católico en México. Siglo XXI*  
Gabriela Aguirre Cristiani et al.
- *Gestión y tecnologías del agua. Alternativas desde las nuevas generaciones*  
Roberto Martín Constantino Toto y Delia Montero (coords.)
- *La mirada escénica. Antología psicodramática*  
Claudia Paz Román



*El multicolor de la energía. Desafíos y oportunidades para la transición energética* no es simplemente un libro, es una invitación al análisis de lo más profundo de los procesos políticos, económicos, sociales y culturales que ha formalizado la transición energética como actualmente la ejercemos. En esta obra, se demuestra que más allá de los aspectos técnicos y las supuestas bondades de este tema, existen entresijos, conflictos y riesgos que deben ser valorados antes de celebrar las luminosas promesas de un futuro más verde y sostenible, pues hay oscuros matices que esconden las secuelas del extractivismo y la monopolización de las tecnologías para el aprovechamiento de los recursos renovables.

Cada capítulo de este trabajo nos muestra una nueva capa de complejidad y nos introduce a distintos aspectos: desde la extracción de minerales hasta las tensiones internacionales que se ciernen sobre la existencia de las materias primas necesarias para la transición. Asimismo, nos explica cómo estas dificultades impactan en nuestra capacidad para implementar soluciones energéticas que sean verdaderamente sostenibles y no perpetúen las desigualdades y los daños ambientales que ya han sido provocados por el sistema actual. Más que un diagnóstico, la obra nos enfrenta a la encrucijada que supone la transición energética en un mundo donde la justicia socioambiental y la equidad se entrelazan intrínsecamente con nuestra manera de entender y llevar a cabo dicha transición. Esto no es sólo una cuestión de cambiar nuestras fuentes de energía, sino un desafío enraizado firmemente en cómo las estructuras de poder y las inequidades son perpetuadas y exacerbadas a través de nuestros sistemas de gobierno.

¿Es realmente posible transitar hacia un futuro energético que sea tanto verde como justo? ¿Cómo podemos navegar las intrincadas dinámicas geopolíticas y las luchas por los recursos en un camino hacia la sostenibilidad? Éstas son algunas de las preguntas que este libro busca explorar, al desentrañar el verdadero multicolor de la energía, sus transiciones y sus límites.

ISBN LIBRO ELECTRÓNICO



9 786072 830936



Casa abierta al tiempo

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA  
Unidad Xochimilco



Publicaciones